

论文题目: Q460E 焊接性能分析及匹配焊材研究

学 科: 材料科学与工程

本 科 生: 黄东鑾

签 名: 黄东鑾

导 师: 张 敏 教授

签 名: 张敏

摘 要

目前国内石油井架存在的主要问题是结构过于笨重, 无法满足石油装备发展模块化、移运性和高强度的要求。针对这一问题, 采用高强度级别钢材替代传统钢材是一个合理的选择, 因此本文选择 Q460E 钢作为母材进行了焊接试验及性能测试, 其焊接接头具有较高的强度和较好的低温韧性, 在获得更高强度的同时能够减轻井架的重量, 满足了石油装备发展对移运性和高强度的要求, 有利于井架生产的模块化和高效率。

在此基础上, 结合焊接接头力学性能和金相组织, 深入探讨了焊接材料中合金成分及配比对焊接组织及性能的影响。通过分析发现, 采用多元微合金化以及严格控制焊材中 S、P 的含量能有效地改善焊接接头的性能, 尤其是添加适量的 Ni、Mo 再辅以其它微合金元素能显著改善焊接接头的低温冲击性能。基于此, 通过调整合金系和药皮配方, 试制了 55 公斤级低氢型焊条, 并采用该焊条进行了焊接试验及性能测试, 该焊条完全满足 Q460E 钢的焊接要求, 尤其是低温冲击性能方面有明显的改善, 为 Q460E 等高强度钢在焊接材料方面提供了更好的选择。

Q460E 作为一种高强度承载结构钢, 其焊接残余应力将对结构安全性及使用寿命产生重要影响, 为了研究其残余应力水平及分布状态, 本文利用 Ansys 软件对焊接过程进行了数值模拟, 并分析了焊接过程中温度场和应力应变场的变化规律。为了验证模拟结果的有效性, 采用盲孔法进行了焊接残余应力测试。结果表明, 模拟结果与测试结果吻合较好, 数值模拟可作为预测重要结构焊接残余应力的一种有效手段, 同时也为优化焊接工艺提供了科学依据。

关键词: Q460E, 焊接工艺, 组织性能, 数值模拟, 残余应力

**Title: WELDING ANALYSIS AND RESEARCH ON MATCHING  
WELDING MATERIALS FOR Q460E STEEL**

**Major: Material Science and Engineering**

**Name: Dongliu HUANG**

**Signature: Dongliu HUANG**

**Supervisor: Prof.Min ZHANG**

**Signature: M. Zhang**

**Abstract**

Presently the primary problem of oil derrick is the cumbersome structure can not match the development of oil equipment desiring modularization、 movement and higher intensity. In allusion this problem, it is a reasonable method to use high strength steel instead of traditional steel. A series of weld experiments were made using the Q460E steel as base metal. The results show that its weld has high intensity and good low-temperature toughness, which can replace those traditional steel used by actual oil derrick manufacture. Because of its lighter weight and higher intensity, it can completely satisfy the development of oil equipment desiring higher movement level and intensity, which is propitious to modularization and efficiency of oil derrick manufacture.

Base on it, though the mechanical property and microstructure, a deep research was made on the influence of different alloy element. Though analysis, it is found that multiple micro alloying and strictly controlling to the S、 P content of welding materials can improve the properties of weld joints effectively, especially adding appropriate Ni、 Mo with other micro alloys can improve the low-temperature toughness of weld joints significantly. Being upon this, though adjusting the alloy systems and formulation of electrode coating, a kind of 55kg class low-hydrogen electrode was trial-produced, and it was used to test weld Q460E steel. The results show that the electrode can fully meet the weld requirements of Q460E steel, and improve low-temperature toughness significantly, which can offer a better choice on welding materials for high strength steel such as Q460E steel.

The welding residual stress of Q460E steel has an important impact on its structure safety and life which is used as high strength and load-bearing structure steel. In order to study its residual stress level and distribution, a numerical simulation was made about the welding process with the software Ansys, and an in-deep analysis was made on the instantaneous changes in the law of temperature field、 stress field and strain field. In order to verify its accuracy of the numerical simulation result, a test was made on the residual stress of test plates. The results show that the numerical simulation result and the actual test result inosculated well, which can be used as an effective method to forecast the welding residual stress of important

structure and provide scientific reference for the optimization to weld process.

