

AL 1011

**A Dissertation in Materials Forming Engineering**

**Intensification Production Technique and  
Experimental Research**

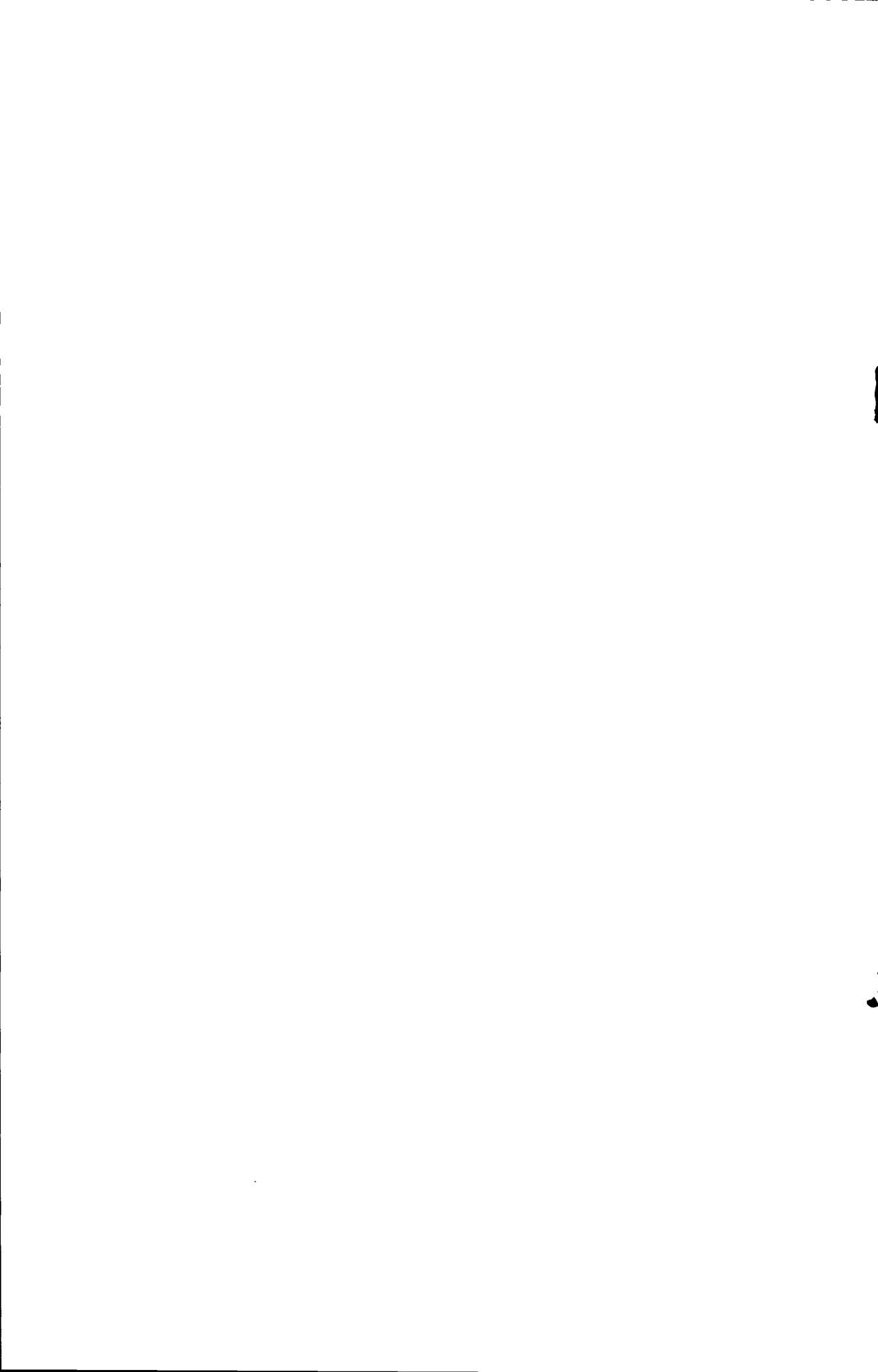
By Liu Fuqiang

Supervisor: Professor Liu Zhenyu

Lecturer Jia Tao

Northeastern University

June 2009





## 独创性声明

本人声明所提交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：刘付强

日期：2009.7.2

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

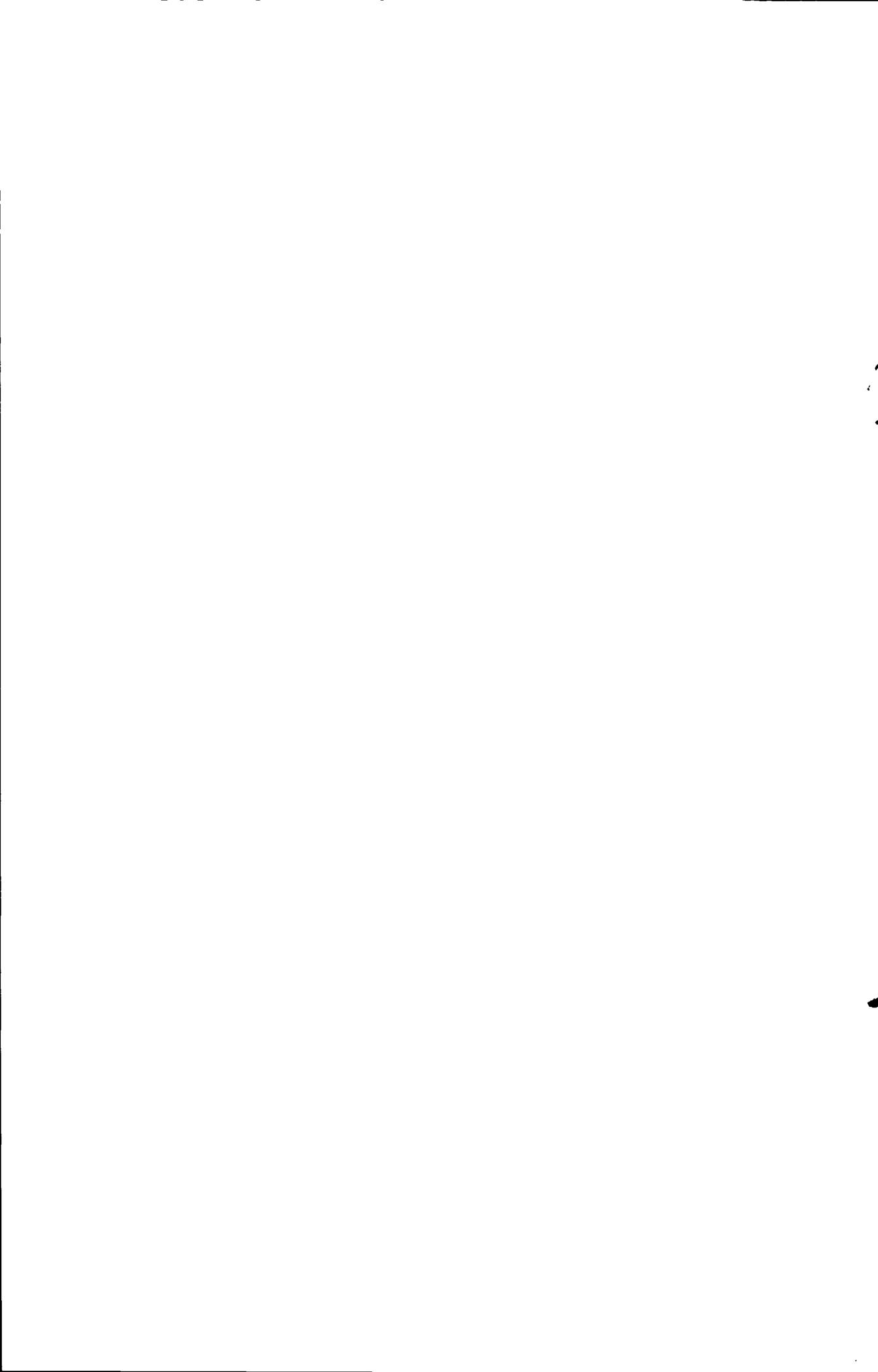
半年     一年     一年半     两年

学位论文作者签名：刘付强

导师签名：

签字日期：2009.7.2

签字日期：



# 集约化生产技术及其实验研究

## 摘要

由于受到传统观念和行业习惯及标准的限制,力学性能的调整主要是通过其成分的改变来实现,导致性能相近的材料采用不同的化学成分,钢种类繁多。一方面对炼钢组织生产不利,加大了人力资源的消耗;另一方面未能充分利用钢铁材料的细晶化、复相化等强化机理,未能充分发挥钢铁材料性能的内在潜力。因此,从钢铁产品标准着手,考虑具有相同或相近力学性能钢铁牌号的归并,通过对轧制与冷却工艺的调整实现具有减量化成分坯料的柔性化升降级轧制,实现“一钢多能”的集约化生产目的,具有重要的理论与实际意义。

由于客户需求的多样性,钢铁企业中一个钢种牌号可能对应着几个成分控制要求的出钢记号。与此同时,相同系列产品中的相邻力学性能级别的钢铁牌号,例如 X46、X52 与 X56,由于力学性能差别不大,而化学成份的差异主要在于一个或者两个主要成分;不同系列或不同标准中的相同力学性能级别,例如 510L 与 X52、Q235B 与 SS400,由于力学性能基本在同一个级别,化学成分具有很大的交集。因此,实现集约化生产的首要问题是智能化钢种归并。通过选择合理的钢种归并对象,从钢铁产品标准及企业内控标准出发,结合对现场生产数据的统计分析,本文建立了智能化钢种归并系统,针对梅钢 1422mm 热轧带钢生产线实现了普碳结构钢系列的归并分析。

针对管线钢系列(X46、X52 和 X56)和结构钢系列(SS330、SS400 和 SS490),从产品标准方面进行了初步归并分析。采用归并后成份范围内的坯料,通过运用 TMCP(热机械控制)技术,即轧制与冷却工艺的调整,实现了 X52、SS400 的柔性化升降级轧制,从实验的角度验证了集约化生产技术的可行性。

关键词:钢种归并、出钢记号、普碳钢、管线钢、单因素方差分析、Cpk、升降级轧制、集约化生产、柔性化生产



# Intensification Production Technique and Experimental Reserch

## Abstract

Traditional conception, common practice of steel industry and restriction of steel standard, which could be interpreted as adjusting the mechanical properties according to the changing of chemical composition, resulted in increased number of steel grade and steel products with similar mechanical properties using different chemical composition. On the one hand, this goes against the production organization, and increased the waste of human resource. On the other hand, grain refinement strengthen and complex phase strengthen have not been made full use of to develop the inherent potential of steel materials. Therefore, starting from product standard of steel and considering steel grades with the same or similar mechanical properties, the upgrade/degrade rolling using one chemical composition could be carried out according to the adjustment of rolling and cooling process parameters. It could be theoretically and practically important to realize intensification production named "one steel multi-grade mechanical property".

Because of the various demands of customers, one steel grade may be represented as several tapping marks that have different requirements of chemical composition. Meanwhile, the chemical composition's difference of steel grades which are in a series with similar mechanical properties, such as X46, X52 and X56, is mainly the percentige of one or two major elements. For the steel grades in different series with the same mechanical property grade, such as 510L & X52, Q235B & SS400, wide intersection exists in chemical composition. Therefore, the integration of steel grades need to be done first. Selecting reasonable steel series and starting from product standard or inner standard of steel enterprise, the intellectual steel integration system was established based on the statistical analysis of production data. For the MeiSteel 1422mm hot rolling strip production line, steel integration analysis of plain carbon structural steel was completed.

Elementary integration analysis from the product standard aspect was conducted for the series of pipeline steel (X46, X52 and X56) and structural steel (SS330, SS400 and SS490).

Using the slab with chemical composition in the range of integrated results, the upgrade/degrade rolling of X52 and SS400 was realized by TMCP technology which is to adjust the rolling and cooling process. The feasibility of intensification production technology was validated experimentally.

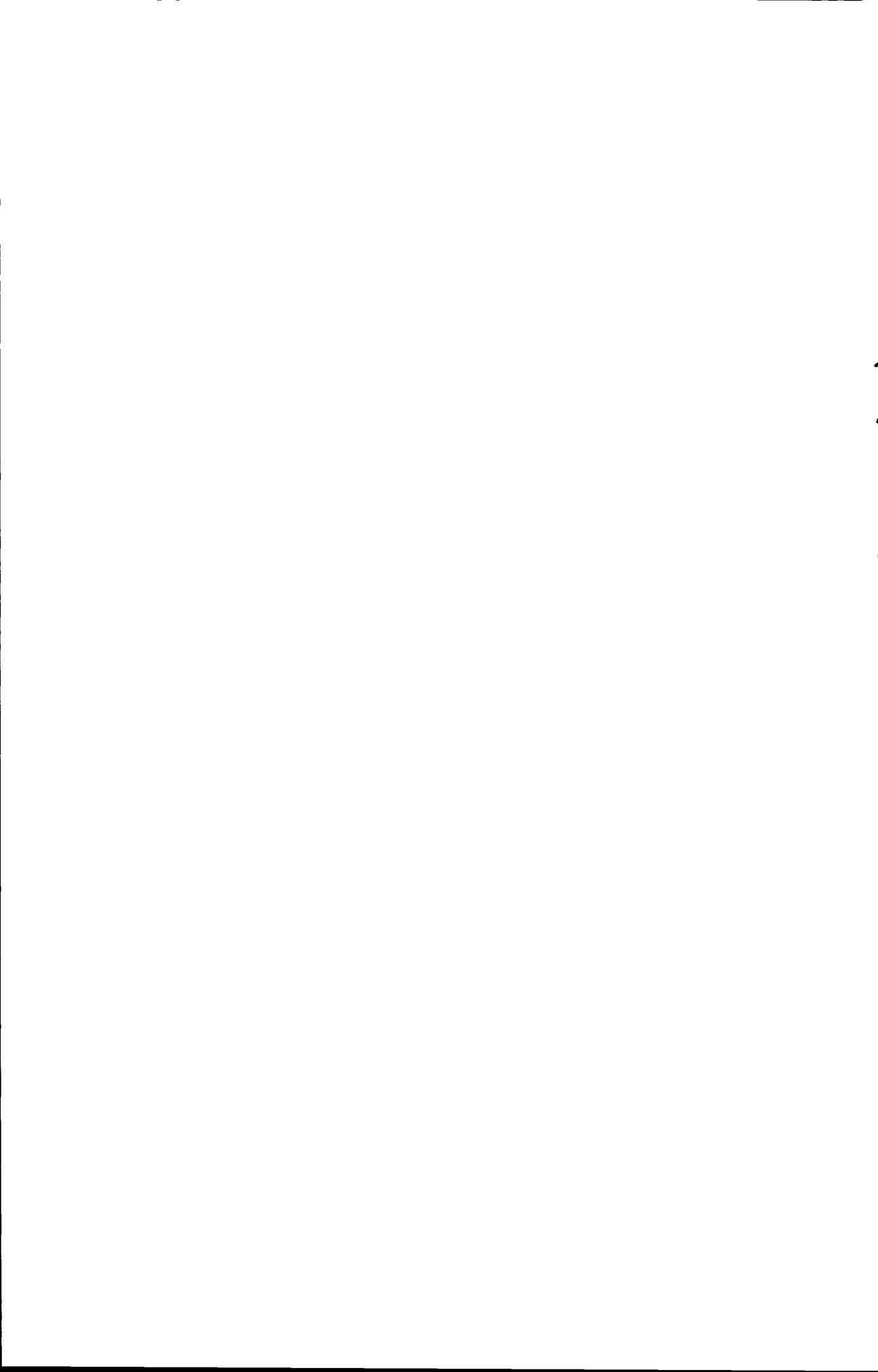
**Key words:** steel grade integration; tapping mark; plain carbon steel; pipeline steel; the single factor variance analysis; Complex Process Capability index (CPK); upgrade/degrade rolling; intensification production; flexible production

## 目 录

|  |     |
|--|-----|
| 独创性声明.....                                       | I   |
| 摘 要.....   | II  |
| ABSTRACT.....                                    | III |
| 第一章 绪论.....                                      | 1   |
| 1.1 课题的背景.....                                   | 1   |
| 1.1.1 课题背景.....                                  | 1   |
| 1.1.2 国内外研究状况.....                               | 2   |
| 1.2 柔性化轧制技术.....                                 | 3   |
| 1.2.1 柔性轧制技术的含义.....                             | 3   |
| 1.2.2 理论支持.....                                  | 4   |
| 1.2.3 柔性轧制技术的系统框架.....                           | 5   |
| 1.2.4 柔性化轧制规则.....                               | 6   |
| 1.3 课题的研究内容、目的和意义.....                           | 7   |
| 1.3.1 研究内容.....                                  | 7   |
| 1.3.2 研究目的与意义.....                               | 8   |
| 第二章 钢种归并.....                                    | 9   |
| 2.1 钢种归并步骤.....                                  | 9   |
| 2.2 结构系列钢种归并概述.....                              | 10  |
| 2.2.1 Q235B-1、Q235B-2、Q235C、Q235D 和 SS400.....   | 10  |
| 2.2.2 Q345B-1、Q345B-2、Q345C-1、Q345C-2、Q345D..... | 11  |
| 2.2.3 SM490A、SM490YA、SM490、SS490.....            | 12  |
| 2.2.4 St37-2、St37-3.....                         | 13  |
| 第三章 Q235&SS400 归并分析报告.....                       | 15  |
| 3.1 标准要求(GB700-88).....                          | 15  |
| 3.1.1 成分.....                                    | 15  |
| 3.1.2 力学性能.....                                  | 15  |
| 3.2 内控成分标准.....                                  | 16  |
| 3.3 热轧生产数据分析.....                                | 16  |
| 3.3.1 化学成分 Cpk 分析.....                           | 16  |
| 3.3.2 力学性能 Cpk 分析.....                           | 18  |
| 3.3.2.1 Cpk 计算.....                              | 18  |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 3.3.2.2 结果分析 .....            | 19 |
| 3.3.3 产品厚度和成分对性能的影响 .....     | 19 |
| 3.3.3.1 Q235B-1 的箱线图 .....    | 19 |
| 3.3.3.2 Q235B-2 的箱线图 .....    | 22 |
| 3.3.3.3 SS400 的箱线图 .....      | 25 |
| 3.3.3.4 单因素方差分析 .....         | 28 |
| 3.4 归并后设计方案 .....             | 29 |
| 3.4.1 归并设计思路 .....            | 29 |
| 3.4.2 归并后的成份设计 .....          | 29 |
| 第四章 SS400 和 X52 升降级实验研究 ..... | 30 |
| 4.1 第一次试验 .....               | 32 |
| 4.1.1 工艺制度 .....              | 32 |
| 4.1.2 实验过程 .....              | 33 |
| 4.1.2.1 加热制度 .....            | 33 |
| 4.1.2.2 轧制与冷却数据 .....         | 33 |
| 4.1.3 试验结果及分析 .....           | 34 |
| 4.1.3.1 金相照片 .....            | 34 |
| 4.1.3.2 拉伸实验 .....            | 36 |
| 4.2 第二次试验 .....               | 37 |
| 4.2.1 工艺制度 .....              | 37 |
| 4.2.2 实验过程 .....              | 38 |
| 4.2.2.1 加热制度 .....            | 38 |
| 4.2.2.2 轧制与冷却数据 .....         | 38 |
| 4.2.3 实验结果及分析 .....           | 39 |
| 4.2.3.1 金相照片 .....            | 39 |
| 4.2.3.2 拉伸实验 .....            | 41 |
| 4.3 第三次试验 .....               | 42 |
| 4.3.1 工艺制度 .....              | 42 |
| 4.3.2 实验过程 .....              | 43 |
| 4.3.2.1 加热制度 .....            | 43 |
| 4.3.2.2 轧制与冷却数据 .....         | 43 |
| 4.3.3 实验结果及分析 .....           | 43 |
| 4.3.3.1 金相照片 .....            | 43 |
| 4.3.3.2 拉伸实验 .....            | 45 |
| 4.4 实验结果分析 .....              | 46 |
| 4.4.1 X52 结果分析 .....          | 46 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 4.4.2 SS400 结果分析 .....    | 48 |
| 4.4.3 升降级轧制结果分析 .....     | 49 |
| 4.5 小结 .....              | 51 |
| 第五章 结论 .....              | 53 |
| 参考文献 .....                | 54 |
| 附录-Q235B 与 SS400 .....    | 56 |
| 1 单因素方差分析 .....           | 56 |
| 1.1 Q235B-1 单因素方差分析 ..... | 56 |
| 1.1.1 厚度对性能的影响 .....      | 56 |
| 1.1.2 碳含量对性能的影响 .....     | 57 |
| 1.1.3 锰含量对性能的影响 .....     | 58 |
| 1.1.4 硅含量对性能的影响 .....     | 59 |
| 1.2 Q235B-2 单因素方差分析 ..... | 60 |
| 1.2.1 厚度对性能的影响 .....      | 60 |
| 1.2.2 碳含量对性能的影响 .....     | 61 |
| 1.2.3 锰含量对性能的影响 .....     | 62 |
| 1.2.4 硅含量对性能的影响 .....     | 63 |
| 1.3 SS400 单因素方差分析 .....   | 64 |
| 1.3.1 厚度对性能的影响 .....      | 64 |
| 1.3.2 碳含量对性能的影响 .....     | 65 |
| 1.3.3 锰含量对性能的影响 .....     | 66 |
| 1.3.4 硅含量对性能的影响 .....     | 67 |
| 2 过程能力分析 .....            | 68 |
| 2.1 化学成份过程能力分析 .....      | 68 |
| 2.2 力学性能过程能力分析 .....      | 69 |
| 致谢 .....                  | 71 |



# 第一章 绪论

## 1.1 课题的背景

### 1.1.1 课题背景

始于2008下半年的金融危机还在继续蔓延,钢铁行业在国内是此次金融危机最先受到冲击的行业,也是此次金融危机中受冲击最严重的行业之一。同时,钢铁材料面临其它材料的激烈竞争、铁矿石及其它原材料涨价、钢铁产品价格下跌等诸多不利影响;社会对钢铁材料提高质量和降低成本提出了更加强烈的要求。中国钢铁业长期卖方市场的局面,企业追求产量、扩大规模,导致忽视品种质量,对用户的个性化需求反映迟缓。钢铁是一个国家国民经济的支柱产业,是典型的大规模生产过程。但当前用户要求越来越挑剔,已经不满足厂家提供的标准化产品;技术更新加快,产品开发周期与产品生命周期缩短;市场不确定性增加,需求的个性化要求大大增强。这一切都动摇了大规模生产赖以生存的基础,企业迫切需要一种新的生产模式来满足用户对产品低成本、高质量、个性化的要求<sup>[1]</sup>。企业由大规模生产转向大规模定制(MC ,mass customization)成为自然的、理性的选择<sup>[2]</sup>。

金属产品大规模定制的核心是在现代金属生产流程的条件下,最大限度地按照用户的需求组织生产,解决大规模生产与个性化需求之间的矛盾。集约化轧制技术和组织性能在线优化控制技术即是金属生产企业实现大规模定制的良好手段,可以降低实现大规模定制的难度<sup>[3]</sup>。

我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》明确提出,要开发新一代可循环钢铁生产流程技术,节约型钢材减量化轧制技术<sup>[4]</sup>在国家“十一五”科技支撑计划中作为其中一个重要研究课题被提出来,而集约化轧制技术是其核心的研究内容之一。作为钢铁材料生产流程主要环节的材料加工过程,由于受到传统观念和行业习惯及标准的限制,如果用户提出特殊的性能需求,钢厂通常采用改变化学成分的方式实现力学性能的调整,而忽略了控制轧制与控制冷却对力学性能的作用,这样就会产生一个新的出钢记号,出现一个钢种牌号对应多个出钢记号的情况。与此同时,中国作为一个钢材出口大国,国内钢厂的产品系列中国外标准的钢铁牌号越来越多,加剧了“性能相近的材料采用不同的化学成份控制标准”的现象,钢种种类繁多,出钢记号冗余。一方面对炼钢组织生产不利,加大了人力资源的消耗;另一方面浪费了钢铁材料性能的内在

潜力,未能充分利用钢铁材料的细晶化、复相化等强化机理实现钢材性能的提升。因此,采用集约化的化学成分坯料,通过柔性轧制策略生产出不同强度级别的产品,最终实现“一钢多能”的目标。这样可以简化炼钢和连铸的操作和管理,有利于炼钢和连铸工艺的持续稳定生产,使炼钢、连铸、板坯库、加热炉之间衔接便捷、管理简化、复杂程度降低<sup>[5]</sup>,满足企业大规模生产的要求。同时,通过优化热轧、轧后冷却及热处理相关生产工艺来生产出不同性能水平的产品来满足用户的不同使用要求,最大程度地发挥钢材产品的性能潜力<sup>[6]</sup>,这种技术的优点是显而易见的,如图1.1所示。

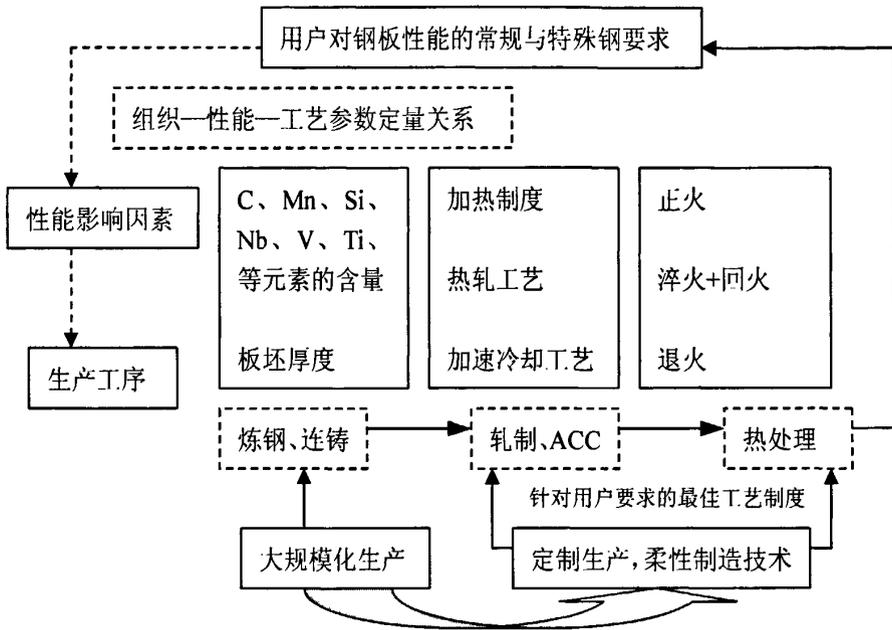


图 1.1 集约化生产中炼钢、连铸及热轧过程的工序示意图

Fig.1.1 The process sketch map of steel-smelting,continuous metal and hot rolling in intensification production

### 1.1.2 国内外研究状况

冶金企业的集约化制造生产模式是以信息化技术和先进的柔性化制造技术为核心的现代冶金企业的核心技术之一。国际一些大型冶金企业,如日本新日铁、韩国的POSCO、欧洲的阿塞勒等,正致力于研发集约化制造生产技术,试图通过柔性生产技术来协调产品个性化需求和大生产现场条件之间的矛盾,解决高端用户的具有高附加值的个性化需求。得到集约化制造生产模式的关键技术主要包括:

(1) 完备的热轧生产信息系统和产品信息分类、处理系统,包括合同的归并及组炉组坯等过程;

(2) 柔性化制造工艺的快速制定,即随用户需要做出的工艺优化和调整;

(3) 柔性化制造设备，包括热轧、轧后冷却及热处理过程所需设备等。

针对性能指标的柔性化制造技术是实现集约化制造生产模式的核心，它的中心内容是针对不同需要快速制定和调整优化工艺，主要包括：

(1) 钢板生产 TMCP 工艺的系统研究和技术储备，为集约化轧制规则的制定提供基础数据和理论保障；

(2) 热轧过程中性能—组织—工艺参数的定量模型和组织—性能预报、优化及控制理论与模型，它们是实现集约化轧制工艺的快速制定并充分挖掘制造设备潜能和产品性能的必备技术。

我国钢铁企业在集约化轧制模式方面的研究工作，目前基本围绕信息处理平台建设和生产调度管理等方面展开，带钢热轧组织性能预测与控制技术发展比较成熟<sup>[7]</sup>。而关于其核心环节包括集约化轧制规则的制定、组织—性能—工艺最优化和柔性化轧制工艺的设计等的研究工作则尚未深入开展。

### 1.2 柔性化轧制技术

#### 1.2.1 柔性轧制技术的含义

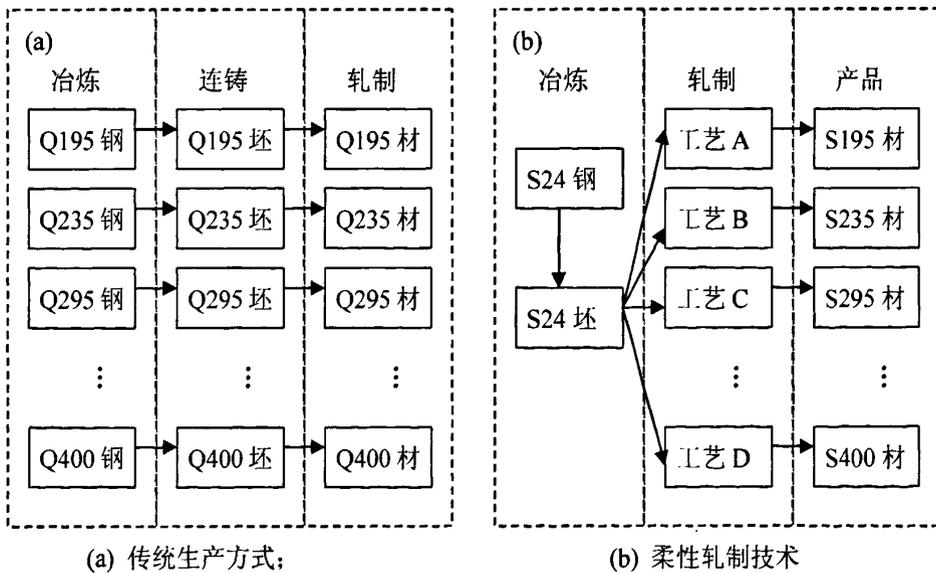


图1.2 柔性轧制技术生产与传统生产方式比较示意图

Fig.1.2 Comparison between FRT production and traditional one

柔性轧制技术( FRT , flexible rolling technology )是指能够导致轧制过程具有较大灵活性和适应性的轧制技术，一般可分为两种类型：外形尺寸方面的柔性轧制技术和组织性能方面的柔性轧制技术<sup>[4]</sup>。组织性能的柔性化轧制技术，是指在组织性能控制方面，

能够导致轧制过程具有较大灵活性和适应性的轧制技术,柔性轧制的实现为金属产品的大规模定制提供了一条新的途径。而且它的出现也是顺应现场技术的需要,如图1.2,柔性轧制技术相对于传统的生产方式而言从很大程度上简化了冶炼的难度,也就控制了炼钢成分的波动性。

## 1.2.2 理论支持

Hall-Petch 公式给出了屈服强度与晶粒尺寸间的定量关系<sup>[8]</sup>:

$$\sigma_s = \sigma_0 + k \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

式中:  $d$  为晶粒的平均直径;  $\sigma_0$  为其它强化方式作用项;  $k$  为钢种常数。由式(1-1)可知,当把晶粒尺寸由15~20 $\mu\text{m}$  控制到3~5 $\mu\text{m}$ ,材料的屈服强度就能增加一倍左右。在研制细晶粒普碳钢时,利用成分与Q195~Q235 相同的普碳钢,已成功地生产出屈服强度为400MPa 的产品<sup>[9]</sup>。如果生产时能在上述范围内控制所希望的晶粒尺寸,就可能在200~400MPa 间控制钢材的性能。在微观组织实验结果观察时,屈服强度也是随着晶粒的细化而逐渐提高<sup>[4]</sup>。对于抗拉强度,晶粒的细化作用不是很明显。近年的一些研究又表明,细化晶粒会使延伸率下降,其中,总的延伸率下降明显,均匀伸长率则下降不明显<sup>[10-12]</sup>,所以柔性化轧制也不能单一的依靠细化晶粒强化。因此,用集约化的化学成分坯料,生产不同强度级别的产品<sup>[5]</sup>的想法已经在某些钢种上可以实现,并且可能通过理论及大量的实验研究最终实现大范围的柔性化轧制技术。

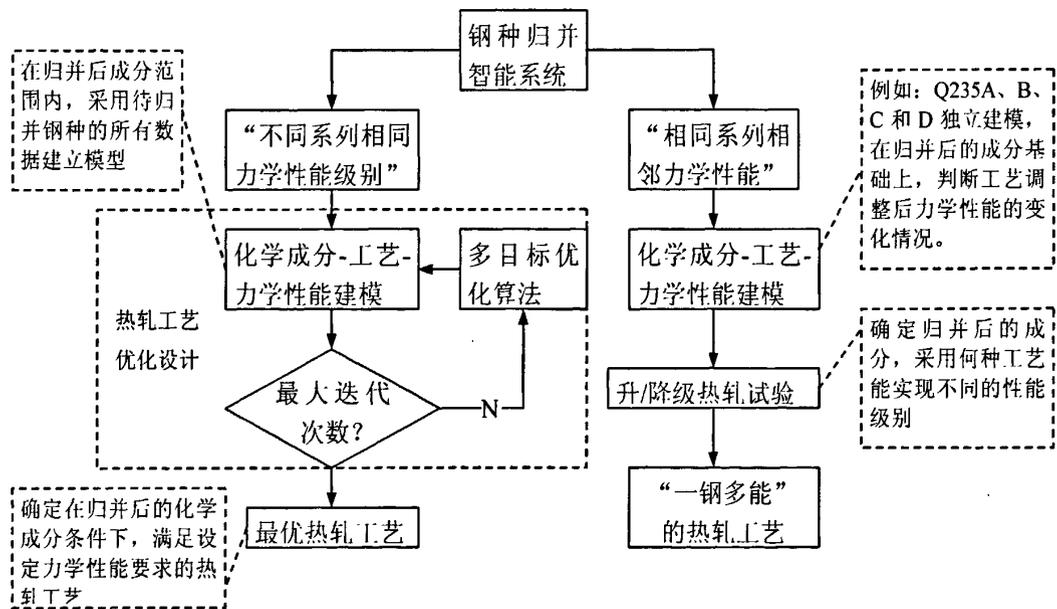
这种思想的优点是显而易见的,但是首先必须要有准确的产品组织性能在线预报和控制技术作支撑,才能付诸实施。需要在坯料化学成分确定的条件下,深入研究并掌握轧制与冷却工艺参数对产品组织和性能影响的定量关系,并能够通过在线控制和调整工艺参数来克服性能指标的偏差,以保证产品的质量要求<sup>[13]</sup>。当对于抗拉强度和上限屈服强度预测时,组织性能的经验模型大约有上下20MPa的误差。因此,为了确保能达到客户的性能需求,额外的40MPa被添加到了目标性能值<sup>[14]</sup>。另一方面,柔性轧制的实现为金属产品的大规模定制提供了一条新的途径。利用钢材性能柔性,可以用一个批号的坯料甚至一炉钢生产不同性能的产品来满足不同的用户需求,以生产技术的柔性化来应对用户需求的多样化,使金属产品的大规模定制得以实现<sup>[3, 15]</sup>。

对于普碳钢,影响其力学性能的主要化学元素是C、Mn、Si、S、P;总压缩比也是一个影响带钢力学性能的重要因素,在高温的粗轧过程一般能比较完全地发生再结晶和晶粒长大,控制精轧入口温度和精轧出口温度,就可以控制带钢的奥氏体组织在再结晶区和未再结晶区的变化过程,决定发生相变前奥氏体晶粒尺寸大小和奥氏体晶粒内变形

带的数量，从而铁素体相变过程产生不同的影响，因此精轧入口温度和精轧出口温度也是影响带钢力学性能的重要因素；卷取温度对钢材相变过程影响比较大，可以认为卷取温度是影响力学性能的主要因素<sup>[16]</sup>。卷取前的冷却过程是奥氏体分解相变的过程，在不同的冷却速度下，奥氏体可分解为铁素体、珠光体、贝氏体、马氏体或上述组织的混合物<sup>[17]</sup>。因此，根据产品不同的力学性能要求，可通过控制轧制和控制冷却过程来得到满意的产品。实际生产中主要采取的工艺方案为低温轧制技术、TMCP技术、长条材的无头连铸连轧技术、特殊钢的在线热处理技术等<sup>[18]</sup>。

### 1.2.3 柔性轧制技术的系统框架

热轧集约化的轧制生产技术是一个基于钢种合金成分设计、在线力学性能建模与工艺优化、以及钢材强化等理论的系统性工程，需要对热轧板带的产品标准和生产与销售全流程进行深入透彻的分析，关键技术难点包括：



如图 1.3 柔性化生产技术系统框

Fig.1.3 Flexible rolling manufacture technology system chart

(1) 对于钢种归并工作需要有一定的现场生产经验，同时需要对大量的生产数据分析，最终需要先选择合适的目标钢种系列分析归并，确定合理的钢种归并原则后再对全部钢种(出钢记号)归并；

(2) 如何实现在线的力学性能预测，并确保一定的预测精度；

(3) 同系列不同级别产品升降级轧制的合理工艺窗口的确定，如何先在实验室的条件下，在归并的钢种成分上通过轧制实验得到对应性能的上下限及生产不同性能级别的

钢种时所需的最优工艺，如图 1.3 所示。

### 1.2.4 柔性化轧制规则

柔性化轧制技术对应钢种归并的基本原则策略，也有不同的柔性轧制原则：

#### (1) “跨系列同性能级别”钢种柔性生产规则

跨系列同性能级别钢种，例如B510L与X52，它们具有较大的成份与性能交集，而不存在力学性能升降级的问题。因此，这一类别的柔性化生产是通过针对归并后成份范围内的工业数据建立力学性能预测模型，开发以用户需求的力学性能为优化目标，考虑工艺及设备能力的约束条件、过程控制等因素，通过优化热轧、轧后冷却过程，实现钢材不同系列产品的“定制式”生产，如图1.4。

针对某一归并后坯料成份，按照设定工艺制度的条件下，通过力学性能预测若能满足客户提出的性能需求，那么就组织生产；如果在既定的工艺制度范围内的力学性能预测值与用户需求相差甚远，那么应该停止采用此种板坯生产这类产品；如果预测出来性能处于边缘状态，那么就启动工艺优化系统，通过轧制及冷却工艺的调整来生产出满足用户需求的产品<sup>[19]</sup>。

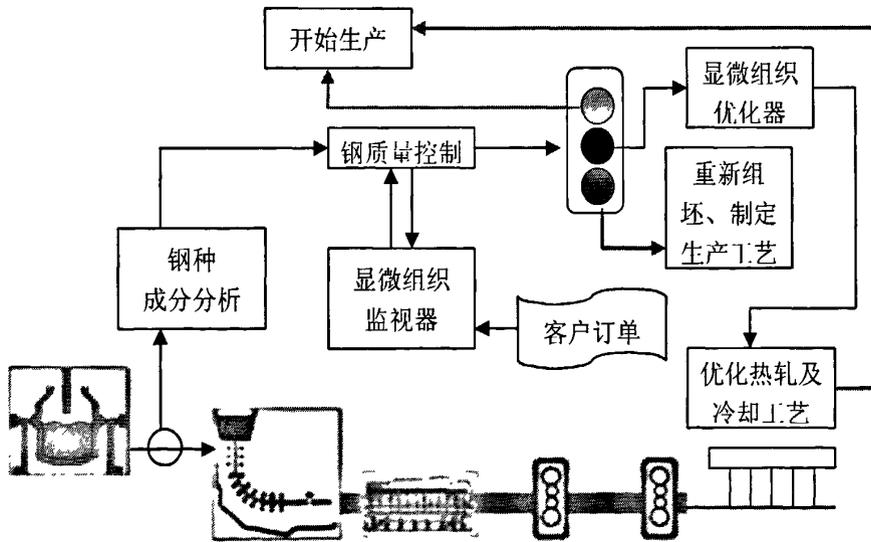


图 1.4 力学性能在线预测与工艺优化子系统示意图

Fig.1.4 The subsystem sketch map of mechanical properties prediction on-line and technology optimization

#### (2) “同系列相邻级别”钢种柔性化生产规则

对于热轧板带，实际生产过程中对于轧制和冷却过程都相对更加稳定，因此在相对集中的终轧温度和卷取温度下，得到的产品性能离目标值的波动范围较小。对于某一成分的钢材，实际生产数据中没有可以用来模拟不同工艺下的性能时参考的数据，需要通

过实验摸索在设备能力范围内不同工艺下的力学性能。

针对典型微合金钢，系统地研究热轧过程中奥氏体动态再结晶规律、奥氏体静态再结晶规律，以及热轧后连续冷却过程中的相变规律，尤其是在应用超快速冷却技术的条件下冷却路径对相变的影响规律，加速冷却可以阻止或延迟微合金元素的碳氮化物在奥氏体中过早的析出，使其在  $\gamma$ - $\alpha$  相变过程中有效的细化晶粒<sup>[20-22]</sup>。以物理冶金学规律为指导，结合实验室热轧实验，确立某一化学成份条件下的极限力学性能，通过轧制及冷却工艺的调整实现钢材的升降级轧制。

### 1.3 课题的研究内容、目的和意义

#### 1.3.1 研究内容

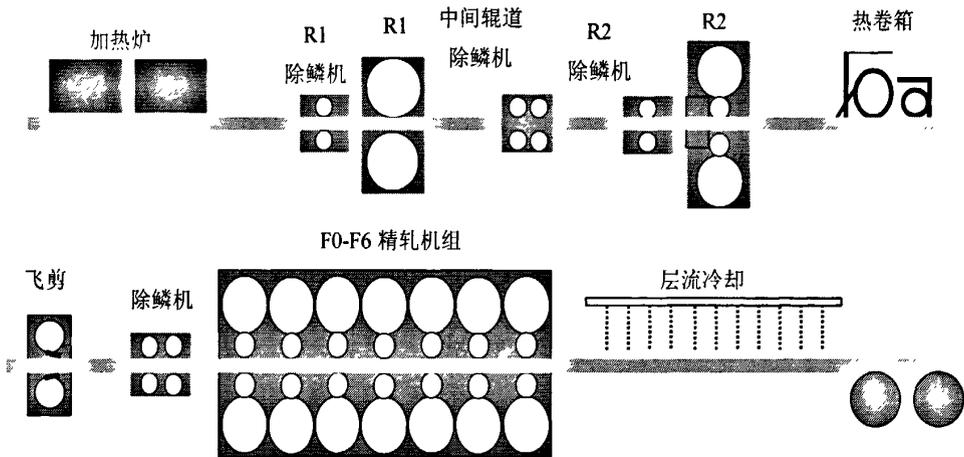


图 1.5 1422 mm 热连轧生产线平面布置图

Fig.1.5 Schematic show of 1422 mm hot-roll production line

宝钢梅山钢铁热轧生产线，如图1.5所示，在实现了带钢组织性能的离线软测量基础上与东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室开展了“热轧带钢柔性生产技术开发研究及应用”课题。本论文以该课题为背景，开展了如下主要研究内容：

- (1) 基于对组织性能预测与优化技术的深入理解，建立集约化生产技术的系统框架；
- (2) 通过对钢铁产品国家标准的研究，结合现场生产控制能力分析，开发智能钢种归并技术。
- (3) 采用集约化的化学成分的坯料，通过控制轧制与控制冷却技术的应用，实现相同系列相邻力学性能级别钢种的升降级轧制。

### 1.3.2 研究目的与意义

本论文的研究目的是通过对钢铁产品国家标准、现场生产控制能力等的分析开发智能钢种归并技术；在集约化的化学成份条件下，通过控轧控冷技术的应用实现“一钢多能”的集约化生产目的，从而建立起集约化生产技术的系统框架。完成这项工作的意义在于：

- (1) 归并、减少品种类别，简化原料的管理，实现冶炼和连铸的集约化生产；
- (2) 最大限度地发挥变形和冷却对轧件性能的控制作用，在轧制环节实现敏捷制造，以生产线的柔性，灵活应对用户的多样化需求；
- (3) 实现钢铁企业节能节材的可持续发展目标，推动相关企业生产模式改造；
- (4) 使我国的“数字化冶金生产技术(实时、定量、可控、柔性)”继续向前迈进一大步，提高我国先进冶金企业的综合竞争力。

## 第二章 钢种归并

### 2.1 钢种归并步骤

集约化生产技术的核心研究内容之一是智能钢种归并技术。一般大中型钢厂钢铁牌号都有成百上千个，而由于客户的多样性需求导致一个钢铁牌号对应多个成分控制标准(或出钢记号)，钢种繁多是钢种归并面临的第一个问题。钢材的力学性能指标通常包括屈服强度、抗拉强度和延伸率，以及冲击功、冷弯，而某些钢种对耐腐蚀、耐磨有特殊要求，因此，合理地选择钢种归并对象是面临的第二个重要问题。面对如此繁多的钢铁牌号，哪些可以归为一类进行归并，即采用什么样的分类标准是钢种归并面临的第三个重要问题。通常，对钢种归并的简单理解是取成分交集，但每个钢铁企业都有自己的内控成分标准，而且它是可以根据实际生产情况进行调整的，那么采用什么样的方法指导钢种归并是其面临的第四个重要问题。

综合分析以上四个问题，可以归纳出如下钢种归并的步骤：

(1) 钢铁企业对现有出钢记号进行梳理与精简。例如国内某厂共有将近200个出钢记号，通过优化精简近40个出钢记号，精简比例约20%，其中包括“删除部分不用的出钢记号”，“在炼钢能力提高下，归并由于部分成分控制要求引起的出钢记号不同”等。

(2) 选择合理的钢种归并对象。针对常规热轧带钢生产线，普碳钢以及普碳结构钢系列是市场容量最大的钢铁产品，力学性能指标只包括屈服强度、抗拉强度、延伸率和冲击功，而热轧带钢在强度和塑性满足要求的条件下冲击性能通常都能满足标准的要求，因此，本论文中选择普碳钢和普碳结构钢系列作为钢种归并的对象。

(3) 按照钢材产品各国的国家标准及企业集团内部的控制标准，制定出合理的分类准则，划分出“同系列相邻级别”与“跨系列同性能级别”，如表2.1举例说明同系列相邻级别和跨系列(或跨标准)同性能级别的成分要求：

表 2.1 钢种归并的类别划分

Table 2.1 The sort division of steel grade integration

(a) 同系列相邻级别

| 牌号   | 等级 | 化学成分，%    |           |      |       |       | 脱氧方法  |
|------|----|-----------|-----------|------|-------|-------|-------|
|      |    | C         | Mn        | Si   | S     | P     |       |
|      |    |           |           | 不小于  |       |       |       |
| Q195 |    | 0.06~0.12 | 0.25~0.50 | 0.30 | 0.050 | 0.045 | F、b、Z |
| Q215 | A  | 0.09~0.15 | 0.25~0.55 | 0.30 | 0.050 | 0.045 | F、b、Z |

(b) 跨系列同性能级别

| 牌号    | 等级 | 化学成分, %   |           |      |       |       | 脱氧方法  |
|-------|----|-----------|-----------|------|-------|-------|-------|
|       |    | C         | Mn        | Si   | S     | P     |       |
|       |    |           |           | 不大于  |       |       |       |
| Q235  | A  | 0.14~0.22 | 0.30~0.65 | 0.30 | 0.050 | 0.045 | F、b、Z |
|       | B  | 0.12~0.20 | 0.30~0.70 |      | 0.045 |       |       |
|       | C  | ≤0.18     | 0.35~0.80 |      | 0.040 | 0.040 | Z     |
|       | D  | ≤0.17     |           |      | 0.035 | 0.035 | TZ    |
| SS400 | -  | ≤0.21     | ≤1.40     | 0.30 | 0.035 | 0.035 | -     |

注：1) D 级钢应含有足够的形成细晶粒结构的元素，例如钢中酸溶铝含量不小于 0.015%或铝含量不小于 0.020%；

2) 钢中残余元素铬、镍、铜含量应各不大于 0.30%，氧气转炉钢的氮含量应不大于 0.008%。如果供方能保证，均可不做分析。

(4) 以目标钢种系列现有生产数据为基础，进行单因素方差分析和Cpk过程控制能力分析，并提出合理的钢种归并规则，实现程序自动化处理，开发钢种归并智能化技术。

## 2.2 结构系列钢种归并概述

国内某厂现有结构钢系列出钢记号 27 个，本小节从钢铁产品的国家标准出发，主要参考碳素结构钢国家标准、低合金高强度结构钢国家标准、宝钢股份企业标准，对结构钢系列产品按力学性能相近或相邻的原则进行归并可能性的初步分析。

### 2.2.1 Q235B-1、Q235B-2、Q235C、Q235D 和 SS400

表 2.1(b)和表 2.2 列举了 Q235 系列和 SS400 在国家标准中力学性能和化学成分的具体要求，可以看出 Q235 系列和 SS400 的性能和成分是有很大交集的。

表 2.2 国家标准中对 Q235 和 SS400 的力学性能要求

Table 2.2 The mechanical properties of Q235&SS400

(a)

| 牌号   | 质量等级 | 拉伸试验                 |        |        |         |          |      |                       |                    |        |        |         |          |      | 冲击试验                  |                |
|------|------|----------------------|--------|--------|---------|----------|------|-----------------------|--------------------|--------|--------|---------|----------|------|-----------------------|----------------|
|      |      | 屈服点 $\sigma_s$ , MPa |        |        |         |          |      | 抗拉强度 $\sigma_b$ , MPa | 伸长率 $\delta_5$ , % |        |        |         |          |      | 温度 $^{\circ}\text{C}$ | V 型冲击功 (纵向), J |
|      |      | 钢材厚度(直径), mm         |        |        |         |          |      |                       | 钢材厚度(直径), mm       |        |        |         |          |      |                       |                |
|      |      | ≤16                  | >16~40 | >40~60 | >60~100 | >100~150 | >150 |                       | ≤16                | >16~40 | >40~60 | >60~100 | >100~150 | >150 |                       |                |
| Q235 | B    | 235                  | 225    | 215    | 205     | 195      | 185  | 375~500               | 26                 | 25     | 24     | 23      | 22       | 21   | 20                    | 27             |
|      | C    |                      |        |        |         |          |      |                       |                    |        |        |         |          | 0    |                       |                |
|      | D    |                      |        |        |         |          |      |                       |                    |        |        |         |          | -20  |                       |                |

(b)

| 牌号    | 拉伸试验          |             |                                 |                                 |     |            | 180°<br>弯曲试验<br>弯曲直径 | V型冲击<br>试验 |  |
|-------|---------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-----|------------|----------------------|------------|--|
|       | 上屈服强度,<br>MPa | 抗拉强度<br>MPa | 断后伸长率,%                         |                                 |     | 试验<br>温度,℃ |                      |            |  |
|       |               |             | L <sub>0</sub> =50mm,<br>b=25mm | L <sub>0</sub> =200mm<br>b=40mm |     |            |                      |            |  |
|       | 公称厚度,mm       |             | 公称厚度,mm                         |                                 |     |            |                      |            |  |
| ≤16   | >16           |             | ≤5                              | 5~16                            | >16 |            |                      |            |  |
| SS400 | ≥245          | ≥235        | 400~510                         | ≥21                             | ≥17 | ≥21        | 3a                   |            |  |

注：进行拉伸和弯曲试验时，钢板、钢带应取横向试样。

从上面表格可以看出：

Q235 系列和 SS400 化学成分的交集分别为：C：0.12~0.17，Mn：0.35~0.65，Si：≤0.30，P≤0.035，S：≤0.035。

对于 Q235 的不同等级，在拉伸试验的力学性能要求上是相同的；对于冲击试验时冲击功的值相同，但对于冲击试验的温度要求略有不同。SS400 屈服强度较 Q235 系列高 10MPa，两者抗拉强度交集为 400~500MPa。Q235 伸长率较 SS400 高 5%，如果采用相同标距，两者延伸率要求基本一致。

### 2.2.2 Q345B-1、Q345B-2、Q345C-1、Q345C-2、Q345D

分析 Q345B、C 和 D 对应出钢记号的钢种归并时，国家标准(GB/T 1591—94)对几者的力学性能和化学成分的要求如表 2.3 与表 2.4 所示。

表 2.3 Q345 的力学性能

Table 2.3 The mechanical properties of Q345

| 牌号   | 质量等级 | 拉伸试验                               |       |   |                       | 冲击功(纵向)<br>AkV,J |    |     | 180°弯曲试验 |        |
|------|------|------------------------------------|-------|---|-----------------------|------------------|----|-----|----------|--------|
|      |      | 屈服点 $\sigma_s$ , N/mm <sup>2</sup> |       | 抗拉强度<br>$\sigma_b$<br>N/mm <sup>2</sup> | 伸长率<br>$\delta_s$ , % |                  |    |     | 钢材厚度,mm  |        |
|      |      | 钢材厚度(直径),mm                        |       |   |                       | 20℃              | 0  | -20 | ≤16      | 16~100 |
|      |      | ≤16                                | 16~35 |   |                       | 不小于              |    |     |          |        |
| Q345 | B    | 345                                | 325   | 470<br>~<br>630                         | 21                    | 34               | 34 | 34  | d=2a     | d=3a   |
|      | C    |                                    |       |   |                       |                  |    |     |          |        |
|      | D    |                                    |       |   |                       |                  |    |     |          |        |

注：进行拉伸和弯曲试验时，钢板、钢带应取横向试样；宽度小于 600mm 的钢带、型钢和钢棒取纵向试样。

在国家标准中，Q345B、C 和 D 的屈服与抗拉强度要求相同，延伸率要求几乎相同，而冲击功的要求分别是 20℃、0℃、-20℃下纵向不小于 34J。

表 2.4 Q345 的化学成分  
Table 2.4 The chemical composition of Q345

| 牌号   | 质量等级 | 化学成分, % |      |      |       |       |      |       |          |       |
|------|------|---------|------|------|-------|-------|------|-------|----------|-------|
|      |      | C≤      | Mn   | Si≤  | P≤    | S≤    | V    | Nb    | Ti       | Al≥   |
| Q345 | B    | 0.20    | 1.00 | 0.55 | 0.04  | 0.04  | 0.2  | 0.015 | 0.02~0.2 | 0.015 |
|      | C    | 0.20    | ~    |      | 0.035 | 0.035 |      |       |          |       |
|      | D    | 0.18    | 1.60 |      | 0.03  | 0.03  | 0.15 | 0.06  |          |       |

注: 1) 表中的 Al 为全铝含量, 如化验酸溶铝时, 其含量应不小于 0.010%;  
2) 细化晶粒元素(V、Nb、Ti、Al), 钢中应至少含有其中的一种; 如这些元素同时使用则至少应有一种元素的含量不低于规定的最小值。

从化学成分上看, 几者的交集范围较大: C≤0.18, Si≤0.55, Mn1.00~1.60, P≤0.03, S≤0.03, V=0.2~0.15, Nb=0.015~0.06, Ti=0.02~0.2, Al≥0.015。钢中应至少含有 V、Nb、Ti 和 Al 中的一种微合金元素; 如果复合添加, 则至少应有一种元素的含量不低于规定的最小值。

### 2.2.3 SM490A、SM490YA、SM490、SS490

表 2.5 SS490、SM490A 和 SM490YA 的力学性能  
Table 2.5 The mechanical property of SS490、SM490A&SM490YA

| 牌号      | 拉伸试验          |      |              |                                 |                                 |     | 180°<br>弯曲试验<br>弯曲直径 | V 型冲击试验    |          |
|---------|---------------|------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|-----|----------------------|------------|----------|
|         | 上屈服强度,<br>MPa |      | 抗拉强度,<br>MPa | 断后伸长率,%                         |                                 |     |                      | 试验<br>温度,℃ | 冲击功<br>J |
|         |               |      |              | L <sub>0</sub> =50mm,<br>b=25mm | L <sub>0</sub> =200mm<br>b=40mm |     |                      |            |          |
|         | 公称厚度,mm       |      |              | 公称厚度,mm                         |                                 |     |                      |            |          |
| ≤16     | >16           | ≤5   |              | 5~16                            | >16                             |     |                      |            |          |
| SS490   | ≥285          | ≥275 | 490~610      | ≥19                             | ≥15                             | ≥19 | 4a                   |            |          |
| SM490A  | ≥325          | ≥315 | 490~610      | ≥22                             | ≥17                             | ≥21 | 3a                   |            |          |
| SM490YA | ≥365          | ≥355 | 490~610      | ≥19                             | ≥15                             | ≥19 | 3a                   |            |          |