**Key words:** Q460E, welding process, microstructure, numerical simulation, residual stress

# 独创性声明

秉承祖国优良道德传统和学校的严谨学风郑重声明：本人所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本文所研究的工作和成果的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及其相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任

论文作者签名：    蔡尔彦          2008年 3月 28日

# 学位论文使用授权声明

本人   蔡尔彦   在导师的指导下创作完成毕业论文。本人已通过论文的答辩，并已经在西安理工大学申请博士 / 硕士学位。本人作为学位论文著作权拥有者，同意授权西安理工大学拥有学位论文的部分使用权，即：1) 已获学位的研究生按学校规定提交印刷版和电子版学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，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；2) 为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文或解密后的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所或在校园网上供校内师生阅读、浏览。

本人学位论文全部或部分内容的公布（包括刊登）授权西安理工大学研究生部办理。

（保密的学位论文在解密后，适用本授权说明）

论文作者签名：  蔡尔彦        导师签名：             2008年 3月 28日

## 1 前言

石油井架底座在石油钻井结构中起着支撑所有设备及井架的作用,属于持续承受重压的大型构件,其重要性不言而喻。同时,石油井架的工作环境也很苛刻,服役时间跨越四季,工作环境温差变化较大,在冬季更要经受低温的考验,如果石油井架底座的焊接质量不过关,其后果不堪设想。随着石油钻采业的不断发展,对石油装备的规格及强度要求越来越高,传统钢材已经不能满足这种要求,采用更高强度的钢材势在必行。本节通过对石油机械的用钢现状和石油井架的结构特点进行分析,结合现代井架设计理念,提出了本课题研究的技术路线。

### 1.1 石油用钢现状

国内石油机械用钢系列基本上 20 世纪 70 年代发展起来的包括 Si-Mn-Mo 系高强低碳马氏体钢、Si-Mn-W-V 系超高强钢、高铬耐磨铸钢、无镍低铬无磁钢、Cr-Mn-Mo 接头钢、稀土合金化铸钢,广泛应用于石油钻井装备制造中的吊环、打捞工具、钻井泵、井口、井控装置以及测井车等重要产品。近年来,国内石油制造企业致力于钢的稀土合金化、复合变质处理、钢包吹氩、均衡凝固、凝固模拟等方面的应用基础研究,进一步扩大了石油机械专用铸造钢的系列<sup>[1]</sup>。

石油钻井装备在高载荷复杂条件下工作,流动性和连续作业是其主要特点。石油机械制造又是钢铁资源消耗很大的行业,企业在节材降耗、提高利用率和发展先进科技方面仍有很大空间和潜力。机械装备制造是国民经济的主导产业,在国家经济增长、推动科技进步等方面发挥着非常重要和不可替代的作用。材料科学作为机械制造业的基础,发展先进材料科技已成为二十一世纪世界科学技术的发展趋势和世界各国科技竞争的焦点。目前,石油钻井机械虽然仍广泛使用传统钢铁材料,但随着石油钻井技术和石油装备科技的发展,为适应先进系统集成制造技术的优质、高效、低耗、清洁和文明生产,研究开发和推广应用先进制造技术已成为现代经济发展中的重要任务,发展高可靠性、强韧化、轻量化、节能型、高性价比以及符合环保要求的新材料、新工艺、新技术将成为发展方向,这些都将为石油机械制造科技注入新的思想,带来新的变化。