表 2.6 SS490、SM490A 和 SM490YA 的化学成分  
Table 2.6 The chemical constitution of SS490、SM490A&SM490YA

| 牌号      | 公称厚度,<br>mm | 化学成分(熔炼分析), % |       |      |        |        |    |
|---------|-------------|---------------|-------|------|--------|--------|----|
|         |             | C             | Si    | Mn   | P      | S      | 其它 |
| SS490   | ≤16         | ≤0.22         | ≤0.25 | ≤1.4 | ≤0.035 | ≤0.035 |    |
| SM490A  | ≤16         | ≤0.20         | ≤0.55 | ≤1.6 |        |        |    |
| SM490YA | ≤12.7       | ≤0.20         |       |      |        |        |    |

国家或相关企业标准: 焊接结构系列 SM490 等由于考虑焊接性能上的要求使碳当

量稍低，标准中的化学成分和性能如表 2.5 与表 2.6 所示。

从以上可以看出，屈服强度差异最大达到 80MPa，而抗拉强度要求相同，延伸率相差 3%，180° 弯曲试验弯曲直径差别为 1a。

化学成分交集为： $C \leq 0.20$ ， $Si \leq 0.25$ ， $Mn \leq 1.40$ ， $P \leq 0.035$ ， $S \leq 0.035$ ，其它元素含量没有具体要求。

### 2.2.4 St37-2、St37-3

St37-3 有两个不同的出钢记号，但化学成分相同。国家或相关企业标准中，St37-2 和 St37-3 的性能和化学成分要求如下表。

表 2.7 St37-2 和 St37-3 的力学性能  
Table 2.7 The mechanical property of St37-2&St37-3

| 牌号     | 拉伸试验          |            |                 |                 |                 |                 |                      |            | 180°<br>弯曲试验<br>弯曲直径 |          | V 型冲击<br>试验     |           |
|--------|---------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------------|----------------------|----------|-----------------|-----------|
|        | 上屈服强度,<br>MPa |            | 抗拉强度,<br>MPa    |                 | 断后伸长率,%         |                 |                      |            |                      |          |                 |           |
|        |               |            |                 |                 | $L_0=80, b=20$  |                 | $L_0=5.65\sqrt{S_0}$ |            |                      |          |                 |           |
|        | 公称厚度,mm       |            | 公称厚度,mm         |                 | 公称厚度,mm         |                 |                      |            | 公称厚度,mm              |          | 试验<br>温度,<br>°C | 冲击功,<br>J |
|        | $\leq 16$     | $> 16$     | $< 3$           | $\geq 3$        | 1.5<br>~<br>2.0 | 2.0<br>~<br>2.5 | 2.5<br>~<br>3.0      | $\geq 3.0$ | $< 3$                | $\geq 3$ |                 |           |
| St37-2 | $\geq 235$    | $\geq 225$ | 360<br>~<br>510 | 340<br>~<br>470 | $\geq 17$       | $\geq 18$       | $\geq 19$            | $\geq 24$  | 1.5a                 | 2a       | +20             | $\geq 27$ |
| St37-3 |               |            |                 |                 |                 |                 |                      |            | 1a                   | 1.5a     | 0               | $\geq 27$ |

表 2.8 St37-2 和 St37-3 的化学成分  
Table 2.8 The chemical constitution of St37-2&St37-3

| 牌号     | 公称厚度,<br>mm | 化学成分(熔炼分析), % |             |             |              |              |                  |
|--------|-------------|---------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------------------|
|        |             | C             | Si          | Mn          | P            | S            | 其它               |
| St37-2 | $\leq 16$   | $\leq 0.17$   | $\leq 0.12$ | $\leq 1.25$ | $\leq 0.035$ | $\leq 0.035$ | Alt $\geq 0.020$ |
|        | 16~25.4     | $\leq 0.20$   |             |             |              |              |                  |
| St37-3 | $\leq 25.4$ | $\leq 0.17$   |             | $\leq 1.30$ |              |              |                  |

以上可以看出，两者对强度与塑性性能的要求相同，唯独对冷弯试验的弯心直径和 V 型冲击试验的实验温度有较小的差别。

针对常规热轧带钢，两者锰含量有较小的差别，成分交集较大： $C \leq 0.17$ ， $Si \leq 0.12$ ， $Mn \leq 1.25$ ， $P \leq 0.035$ ， $S \leq 0.035$ 。

根据以上分类标准，本论文开展了 Q235 系列与 SS400、Q345 系列、SM400 和 SS400、

SM490 系列和 SS490、Q195 与 Q215、SPHT1 与 SPHT2、St37-2 与 St37-3、以及 510L 与 X52 等近 30 个牌号(出钢记号)的钢种归并研究工作。在下一章中,以 Q235B 与 SS400 的归并分析为例,按照 2.1 节中钢种归并步骤,详细介绍了智能化钢种归并分析方法的建立。

## 第三章 Q235&SS400 归并分析报告

碳素结构钢 Q235 系列是普碳钢的主要产品, 根据其力学性能、延伸率等指标和冲击功试验温度要求的不同, 由低到高分为 A、B、C、D 四个等级, 其中使用较为广泛的是 B、C、D 三个等级的产品。结构用热连轧钢板及钢带中的 SS400 牌号根据它的硅含量的不同主要有 SS400(带硅)、SS400(标准)、SS400(低硅)共三个出钢记号, 其中常用的为 SS400(带硅)。

现在国内某钢已能稳定地控制和生产厚度在 1.8~12.5mm 的 Q235B、Q235C、Q235D 热轧钢卷, 成分、性能合格率达到 100%。但在合同计划和生产组织方面存在一定的问题, 这主要表现在不同级别 Q235 产品的化学和炼钢、热轧工艺设计各不相同。B、C、D 三个等级的产品共生成了四个出钢记号。为便于改善生产制造管理、使现场操作控制工艺简单化, 需要对该三个等级的产品进行归并整合, 以下简要分析归并的实施方案。

### 3.1 标准要求

#### 3.1.1 成分

Q235 和 SS400 的化学成分应该满足表 2.1(b)的规定。两者是来自于不同国家标准的同一个性能级别的钢种, 因此它们在成分上有很大交集。由于归并几个钢种(出钢记号)时需要分析实际生产数据, 最终选择生产数据较多的 Q235B-1、Q235B-2 对应的两个出钢记号和 SS400 带硅的出钢记号进行归并。分析 Q235B 和 SS400 国家标准中对化学成分的要求, 交集为:  $C=0.12\sim 0.20$ ,  $Si\leq 0.30$ ,  $Mn=0.30\sim 0.70$ ,  $P\leq 0.035$ ,  $S\leq 0.035$ 。

#### 3.1.2 力学性能

Q235 的拉伸、冲击和弯曲试验结果应符合国家标准表 2.2 (a)的规定, SS400 性能采用宝山钢铁股份有限公司企业标准, 见表 2.2 (b)。针对常规热轧带钢生产线的产品厚度范围, SS400 的屈服强度要求较 Q235B 高 10MPa; 抗拉强度下限较 Q235B 高 25MPa, 而两者的上限差别不大; SS400 延伸率较 Q235B 低 5%, 这主要是由于拉伸试样的标距不同产生的。Q235B 的拉伸试样尺寸按国家标准为“ $L_0=50\text{mm}$ 、 $b=12.5\text{mm}$ ”, 而 SS400 针对产品厚度  $h\leq 5\text{mm}$  和  $h\geq 5\text{mm}$  的拉伸试样尺寸要求分别为“ $L_0=50\text{mm}$ 、 $b=25\text{mm}$ ”和“ $L_0=200\text{mm}$ 、 $b=40\text{mm}$ ”。由于拉伸时断裂处的伸长最大, 因此试样的标距越大, 延

伸率计算值越小。通过标距的转化可知，两者延伸率差别较小；SS400 对 V 型冲击试验的试验温度和冲击功没有要求，而 Q235 的要求也相对较低。总体来看两者的性能要求非常接近。

### 3.2 内控成分标准

企业在实际生产时也有相对于国家的具体标准，此标准一般会在国家标准的范围内，如表 3.1~表 3.3 所示。从下表可以看出，Q235B 和 SS400 对应的三个出钢记号的成分具体要求虽有不同但差别很小，主要是 C 和 Mn 含量的差别：出钢记号 Q235B-2 碳的目标值高于其余两者 0.02，它的锰目标值和 SS400 的相同高于 Q235B-1 锰的目标值 0.1，因此可以考虑适当降低 Q235B-2 的碳含量目标值，再通过改变其轧制工艺和冷却工艺提高性能到相应的水平，而同时归并还需要适当提高 Q235B-1 的锰目标值，因此还需要适当改变 Q235B-1 的工艺满足相应的性能要求。

表 3.1 Q235B-1 的化学成分

Table 3.1 The smelting constitution of Q235B-1

| 元素  | C, %  | Si, % | Mn, % | P, %  | S, %   | Alt, % | Als, % |
|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 目标值 | 0.13  | 0.2   | 0.4   | 0.022 | 0.02   | 0      | 0      |
| 下限  | 0.095 | 0.115 | 0.3   | 0     | 0      | 0      | 0      |
| 上限  | 0.185 | 0.305 | 0.7   | 0.025 | 0.0254 | 9.999  | 9.999  |

表 3.2 Q235B-2 的化学成分

Table 3.2 The smelting constitution of Q235B-2

| 元素  | C, %  | Si, % | Mn, % | P, %  | S, %   | Alt, % | Als, % |
|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 目标值 | 0.15  | 0.2   | 0.5   | 0     | 0      | 0      | 0      |
| 下限  | 0.115 | 0     | 0.4   | 0     | 0      | 0      | 0      |
| 上限  | 0.185 | 0.305 | 0.7   | 0.035 | 0.0354 | 9.999  | 9.999  |

表 3.3 SS400 的化学成分

Table 3.3 The smelting constitution of SS400 with silicon

| 元素  | C, %  | Si, % | Mn, % | P, % | S, %   | Alt, % | Als, % |
|-----|-------|-------|-------|------|--------|--------|--------|
| 目标值 | 0.13  | 0.2   | 0.5   | 0    | 0      | 0.02   | 0      |
| 下限  | 0.115 | 0.146 | 0.3   | 0    | 0      | 0.01   | 0      |
| 上限  | 0.185 | 0.305 | 0.7   | 0.03 | 0.0305 | 9.999  | 9.999  |

### 3.3 热轧生产数据分析

#### 3.3.1 化学成分 Cpk 分析

本文采用过程能力指数 Cpk (Complex Process Capability index)分析实际生产数据,说明生产中对几者成分的控制能力。Cpk 是现代企业用于表示制程能力的指标,制程能力是过程性能的允许最大变化范围与过程的正常偏差的比值。制程能力研究在于确认这些特性符合规格的程度, Cpk 值越大表示品质越佳控制能力越强<sup>[23]</sup>。由于计算取样数据至少应有 20~25 组数据,才具有一定代表性,分析计算时选取几者的实际生产数据量分别为: Q235B-1 有 507 组、Q235B-2 有 201 组和 SS400 有 252 组。下表计算了几者的 Cpk、平均值和合格率。

表 3.4 Q235B-1 的化学成分指标  
Table 3.4 The chemical constitution index of Q235B-1

|        | C      | Si     | Mn     | P      | S      | Alt    | Als    |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cpk    | 1.54   | 2.38   | 1.95   | 0.9    | 1.18   | 1.25   | 1.08   |
| 平均值, % | 0.1339 | 0.1946 | 0.4269 | 0.0184 | 0.0154 | 0.0194 | 0.0159 |
| 合格率, % | 99.41  | 100    | 99.41  | 91.52  | 97.83  | 100    | 100    |

表 3.5 Q235B-2 的化学成分指标  
Table 3.5 The chemical constitution index of Q235B-2

|        | C      | Si     | Mn     | P      | S      | Alt    | Als    |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cpk    | 1.53   | 3.63   | 1.84   | 3.81   | 3.18   | 1.51   | 1.29   |
| 平均值, % | 0.1517 | 0.1946 | 0.4982 | 0.0164 | 0.0091 | 0.0171 | 0.0138 |
| 合格率, % | 100    | 100    | 100    | 100    | 100    | 100    | 100    |

表 3.6 SS400 的化学成分指标  
Table 3.6 The chemical constitution index of SS400 with silicon

|        | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Alt   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cpk    | 1.64  | 2.00  | 2.94  | 2.12  | 2.57  | 1.75  |
| 平均值, % | 0.144 | 0.204 | 0.453 | 0.018 | 0.015 | 0.032 |
| 合格率, % | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 98.41 |

注: Cpk 的判断标准:

A++级 Cpk ≥ 2.0 特优 可考虑成本的降低;

A+ 级 2.0 > Cpk ≥ 1.67 优 应当保持之;

A 级 1.67 > Cpk ≥ 1.33 良 能力良好, 状态稳定, 但应尽力提升为 A+级;

B 级 1.33 > Cpk ≥ 1.0 一般 状态一般, 制程因素稍有变异即有产生不良的危险, 应利用各种资源及方法将其提升为 A 级;

C 级 1.0 > Cpk ≥ 0.67 差 制程不良较多, 必须提升其能力;

D 级 0.67 > Cpk 不可接受 其能力太差, 应考虑重新整改设计制程。

分析以上 Cpk 值, Q235B-1 的 C、Si、Mn 元素成分的控制水平较高, 控制能力充足, S、Alt、Als 的控制水平一般, 而且 P 的控制水平较差, 应该加强后四者的控制;

Q235B-2 和 SS400 各元素成分的控制水平均较高,控制能力充足。而且它们的合格率都很高。归并时需要调整 C、Si 和 Mn 的含量时,三者的炼钢控制能力均可以满足。由于 Q235B-1 对 P 和 S 的成分范围及目标值要求相对较高,而且其控制能力相对较弱,在不影响性能的前提下可以考虑适当放宽对它们要求, Q235B-2 和 SS400 的 P 和 Si 的范围及目标值与前者有差别,但其控制能力过剩,因此在调整它们时相对容易实现。同时对于表格中 Cpk 值大于 2.0 的可以考虑降低其控制难度以节约成本。

### 3.3.2 力学性能 Cpk 分析

#### 3.3.2.1 Cpk 计算

表 3.7 Q235B-1 的性能指标  
Table 3.7 The performance index of Q235B-1

|        | 屈服强度      | 抗拉强度      | 伸长率   |
|--------|-----------|-----------|-------|
| Cpk    | 2.45      | 1.09      | 1.30  |
| 平均值    | 338.4 MPa | 454.6 MPa | 35.5% |
| 合格率, % | 100       | 100       | 99.01 |
| 评价     | 能力过剩      | 能力尚可      | 能力尚可  |

表 3.8 Q235B-2 的性能指标  
Table 3.8 The performance index of Q235B-2

|        | 屈服强度      | 抗拉强度      | 伸长率   |
|--------|-----------|-----------|-------|
| Cpk    | 2.81      | 1.04      | 0.79  |
| 平均值    | 327.2 MPa | 465.1 MPa | 30.3% |
| 合格率, % | 100       | 100       | 96.02 |
| 评价     | 能力过剩      | 能力尚可      | 能力不足  |

表 3.9 SS400 的性能指标  
Table 3.9 The performance index of SS400 with silicon

|        | 屈服强度      | 抗拉强度      | 伸长率   |
|--------|-----------|-----------|-------|
| Cpk    | 2.53      | 1.15      | 1.28  |
| 平均值    | 344.3 MPa | 466.8 MPa | 27.9% |
| 合格率, % | 100       | 98.02     | 98.41 |
| 评价     | 能力过剩      | 能力尚可      | 能力尚可  |

对于三者性能方面的控制能力通过对 Cpk、平均值和合格率的计算如上表。可以看出它们对屈服强度的控制能力均有过剩,而对抗拉强度和伸长率的控制相对较差,能力一般。合格率基本满足生产要求。

### 3.3.2.2 结果分析

#### (1) 屈服强度、抗拉强度

Q235B-1、Q235B-2 和 SS400 的屈服强度控制水平很高，有控制能力过剩的现象。Q235B-1 和 SS400 的屈服强度平均值很接近，高于 Q235B-2 的 10MPa 以上，它们的屈服强度平均值均高于国家或者相关企业标准很多；而三者抗拉强度的平均值都满足要求，合格率也较高，但控制能力一般。前面分析几者的成分时考虑适当降低 Q235B-1 碳含量和提高 Q235B-2 锰含量，从控制能力上容易实现，还需要分析它们对性能的影响。

#### (2) 伸长率

Q235B-2 延伸率控制能力不足，有待提高；Q235B-1、Q235B-2 和 SS400 的伸长率合格率分别为 99.01%，96.02%，98.41%。但它们的平均值都高于国家或者企业标准很多，前面分析国家或者企业标准时，三者的伸长率相差较大，从实际生产中可以看出，归并时它们可以满足三者对伸长率的要求。

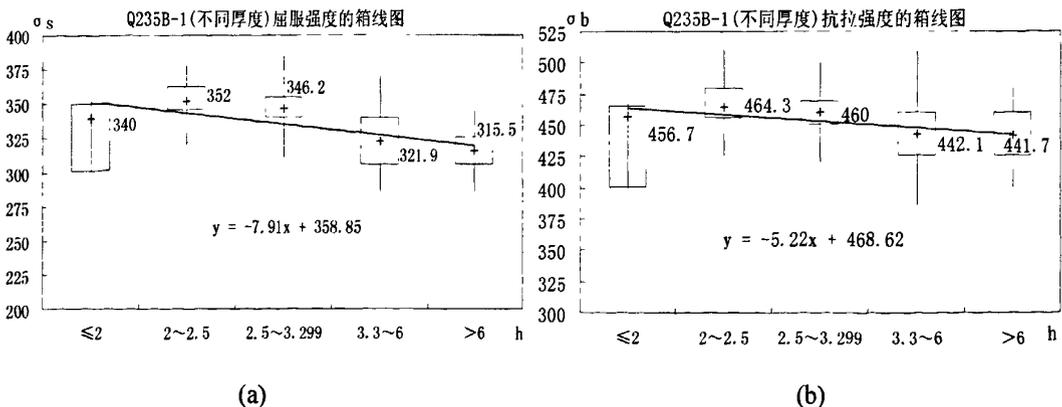
### 3.3.3 产品厚度和成分对性能的影响

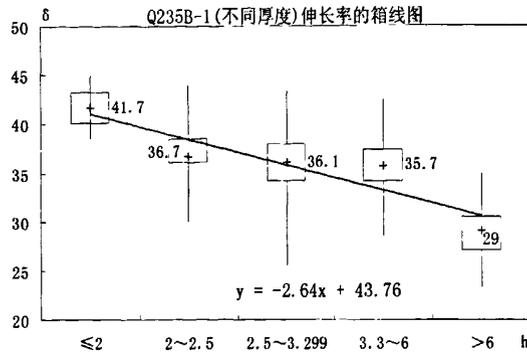
通过厚度和碳、硅、锰元素对产品性能影响的单因素方差分析(见附录)和箱线图进行综合分析，得到碳、硅和锰对其性能影响能力的大小，以此分析改变几者的含量时影响性能的趋势和变化量。箱线图是利用数据中的五个统计量：最小值、第一四分位数、中位数、第三四分位数与最大值来描述数据的一种方法，它也可以粗略地看出数据是否具有有对称性，分布的分散程度等信息。

#### 3.3.3.1 Q235B-1 的箱线图

对于钢种 Q235B-1 的出钢记号，结合实际生产数据主要分析厚度和碳、硅、锰对其力学性能的影响：

#### (1) 厚度对其性能的影响





(c)

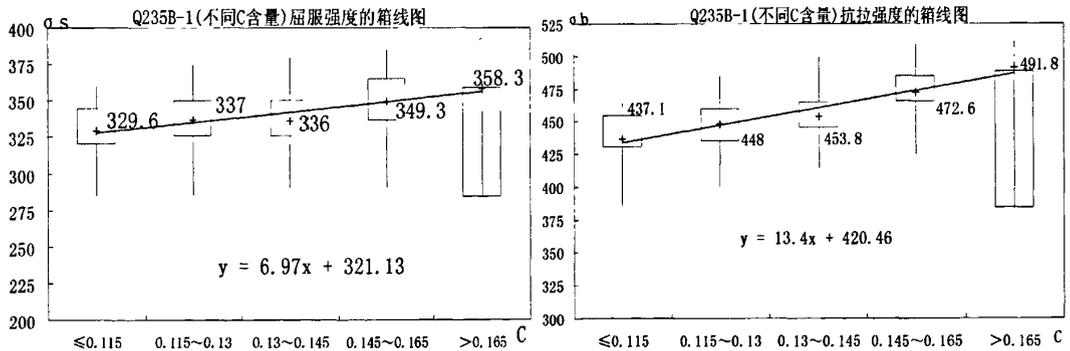
图 3.1 Q235B-1 厚度对性能影响的箱线图

Fig.3.1 Thickness influence on the performance of the box plot Q235B-1

厚度对 Q235B-1 的力学性能的影响如图 3.1 所示。随着厚度增加，强度和塑性均降低，对伸长率的影响最为明显：屈服强度降低达 40MPa，抗拉强度降低 20MPa，伸长率降低 10%左右。因此，有必要通过热轧工艺的调整降低不同厚度产品性能的波动。

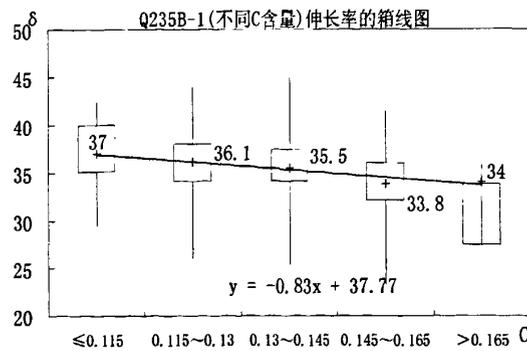
(2) 碳元素对其性能的影响

碳对 Q235B-1 的力学性能的影响如图 3.2 所示。



(a)

(b)



(c)

图 3.2 Q235B-1 碳含量对性能影响的箱线图

Fig.3.2 Carbon content influence on the performance of the box plot Q235B-1

(3) 硅元素对其性能的影响

硅对 Q235B-1 的力学性能的影响如图 3.3 所示。

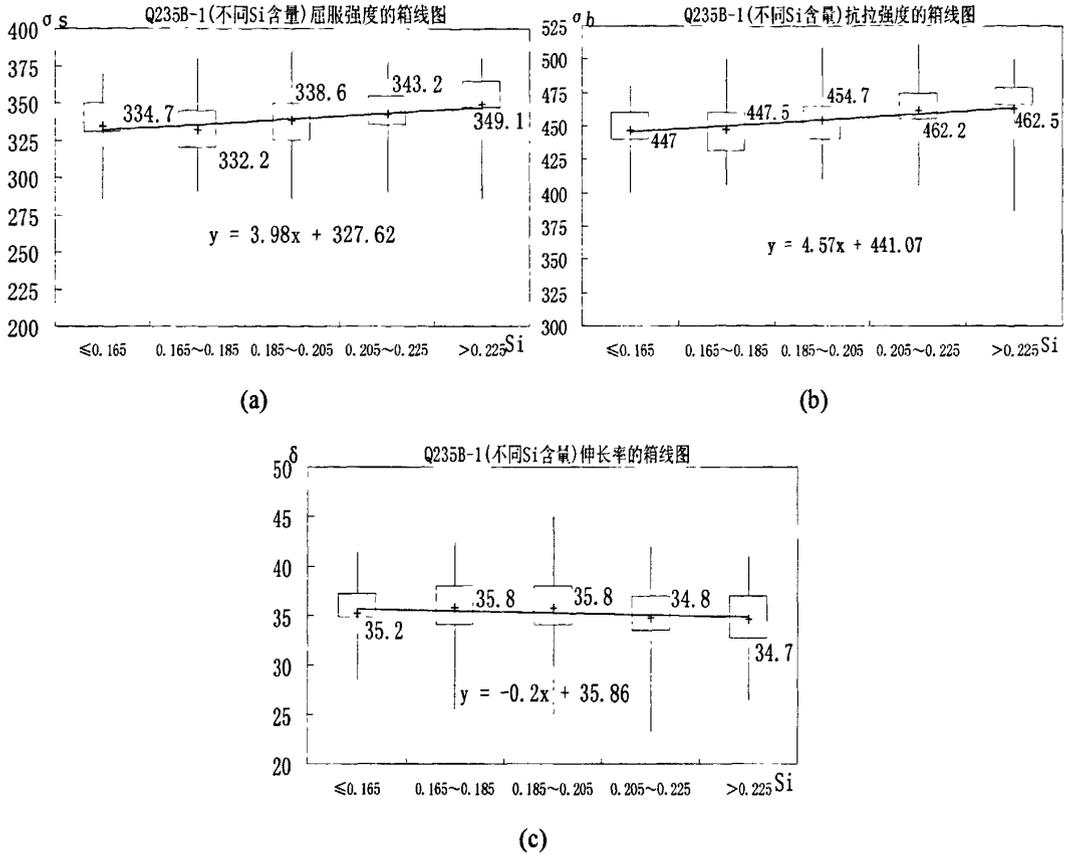
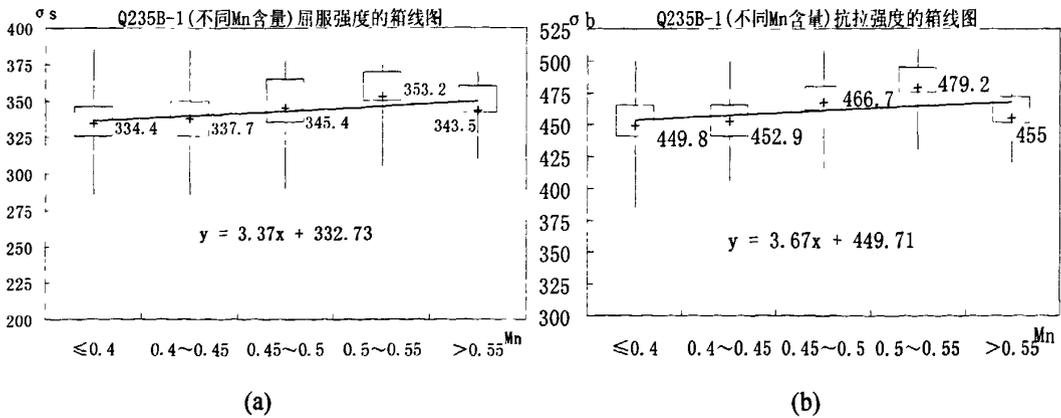


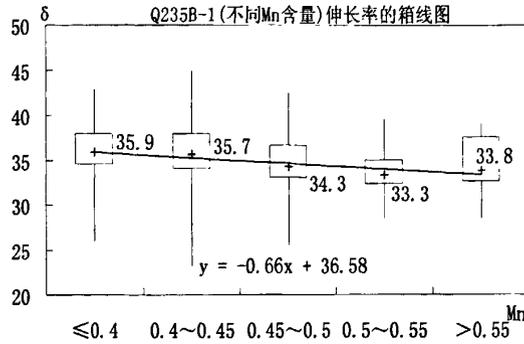
图 3.3 Q235B-1 硅含量对性能影响的箱线图

Fig.3.3 Silicon content influence on the performance of the box plot Q235B-1

(4) 锰元素对其性能的影响

锰对 Q235B-1 的力学性能的影响如图 3.4 所示。





(c)

图 3.4 Q235B-1 锰含量对性能影响的箱线图

Fig.3.4 Manganese content influence on the performance of the box plot Q235B-1

根据上面三组箱线图分析可以看出，碳是典型的强化元素，随碳含量增加强度提高的同时也降低了延伸率，作用相对硅和锰元素较明显。碳元素含量从低于 0.115 的范围增加到大于 0.165 的范围时，屈服强度增加了 30MPa，抗拉强度增加了 55MPa，而伸长率降低了 3%左右。相当于每增加 0.01 的碳含量，屈服强度提高 6MPa，抗拉强度提高 11MPa，伸长率下降 0.6%。可以看出碳元素对其抗拉强度的影响最明显，屈服强度次之，伸长率受之影响较小。

硅含量对强度的提高也有一定的作用，但延伸率基本不受硅含量的影响。硅元素含量从低于 0.166 的范围增加到大于 0.226 的范围时，屈服强度增加了 15MPa，抗拉强度增加了 15MPa，而伸长率变化了 1%左右。由此可以看出硅元素对其性能的影响微弱。

锰的强化作用仅次于碳，但对延伸率的负面影响相对碳稍弱一些。锰元素从低于 0.4 的范围增加到 0.55 的范围以内时，屈服强度增加了 20MPa，抗拉强度增加了 30MPa，而伸长率变化了 2%左右。

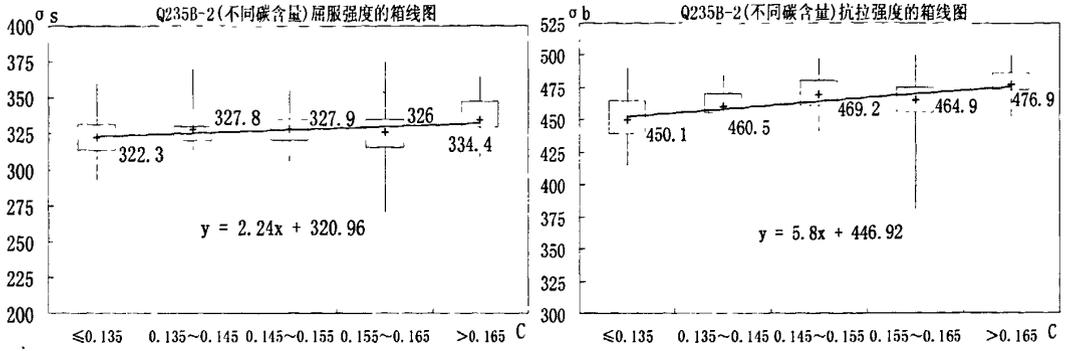
### 3.3.3.2 Q235B-2 的箱线图

从附录中厚度的单因素方差分析可以看出 Q235B-2 现场产品厚度均在 6mm 以上，且厚度值很集中，在做分段分析时相对较困难，因此没有进行厚度对力学性能影响的箱线图分析。

对 Q235B-2 钢，结合实际生产数据主要分析碳、硅和锰元素对其力学性能的影响：

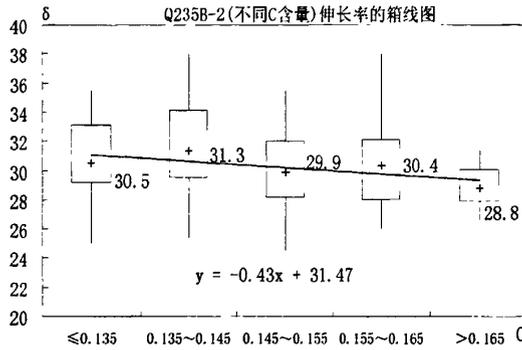
#### (1) 碳元素对其性能的影响

碳对 Q235B-2 的力学性能的影响如图 3.5 所示。



(a)

(b)



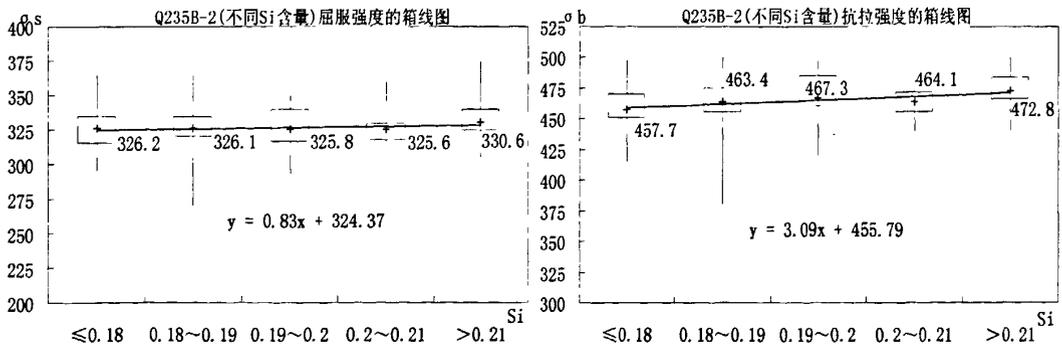
(c)

图 3.5 Q235B-2 碳含量对性能影响的箱线图

Fig.3.5 Carbon content influence on the performance of the box plot Q235B-2

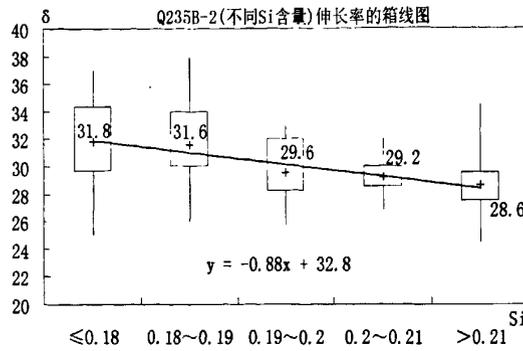
(2) 硅元素对其性能的影响

硅对 Q235B-2 的力学性能的影响如图 3.6 所示。



(a)

(b)



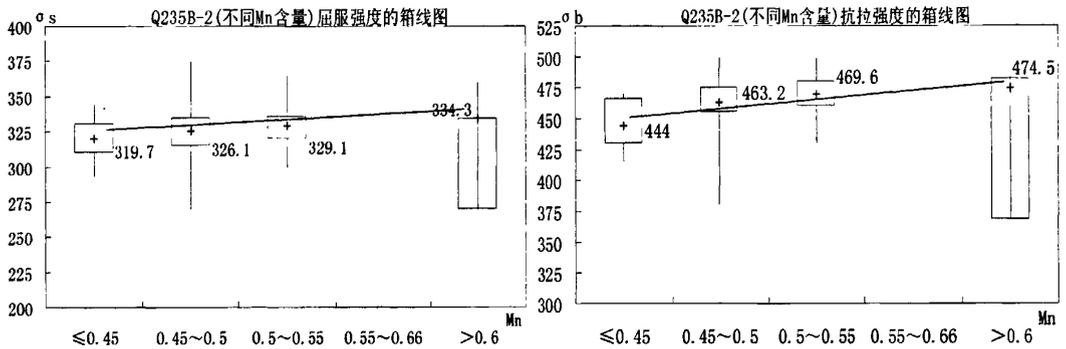
(c)

图 3.6 Q235B-2 硅含量对性能影响的箱线图

Fig.3.6 Silicon content influence on the performance of the box plot Q235B-2

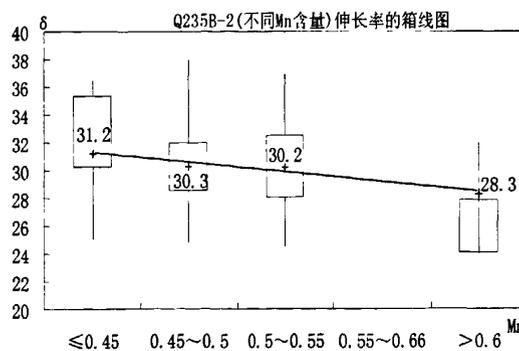
(3) 锰元素对其性能的影响

锰对 Q235B-2 的力学性能的影响如图 3.7 所示。



(a)

(b)



(c)

图 3.7 Q235B-2 锰含量对性能影响的箱线图

Fig.3.7 Manganese content influence on the performance of the box plot Q235B-2

根据以上箱线图分析可以看出，基于 Q235B-2 的生产数据分析，碳元素含量从低于 0.135 的范围增加到大于 0.165 的范围时，屈服强度增加了 10MPa，抗拉强度增加了 25MPa，而伸长率降低了 2%左右。相当于每增加 0.01 的碳含量，屈服强度提高 3MPa，

抗拉强度提高 8MPa，伸长率下降 0.7%。可以看出碳元素对其抗拉强度的影响最明显，屈服强度次之，伸长率受之影响较小。

硅元素含量从低于 0.18 的范围增加到大于 0.21 的范围时，屈服强度增加了 5MPa，抗拉强度增加了 15MPa，而伸长率变化了 3%左右。由此可以看出硅元素对 Q235B-2 伸长率的影响较明显，抗拉强度次之，屈服强度影响较小。

锰元素从低于 0.45 的范围增加到大于 0.6 的范围时，屈服强度增加了 15MPa，抗拉强度增加了 30MPa，而伸长率变化了 3%左右。

可以看出：碳和锰的强化作用相当，但对屈服强度的影响较小，而对延伸率的负面影响相对大；硅含量对屈服强度基本上没有影响，但对抗拉强度的提高有一定的作用，同时降低延伸率。

### 3.3.3.3 SS400 的箱线图

对于钢种牌号为 SS400 的结构用钢，结合实际生产数据主要分析厚度和碳、硅、锰元素对其力学性能的影响：

(1) 厚度对其性能的影响，厚度碳对 SS400 的力学性能的影响如图 3.8 所示。

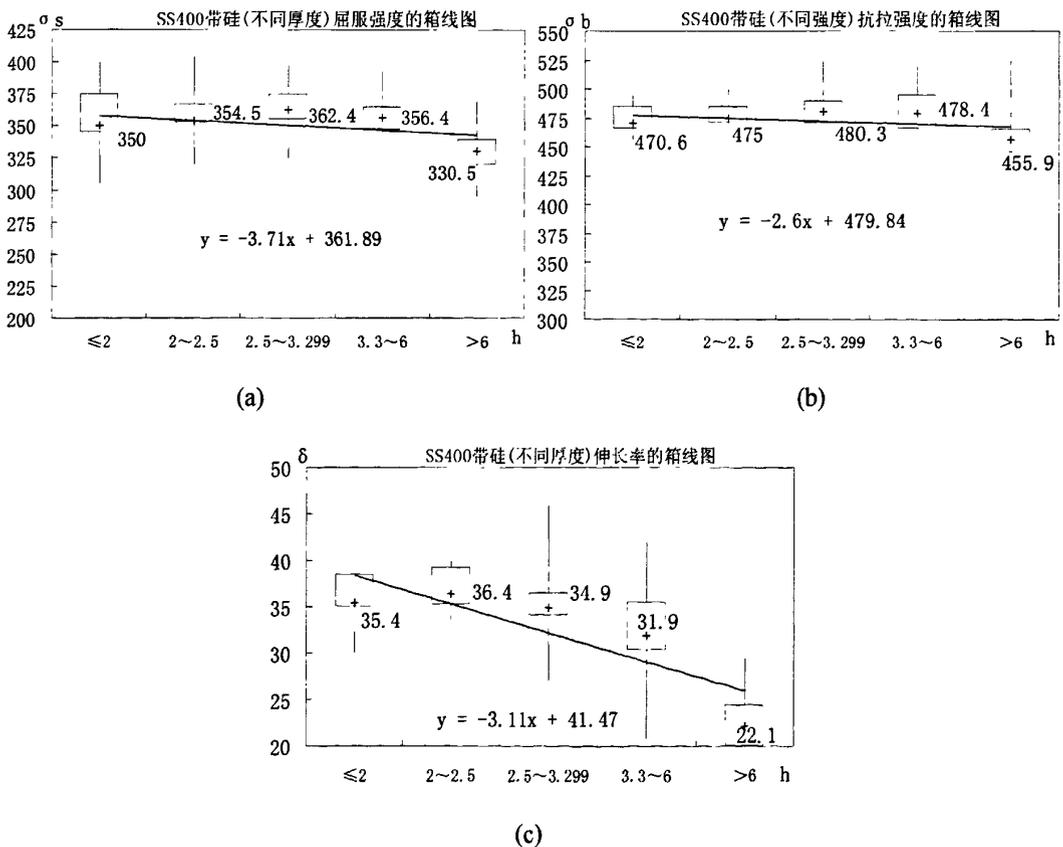


图 3.8 SS400 的厚度对性能影响的箱线图

Fig.3.8 Thickness influence on the performance of the box plot SS400 with silicon

(2) 碳元素对其性能的影响

碳对 SS400 的力学性能的影响如图 3.9 所示。

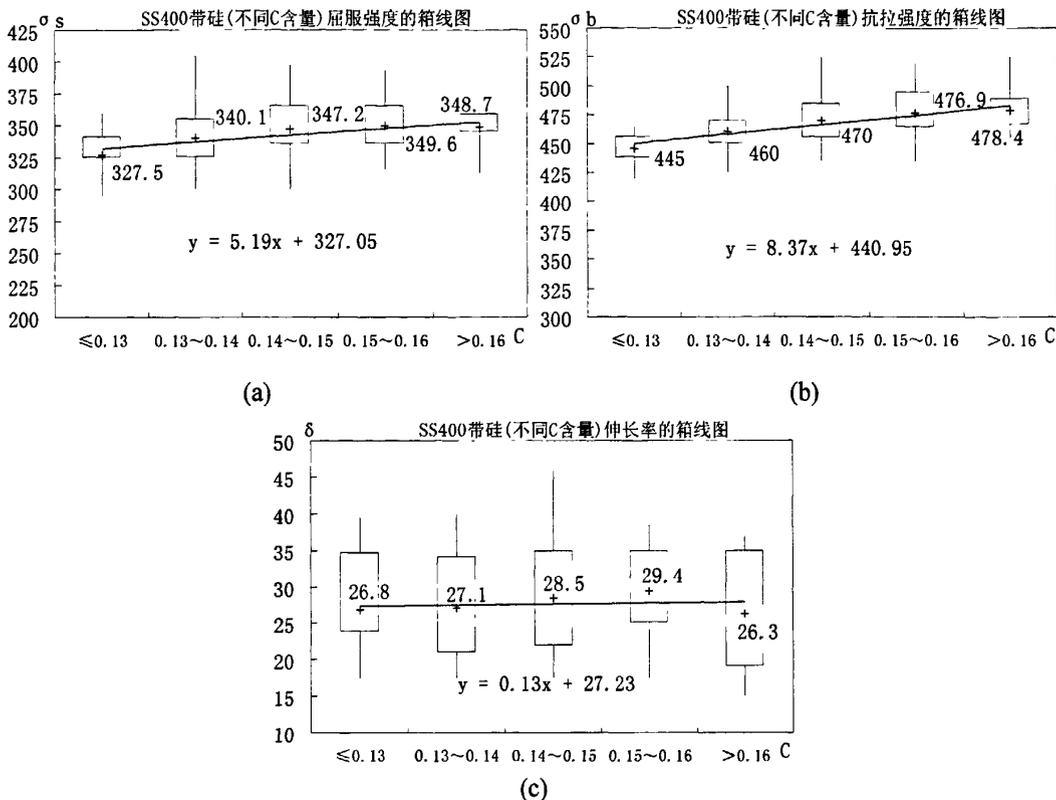
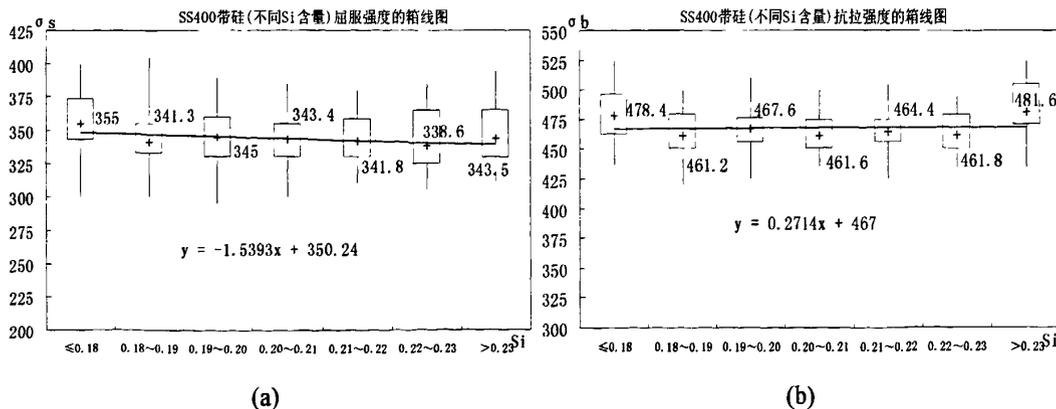


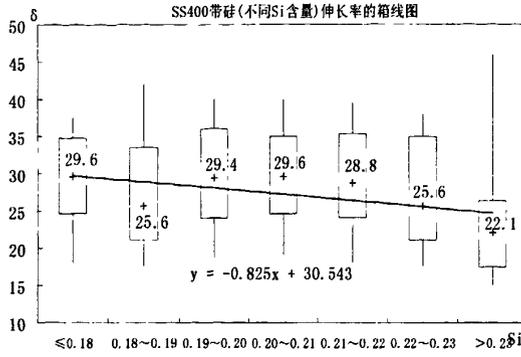
图 3.9 SS400 的碳含量对性能影响的箱线图

Fig.3.9 Carbon content influence on the performance of the box plot SS400 with silicon

(3) 硅元素对其性能的影响

硅对 SS400 的力学性能的影响如图 3.10 所示。





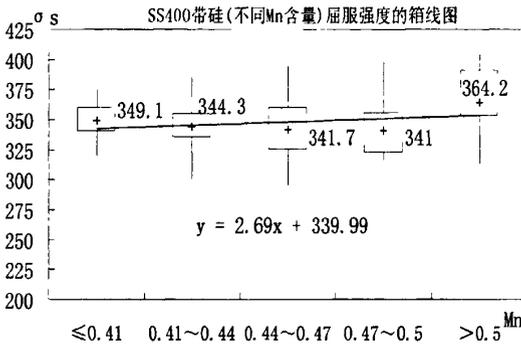
(c)

图 3.10 SS400 的硅含量对性能影响的箱线图

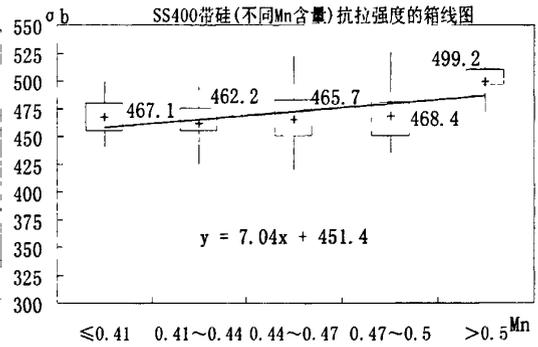
Fig.3.10 Silicon content influence on the performance of the box plot SS400 with silicon

(4) 锰元素对其性能的影响

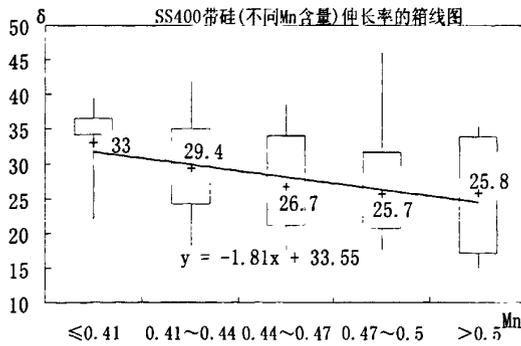
锰对 SS400 的力学性能的影响如图 3.11 所示。



(a)



(b)



(c)

图 3.11 SS400 的锰含量对性能影响的箱线图

Fig.3.11 Manganese content influence on the performance of the box plot SS400 with silicon

SS400 的厚度从小于 2mm 的范围到大于 6mm 的范围, 屈服强度和抗拉强度分别下降了 20 和 15MPa, 而对伸长率的影响很大, 伸长率下降 13%左右。因此应适当的调整对应不同厚度的热轧工艺, 以减少厚度不同带来的性能波动。

基于元素的三组箱线图分析可以看出, 碳元素含量从低于 0.13 的范围增加到大于 0.16 的范围时, 屈服强度增加了 20MPa, 抗拉强度增加了 30MPa, 而伸长率变化了 3%

左右。相当于每增加 0.01 的碳含量，屈服强度提高 7MPa，抗拉强度提高 10MPa，伸长率下降 1%。可以看出碳元素对其抗拉强度的影响最明显，屈服强度次之，伸长率受之影响较小但有波动。

硅元素含量从低于 0.18 的范围增加到大于 0.23 的范围时，屈服强度除了在硅含量小于 0.18 时稍大，其余几个范围变化很小，抗拉强度在硅含量小于 0.18 和大于 0.23 两个范围值较大，中间几个范围的变化很小，而伸长率在前几个范围有波动，中间趋于平稳，后端几个范围下降了 7%左右。

锰元素从低于 0.41 的范围增加到大于 0.5 的范围时，屈服强度开始几个范围内变化很小，到到最后一段范围增加了 20MPa，抗拉强度的变化类似与屈服强度，而伸长率一直下降，变化量为 7%左右。

碳含量对 SS400 的强化作用很明显，但延伸率受之影响较小；硅的强化作用不明显，但当  $Si \geq 0.21\%$  时，伸长率随硅元素含量增加而降低；锰的强化作用相对 Q235 较弱，但同时使延伸率降低明显。

### 3.3.3.4 单因素方差分析

单因素方差分析(见附录)的 F 值汇总表：

表 3.10 三者的单因素方差分析 F 值汇总表

Table 3.10 The summary sheet of the single factor variance analysis F value

|    | Q235B-1    |      | Q235B-2 |      | SS400  |      |        |
|----|------------|------|---------|------|--------|------|--------|
|    | F crit     | F    | F crit  | F    | F crit | F    |        |
| 厚度 | $\sigma_s$ |      | 73.89   |      | 9.37   |      | 46.93  |
|    | $\sigma_b$ | 2.39 | 27.17   | 2.42 | 3.86   | 2.41 | 27.91  |
|    | $\delta$   |      | 73.22   |      | 7.45   |      | 196.38 |
| 碳  | $\sigma_s$ |      | 10.37   |      | 1.63   |      | 4.30   |
|    | $\sigma_b$ | 2.39 | 39.86   | 2.42 | 7.74   | 2.41 | 12.06  |
|    | $\delta$   |      | 9.04    |      | 2.46   |      | 1.16   |
| 锰  | $\sigma_s$ |      | 5.40    |      | 1.46   |      | 3.78   |
|    | $\sigma_b$ | 2.39 | 14.72   | 2.42 | 7.55   | 2.41 | 11.53  |
|    | $\delta$   |      | 4.86    |      | 0.84   |      | 5.46   |
| 硅  | $\sigma_s$ |      | 5.90    |      | 0.94   |      | 1.92   |
|    | $\sigma_b$ | 2.39 | 9.60    | 2.42 | 5.48   | 2.14 | 5.43   |
|    | $\delta$   |      | 2.05    |      | 15.11  |      | 5.10   |

注：若  $F_{crit} \leq F$ ，则在水平 0.05 下，认为厚度、成分对性能有显著的影响。

锰对 Q235B-2 的屈服强度和延伸率不存在明显的影响；硅对 Q235B-1 的延伸率、Q235B-2 的屈服强度和 SS400 的屈服强度不存在明显的影响。以上分析结果同箱线图分

析结果完全吻合。

### 3.4 归并后设计方案

#### 3.4.1 归并设计思路

根据第 2 节中提供的 Q235B-1、Q235B-2 和 SS400 内控成份数据可以看出，主要成分 C、Si、Mn 均有很大交集，而且目标值接近。

从单因素方差分析和箱线图的分析结果可知，随着碳和锰元素的增加，屈服强度和抗拉强度提高，而延伸率下降；而硅含量对强度和塑性的影响相对较小；但对于不同出钢记号的产品，成份对性能的影响大小略有不同。

Q235B-2 同 Q235B-1 和 SS400 相比，它的碳目标值(0.15)略高，但屈服强度过程控制能力过剩，抗拉强度过程控制能力尚可，延伸率过程控制能力不足，结合碳元素对性能的影响，可以将其降低至 0.13 (0.115~0.185)，改善延伸率；

Q235B-2、Q235B-1 和 SS400 硅的目标值均为 0.2。硅元素对 Q235B-2 的抗拉强度提高有一定的作用，因此将其下限提高至 0.115；硅元素对 SS400 的强化作用不明显，并且当 Si<0.21%时它对延伸率也基本上没有影响，因此将其下限降低至 0.115。

Q235B-1 中锰的强化作用稍弱于碳，但其对延伸率的影响也相对较小，实际生产数据显示锰元素含量主要集中在 0.5，因此可以将其目标值提高至 0.5；Q235B-2 由于碳目标值的降低而可能导致抗拉强度的降低，因此保持锰含量 0.4 的下限不变；Q235B-1 和 SS400 锰的下限提高至 0.4。

#### 3.4.2 归并后的成份设计

归并后 Q235 系列和 SS400 产品统一按如下成份设计，见下表：

表 3.11 Q235 系列和 SS400 归并后成分设计

Table 3.11 The composition design after integration of Q235 series and SS400

| 元素  | C, %  | Si, % | Mn, % | P, %  | S, %   | Alt, % | Als, % |
|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 目标值 | 0.13  | 0.2   | 0.5   | 0.022 | 0.02   | 0.02   | 0      |
| 最小值 | 0.115 | 0.115 | 0.4   | 0     | 0      | 0.01   | 0      |
| 最大值 | 0.185 | 0.305 | 0.7   | 0.025 | 0.0254 | 9.999  | 9.999  |

## 第四章 SS400 和 X52 升降级实验研究

本章中采用满足归并后成分范围内的坯料,通过改变轧制和冷却工艺提高钢材产品的力学性能,进行柔性化生产的实验研究。产品标准中与 SS400 和 X52 相邻力学性能级别的产品要求如表 4.1 和表 4.2 所示。

表 4.1 与 X52(S360)性能相近牌号钢种的力学性能

Table 4.1 The mechanical properties of steel grades approach X52(S360) property

| 牌号  | 拉伸试验 <sup>a</sup>                   |                                   |                                     |                                | 180°弯曲试验 <sup>a</sup><br>a—试样厚度<br>d—弯曲直径 |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---|
|     | 屈服强度<br>R <sub>0.5</sub> , MPa<br>≥ | 抗拉强度<br>R <sub>m</sub> , MPa<br>≥ | 断后伸长率, % ≥                          |                                |   |
|     |                                     |                                   | 标距 <sup>b</sup>                     |                                |   |
|     |                                     |                                   | L <sub>0</sub> =5.65√S <sub>0</sub> | L <sub>0</sub> =50 mm          |   |
| X46 | 320                                 | 435                               | 20                                  | A <sub>50mm</sub> <sup>c</sup> | d=2a                                      |
| X52 | 360                                 | 460                               | 19                                  |                                |   |
| X56 | 390                                 | 490                               | 18                                  |                                |   |

注: c 标距为 50mm 时断后伸长率最小值按下式计算:

$$A_{50mm} = 1956 \frac{S_0^{0.2}}{R_m^{0.9}} \tag{4-1}$$

式中: A<sub>50mm</sub> — 断后伸长率最小值, %;  
S<sub>0</sub> — 拉伸试样原始横截面积, mm<sup>2</sup>;  
R<sub>m</sub> — 规定的最小抗拉强度, MPa。

表 4.2 与 SS400 性能相近牌号钢的力学性能

Table 4.2 The mechanical properties of steel grades approach SS400 property

| 牌号    | 拉伸试验 <sup>a</sup> |      |              |                                  |                                 |            | 180°<br>弯曲<br>试验 <sup>b</sup><br>弯曲<br>直径 | V 型冲击<br>试验 <sup>c</sup> |  |
|-------|-------------------|------|--------------|----------------------------------|---------------------------------|------------|---|--------------------------|--|
|       | 上屈服强度,<br>MPa     |      | 抗拉强度,<br>MPa | 断后伸长率, %                         |                                 |            |   |                          |  |
|       |                   |      |              | L <sub>0</sub> =50 mm<br>b=25 mm | L <sub>0</sub> =200mm<br>b=40mm |            |   |                          |  |
|       | 公称厚度, mm          |      |              | ≤5                               | 5~16                            | >16        |   |                          |  |
|       | ≤16               | >16  | ≤5           | 5~16                             | >16                             | 试验温度,<br>℃ |   | 冲击<br>功, J               |  |
| SS330 | ≥205              | ≥195 | 330~430      | ≥26                              | ≥21                             | ≥26        | 1a  |                          |  |
| SS400 | ≥245              | ≥235 | 400~510      | ≥21                              | ≥17                             | ≥21        | 3a  |                          |  |
| SS490 | ≥285              | ≥275 | 490~610      | ≥19                              | ≥15                             | ≥19        | 4a  |                          |  |

注: a 拉伸试验取横向试样; 屈服现象不明显时, 采用 R<sub>p0.2</sub>; 对拉伸试验取 L<sub>0</sub>=50mm, b=25mm 的试样, 即为 GB/T228 中 P14 试样;

b 弯曲试验取横向试样, 仲裁试验时试样宽度为 35mm;

c 冲击试验去纵向试样, 冲击试验仅适用于厚度不小于 12.0mm 的产品。

X46、X52 和 X56 三个钢种牌号钢的化学成分交集为： $C \leq 0.24$ ， $Si \leq 0.35$ ， $Mn \leq 1.40$ ， $P \leq 0.03$ ， $S \leq 0.03$ ；对于公称厚度小于 12.7mm 的 SS330、SS400 和 SS490 三种牌号钢化学成分交集为： $C \leq 0.15$ ， $Si \leq 0.25$ ， $Mn \leq 0.95$ ， $P \leq 0.035$ ， $S \leq 0.035$ 。