推广应用新材料,进一步提高石油装备技术水平是时代发展的要求。目前,结构钢占石油钻井机械用钢总量的三分之一,井架和底座等占到钻机总质量的一半左右。据有关人士对钻机整体技术的评价,国内钻机钢结构笨重已是个突出问题,与世界先进水平的石油钻机在相同钻井深度和钩载荷情况下相比,本体质量高 10%~20%,原因之一就是使用低级别结构钢,与国外普遍使用高级别钢种存在着较大的差距。随着现代钻井技术的发展,石油钻井装备呈现向重型和轻型化两方面的发展趋势,迫切希望进一步减轻钻机质量,增加移运性,满足高效作业、低成本和快速钻井的要求。以重型钻机为例,如果能使结构钢的强度提高 1~2 个等级,使用钢材可减少 10%,单台钻机质量至少可减轻 10t,并由此导致配置动力、消耗和起升载荷降低,其直接和间接经济效益是很大的。

## 1.2 石油井架底座的现状

对于老式、重型式机械驱动钻机，所配套的底座都为模块拼装式<sup>[2]</sup>，一般分为前台和后台，前台高后台低，结构不太紧凑，这些底座的起升方式为箱式层叠或低位安装，用绞车通过人字撑起升，各组件采用销或螺栓连接，为了便于运输和拆卸，组件拆分较细，拆装工作量较大，模块化水平低，运输车次多，而且现场拆装时需要大型起吊设备，高位安装时极不安全。新式电驱动钻机，普遍采用旋升式底座，整体结构为平行四边形，比机械驱动钻机底座结构紧凑，可以低位安装，模块化水平较高，但仍然存在拆卸工作量较大、运输车次多的缺点，而且起升时必须先安装人字撑，再用两台电动绞车通过人字撑起升，最后在高位穿销来锁定，复合驱动机的结构形式与机械驱动钻机基本类似。

上述三种驱动形式钻机的底座整体移运性差，随着钻井技术的不断提高，移运性对中深井钻机的效率起着至关重要的作用。移运性包括两个方面的含义：一是井场间长途移运时，模块间拆装较少；二是单列井或从林式井架间短距离移运时，能够整体拖运。

## 1.3 现代设计思想及原则

世界上主要产油区大多集中于人烟稀少、交通不便和自然条件较为恶劣的地区，而目前绝大多数的陆地钻机钻完一口井就需要搬家，移运到别处再钻下一口井。在钻机的使用寿命内，拆卸、运输和安装所耗费的时间占了相当大的比例。因此，如何以最少的时间快速高效地移动、运送石油钻井设备，延长钻机的使用寿命，使钻井成本降为最低成为摆在钻井工程人员面前的关键问题。作为一种新型的快速移运钻机，轻便、快速、安全、高效、低成本是其核心设计思想<sup>[3,4]</sup>。石油井架底座是整个钻井设备的一部分，集成化和一体化的设计思想必须始终贯穿于设计始终，增强各部件的互换性、通用性和可靠性<sup>[3]</sup>。近年来，我国自行设计制造的石油钻机在软件和硬件的配置上已经接近或达到世界先进水平，但是在整体设计思想和设计方案上还有待于进一步提高和改进，尤其是现代设计中所倡导的人性化、集成化、智能化、绿色环保、模块化和并行设计等先进的设计理念未能很好地应于于钻机设计的实践中。作为一个新时代的设计人员，这些设计理念和思想为我们提供了许多可借鉴和学习之处<sup>[5-8]</sup>。

## 1.4 石油井架底座存在的问题

目前国内石油井架结构用钢以传统的 Q345 为主，Q420 正处于试用阶段，而随着石油钻采业的不断发展，石油装备越来越趋向于大型化和集成化。因此，石油机械中钢结构材料成为一个日益突出的问题，主要有以下几个方面：

- 1) 随着石油井架结构体积和高度的不断攀升以及钩载的不断加大，采用 Q345 等传统中低强度钢材制造的井架安全性越来越低，而工程设计人员为了保证安全系数，在井架设计的时候不可避免地要增加结构的相应尺寸，从而大大增加了整体结构的重量，并由此导致配置动力和消耗增加，增加了成本，降低了工作效率。

2)目前国内只有在国家体育馆鸟巢等少数工程中应用过 Q460 系列钢种,针对 Q460E 的焊接工艺还处于摸索阶段。因此,有必要对 Q460E 的焊接性和焊接工艺进行深入的研究以满足工程实际需求。