柔性化轧制要求在同一钢种成分下通过不同的工艺生产不同性能级别的产品，因此首先在实验室的条件下模拟现场热轧工艺(如表 4.3) 研究与现场条件下达到的力学性能的差别。然后，根据现场工艺约束条件，采用极限工艺制度探索所能达到的力学性能的上下限，寻找该钢种成分条件下可以实现的升降级级别。

表 4.3 X52 和 SS400 实际生产时控制的工艺参数  
Table 4.3 The processing parameter in real production control of X52&SS400

| 钢种    | 成品厚度,mm | 精轧入口温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ |
|-------|---------|----------|--------|--------|
| X52   | 6~8     | 1030±20  | 860±20 | 560±20 |
| SS400 | 6~12.7  | 1000±20  | 890±20 | 680±20 |

表 4.4 X52 和 SS400 的化学成分  
Table 4.4 Chemical composition of X52&SS400

| 坯料    | C, % | Si, % | Mn, % | P, % | S, %  | Nb, % | Ti, % | Al, % |
|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| X52   | 0.08 | 0.2   | 1.2   | 0.02 | 0.005 | 0.02  | 0.015 | 0.03  |
| SS400 | 0.14 | 0.17  | 0.45  | 0.02 | 0.01  |       | 0.035 | 0.03  |

根据归并后的成分范围，选择坯料的化学成份如表 4.4 所示。试验用钢的坯料尺寸分别为： $88\text{mm} \times 101\text{mm} \times 120\text{mm}$ (X52)； $88\text{mm} \times 102\text{mm} \times 119\text{mm}$ (SS400)。试验时采用的压下制度如表 4.5 所示，模拟现场轧制工艺制度并考虑实验室热轧轧机弹跳，设定中间坯厚度与成品厚度分别为 38mm 和 5mm。

表 4.5 X52 和 SS400 轧制压下制度  
Table 4.5 The rolling reduction system of X52&SS400

| 参数     | 粗轧 |      | 精轧   |      |      |    |      |      |      |     |
|--------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|-----|
|        |    |      | 1    | 2    | 3    | 4  | 5    | 6    | 7    |     |
| 辊缝值,mm | 88 | 58   | 38   | 24.5 | 15.5 | 11 | 8    | 6.5  | 5.5  | 5   |
| 压下率,%  |    | 34.1 | 34.5 | 35.5 | 36.7 | 29 | 27.3 | 18.8 | 15.4 | 9.1 |

热轧工艺路线如图 4.1，曲线 1 热轧工艺的示意曲线。在本实验中，通过改变终轧温度、冷却速度和卷取温度，获得不同的铁素体晶粒尺寸、铁素体/珠光体相比比例，最终得到不同的力学性能，实现产品的升降级轧制。

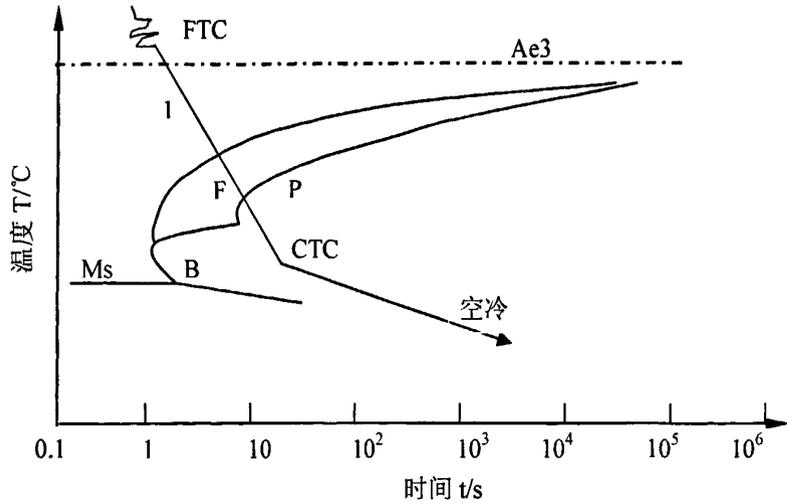


图 4.1 低碳钢的连续冷却转变曲线(CCT)示意图  
Fig.4.1 The CCT sketch map of low carbon steel

## 4.1 第一次试验

### 4.1.1 工艺制度

分析与 X52 和 SS400 级别相邻的钢种的性能, 结合实际生产时的工艺制度, 制定了两者轧制试验时的三种工艺路线如下表 4.6 和表 4.7。实验首先分别设定一块坯料(1#)来模拟实际生产工艺, 并考虑现场设备能力对卷取温度要求和层流冷却时的最大温降等, 分别设定了第二种模拟“高温轧制、高温卷取”和第三种模拟“低温轧制、低温卷取”两种轧制工艺制度。坯料出炉后开始粗轧, 再按设定的温度进入精轧。

表 4.6 X52 实验工艺制度

Table 4.6 The experimental processing system of X52

| 参数  | 加热温度, °C | 精轧开始温度, °C | 终轧温度, °C | 卷取温度, °C |
|-----|----------|------------|----------|----------|
| X 1 |          | 1000       | 860      | 580      |
| X 2 | 1200     | 1050       | 930      | 700      |
| X 3 |          | 950        | 810      | 450      |

表 4.7 SS400 实验工艺制度

Table 4.7 The experimental processing system of SS400

| 参数  | 加热温度, °C | 精轧开始温度, °C | 终轧温度, °C | 卷取温度, °C |
|-----|----------|------------|----------|----------|
| S 4 |          | 1000       | 890      | 680      |
| S 5 | 1200     | 1050       | 940      | 740      |
| S 6 |          | 950        | 800      | 450      |

## 4.1.2 实验过程

### 4.1.2.1 加热制度

加热开始时间： 8 : 50 炉温： 164℃；

加热到目标温度： 15 : 20 炉温： 1197℃；

保温时间： 30 分钟。

### 4.1.2.2 轧制与冷却数据

本试验使用的轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学) 450 热轧实验机组进行热轧实验, 水冷采用层流冷却的方式(前段 2 组+后段 4 组)。试验时先让终轧后的钢板通过 6 组水管, 测钢板的温度, 若不符合卷取温度的要求, 则再让钢板返回通过 6 组水管。由于本次实验在冬天进行, 冷却水温较低, 获得了较高的冷却速率。

X3 的终轧温度为 880℃ 高于设定值, 待温到 814℃ 后进入层流冷却。现场生产时主要采用机架间冷却水控制温度, 实验室条件下可以适当降低精轧开始温度, 或者降低轧制速度的方法控制终轧温度。

表 4.8 X52 实验实测工艺参数

Table 4.8 The experiment actual measurement processing parameter of X52

| 参数  | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃   | 水组开,组 | 水冷时间,s |
|-----|----------|--------|----------|-------|--------|
| X 1 | 设定值      | 1000   | 860      | 580   |        |
|     | 实测       | 1000   | 869      | 447   | 12     |
| X 2 | 设定值      | 1050   | 930      | 700   |        |
|     | 实测       | 1048   | 937      | 490   | 12     |
| X 3 | 设定值      | 950    | 810      | 450   |        |
|     | 实测       | 962    | 880, 814 | 446   | 12     |

相对于 X52, SS400 的温度控制精度较高; 但 S6 同样由于精轧开轧温度设定较高, 而导致终轧温度过高, 待温后进入层流冷却。

表 4.9 SS400 实验实测工艺参数

Table 4.9 The experiment actual measurement processing parameter of SS400

| 参数  | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃   | 水组开,组 | 水冷时间,s |
|-----|----------|--------|----------|-------|--------|
| S 4 | 设定值      | 1000   | 890      | 680   |        |
|     | 实测       | 1003   | 891      | 687   | 6      |
| S 5 | 设定值      | 1050   | 940      | 740   |        |
|     | 实测       | 1057   | 935      | 710   | 6      |
| S 6 | 设定值      | 950    | 800      | 450   |        |
|     | 实测       | 948    | 884, 804 | 416   | 12     |

### 4.1.3 试验结果及分析

#### 4.1.3.1 金相照片

采用 GZ4208 型金属带锯床，按图 4.2 所示分别切取 2 个金相和 3 个拉伸试样。由于试样宽度不能满足拉伸试样的长度要求，因此未进行横向力学性能的测试。

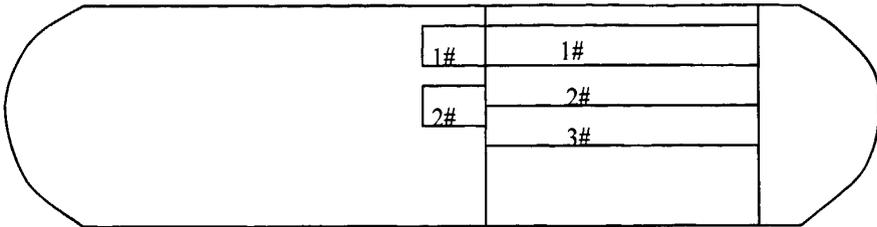


图 4.2 金相试样和拉伸试样的取样位置

Fig.4.2 The sampling taking position of metallographic specimen and tensile sample

金相试样的尺寸为  $7 \times 15 \times 20\text{mm}$ ，对 1# 试样研磨  $7 \times 20\text{mm}$  面观察轧件纵截面，而对 2# 试样研磨  $7 \times 15\text{mm}$  面观察轧件横截面。按照 100#、400#、800#、1200#、1500#(水磨)的研磨顺序，每换一次砂纸将试样转 90 度进行研磨，最后在抛光机上抛光。再用酒精擦拭、吹干，然后用 4% 的硝酸酒精溶液中腐蚀 10 秒钟左右，用酒精冲洗后吹干，在电子显微镜下观察微观组织。

图 4.3 为 X52 在不同的工艺下的金相照片，可以看出主要由铁素体和珠光体组成。用直线截点法测量计算 X1、X2 和 X3 的每毫米内截点数(P1)分别为：257.3、219.3 和 151.8。查 GB/T6394—2002 表 5 得它们的晶粒度级别数(G)大小分别为：12.5、12.5 和 11，直线截点法的精确度为  $\pm 0.25$ 。晶粒度级别数越高反应试样晶粒越细小，由此可以看出试样 X1 和 X2 两者的晶粒大小相近，且 X1 略比 X2 细小，X3 的晶粒相对较粗大。

试样 X1 的平均晶粒直径在  $4 \sim 5\mu\text{m}$  范围内，从图 4.3(a)X1 的典型金相照片可以看出，晶粒内主要为多边形、部分为针状铁素体，其面积比例占一半以上，晶粒金相照片中显示有很多层片状的珠光体，经测量分析金相照片铁素体面积占 75% 左右；试样 X2 的平均晶粒直径在  $5\mu\text{m}$  左右，组织为大量多边形铁素体加少量珠光体和极少量的针状铁素体，图 4.3(b)X2 的典型金相照片与 X1 相比，它们的晶粒大小相当，其铁素体含量比例稍大，接近 80%，珠光体晶粒相对较小；试样 X3 的平均晶粒直径为  $8\mu\text{m}$  左右，其晶粒大小相对比较均匀相对前两个试样晶粒长大了很多，且多边形铁素体面积比例较大，占 85% 左右。

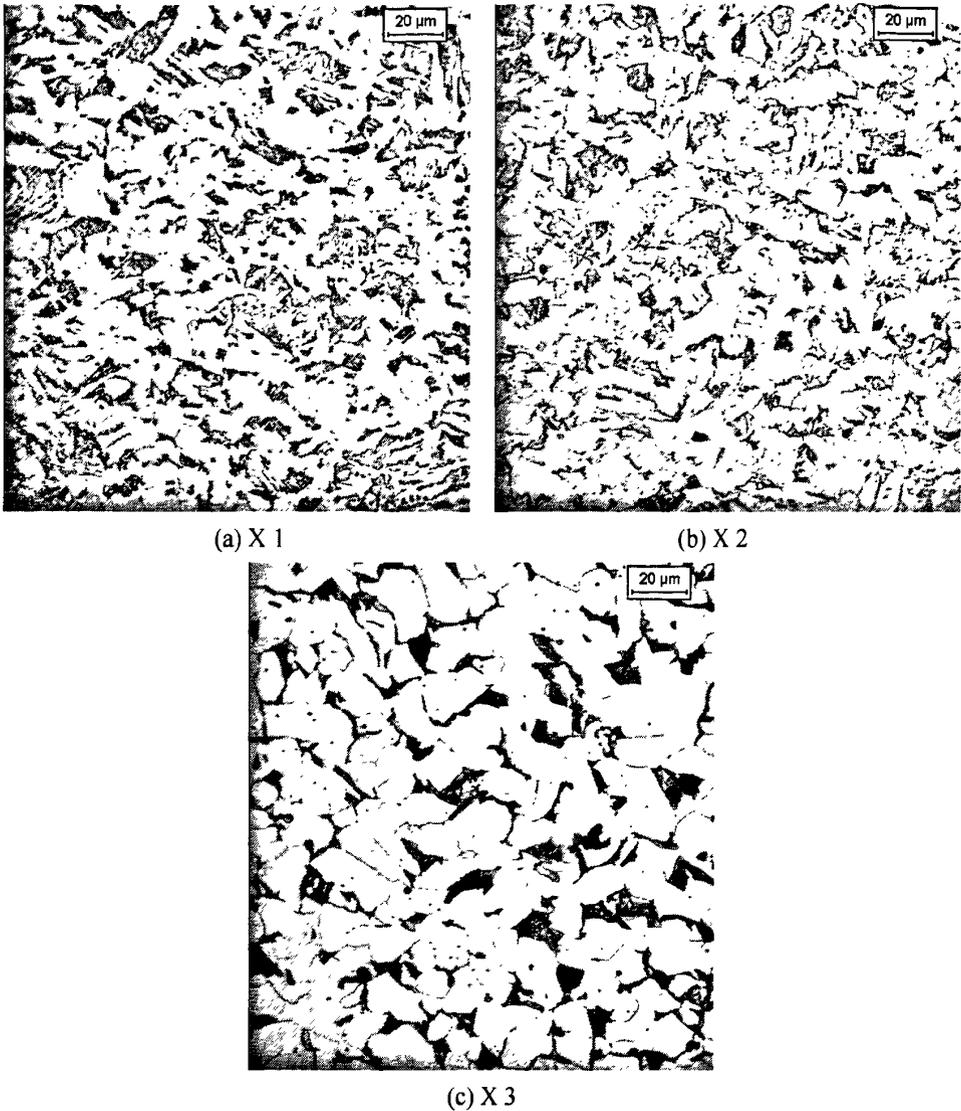
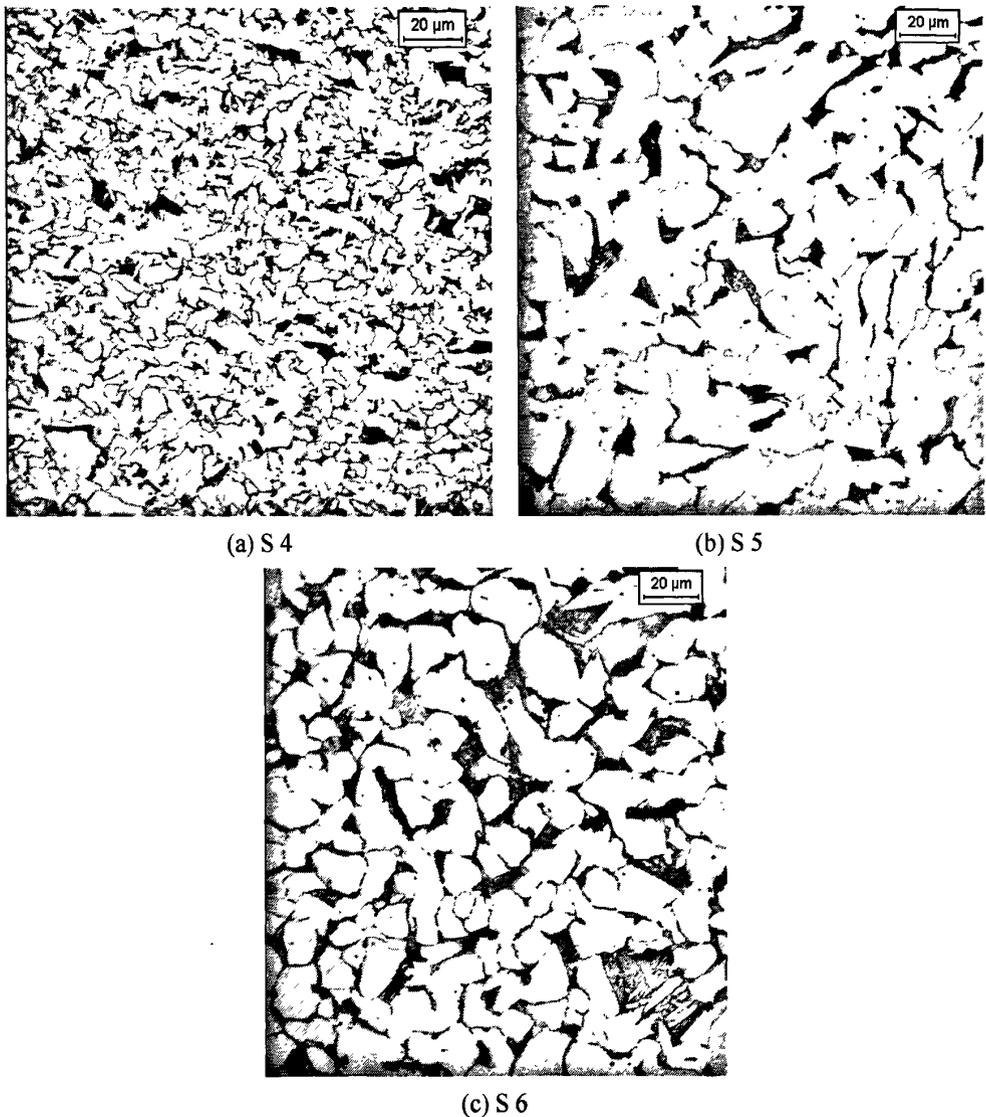


图 4.3 X52 热轧实验典型金相照片

Fig.4.3 The typical tensile sample of X52 hot rolling experiment

图 4.4 为 SS400 不同工艺下的金相照片，主要由铁素体和珠光体组成。用直线截点法测量计算 S4、S5 和 S6 的每毫米内截点数(P1)分别为：213.1、144.1 和 124.6。查 GB/T6394—2002 表 5 得它们的晶粒度级别数(G)分别为：12、11 和 10.5。

图 4.4(a)试样 S4 的晶粒平均直径最小，平均晶粒直径在 5 $\mu$ m 左右，金相照片中显示大部分面积为多边形铁素体组织，还有少量针状铁素体，经测量分析金相照片铁素体面积比例占 85%左右；直观看上去，试样 S5 的晶粒较大，而且个别晶粒是此次 SS400 三块热轧实验中最粗大的，由于它的晶粒整体相差较大，其平均晶粒平均直径比 S6 小，接近 8 $\mu$ m，铁素体面积比例接近 90%；S6 晶粒大小比较均匀，平均晶粒直径大于 9 $\mu$ m，铁素体含量相对较少，占 75%左右。



(a) S 4

(b) S 5

(c) S 6

图 4.4 SS400 热轧实验典型金相照片

Fig.4.4 The tylical tensile sample of SS400 hot rolling experiment

#### 4.1.3.2 拉伸实验

拉伸试样如图 4.5，它的尺寸是根据国家标准要求计算如下：

$$a=7\text{mm}, b=12.5\text{mm};$$

$$L_0=5.65 \times \sqrt{s_0}=5.65 \times \sqrt{7 \times 12.5}=52.85\text{mm} \text{ 取 } 50\text{mm};$$

$$L_c=L_0+1.5 \times \sqrt{s_0}=64.04\text{mm} \text{ 取 } 70\text{mm};$$

拉伸试样在常温下以 4mm/min 的速度在微机控制电子万能试验机上进行拉伸实验，记录材料的屈服强度和抗拉强度，输出应力-应变曲线，拉伸试验结果如下表。在图 4.2 中试样的取样位置可以知道，1#拉伸试样靠近板材的边部，由于板的边部冷却速度相对较快，得到的组织相对较细，其屈服强度值也偏高。将每个试样上的三个拉伸试样所得

的力学性能取平均值。

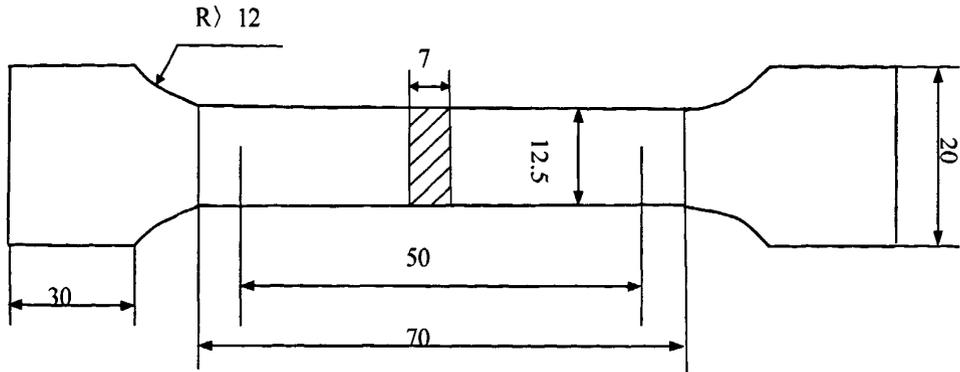


图 4.5 拉伸试样尺寸

Fig.4.5 Tensile sample dimension

由表 4.10 可以看出, X1 和 X2 获得了较高的屈服强度和抗拉强度, 延伸率比 X3 低。X3 的层流冷却工艺实际相当于现场采用的后段冷却方式, 强度降低, 但获得了最低的屈强比。当前结果表明, 后段冷却方式是一种降低屈强比的有效手段。由于较大的冷却速率, X2 的强度也较高, 而延伸率较低。

表 4.10 X52 热轧实验力学性能检测结果

Table 4.10 The mechanical properties measuring results of X52 hot rolling

| 编号  | 抗拉强度, MPa | 屈服强度, MPa | 屈强比  | 伸长率, % |
|-----|-----------|-----------|------|--------|
| X 1 | 536       | 435       | 0.80 | 29.3   |
| X 2 | 528       | 444       | 0.85 | 28.8   |
| X 3 | 454       | 340       | 0.74 | 33.9   |

由表 4.11 可以看出, S4 在较大冷速下获得了最高的屈服强度和抗拉强度, 相应的延伸率也是最低的, 达到 SS490 的力学性能要求。S5 由于层流冷却终冷温度为 710℃, 仍然处于铁素体区, 因此铁素体晶粒在后续空冷过程中长大, 屈服与抗拉强度最低, 接近于 SS330 性能要求。S6 类似于 X3 为后段冷却方式下, 强度也较低。

表 4.11 SS400 热轧实验力学性能检测结果

Table 4.11 The mechanical properties measuring results of SS400 hot rolling

| 编号  | 抗拉强度, MPa | 屈服强度, MPa | 屈强比  | 伸长率, % |
|-----|-----------|-----------|------|--------|
| S 4 | 512       | 444       | 0.86 | 33.1   |
| S 5 | 436       | 317       | 0.7  | 34.6   |
| S 6 | 458       | 339       | 0.73 | 35.1   |

## 4.2 第二次试验

### 4.2.1 工艺制度

在第一次热轧试验时低温轧制工艺对应的试样存在精轧开始温度过高，导致终轧温度高于设定值的现象，本次试验采用和上次试验相同的轧制道次和压下率，X52 设定 4 种工艺方案，包括“高温轧制、高温卷曲”和“低温轧制、低温卷曲”，以及两种中间工艺摸索；SS400 设定 3 种工艺方案，包括“低温轧制、低温卷取”和中间工艺摸索。

表 4.12 X52 实验工艺制度

Table 4.12 The experimental processing system of X52

| 参数  | 加热温度,℃ | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ |
|-----|--------|----------|--------|--------|
| X 1 | 1200   | 1050     | 930    | 700    |
| X 2 |        | 980      | 870    | 580    |
| X 3 |        | 960      | 860    | 500    |
| X 4 |        | 910      | 810    | 450    |

表 4.13 SS400 实验工艺制度

Table 4.13 The experimental processing system of SS400

| 参数  | 加热温度,℃ | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ |
|-----|--------|----------|--------|--------|
| S 5 | 1200   | 1000     | 890    | 540    |
| S 6 |        | 960      | 850    | 500    |
| S 7 |        | 900      | 800    | 450    |

## 4.2.2 实验过程

### 4.2.2.1 加热制度

加热开始时间： 8：30 炉温：124℃

加热到目标温度： 13：40 炉温：1196℃

保温时间： 120 分钟

### 4.2.2.2 轧制与冷却数据

表 4.14 X52 实验实测工艺参数

Table 4.14 The experiment actual measurement processing parameter of X52

| 参数  | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ | 水组开,组 |
|-----|----------|--------|--------|-------|
| X 1 | 设定值      | 1050   | 930    | 700   |
|     | 实际       | 1049   | 891    | 722   |
| X 2 | 设定值      | 980    | 870    | 580   |
|     | 实际       | 1002   | 871    | 615   |
| X 3 | 设定值      | 960    | 860    | 500   |
|     | 实际       | 980    | 876    | 527   |
| X 4 | 设定值      | 910    | 810    | 450   |
|     | 实际       | 895    | 821    | 480   |

层流冷却过程中，钢板首先经过“前段 2 组+后段 4 组”集管冷却，测量钢板温度是否满足目标卷曲温度，然后判断需继续经过多少组集管冷却。X52 与 SS400 热轧实验实测工艺数据如表 4.14 与表 4.15 所示，可以看出本次实验温度控制精度得到了提高，但总体而言，终轧温度由于影响因素较少、轧制过程稳定而获得了更高的控制精度。

表 4.15 SS400 实验实测工艺参数

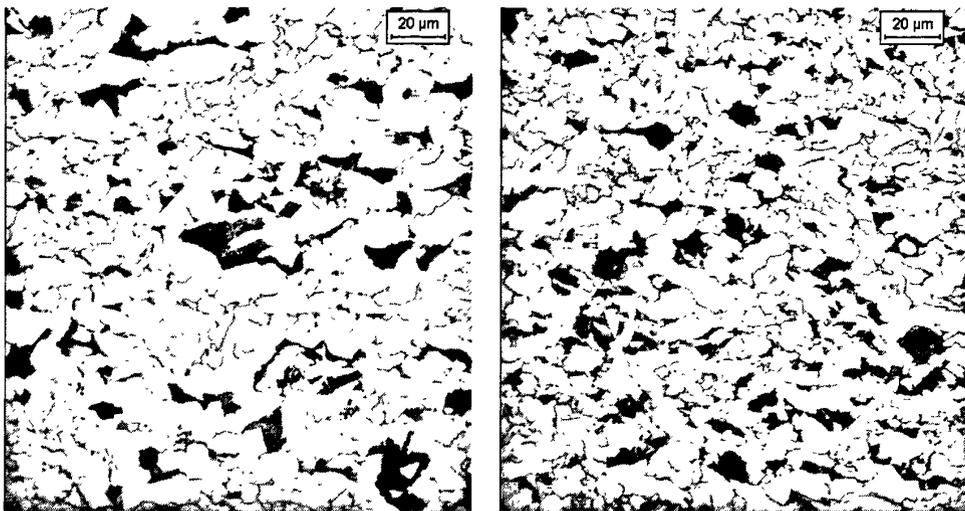
Table 4.15 The experiment actual measurement processing parameter of SS400

| 参数  | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ | 水组开,组 |
|-----|----------|--------|--------|-------|
| S 5 | 设定值      | 1000   | 890    | 540   |
|     | 实际       | 1001   | 881    | 500   |
| S 6 | 设定值      | 960    | 850    | 500   |
|     | 实际       | 910    | 844    | 580   |
| S 7 | 设定值      | 900    | 800    | 450   |
|     | 实际       | 897    | 811    | 470   |

### 4.2.3 实验结果及分析

#### 4.2.3.1 金相照片

图 4.6 所示本次试验 X52 在不同的工艺下所得的金相照片，主要是铁素体和珠光体组织。用直线截点法测量计算四个试样的每毫米内截点数(P1)分别为：193.2、202.3、261.5 和 234.4。查 GB/T6394—2002 表 5 得它们的晶粒度级别数(G)大小分别为：12、12、13 和 12.5，直线截点法的精确度为±0.25。观察几者的金相照片对应相应的晶粒度级别数的大小值，可得试样的晶粒由小到大的顺序为：X3、X4、X2、X1。其中 X1 和 X2 两者的晶粒大小相近。



(a) X 1

(b) X 2

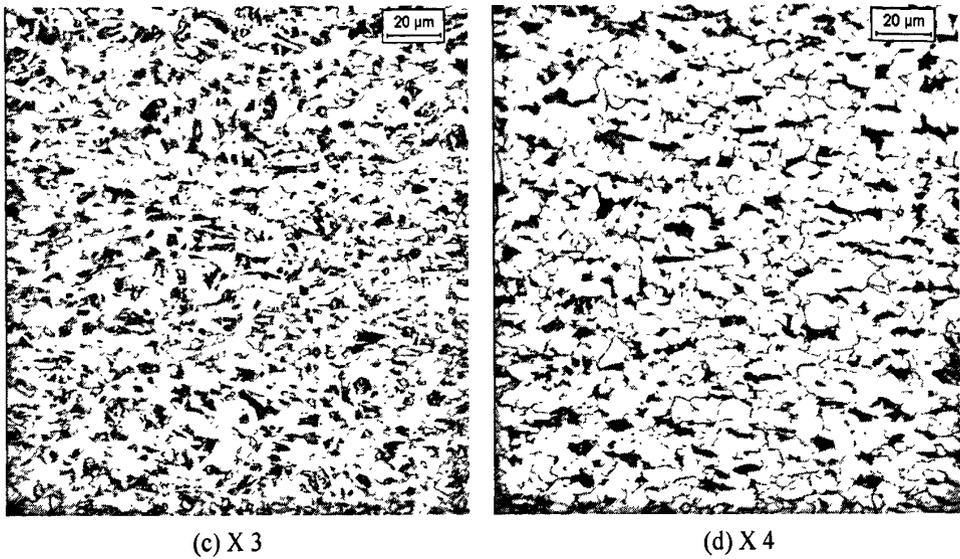


图 4.6 X52 热轧实验典型金相照片

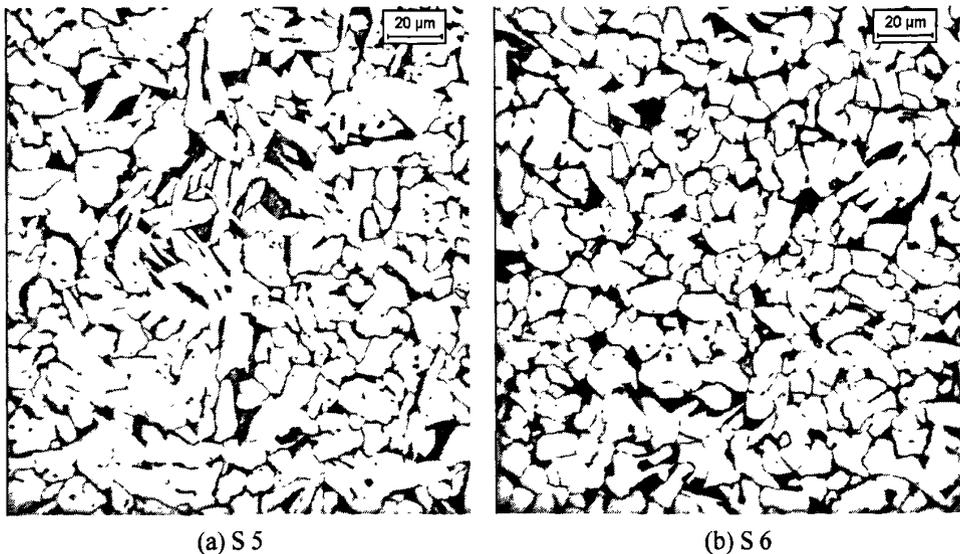
Fig.4.6 The typical tensile sample of X52 hot rolling experiment

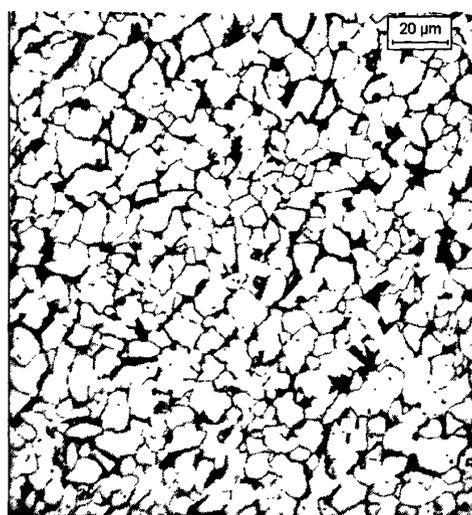
试样 X1 的平均晶粒直径在  $6\mu\text{m}$  左右, 从图 4.6(a)可以看出, 晶粒内的多边形铁素体的含量占绝大多数, 且存在一些尺寸较大的铁素体, 只有少量的大块珠光体, 经测量分析金相照片中铁素体面积比例占近 90%;

试样 X2 的晶粒平均直径比 X1 的稍小, 在  $5\sim 6\mu\text{m}$  的范围内, 而且其晶粒大小比较接近, 铁素体面积所占的比例与 X1 相比稍小, 大概在 85%左右;

试样 X3 的晶粒是此次试验 4 个 X52 试样中最细小的, 平均晶粒直径接近达到  $4\mu\text{m}$ , 金相照片中的晶粒均匀细小, 铁素体面积比例相对前面几个试样较少, 在 80%左右, 同时可能有其它组织贝氏体等存在;

试样 X4 的晶粒相对于 X1 和 X2 来说均匀细小, 平均直径小于  $5\mu\text{m}$ , 它的多边形铁素体面积比例也均在 85%左右。





(c) S 7

图 4.7 SS400 热轧实验典型金相照片

Fig.4.7 The tylical tensile sample of SS400 hot rolling experiment

图 4.7 为 SS400 在不同工艺下所得的金相照片，由多边形铁素体和珠光体组成。用直线截点法测量计算四者的每毫米内截点数(P1)分别为：160.2、156.1 和 196.8。查 GB/T6394—2002 表 5 得它们的晶粒度级别数(G)分别为：11.5、11.5 和 12。观察金相照片对应相应的晶粒度级别，可得试样的晶粒由小到大的顺序为：S7、S6 和 S5。

试样 S5 的平均晶粒直径在 7 $\mu\text{m}$  左右，晶粒内有相对较大块的铁素体晶粒，且含有少量的魏氏组织，从图 4.7(a)可以看出晶粒内大部分面积均是铁素体组织，经测量计算其面积比例占 85%左右；

试样 S6 的晶粒相对大小比较均匀，晶粒的平均直径与 S5 的相近，其珠光体含量多于试样 S5；

试样 S7 的晶粒相对前面两者更加均匀，测量其平均晶粒直径在 6 $\mu\text{m}$  以内，块状珠光体晶粒主要分布在多边形铁素体晶界的周围，而且大部分还没有长大，测量而知其铁素体的面积比例在 85%左右。

#### 4.2.3.2 拉伸实验

采用 4.1.3.2 节中的实验方法，测定力学性能结果如表 4.16 与表 4.17 所示。

表 4.16 X52 热轧实验力学性能测试结果

Table 4.16 The mechanical properties measuring results of X52 hot rolling

| 编号  | 抗拉强度, MPa | 屈服强度, MPa | 屈强比  | 伸长率, % |
|-----|-----------|-----------|------|--------|
| X 1 | 473       | 400       | 0.85 | 35.1   |
| X 2 | 497       | 420       | 0.85 | 33.8   |
| X 3 | 530       | 423       | 0.80 | 31.7   |
| X 4 | 510       | 445       | 0.87 | 32.6   |

由表 4.16 可以看出, X3 的抗拉强度是此次试验中的最高值, 屈服强度也比较高, 延伸率相应比较低。X6 的力学性能测试中, 拉伸应力-应变曲线中出现了连续屈服的现象, 对应于较低的屈强比。在所有轧制工艺中, X4 终轧温度最低(821℃), 在冷速相差不大的条件下, 获得了最高的屈服强度 445MPa, 抗拉强度相对并没有得到很大的提高, 导致了较高的屈强比。X2 模拟现场工艺, 冷却速率也比较接近于现场工艺控制范围 10~30℃/s, 从性能检测看, 采用相同工艺制度实验室条件下获得的力学性能比现场实际低 30MPa 左右。这主要是由于在模拟现场精轧阶段, 实验室单机架轧制道次间隔时间较长, 形变奥氏体发生了回复与再结晶。

表 4.17 SS400 热轧实验力学性能测试结果

Table 4.17 The mechanical properties measuring results of SS400 hot rolling

| 编号  | 抗拉强度, MPa | 屈服强度, MPa | 屈强比  | 伸长率, % |
|-----|-----------|-----------|------|--------|
| S 5 | 452       | 337       | 0.75 | 35.4   |
| S 6 | 453       | 360       | 0.79 | 33.7   |
| S 7 | 468       | 383       | 0.82 | 34.3   |

由表 4.17 可以看出, S7 具有最高的屈服强度和抗拉强度, 实现了“低温轧制低温卷取”提力高学性能的目的, 可以作为升级轧制的一种工艺制度。对于 S6, 相对较低的终轧温度获得了较高的屈服强度, 但由于实测卷取温度较高, 比设定值高出近 130℃, 抗拉强度并没有得到相应的提高。

### 4.3 第三次试验

#### 4.3.1 工艺制度

表 4.18 X52 实验工艺制度

Table 4.18 The experimental processing system of X52

| 参数  | 加热温度,℃ | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ |
|-----|--------|----------|--------|--------|
| X 1 |        | 970      | 860    | 470    |
| X 2 | 1200   | 910      | 820    | 440    |
| X 3 |        | 990      | 870    | 560    |

表 4.19 SS400 实验工艺制度

Table 4.19 The experimental processing system of SS400

| 参数  | 加热温度,℃ | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ |
|-----|--------|----------|--------|--------|
| S 4 |        | 1010     | 890    | 690    |
| S 5 | 1200   | 900      | 810    | 550    |

经过前面两次试验的研究, 还需要试验 X52 坯料在实际生产工艺和“低温轧制低温

卷取”的性能；SS400 坯料的升降级部分工艺还需要进一步试验，本次试验采用和前两次试验相同的轧制道次和压下率。X52 与 SS490 设定工艺制度如表 4.18 和表 4.19 所示。

### 4.3.2 实验过程

#### 4.3.2.1 加热制度

加热开始时间： 8 : 15

加热到目标温度： 13 : 30 炉温： 1200℃

保温时间： 60 分钟

#### 4.3.2.2 轧制与冷却数据

实验实测工艺数据如表 4.20 和 4.21 所示。

表 4.20 X52 实验实测工艺参数

Table 4.20 The experiment actual measurement processing parameter of X52

| 参数 | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ | 水组开,组 |    |
|----|----------|--------|--------|-------|----|
| X1 | 设定值      | 970    | 860    | 470   |    |
|    | 实际       | 965    | 866    | 580   | 12 |
| X2 | 设定值      | 910    | 820    | 440   |    |
|    | 实际       | 911    | 820    | 480   | 14 |
| X3 | 设定值      | 990    | 860    | 470   |    |
|    | 实际       |        | 850    | 590   | 14 |

表 4.21 SS400 实验实测工艺参数

Table 4.21 The experiment actual measurement processing parameter of SS400

| 参数 | 精轧开始温度,℃ | 终轧温度,℃ | 卷取温度,℃ | 水组开,组 |    |
|----|----------|--------|--------|-------|----|
| S4 | 设定值      | 1010   | 890    | 690   |    |
|    | 实际       | 1012   | 887    | 691   | 8  |
| S5 | 设定值      | 900    | 810    | 550   |    |
|    | 实际       | 914    | 832    | 540   | 14 |

由于冷却水温度较高，大约为 40~50℃，本次实验获得了最低的冷却速率。X52 温度控制精度相对较低，而通过调整后 SS400 温度控制相对较好。

### 4.3.3 实验结果及分析

#### 4.3.3.1 金相照片

图 4.8 为本次试验 X52 在不同的工艺下所得的金相照片，金相组织主要是多边形铁素体和珠光体。用直线截点法测量计算三个试样的每毫米内截点数(P1)分别为：247.5、

253 和 236.6。查 GB/T6394—2002 表 5 得它们的晶粒度级别数(G)大小全部为 12.5，直线截点法的精确度为±0.25。观察金相照片对应的晶粒度级别数，可得试样的晶粒由小到大的顺序为：X2、X1、X3。

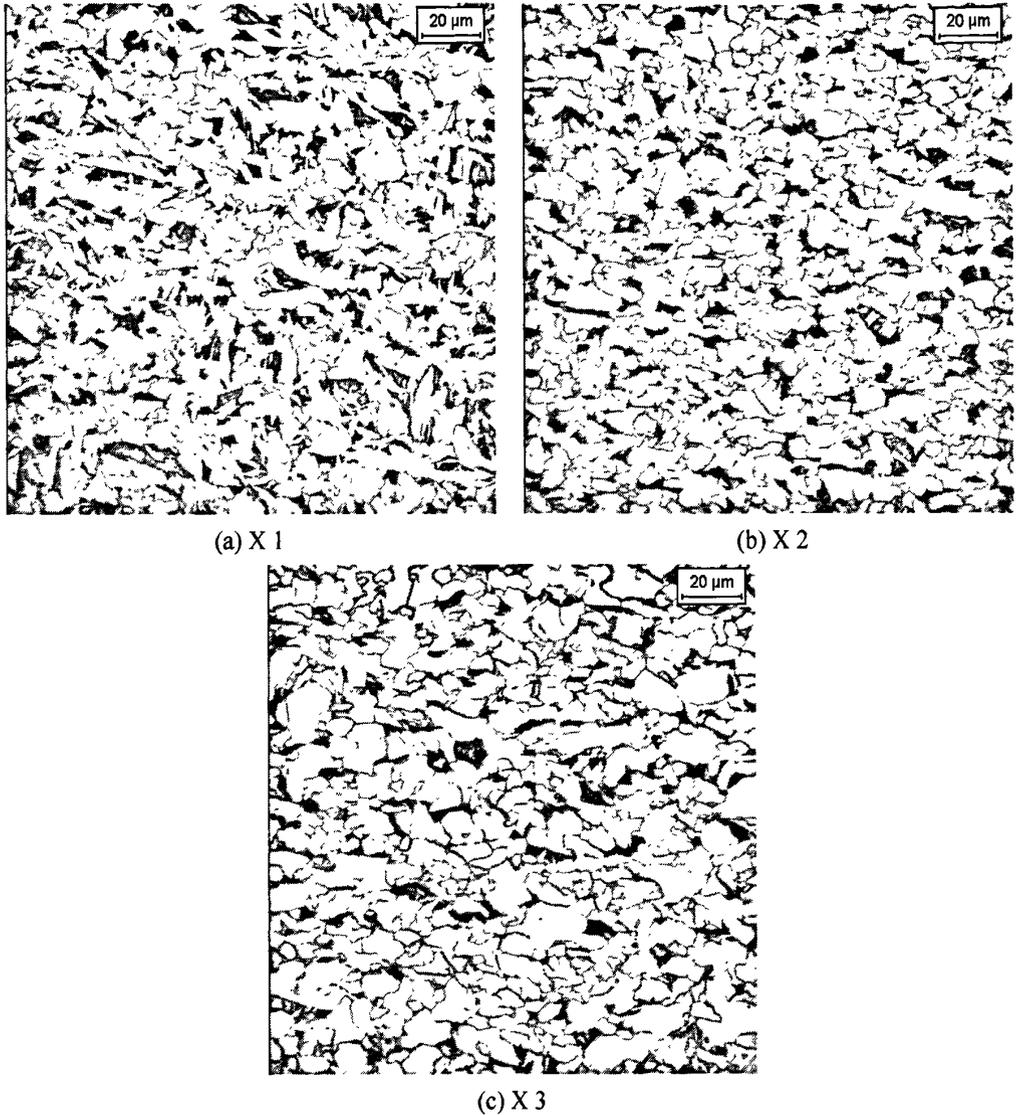


图 4.8 X52 热轧实验典型金相照片

Fig.4.8 The tylical tensile sample of X52 hot rolling experiment

本次试验试样 X1 晶粒平均直径大概为 5 $\mu\text{m}$ ，从图 4.8 X52 (a)可以看出，晶粒内大部分面积为多边形铁素体组织，并有少量针状铁素体存在，金相照片显示铁素体面积比例是此次 3 块 X52 试样中最低的，大概在 75%左右。

试样 X2 的晶粒平均直径在 4~4.5 $\mu\text{m}$  范围附近。晶粒比较细小规则，试样内的晶粒直径都大小相近。观察晶粒相的组成可知多边形铁素体的含量很高，其面积比例占到 90%左右。

试样 X3 的晶粒平均直径与 X1 的很接近，金相内有相对较大块的铁素体晶粒。测

量分析铁素体面积比例可知，占 90%左右。

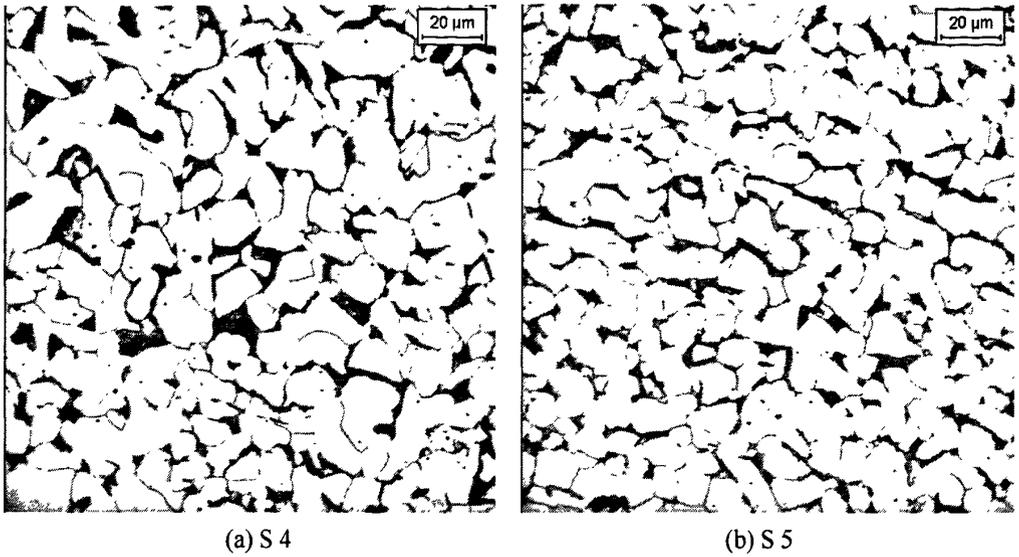


图 4.9 SS400 热轧实验典型金相照片

Fig.4.9 The tylical tensile sample of SS400 hot rolling experiment

图 4.9 为 SS400 在不同工艺下所得的金相照片，主要由铁素体和珠光体组成。用直线截点法测量计算两者的每毫米内截点数(P1)分别为：131 和 156.5。查 GB/T6394—2002 表 5 得它们的晶粒度级别数(G)分别为：11 和 11.5。观察金相照片对应的晶粒度级别数，可得试样的晶粒由小到大的顺序为：S5、S4。

试样 S4 的晶粒平均直径相对比较粗大，大概在 8μm 左右，从图 4.8(a)可以看出晶粒内大部分面积均是多边形铁素体组织，经测量计算它的面积比例占 90%左右。

试样 S5 的晶粒大小比较均匀，平均直径也比较小，大概为 7μm，金相照片中显示珠光体晶粒大小相对小于铁素体，铁素体的面积比例和试样 S4 的相近。

#### 4.3.3.2 拉伸实验

实测力学性能结果如表 4.22 和表 4.23 所示。

表 4.22 X52 热轧实验力学性能测试结果

Table 4.22 The mechanical properties measuring results of X52 hot rolling

| 编号  | 抗拉强度, MPa | 屈服强度, MPa | 屈强比  | 伸长率, % |
|-----|-----------|-----------|------|--------|
| X 1 | 510       | 422       | 0.83 | 32.7   |
| X 2 | 503       | 438       | 0.87 | 34.7   |
| X 3 | 492       | 410       | 0.84 | 35.2   |

试验过程中试样 X1 的 2#和 3#在拉伸时发生了靠近拉伸试样边部断裂的情况，使得测量断后长度值相对不准确，伸长率只采用了 1#试样的值，因此它的伸长率值误差较大。拉伸试验所得的结果显示，大部分试样的边部强度相对较高，但 X1 和 X2 的与此规律有偏差，可能是由于实验过程等引起的。

由表 4.22 可以看出, X1~X3 的抗拉强度波动较小, 屈服强度存在一定的差别。由于 X2 的终轧温度很低, 得到的屈服强度较高。从当前实验结果来看, 延伸率与抗拉强度成典型的反比关系。

表 4.23 SS400 热轧实验力学性能测试结果

Table 4.23 The mechanical properties measuring results of SS400 hot rolling

| 编号  | 抗拉强度, MPa | 屈服强度, MPa | 屈强比  | 伸长率, % |
|-----|-----------|-----------|------|--------|
| S 4 | 433.3     | 310       | 0.72 | 35.6   |
| S 5 | 441.7     | 325       | 0.74 | 37.4   |

由表 4.23 可知, S5 较低的终轧温度获得了较高的屈服强度; 但相对于 S4 较低的卷取温度, 抗拉强度没有得到明显的提升。

## 4.4 实验结果分析

### 4.4.1 X52 结果分析

三次实验 X52 试样的工艺和力学性能汇总得表 4.24。

表 4.24 X52 试样力学性能均值与工艺对照

Table 4.24 The mechanical properties equalizing value and process control of X52 samples

| 试验 | 试样      | 开轧温度, 终轧温度, 卷取温度, 水组开, 抗拉强度, 屈服强度, 伸长率, |          |     |    |       |       |      |
|----|---------|---|----------|-----|----|-------|-------|------|
|    |         | °C                                      | °C       | °C  | 组  | MPa   | MPa   | %    |
| 一  | X1 (1)  | 1000                                    | 869      | 447 | 12 | 535.8 | 435   | 29.3 |
|    | X2 (2)  | 1048                                    | 937      | 490 | 12 | 527.7 | 444   | 28.8 |
|    | X3 (3)  | 962                                     | 880, 814 | 446 | 12 | 453.6 | 340   | 33.9 |
| 二  | X1 (4)  | 1049                                    | 891      | 722 | 6  | 472.5 | 400   | 35.1 |
|    | X2 (5)  | 1002                                    | 871      | 615 | 10 | 496.7 | 420   | 33.8 |
|    | X3 (6)  | 980                                     | 876      | 527 | 10 | 530   | 422.5 | 31.7 |
|    | X4 (7)  | 895                                     | 821      | 480 | 10 | 510   | 445   | 32.6 |
| 三  | X1 (8)  | 965                                     | 866      | 580 | 12 | 510   | 421.7 | 32.7 |
|    | X2 (9)  | 911                                     | 820      | 480 | 14 | 503.3 | 438.3 | 34.7 |
|    | X3 (10) | 960                                     | 850      | 590 | 14 | 491.7 | 410   | 35.2 |

由表 4.24 可以看出, 试样 3 的抗拉强度和屈服强度值都是最低值, 是由于在轧制的过程中先轧制到终轧温度 880°C, 然后再空冷至 814°C, 相当于热轧现场的后段冷却模式, 使得在空冷的过程中发生了回复过程<sup>[24]</sup>, 一方面形变奥氏体晶粒得以长大, 另一方面在热轧过程中由压下而形成的形变带会在高温的条件下, 产生形变带内部的位错的相互抵消而不断消失, 而这些形变带本可以作为铁素体相变形核的有利位置<sup>[25]</sup>。由于相变

前的初始奥氏体晶粒长大以及有利形核位置的大量减少,铁素体形核率降低最终导致试样 3 的铁素体晶粒粗大。

由 Hall-Petch 公式可知,屈服强度和晶粒尺寸成反比。因此,试样 3 的屈服强度只达到了 340MPa,是 X52 三次热轧实验中获得屈服强度最低值。由此可知,终轧后的回复过程对后面的层流冷却过程中的铁素体相变具有较大的影响。与此同时,较低的卷取温度并没有起到相变强化的作用,试样 3 的抗拉强度也达到了最低值。但试样 3 的屈强比在 X52 的所有试验中最小,从实验的角度证明了采用后段冷却方式是降低屈强比的一个有效手段。

试样 1 和试样 2 的冷却速率最高,提高了相变过冷度,降低了  $\gamma$ - $\alpha$  的相变温度  $A_{r3}$ ,抑制相变铁素体晶粒的长大,从而促进铁素体晶粒明显细化,同时产生了小部分针状铁素体组织。由于针状铁素体内部存在很高的位错密度<sup>[26]</sup>,具有良好的强韧性,对提高组织的强度性能有一定的作用。此外,较大的冷却速率会延迟铌、钛微合金元素碳氮化物的析出<sup>[27,28]</sup>,使其在相变过程中析出,一方面能够有效的阻碍铁素体晶粒的长大,大大细化铁素体晶粒,一方面起到了析出强化的作用,使 X1 和 X2 获得了最高的屈服强度和抗拉强度。

试样 4 模拟了“高温轧制、高温卷取”工艺思路。由于终轧温度较高,形变奥氏体得到充分的回复与长大<sup>[29]</sup>,晶界面积减少,铁素体形核位置减少导致了粗大的铁素体晶粒。它的屈服强度和抗拉强度也是 X52 热轧试验除了试样 3 以外最低的,对应的伸长率达到了最大值的范围。

试样 7 和试样 9 模拟了“低温轧制、低温卷取”工艺思路,终轧温度低至 820℃左右,获得了较高的屈服强度和抗拉强度。由图 4.6 可以观察到试样 7 的晶粒沿轧制方向分布。在终轧结束后,奥氏体晶粒中产生了大量的扁平的形变带,增加铁素体相变的形核位置和形核速率;与此同时,低温轧制增加了应变累积的效果,促进碳氮化铌、碳氮化钛形变诱导析出,有效的细化了相变前的奥氏体组织,另一方面也会使奥氏体变形储存能增加,在随后的冷却过程中将促使大量细小的碳氮化物析出,对提高析出强化有明显的作用。

试样 5、试样 6 和试样 8 模拟了中间工艺制度,三者终轧温度相差不大,屈服强度也几乎相同,但低于试样 7 的屈服强度。而试样 6 中针状铁素体的存在,很大程度上提高了抗拉强度。

### 4.4.2 SS400 结果分析

三次实验 SS400 试样的工艺和力学性能汇总得表 4.25。

表 4.25 SS400 试样力学性能均值与工艺对照

Table 4.25 The mechanical properties equalizing value and process control of SS400 samples

| 试验 | 试样     | 开轧温度,<br>℃ | 终轧温度,<br>℃ | 卷取温度,<br>℃ | 水组开,<br>组 | 抗拉强度,<br>MPa | 屈服强度,<br>MPa | 伸长率,<br>% |
|----|--------|------------|------------|------------|-----------|--------------|--------------|-----------|
| 一  | S4 (1) | 1003       | 891        | 687        | 6         | 512          | 443.3        | 33.1      |
|    | S5 (2) | 1057       | 935        | 710        | 6         | 436.2        | 316.7        | 34.6      |
|    | S6 (3) | 948        | 884, 804   | 416        | 12        | 457.9        | 339          | 35.1      |
| 二  | S5 (4) | 1001       | 881        | 500        | 9         | 451.7        | 336.7        | 35.4      |
|    | S6 (5) | 910        | 844        | 580        | 9         | 453.3        | 360          | 33.7      |
|    | S7 (6) | 897        | 811        | 470        | 10        | 468.3        | 383.3        | 34.3      |
| 三  | S4 (7) | 1012       | 887        | 691        | 8         | 433.3        | 310          | 35.6      |
|    | S5 (8) | 914        | 832        | 540        | 14        | 441.7        | 325          | 37.4      |

与 X52 试样 3 相同，由于终轧后待温至 804℃ 进入层流冷却，试样 3 的铁素体晶粒粗大，屈服强度和抗拉强度都较低。

试样 1 采用的是 SS400 现场热轧工艺制度，但冷却速率远高于现场层流冷速，获得了细小的铁素体晶粒，其性能也相对较高<sup>[30]</sup>。试样 7 与试样 1 工艺制度接近，但冷却速率远远低于试样 1，导致了较低的屈服强度和抗拉强度。