3)钢材的强度和韧性是一对相互制约的因素,焊接过程是一个复杂的高温瞬态冶金反应,因此不能完全依据强度匹配来选择焊接材料。目前国内针对于特殊钢中的焊接材料开发技术落后于国外,以母材的性能和组织特征为出发点,开发与母材相匹配的焊接材料成一个亟待解决的问题。

## 1.5 研究的主要内容及技术路线

通过分析石油井架的用钢现状和石油装备的发展趋势,本课题拟定了以下研究内容:

1)为了达到提高井架承载能力和减重的目的,针对目前井架多采用 Q345 等传统钢材的现状,拟采用强度和韧性都更好的 Q460E 钢,以达到井架结构增强减重的目的。

2)通过对母材进行性能测试,进一步研究其焊接性,对 Q460E 钢在石油井架底座中的可用性进行评估。

3)为了研究不同的合金元素和强度匹配对焊接接头性能的影响,拟采用不同的焊接材料和焊接方法进行焊接试验,为 Q460E 应用于工程实际提供依据。

4)对所选的焊接材料进行评估,在此基础上针对现行焊接材料的缺陷进行相应的性能改进。

5)对焊接接头进行组织和残余应力分析,并通过数值模拟进一步研究焊接过程中温度和应力应变场的变化规律,从而优化焊接工艺规范。

本课题的技术路线如图 1-1 所示。

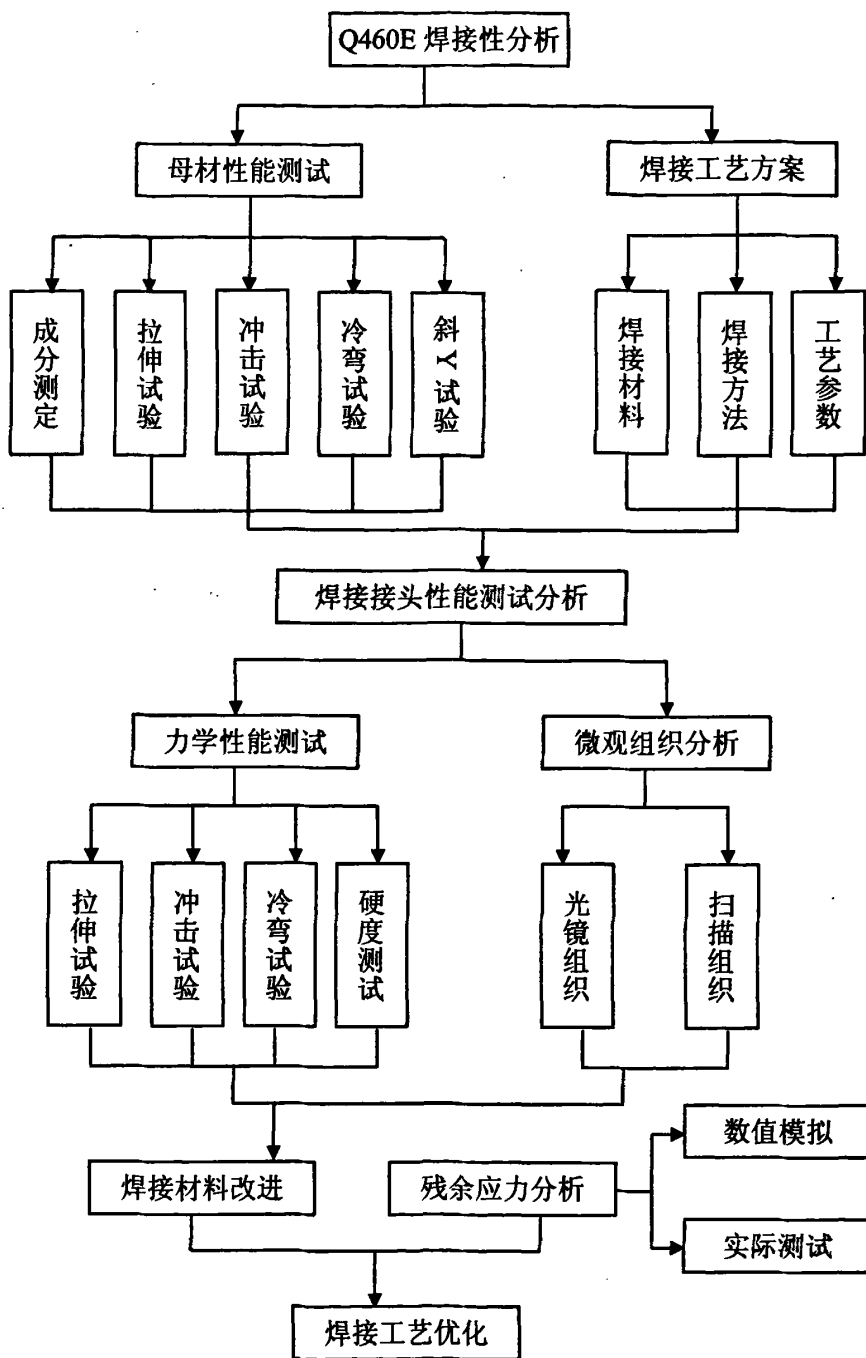


图 1-1 技术路线

Fig.1-1 Technical route of the study



## 2 Q460E 钢焊接性分析及试验方案

一般情况下,金属材料焊接接头的性能与母材本身有关,焊接热循环直接影响焊接热影响区的尺寸、晶粒大小和最终的接头组织形态,从而对整个接头的性能产生很大影响。本文从 Q460E 本身的性能出发,从裂纹敏感性、接头脆化和层状撕裂等方面对 Q460E 钢焊接性能特点进行研究分析,为焊接工艺的制定提供必要的理论和试验依据。

### 2.1 检测项目及方法

根据《焊接数据资料手册》<sup>[9]</sup>中对碳素结构钢的焊接所要求对母材检验的项目,对 Q460E 进行下列性能分析,如表 2-1 所示。

表 2-1 检测项目及试验方法  
Table.2-1 Test items and methods