试样 2 模拟了“高温轧制、高温卷取”的工艺思路，由于终轧温度很高，并且层流冷却结束后仍处于铁素体相变区，铁素体晶粒继续长大导致了最低的屈服强度和抗拉强度值。

试样 6 模拟了“低温轧制、低温卷取”的工艺思路，铁素体晶粒较小；但由于冷却速率细化晶粒的效果更明显，试样 6 的冷却速率相对低很多，其屈服强度比试样 1 低 56.7MPa。

试样 4、5 和 8 模拟了中间工艺制度，力学性能也处于中间水平。

综上分析可得：

(1) 相同的冷却速率条件下，终轧温度是影响铁素体晶粒直径最重要因素之一，进而决定屈服强度的大小，屈服强度随终轧温度升高成降低的趋势，如图 4.10 和 4.11；

(2) 冷却速率是影响铁素体晶粒直径的另外一个主要因素，并且与卷取温度共同决定相变强化的作用大小；

(3) 后段式冷却是降低热轧板带屈强比的一个重要手段。

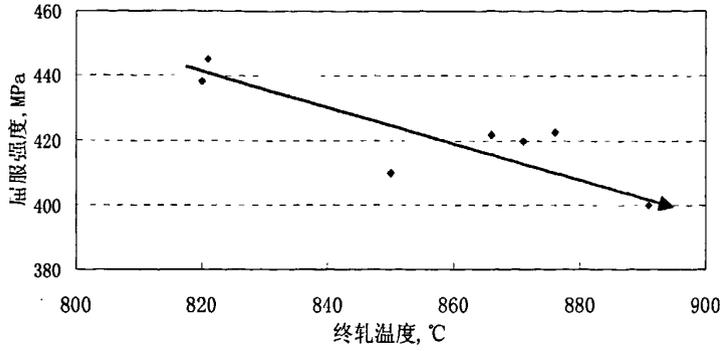


图 4.10 X52 热轧试验屈服强度与终轧温度趋势图

Fig.4.10 Yield strength and finishing temperature tendency chart of X52 hot rolling experiment

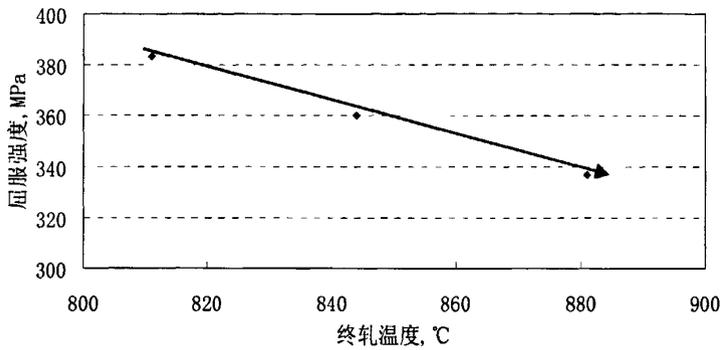


图 4.11 SS400 热轧试验屈服强度与终轧温度趋势图

Fig.4.11 Yield strength and finishing temperature tendency chart of SS400 hot rolling experiment

### 4. 4. 3 升降级轧制结果分析

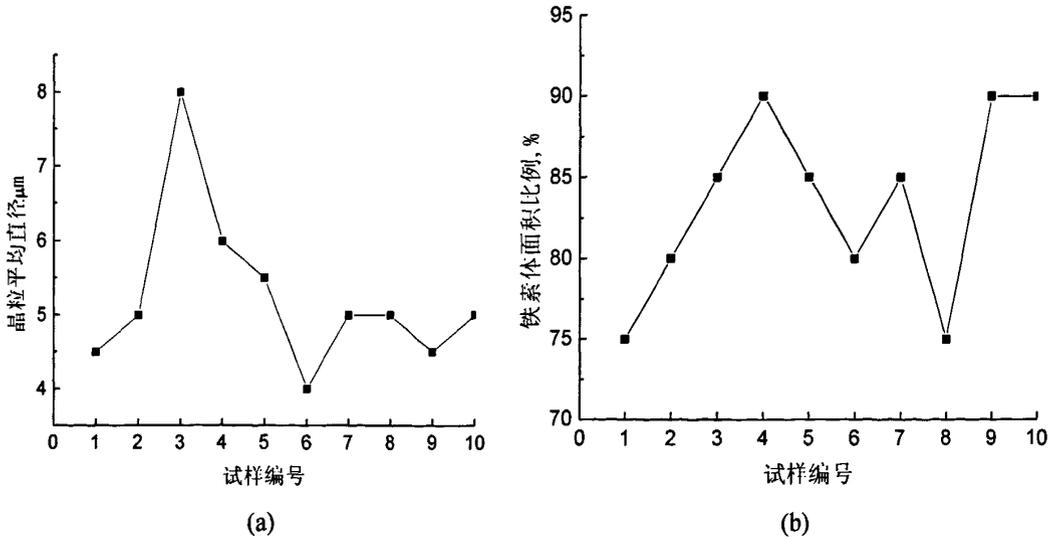


图 4.12 试样 X52 晶粒大小与铁素体比例统计

Fig.4.12 Grain size and area ratio statistics of X52 samples

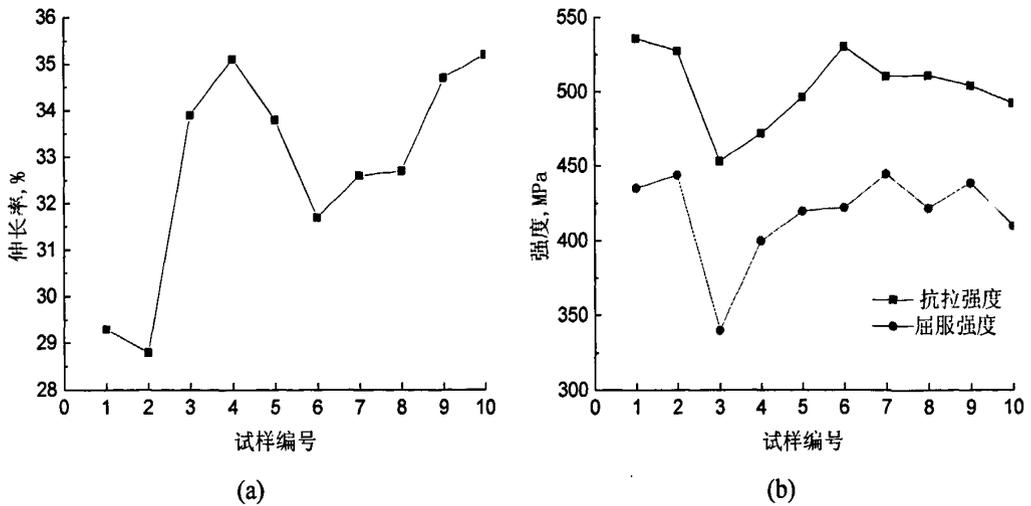


图 4.13 试样 X52 性能结果统计

Fig.4.13 Properties results statistics of X52 samples

由图 4.12 和图 4.13 可知，力学性能与晶粒尺寸、铁素体含量对应关系明显；抗拉强度主要在 500MPa 左右的较多，但同时也有明显高于和低于该范围的性能存在，最低值为 453.6MPa，最高值达到了 535.8MPa；屈服强度均大于 340MPa 的范围，最高值达到了近 450MPa，延伸率均满足 X46、X52 和 X56 的标准要求。试样 3 的屈服强度与抗拉强度满足 X46 的标准要求，试样 1、2、6、7 和 8 的屈服强度和抗拉强度满足 X56 的标准要求；通过轧制与冷却工艺调整，X52 坯料可以实现降级轧制 X46 和升级轧制 X56 产品，但仍需要通过试验进一步验证热轧现场降级轧制 X46 的可行性。

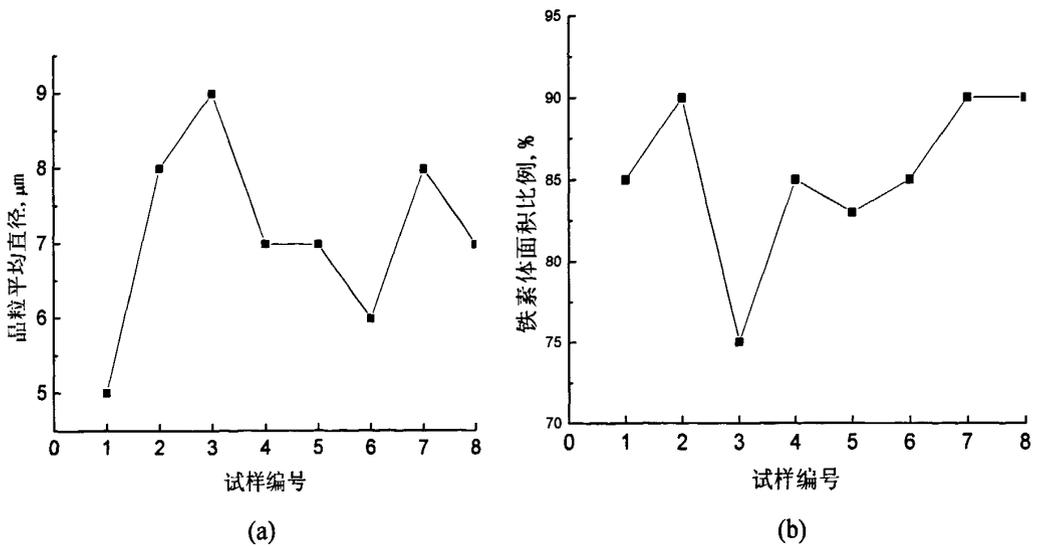


图 4.14 试样 SS400 晶粒大小与铁素体比例统计

Fig.4.14 Grain size and area ratio statistics of SS400 samples

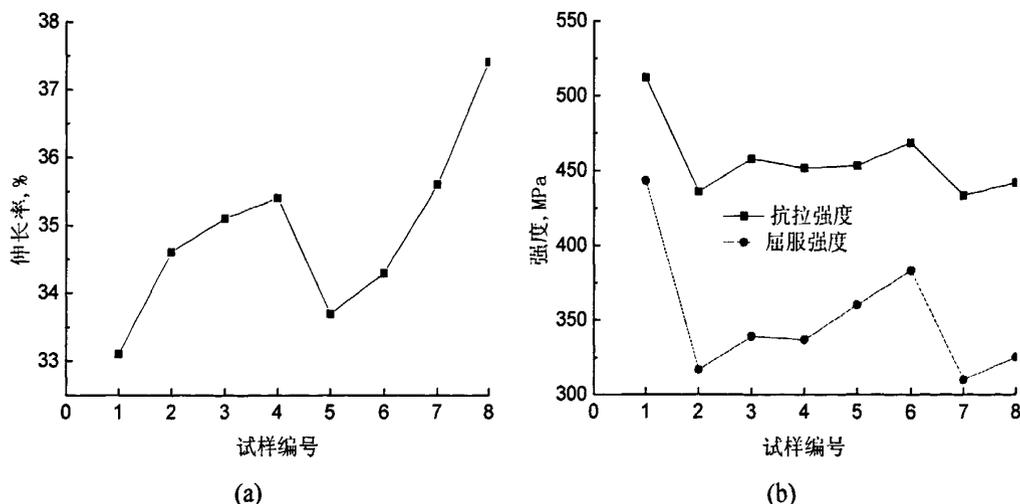


图 4.15 试样 SS400 性能结果统计  
Fig.4.15 Properties results statistics of SS400 samples

由下图 4.14 和图 4.15 可知, SS400 热轧试验 8 个试样的伸长率均满足 SS300、SS400、SS490 和 Q235 系列的标准要求。试样 1 的屈服强度与抗拉强度满足 SS490 的标准要求, 试样 2 和 7 的屈服强度与抗拉强度接近 SS330 的标准要求, 其余几个试样的屈服强度和抗拉强度均满足 Q235B 和 SS400 的标准要求; 通过轧制与冷却工艺调整, SS400 可以实现跨系列轧制 Q235B, 以及降级轧制 SS330 和升级轧制 SS490, 但仍需要通过大量试验进一步验证热轧现场降级轧制 SS330 和升级轧制 SS490 的可行性。

## 4.5 小结

(1) 采用满足 X46、X52 和 X56 归并后成分范围的 X52 坯料, 通过应用控制轧制与控制冷却技术, 实现了 X52 的升降级轧制目的。

- 伸长率均满足 X46、X52 和 X56 的要求;
- 采用 X52 降级轧制 X46 时, 可以采用后段冷却的方式, 即第一次实验中 X3 “高温终轧+后段冷却+慢速冷却”, 或采用第二次实验 X1 “高温终轧+高温卷取+慢速冷却”的工艺路线, 两者均满足 X46 对性能的要求;
- 采用 X52 升级轧制 X56 时, 可以采用“低温轧制+低温卷取”, 例如第二次试验 X4 和第三次试验 X2, 终轧温度为 820℃, 采用较大冷却速率, 卷取温度为 480℃, 得到屈服强度 450MPa、抗拉强度 510MPa、伸长率 32%左右的性能;

(2) 采用满足 SS330、SS400 和 SS490 归并后成分范围的 SS400 坯料, 通过应用控制轧制与控制冷却技术, 实现了 SS400 的升级轧制目的。

- 延伸率均满足 SS330、SS400、SS490 要求;
- 采用第三次试验 S4 “高温轧制+高温卷取”的工艺路线, 获得接近于 SS330 的

力学性能水平，可以通过空冷尝试 SS400 的降级轧制；

- 采用 SS400 升级轧制 SS4900 时，可以采用第一次实验 S4 的工艺路线，冷却速率较高从而获得了少量的针状铁素体，通过组织的复相化达到力学性能提高的目的；

## 第五章 结论

通过对钢铁产品标准的研究、现场生产数据的统计分析，建立了智能化钢种归并系统方法；采用满足归并后成分范围的 X52、SS400 坯料，通过应用控制轧制与控制冷却技术，实现了 X52、SS400 的升降级轧制目的，建立了集约化生产技术系统框架。本论文得到如下主要结论：

(1) 针对力学性能指标较少、产品产量较大的普碳钢和普碳结构钢系列，从钢铁产品标准出发，制定出“同系列相邻级别”与“跨系列同性能级别”的分类标准，通过对生产数据的单因素方差分析、Cpk 过程能力分析实现了智能化钢种归并系统方法的建立；在技术上已经可以实现 Q195 与 Q215、Q235 系列与 SS400 系列、Q345 系列、SPHT1 与 SPHT2，等近 30 个牌号(出钢记号)的钢种归并。

(2) 针对满足归并后成分范围的 X52 坯料，通过采用“高温终轧+后段冷却+慢速冷却”或者“高温终轧+高温卷取+慢速冷却”实现了 X52 降级轧制 X46；采用“低温轧制+低温卷取”或者“快速冷却”的工艺路径实现了 X52 升级轧制 X56。

(3) 针对满足归并后成分范围的 SS400 坯料，通过采用“快速冷却”的工艺路线实现了 SS400 升级轧制 SS490；但在本论文中未能实现 SS400 降级轧制 SS330，可以通过空冷进一步尝试。

(4) 与普碳钢相比，通过控制轧制与控制冷却技术的应用，微合金钢更易实现力学性能的升降级；实验结果为“相同系列相邻力学性能级别”钢种的集约化生产可行性提供了重要依据。



## 参考文献

- [1] 周世春, 丁建华, 陈超. 全球化市场背景下我国钢铁企业生产模式的探讨[J], 冶金经济与管理, 2004, (1): 20~23.
- [2] 刘相华, 王国栋, 杜林秀, 刘振宇. 钢材性能柔性化及柔性化轧制技术[J], 钢铁, 2006, 11(41): 32~36.
- [3] 董安平. 热轧钢结构翼板钢轧制过程有限元仿真及其柔性化研究[D], 济南, 山东大学, 2005.
- [4] 王国栋, 刘相华, 吴迪. 节约型钢铁材料及其减量化加工制造[J], 轧钢, 2006, 23(2): 1~5.
- [5] 刘相华, 陆匠心, 张丕军等. 400-500MPa 级碳素钢先进工业化制造技术[J], 中国有色金属学报, 2004, 14(增刊 1): 207~210.
- [6] 董杰吉, 张继奎, 马丙涛, 吕宝敏. 柔性生产工艺的研究与实施[J], 莱钢特殊钢厂报, 94~99.
- [7] 沙孝春, 兰勇军, 李殿中, 李依依. 热轧带钢组织性能预测与控制技术应用与发展[J], 轧钢, 2003.7, 20(3): 23~26.
- [8] 王占学. 塑性加工金属学[M], 北京: 冶金工业出版社, 2006 年.
- [9] 王国栋, 刘相华, 李伟娟等. 超级 Super-SS400 钢的工业轧制实验[J], 钢铁, 2001, 36(5): 39~43.
- [10] HodgsonPD, Hiekson M R. Ultrafine ferrite in low carbon steel[J], Scripta Materialia, 1999, 40: 1179~1184.
- [11] UmKK, CholJK, ChooWY. Mechanical properties of dual phase steels containing strain-induced dynamically transformed ferrite[A], proceeding of the Workshop on HIPERS 21, Pohang .Korea:POSCO, 2002.
- [12] Niikura M, Yokota T, Sato K, etal. Ultrarefinement of grain size and its effect on mechanical propefties [A], NG Steel 2001[C].Beijing:The Chinese Society for Metals, 2001.
- [13] 李军凯. 基于物理冶金学和 BP 网络的热轧带钢组织-性能的模拟和预测[D], 沈阳, 东北大学, 2008.
- [14] P.A Manohar, S.S. Shivathaya, M. Ferry. Design of an expert system for the optimization of steel compositions and process route[J], Expert Systems with Applications, 1999, 17, 129~134.
- [15] 刘振宇, 许云波, 王国栋. 热轧钢材组织-性能演变的模拟和预测[M], 沈阳, 东北大学出版社, 2004.
- [16] 邓天勇, 吴迪, 许云波, 刘相华, 王国栋. 低碳钢组织性能的柔性化研究[J], 钢铁, 2008, 43(1), 58~63.

- [17] 彭良贵,朱伏先,刘相华. 柔性生产策略在热轧带钢控冷过程中的应用[J], 钢铁研究, 2007, 35(1), 33~37.
- [18] 刘雅政, 孙景宏, 李志强, 曲阳. 有效控制产品质量的轧制技术[J], 轧钢, 2003, 20(3): 19~22.
- [19] 王丹民, 李华德, 李擎. 力学性能预测模型及其控制的研究[J], 机械强度, 2006, 28(6), 878~882.
- [20] 曲锦波, 单以银, 赵明纯等. 加速冷却对控轧管线钢组织和性能的影响[J], 钢铁, 2001, 36(9): 46.
- [21] Zhao Mingchun, Yang Ke, Xiao Furen. Continuous cooling transformation of undeformed and deformed low carbon pipeline steels [J], Mater Sci Eng, 2003, (1): 126.
- [22] Zhao Mingchun, Yang Ke, Shan Yiying. Effects of thermomechanical control process on microstructures and mechanical properties of X60 pipeline steel [J], Mater Sci Eng, 2002, (3): 14.
- [23] 刘力. Cpk 使用中的有关问题的探讨[J], 宝钢技术, 2001, 4: 58~60.
- [24] 赵明纯, 单以银, 杨振国等. 热加工对管线用低碳钢性能的影响[J], 材料研究学报, 2002, 15(6): 669.
- [25] 崔忠圻. 金属学与热处理[M], 北京, 机械工业出版社, 2000, 274~275.
- [26] 付俊岩, 东涛. 控轧低 C—Mn—Mo—Nb 针状铁素体钢的性能和显微组织
- [27] 吴新朗, 赵征志, 田允等. Nb—Ti 微合金钢热变形后组织演变及第二相粒子析出行为[J], 钢铁钒钛, 2008; 2: 29(1).
- [28] 李龙, 丁桦, 杨春征等. 控轧控冷工艺对低碳铌微合金钢组织和性能的影响[J], 钢铁研究学报, 2006.7, 18(7): 46~51.
- [29] 王延溥, 齐克敏 主编, 金属塑性加工学[M], 冶金工业出版社, 北京, 2001.
- [30] 李龙, 丁桦, 杜林秀等. TMCP 对低碳锰钢组织和力学性能的影响[J], 钢铁, 2006, 41(11): 53~57.

# 附录-Q235B 与 SS400

## 1 单因素方差分析

### 1.1 Q235B-1 单因素方差分析

#### 1.1.1 厚度对性能的影响

##### (1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度与厚度

| 差异源(来源) | SS        | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|-----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 80179.92  | 4   | 20044.98 | 73.88844 | 3.22E-49 | 2.389696 |
| 组内(误差)  | 136186.1  | 502 | 271.2871 |          |          |          |
| 总计      | 216366.02 | 506 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤2         | 3     | 340      | 18.03 |
| >2.0~2.5   | 35    | 352.2381 | 13.64 |
| >2.5~3.299 | 310   | 346.2258 | 13.54 |
| >3.3~6     | 114   | 321.9298 | 23.38 |
| >6         | 45    | 315.5185 | 15.65 |

##### (2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与厚度

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 37571.89 | 4   | 9392.972 | 27.16608 | 1.99E-20 | 2.389696 |
| 组内(误差)  | 173572   | 502 | 345.761  |          |          |          |
| 总计      | 211143.9 | 506 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平) | 观测数 N | 平均值    | 标准差   |
|-------|-------|--------|-------|
| ≤3    | 3     | 456.67 | 15.28 |
| >3~4  | 35    | 464.33 | 18.95 |
| >4~5  | 310   | 459.99 | 16.00 |
| >5~9  | 114   | 442.12 | 23.69 |
| >9    | 45    | 441.70 | 20.41 |

##### (3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与厚度

| 差异源(来源) | SS       | df | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 2213.023 | 4  | 553.2557 | 73.22044 | 7.44E-49 | 2.389696 |

|        |          |     |          |
|--------|----------|-----|----------|
| 组内(误差) | 3793.126 | 502 | 7.556029 |
| 总计     | 6006.149 | 506 |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平) | 观测数 N | 平均值   | 标准差   |
|-------|-------|-------|-------|
| ≤3    | 3     | 41.67 | 3.253 |
| >3~4  | 35    | 36.68 | 2.649 |
| >4~5  | 310   | 36.14 | 2.822 |
| >5~9  | 114   | 35.67 | 2.670 |
| >9    | 45    | 28.97 | 2.462 |

### 1.1.2 碳含量对性能的影响

#### (1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度与碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 16510.5  | 4   | 4127.625 | 10.37467 | 4.43E-08 | 2.389696 |
| 组内(误差)  | 199723.6 | 502 | 397.8558 |          |          |          |
| 总计      | 216234.1 | 506 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)        | 观测数 N | 平均值    | 标准差   |
|--------------|-------|--------|-------|
| ≤0.115       | 35    | 329.57 | 20.81 |
| >0.115~0.13  | 168   | 336.96 | 18.62 |
| >0.13~0.145  | 210   | 335.98 | 20.38 |
| >0.145~0.165 | 90    | 349.26 | 21.08 |
| >0.165       | 4     | 358.33 | 15.81 |

#### (2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 50892.29 | 4   | 12723.07 | 39.85596 | 5.31E-29 | 2.389696 |
| 组内(误差)  | 160251.6 | 502 | 319.2264 |          |          |          |
| 总计      | 211143.9 | 506 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)        | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|--------------|-------|----------|-------|
| ≤0.115       | 35    | 437.1429 | 18.99 |
| >0.115~0.13  | 168   | 448.8393 | 17.38 |
| >0.13~0.145  | 210   | 453.7857 | 17.86 |
| >0.145~0.165 | 90    | 472.5556 | 18.46 |
| >0.165       | 4     | 491.6667 | 13.94 |

#### (3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 403.6686 | 4  | 100.9172 | 9.042497 | 4.66E-07 | 2.389696 |

|        |          |     |          |
|--------|----------|-----|----------|
| 组内(误差) | 5602.481 | 502 | 11.16032 |
| 总计     | 6006.149 | 506 |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)        | 观测数 N | 平均值    | 标准差   |
|--------------|-------|--------|-------|
| ≤0.115       | 35    | 37.029 | 3.546 |
| >0.115~0.13  | 168   | 36.068 | 3.028 |
| >0.13~0.145  | 210   | 35.476 | 3.472 |
| >0.145~0.165 | 90    | 33.806 | 3.938 |
| >0.165       | 4     | 33.958 | 1.887 |

### 1.1.3 锰含量对性能的影响

#### ①屈服强度

单因素方差分析：屈服强度与锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 8916.613 | 4   | 2229.153 | 5.397686 | 0.000292 | 2.389696 |
| 组内(误差)  | 207317.5 | 502 | 412.9831 |          |          |          |
| 总计      | 216234.1 | 506 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)     | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|-----------|-------|----------|-------|
| ≤0.4      | 124   | 334.3548 | 20.54 |
| >0.4~0.45 | 300   | 337.7444 | 19.77 |
| >0.45~0.5 | 56    | 345.4167 | 23.24 |
| >0.5~0.55 | 17    | 353.2353 | 18.28 |
| >0.55     | 10    | 343.5    | 19.88 |

#### ②抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 22169.85 | 4   | 5542.462 | 14.72327 | 2.21E-11 | 2.389696 |
| 组内(误差)  | 188974.1 | 502 | 376.4424 |          |          |          |
| 总计      | 211143.9 | 506 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)     | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|-----------|-------|----------|-------|
| ≤0.4      | 124   | 449.8387 | 19.84 |
| >0.4~0.45 | 300   | 452.9444 | 19.02 |
| >0.45~0.5 | 56    | 466.7262 | 20.37 |
| >0.5~0.55 | 17    | 479.2157 | 21.09 |
| >0.55     | 10    | 455      | 16.67 |

#### ③伸长率

单因素方差分析：伸长率与锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 224.0383 | 4  | 56.00957 | 4.862723 | 0.000744 | 2.389696 |

|        |          |     |          |
|--------|----------|-----|----------|
| 组内(误差) | 5782.111 | 502 | 11.51815 |
| 总计     | 6006.149 | 506 |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)     | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|-----------|-------|----------|-------|
| ≤0.4      | 124   | 35.91129 | 3.349 |
| >0.4~0.45 | 300   | 35.68778 | 3.412 |
| >0.45~0.5 | 56    | 34.29167 | 3.539 |
| >0.5~0.55 | 17    | 33.32353 | 2.634 |
| >0.55     | 10    | 33.75    | 3.691 |

### 1.1.4 硅含量对性能的影响

#### (1) 屈服强度

单因素方差分析: 屈服强度与硅含量(0.115~0.305), 数据源(0.15~0.237)

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F       | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|---------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 9708.121 | 4   | 2427.03  | 5.89935 | 0.000121 | 2.389696 |
| 组内(误差)  | 206526   | 502 | 411.4064 |         |          |          |
| 总计      | 216234.1 | 506 |          |         |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)        | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|--------------|-------|----------|-------|
| ≤0.165       | 32    | 334.6875 | 18.96 |
| >0.165~0.185 | 110   | 332.1818 | 21.44 |
| >0.185~0.205 | 234   | 338.5897 | 19.98 |
| >0.205~0.225 | 109   | 343.1804 | 19.26 |
| >0.225       | 22    | 349.0909 | 24.08 |

#### (2) 抗拉强度

单因素方差分析: 抗拉强度与硅含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 14982.06 | 4   | 3745.516 | 9.585191 | 1.78E-07 | 2.389696 |
| 组内(误差)  | 196161.9 | 502 | 390.7607 |          |          |          |
| 总计      | 211143.9 | 506 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)        | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|--------------|-------|----------|-------|
| ≤0.165       | 32    | 447.1875 | 17.08 |
| >0.165~0.185 | 110   | 447.5455 | 20.33 |
| >0.185~0.205 | 234   | 454.6866 | 19.96 |
| >0.205~0.225 | 109   | 462.2477 | 17.79 |
| >0.225       | 22    | 462.5    | 26.80 |

#### (3) 伸长率

单因素方差分析: 伸长率与硅含量

| 差异源(来源) | SS       | df | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 96.58944 | 4  | 24.14736 | 2.051248 | 0.086068 | 2.389696 |

|        |          |     |          |
|--------|----------|-----|----------|
| 组内(误差) | 5909.56  | 502 | 11.77203 |
| 总计     | 6006.149 | 506 |          |

| 平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间 |       |          |       |
|-------------------------|-------|----------|-------|
| 组(水平)                   | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
| ≤0.165                  | 32    | 35.1875  | 3.230 |
| >0.165~0.185            | 110   | 35.76818 | 3.196 |
| >0.185~0.205            | 234   | 35.76211 | 3.533 |
| >0.205~0.225            | 109   | 34.77829 | 3.493 |
| >0.225                  | 22    | 34.72727 | 3.429 |