序号	检验项目	取样数量	取样方法	试验方法
1	化学成分分析	1	GB222-2002	GB223.36-2002
2	拉伸	1		GB228-2002
3	冷弯	1	GB2975-2002	GB232-2002
4	冲击	10		GB2106-2002
5	斜 Y	1		GB4159-2002

### 2.2 试验结果及分析

#### 2.2.1 化学成分分析

母材的化学成分是母材最基本的性质,通过化学成分我们可以通过计算碳当量和冷裂纹敏感指数,从而预测其焊接性;与此同时,通过分析母材的合金系,可以为焊接材料的选择提供必要的依据。本次试验采用光谱分析,试验结果示于表 2-2。所提供的母材的各种化学成分均满足国家标准, S、P 的含量控制得很严格。

表 2-2 母材化学成分 (%)

Table.2-2 Chemical composition of base metal (%)

类别	C	Mn	Si	P	S	V	Nb	Ti	Al	Cr	Ni
实测值	0.15	1	0.35	0.009	0.008	0.003	0.015	0.018	0.053	0.035	0.03
		1.00				0.02		0.02			
标准值	≤0.20	~	≤0.55	≤0.025	≤0.025	~	0.015	~	≤0.10	≤0.70	≤0.70
		1.70				0.20	~0.060	0.20			

#### 2.2.2 拉伸试验

拉伸试验按表 2-1 所示的方法进行,结果示于表 2-3。其屈服强度、抗拉强度和延伸率都达到了国家标准。屈强比为 0.765,断面收缩率为 27.17%,拉伸断口上也有较深的韧窝,可知其韧性较好,并且其屈强比较小,具有较高的安全系数,适合应用于大型的高强度承载结构。

表 2-3 母材拉伸试验结果

Table.2-3 Tensile test results of base metal

类别	屈服强度	抗拉强度	延伸率	屈强比	断面收缩率
	MPa	MPa	%		%
实测值	460.16	601.51	30.08	0.765	27.17
标准值	≥460	550~720	≥17	—	—