## 1.2 Q235B-2 单因素方差分析

### 1.2.1 厚度对性能的影响

#### (1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度 与 厚度

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|---------|----------|
| 组间(厚度)  | 7163.363 | 4   | 1790.841 | 9.367255 | 6E-07   | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 37471.47 | 196 | 191.181  |          |         |          |
| 总计      | 44634.83 | 200 |          |          |         |          |

| 平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间 |       |          |       |
|-------------------------|-------|----------|-------|
| 组(水平)                   | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
| ≤2                      | 5     | 355      | 7.07  |
| >2.0~2.5                | 0     | *        | *     |
| >2.5~3.299              | 1     | 360      | *     |
| >3.3~6                  | 4     | 348.75   | 14.93 |
| >6                      | 191   | 325.8159 | 13.88 |

#### (2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与厚度

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 4290.019 | 4   | 1072.505 | 3.861156 | 0.004824 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 54442.49 | 196 | 277.7678 |          |          |          |
| 总计      | 58732.5  | 200 |          |          |          |          |

| 平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间 |       |          |       |
|-------------------------|-------|----------|-------|
| 组(水平)                   | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
| ≤2                      | 5     | 473      | 4.47  |
| >2.0~2.5                | 0     | *        | *     |
| >2.5~3.299              | 1     | 490      | *     |
| >3.3~6                  | 4     | 493.3333 | 7.07  |
| >6                      | 191   | 464.1579 | 16.89 |

#### (3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与厚度

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 215.7177 | 4   | 53.92941 | 7.445484 | 1.33E-05 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 1419.675 | 196 | 7.243238 |          |          |          |
| 总计      | 1635.392 | 200 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤2         | 5     | 35.9     | 1.557 |
| >2.0~2.5   | 0     | *        | *     |
| >2.5~3.299 | 1     | 36.5     | *     |
| >3.3~6     | 4     | 28.33333 | 2     |
| >6         | 191   | 30.13613 | 2.713 |

### 1.2.2 碳含量对性能的影响

#### (1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度 与 碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 1440.659 | 4   | 360.1647 | 1.634301 | 0.167125 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 43194.17 | 196 | 220.3784 |          |          |          |
| 总计      | 44634.83 | 200 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)        | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|--------------|-------|----------|-------|
| ≤0.135       | 18    | 322.2685 | 15.88 |
| >0.135~0.145 | 32    | 327.8125 | 13.47 |
| >0.145~0.155 | 59    | 327.8814 | 11.97 |
| >0.155~0.165 | 76    | 325.9649 | 16.84 |
| >0.165       | 16    | 334.4792 | 15.73 |

#### (2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 8012.535 | 4   | 2003.134 | 7.740821 | 8.22E-06 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 50719.97 | 196 | 258.7754 |          |          |          |
| 总计      | 58732.5  | 200 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)        | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|--------------|-------|----------|-------|
| ≤0.135       | 18    | 450.0926 | 20.81 |
| >0.135~0.145 | 32    | 460.4688 | 11.05 |
| >0.145~0.155 | 59    | 469.2373 | 13.83 |
| >0.155~0.165 | 76    | 464.8575 | 18.55 |
| >0.165       | 16    | 476.9792 | 14.08 |

#### (3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 78.2479  | 4   | 19.56198 | 2.462294 | 0.046592 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 1557.144 | 196 | 7.944614 |          |          |          |
| 总计      | 1635.392 | 200 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)        | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|--------------|-------|----------|-------|
| ≤0.135       | 18    | 30.54167 | 2.891 |
| >0.135~0.145 | 32    | 31.27083 | 3.004 |
| >0.145~0.155 | 59    | 29.88983 | 2.783 |
| >0.155~0.165 | 76    | 30.40461 | 2.935 |
| >0.165       | 16    | 28.79167 | 1.632 |

### 1.2.3 锰含量对性能的影响

#### (1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度 与 锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F       | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|---------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 1287.289 | 4   | 321.8223 | 1.45515 | 0.217402 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 43347.54 | 196 | 221.1609 |         |          |          |
| 总计      | 44634.83 | 200 |          |         |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)     | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|-----------|-------|----------|-------|
| ≤0.45     | 12    | 319.6528 | 15.35 |
| >0.45~0.5 | 97    | 326.1168 | 15.43 |
| >0.5~0.55 | 88    | 329.0341 | 13.83 |
| >0.55~0.6 | 0     | *        | *     |
| >0.6      | 4     | 334.1667 | 20.48 |

#### (2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 7841.875 | 4   | 1960.469 | 7.550543 | 1.12E-05 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 50890.63 | 196 | 259.6461 |          |          |          |
| 总计      | 58732.5  | 200 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)     | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|-----------|-------|----------|-------|
| ≤0.45     | 12    | 444.0278 | 21.30 |
| >0.45~0.5 | 97    | 463.1873 | 16.22 |
| >0.5~0.55 | 88    | 469.6212 | 15.06 |
| >0.55~0.6 | 0     | *        | *     |
| >0.6      | 4     | 474.5833 | 17.34 |

#### (3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 27.65551 | 4   | 6.913879 | 0.842874 | 0.499511 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 1607.737 | 196 | 8.202739 |          |          |          |
| 总计      | 1635.392 | 200 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)     | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|-----------|-------|----------|-------|
| ≤0.45     | 12    | 31.22917 | 3.519 |
| >0.45~0.5 | 97    | 30.32388 | 2.735 |
| >0.5~0.55 | 88    | 30.18182 | 2.901 |
| >0.55~0.6 | 0     | *        | *     |
| >0.6      | 4     | 28.29167 | 2.668 |

### 1.2.4 硅含量对性能的影响

#### (1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度 与 硅含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 836.6827 | 4   | 209.1707 | 0.936054 | 0.444103 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 43798.15 | 196 | 223.4599 |          |          |          |
| 总计      | 44634.83 | 200 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.18      | 46    | 326.1775 | 15.78 |
| >0.18~0.19 | 51    | 326.0458 | 16.30 |
| >0.19~0.20 | 23    | 325.7971 | 15.95 |
| >0.20~0.21 | 29    | 325.6322 | 12.20 |
| >0.21      | 52    | 330.609  | 13.68 |

#### (2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与硅含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|----------|
| 组间(厚度)  | 5905.208 | 4   | 1476.302 | 5.477381 | 0.000335 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 52827.3  | 196 | 269.527  |          |          |          |
| 总计      | 58732.5  | 200 |          |          |          |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.18      | 46    | 457.7536 | 18.10 |
| >0.18~0.19 | 51    | 463.3824 | 18.06 |
| >0.19~0.20 | 23    | 467.3188 | 20.76 |
| >0.20~0.21 | 29    | 464.023  | 11.64 |
| >0.21      | 52    | 472.8526 | 12.91 |

#### (3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与硅含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value | F crit   |
|---------|----------|-----|----------|----------|---------|----------|
| 组间(厚度)  | 385.387  | 4   | 96.34675 | 15.10711 | 8.8E-11 | 2.417725 |
| 组内(误差)  | 1250.005 | 196 | 6.377578 |          |         |          |
| 总计      | 1635.392 | 200 |          |          |         |          |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.18      | 46    | 31.7663  | 2.885 |
| >0.18~0.19 | 51    | 31.58333 | 3.087 |
| >0.19~0.20 | 23    | 29.62319 | 2.271 |
| >0.20~0.21 | 29    | 29.1954  | 1.409 |
| >0.21      | 52    | 28.5641  | 2.123 |

### 1.3 SS400 单因素方差分析

#### 1.3.1 厚度对性能的影响

##### (1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度与厚度

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|---------|---------|
| 组间(厚度)  | 52563.06 | 4   | 13140.77 | 46.92791 | 2.6E-29 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 69165.01 | 247 | 280.0203 |          |         |         |
| 总计      | 121728.1 | 251 |          |          |         |         |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤2         | 9     | 350      | 30.31 |
| >2.0~2.5   | 11    | 354.5455 | 23.07 |
| >2.5~3.299 | 63    | 362.4603 | 16.30 |
| >3.3~6     | 39    | 356.4103 | 14.87 |
| >6         | 130   | 330.5385 | 15.66 |

##### (2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与厚度

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 组间(厚度)  | 33120.99 | 4   | 8280.248 | 27.90785 | 3.94E-19 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 73284.79 | 247 | 296.6995 |          |          |         |
| 总计      | 121728.1 | 251 |          |          |          |         |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤2         | 9     | 470.5556 | 12.83 |
| >2.0~2.5   | 11    | 475      | 10.95 |
| >2.5~3.299 | 63    | 480.291  | 17.33 |
| >3.3~6     | 39    | 478.3761 | 18.50 |
| >6         | 130   | 455.859  | 17.42 |

(3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与厚度

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 组间(厚度)  | 9356.789 | 4   | 2339.197 | 196.3811 | 1.82E-75 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 2942.146 | 247 | 11.91152 |          |          |         |
| 总计      | 12298.93 | 251 |          |          |          |         |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤2         | 9     | 35.38889 | 3.060 |
| >2.0~2.5   | 11    | 36.40909 | 2.267 |
| >2.5~3.299 | 63    | 34.86772 | 2.677 |
| >3.3~6     | 39    | 31.78632 | 5.420 |
| >6         | 130   | 22.07692 | 3.025 |

1.3.2 碳含量对性能的影响

(1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度与碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 组间(厚度)  | 7927.137 | 4   | 1981.784 | 4.301376 | 0.002211 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 113800.9 | 247 | 460.7325 |          |          |         |
| 总计      | 121728.1 | 251 |          |          |          |         |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.13      | 16    | 327.5    | 19.92 |
| >0.13~0.14 | 72    | 340.0463 | 21.48 |
| >0.14~0.15 | 117   | 347.1652 | 22.92 |
| >0.15~0.16 | 25    | 349.6667 | 20.42 |
| >0.16      | 22    | 348.7121 | 14.11 |

(2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 组间(厚度)  | 17390.53 | 4   | 4347.632 | 12.06383 | 5.68E-09 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 89015.25 | 247 | 360.3856 |          |          |         |
| 总计      | 106405.8 | 251 |          |          |          |         |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.13      | 16    | 445      | 14.83 |
| >0.13~0.14 | 72    | 459.9769 | 16.73 |
| >0.14~0.15 | 117   | 469.6866 | 20.70 |
| >0.15~0.16 | 25    | 476.8667 | 21.06 |
| >0.16      | 22    | 478.3333 | 16.15 |

(3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与碳含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 组间(厚度)  | 226.0296 | 4   | 56.5074  | 1.156087 | 0.330846 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 12072.91 | 247 | 48.87816 |          |          |         |
| 总计      | 12298.93 | 251 |          |          |          |         |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.13      | 16    | 26.75    | 6.186 |
| >0.13~0.14 | 72    | 27.07176 | 6.864 |
| >0.14~0.15 | 117   | 28.49003 | 6.999 |
| >0.15~0.16 | 25    | 29.44    | 6.023 |
| >0.16      | 22    | 26.31061 | 8.732 |

1.3.3 锰含量对性能的影响

(1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度与锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 组间(厚度)  | 7017.25  | 4   | 1754.313 | 3.777457 | 0.005308 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 114710.8 | 247 | 464.4163 |          |          |         |
| 总计      | 121728.1 | 251 |          |          |          |         |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.41      | 17    | 349.1176 | 16.03 |
| >0.41~0.44 | 86    | 344.3023 | 17.17 |
| >0.44~0.47 | 99    | 341.7508 | 23.68 |
| >0.47~0.5  | 36    | 341.0185 | 25.05 |
| >0.5       | 14    | 364.2857 | 25.74 |

(2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 组间(厚度)  | 16741.6  | 4   | 4185.401 | 11.52962 | 1.34E-08 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 89664.17 | 247 | 363.0128 |          |          |         |
| 总计      | 106405.8 | 251 |          |          |          |         |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.41      | 17    | 467.0588 | 16.40 |
| >0.41~0.44 | 86    | 462.1512 | 14.62 |
| >0.44~0.47 | 99    | 465.6734 | 21.98 |
| >0.47~0.5  | 36    | 468.3796 | 22.12 |
| >0.5       | 14    | 499.1667 | 14.47 |

(3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与锰含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit  |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 组间(厚度)  | 999.7241 | 4   | 249.931  | 5.463476 | 0.000313 | 2.40819 |
| 组内(误差)  | 11299.21 | 247 | 45.74579 |          |          |         |
| 总计      | 12298.93 | 251 |          |          |          |         |

| 平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间 |       |          |       |
|-------------------------|-------|----------|-------|
| 组(水平)                   | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
| ≤0.41                   | 17    | 33       | 5.142 |
| >0.41~0.44              | 86    | 29.40698 | 6.482 |
| >0.44~0.47              | 99    | 26.74242 | 6.742 |
| >0.47~0.5               | 36    | 25.74537 | 7.312 |
| >0.5                    | 14    | 25.78571 | 8.679 |

1.3.4 硅含量对性能的影响

(1) 屈服强度

单因素方差分析：屈服强度与硅含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F       | P-value  | F crit |
|---------|----------|-----|----------|---------|----------|--------|
| 组间(厚度)  | 5470.711 | 6   | 911.7852 | 1.92149 | 0.077943 | 2.1357 |
| 组内(误差)  | 116257.4 | 245 | 474.5199 |         |          |        |
| 总计      | 121728.1 | 251 |          |         |          |        |

| 平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间 |       |          |       |
|-------------------------|-------|----------|-------|
| 组(水平)                   | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
| ≤0.18                   | 35    | 355      | 26.75 |
| >0.18~0.19              | 39    | 341.2821 | 20.80 |
| >0.19~0.20              | 44    | 344.9621 | 21.04 |
| >0.20~0.21              | 56    | 343.3631 | 19.33 |
| >0.21~0.22              | 34    | 341.7647 | 18.50 |
| >0.22~0.23              | 25    | 338.6    | 22.43 |
| >0.23                   | 19    | 343.5965 | 26.38 |

(2) 抗拉强度

单因素方差分析：抗拉强度与硅含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|--------|
| 组间(厚度)  | 12498.85 | 6   | 2083.141 | 5.434846 | 2.69E-05 | 2.1357 |
| 组内(误差)  | 93906.93 | 245 | 383.2936 |          |          |        |
| 总计      | 106405.8 | 251 |          |          |          |        |

| 平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间 |       |          |       |
|-------------------------|-------|----------|-------|
| 组(水平)                   | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
| ≤0.18                   | 35    | 478.4286 | 23.63 |
| >0.18~0.19              | 39    | 461.1538 | 19.92 |
| >0.19~0.20              | 44    | 467.5758 | 20.13 |

|            |    |          |       |
|------------|----|----------|-------|
| >0.20~0.21 | 56 | 461.5774 | 15.50 |
| >0.21~0.22 | 34 | 464.4118 | 15.94 |
| >0.22~0.23 | 25 | 461.8    | 16.58 |
| >0.23      | 19 | 481.5789 | 28.13 |

(3) 伸长率

单因素方差分析：伸长率与硅含量

| 差异源(来源) | SS       | df  | MS       | F        | P-value  | F crit |
|---------|----------|-----|----------|----------|----------|--------|
| 组间(厚度)  | 1364.775 | 6   | 227.4625 | 5.096716 | 5.95E-05 | 2.1357 |
| 组内(误差)  | 10934.16 | 245 | 44.62922 |          |          |        |
| 总计      | 12298.93 | 251 |          |          |          |        |

平均值(基于合并标准差)的单组 95%置信区间

| 组(水平)      | 观测数 N | 平均值      | 标准差   |
|------------|-------|----------|-------|
| ≤0.18      | 35    | 29.61429 | 6.268 |
| >0.18~0.19 | 39    | 25.62821 | 6.733 |
| >0.19~0.20 | 44    | 29.37879 | 6.813 |
| >0.20~0.21 | 56    | 29.63095 | 6.128 |
| >0.21~0.22 | 34    | 28.75    | 6.660 |
| >0.22~0.23 | 25    | 25.6     | 6.948 |
| >0.23      | 19    | 22.09649 | 8.137 |

## 2 过程能力分析

### 2.1 化学成份过程能力分析

#### (1) Q235B-1 化学成份过程能力计算值

|            | C     | Si    | Mn    | P      | S      | Alt    | Als    |
|------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 样本均值 $\mu$ | 0.134 | 0.195 | 0.427 | 0.0184 | 0.0154 | 0.0194 | 0.0159 |
| 样本 N       | 507   | 507   | 507   | 507    | 507    | 507    | 507    |
| 标准差(组内)    | 0.008 | 0.011 | 0.022 | 0.0024 | 0.0028 | 0.0052 | 0.0049 |
| 标准差(整体)    | 0.013 | 0.017 | 0.049 | 0.0040 | 0.0047 | 0.0099 | 0.0095 |
| Cp         | 1.78  | 2.84  | 3.07  | 1.71   | 1.50   | *      | *      |
| CPL        | 1.54  | 2.38  | 1.95  | 2.52   | 1.82   | 1.25   | 1.08   |
| CPU        | 2.02  | 3.30  | 4.20  | 0.90   | 1.18   | *      | *      |
| Cpk        | 1.54  | 2.38  | 1.95  | 0.90   | 1.18   | 1.25   | 1.08   |
| Pp         | 1.13  | 1.83  | 1.36  | 1.05   | 0.90   | *      | *      |
| PPL        | 0.97  | 1.54  | 0.86  | 1.54   | 1.09   | 0.65   | 0.56   |
| PPU        | 1.28  | 2.13  | 1.85  | 0.55   | 0.71   | *      | *      |
| Ppk        | 0.97  | 1.54  | 0.86  | 0.55   | 0.71   | 0.65   | 0.56   |

#### (2) Q235B-2 化学成份过程能力计算值

|            | C     | Si    | Mn    | P      | S      | Alt    | Als    |
|------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 样本均值 $\mu$ | 0.152 | 0.195 | 0.498 | 0.0164 | 0.0091 | 0.0171 | 0.0139 |

|         |       |       |       |        |        |        |        |
|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 样本 N    | 201   | 201   | 201   | 201    | 201    | 201    | 201    |
| 标准差(组内) | 0.007 | 0.010 | 0.018 | 0.0014 | 0.0010 | 0.0038 | 0.0036 |
| 标准差(整体) | 0.012 | 0.019 | 0.033 | 0.0025 | 0.0021 | 0.0077 | 0.0073 |
| Cp      | 1.61  | 5.02  | 2.81  | 4.07   | 6.15   | *      | *      |
| CPL     | 1.69  | 4.61  | 1.84  | 3.81   | 3.18   | 1.51   | 1.29   |
| CPU     | 1.53  | 3.36  | 3.78  | 4.33   | 9.13   | *      | *      |
| Cpk     | 1.53  | 3.36  | 1.84  | 3.81   | 3.18   | 1.51   | 1.29   |
| Pp      | 0.96  | 2.64  | 1.54  | 2.36   | 2.85   | *      | *      |
| PPL     | 1.01  | 3.37  | 1.01  | 2.21   | 1.47   | 0.74   | 0.63   |
| PPU     | 0.91  | 1.91  | 2.07  | 2.50   | 4.23   | *      | *      |
| Ppk     | 0.91  | 1.91  | 1.01  | 2.21   | 1.47   | 0.74   | 0.63   |

(3) SS400 化学成份过程能力计算值

|            | C     | Si    | Mn    | P      | S      | Alt    |
|------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 样本均值 $\mu$ | 0.144 | 0.204 | 0.453 | 0.0178 | 0.0150 | 0.0323 |
| 样本 N       | 252   | 252   | 252   | 252    | 252    | 252    |
| 标准差(组内)    | 0.006 | 0.010 | 0.017 | 0.0019 | 0.0019 | 0.0042 |
| 标准差(整体)    | 0.010 | 0.021 | 0.040 | 0.0036 | 0.0036 | 0.0084 |
| Cp         | 2.00  | 2.77  | 3.84  | 2.61   | 2.61   | *      |
| CPL        | 1.64  | 2.00  | 2.94  | 3.10   | 2.57   | 1.75   |
| CPU        | 2.36  | 3.53  | 4.74  | 2.12   | 2.65   | *      |
| Cpk        | 1.64  | 2.00  | 2.94  | 2.12   | 2.57   | 1.75   |
| Pp         | 1.13  | 1.27  | 1.67  | 1.38   | 1.41   | *      |
| PPL        | 0.93  | 0.92  | 1.28  | 1.64   | 1.39   | 0.88   |
| PPU        | 1.33  | 1.62  | 2.06  | 1.12   | 1.43   | *      |
| Ppk        | 0.93  | 0.92  | 1.28  | 1.12   | 1.39   | 0.88   |

2.2 力学性能过程能力分析

(1) Q235B-1 力学性能过程能力计算值

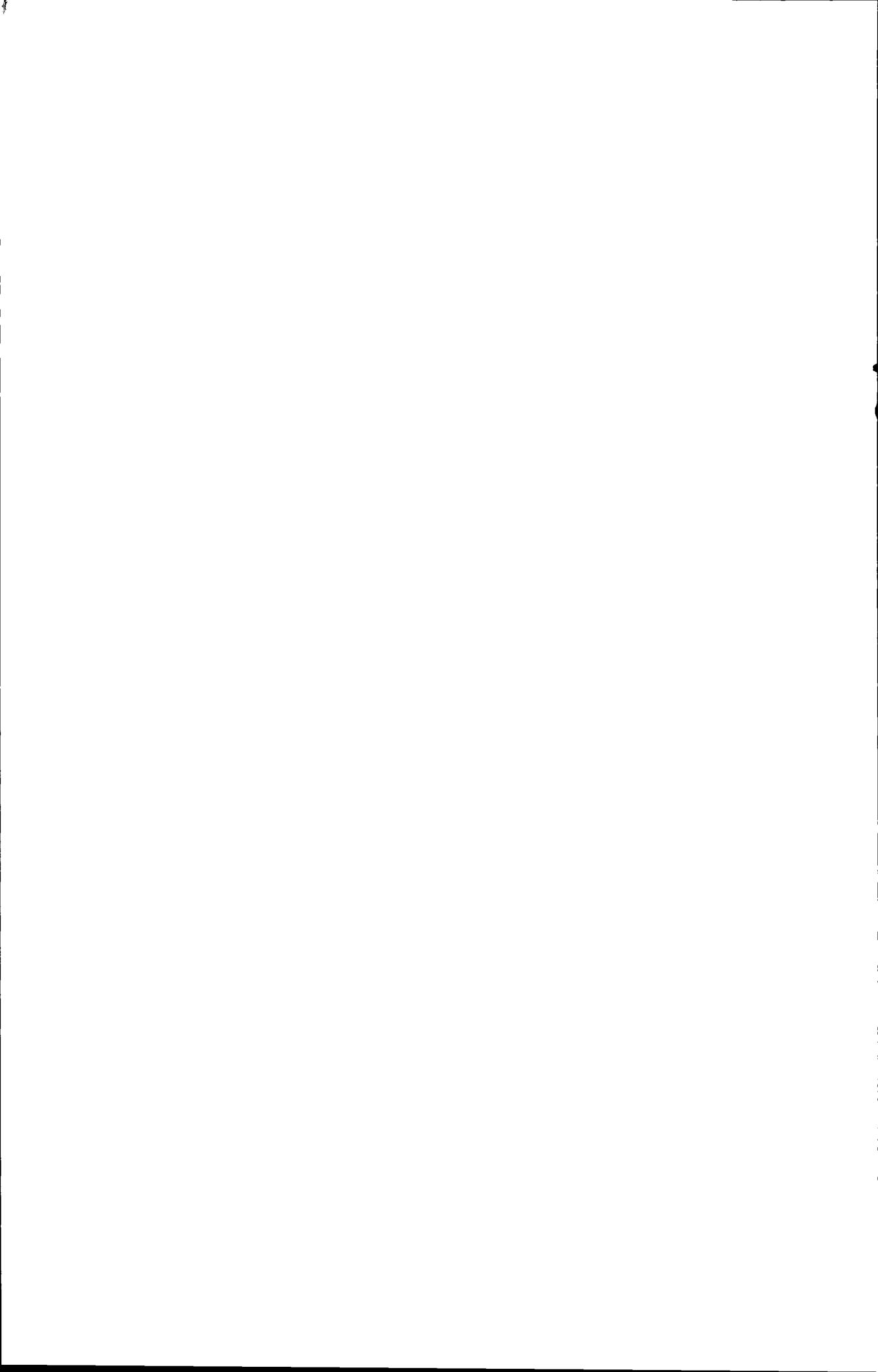
|            | 屈服强度   | 抗拉强度   | 伸长率   |
|------------|--------|--------|-------|
| 样本均值 $\mu$ | 338.4  | 454.6  | 35.5  |
| 样本 N       | 507    | 507    | 507   |
| 标准差(组内)    | 14.084 | 13.851 | 2.426 |
| 标准差(整体)    | 20.669 | 20.428 | 3.445 |
| Cp         | *      | 1.50   | *     |
| CPL        | 2.45   | 1.92   | 1.30  |
| CPU        | *      | 1.09   | *     |
| Cpk        | 2.45   | 1.09   | 1.30  |
| Pp         | *      | 1.02   | *     |
| PPL        | 1.67   | 1.30   | 0.92  |
| PPU        | *      | 0.74   | *     |
| Ppk        | 1.67   | 0.74   | 0.92  |

(2) Q235B-2 力学性能过程能力计算值

|            | 屈服强度   | 抗拉强度   | 伸长率   |
|------------|--------|--------|-------|
| 样本均值 $\mu$ | 327.2  | 465.1  | 30.3  |
| 样本 N       | 201    | 201    | 201   |
| 标准差(组内)    | 10.920 | 11.208 | 1.808 |
| 标准差(整体)    | 14.946 | 17.138 | 2.861 |
| Cp         | *      | 1.86   | *     |
| CPL        | 2.81   | 2.68   | 0.79  |
| CPU        | *      | 1.04   | *     |
| Cpk        | 2.81   | 1.04   | 0.79  |
| Pp         | *      | 1.22   | *     |
| PPL        | 2.06   | 1.75   | 0.50  |
| PPU        | *      | 0.68   | *     |
| Ppk        | 2.06   | 0.68   | 0.50  |

(3) SS400 力学性能过程能力计算值

|            | 屈服强度   | 抗拉强度   | 伸长率   |
|------------|--------|--------|-------|
| 样本均值 $\mu$ | 344.3  | 466.8  | 27.9  |
| 样本 N       | 252    | 252    | 252   |
| 标准差(组内)    | 13.098 | 12.523 | 2.831 |
| 标准差(整体)    | 22.014 | 20.588 | 7.001 |
| Cp         | *      | 1.46   | *     |
| CPL        | 2.53   | 1.78   | 1.28  |
| CPU        | *      | 1.15   | *     |
| Cpk        | 2.53   | 1.15   | 1.28  |
| Pp         | *      | 0.89   | *     |
| PPL        | 1.50   | 1.08   | 0.52  |
| PPU        | *      | 0.70   | *     |
| Ppk        | 1.50   | 0.70   | 0.52  |



## 致 谢

值此论文完成之际，首先向东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室的刘振宇教授表示衷心的感谢。导师渊博的知识，严谨的治学态度，创新的工作理念，不仅使作者在论文工作当中受益非浅，而且这种影响与教诲将使作者终身受益。除了学习和工作之外，在生活上还得到了导师无微不至的关怀与帮助。导师的教诲和帮助作者将铭记于心，在以后的工作中，一定努力进取，积极创新，不辜负导师的培养和教诲。在此还要特别感谢贾涛老师对我工作的指导和生活上的帮助，他认真负责的态度一直影响着我，让我在成长中成熟。

同时在论文的工作当中，得到了所在课题组的周晓光老师和曹光明老师给予的多方面的帮助和支持，在此表示诚挚的谢意。感谢合作单位南京梅钢技术中心的胡恒法总工程师，在论文工作中提供了大量的数据资料，在此一并表示感谢。

作者要对实验室的崔光洙老师、张进师傅、田浩师傅、办公室的张颖老师、杨子琴老师、沈馨老师，测试中心的宋丹老师等对作者的帮助与支持表示谢意。

感谢重点实验室的每一位成员，感谢各位老师在学习中所给予的大力支持与帮助和耐心指导。在这样一个有凝聚力和团结创新精神的集体中学习和工作，使我不断地学到新的知识和方法，感谢实验室给我们创造了良好的学习环境。

谨以此文献给我的家人，深深感谢我的父母和朋友无私的关爱和默默的支持！