### 2.2.3 冲击试验

冲击试验按表 2-1 所示的方法进行, 结果示于表 2-4。Q460E 钢的冲击韧性较好, 并且在 -20℃ 时冲击韧性的下降不是很明显, 当温度下降到 -40℃ 时冲击韧性才有较大的下降, 但仍然保持在一个较高的水平。可知, Q460E 钢的低温韧性较好, 能适应石油井架的服役环境。

表 2-4 母材冲击试验结果  $a_{KV}(J/cm^2)$ 

Table.2-4 Impact test results of base metal

温度	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4	平均值
室温	265.825	260.925	327.075	308.7	290.631
-20℃	284.2	274.4	313.6	260.925	283.281
-40℃	199.3	190.5	180.4	185.7	188.975

### 2.2.4 冷弯试验

冷弯试验按表 2-1 所示方法进行, 结果示于表 2-5。在试样挠度达到 180° 时仍然完好, 试样表面光滑, 没有出现裂纹, 可知其韧性很好, 适合应用于重要的承载结构, 具有较高的安全系数, 即使在发生挠曲时也有足够的时间进行补救, 从而避免事故的发生。

表 2-5 母材冷弯试验结果

Table.2-5 Bending test results of base metal

试样面积	最大载荷	截面抗弯系数	抗弯强度	挠曲	是否
mm <sup>2</sup>	KN	bh <sup>2</sup> /6	M <sub>b</sub> /W GPa	角度	断裂
101.0	8.379	1.68×10 <sup>-8</sup>	14.9	180°	否

### 2.2.5 斜 Y 试验

斜 Y 试验按表 2-1 所示方法进行, 试样的形状及尺寸如图 2-1 所示<sup>[10]</sup>, 试验结果如图 2-2 所示。通过放大镜对焊缝表面进行观察, 不存在任何细小的裂纹, 可知 Q460E 钢的冷裂纹敏感性较低, 产生延迟裂纹的倾向较小。

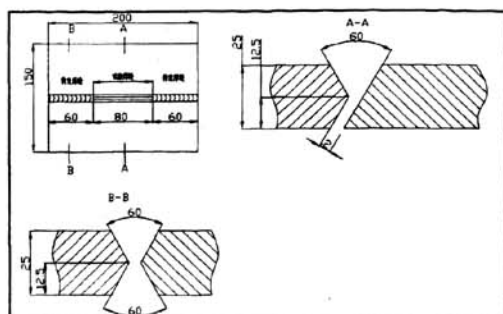


图 2-1 斜 Y 型裂纹试验试样尺寸  
Fig.2-1 Size of ramp Y test specimen

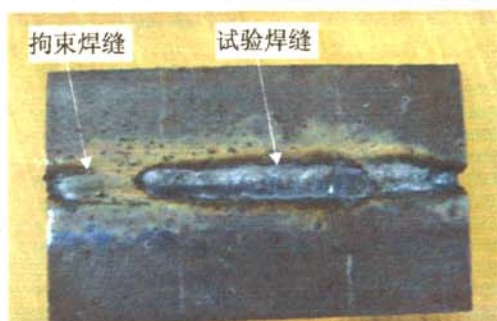


图 2-2 斜 Y 试验试件表面状况图  
Fig.2-2 Surface condition of ramp Y test specimen

## 2.3 Q460E 钢焊接性分析

Q460E 属于热轧正火钢，也是一种低碳低合金高强度钢，整体来看具有较好的焊接性。结合 2.2 节所测的试验结果，从热裂纹敏感性、冷裂纹敏感性、接头脆化和层状撕裂倾向等方面对其焊接性更深层次进行了探讨<sup>[11, 12]</sup>。

1) 热裂纹敏感性 从 Q460E 钢的成分看，含碳量比较低，S、P 的含量也都很低，Mn 含量比较高，因此 Mn/S 能达到要求，具有较好的抗热裂性能，正常情况下焊缝不会出现热裂纹。但当材料成分不合格或严重偏析使局部 C、S 含量偏高时，Mn/S 就可能低于要求而出现热裂纹。在这种情况下，就要从工艺上设法减少融合比，在焊接材料上采用低碳焊丝和含 SiO<sub>2</sub> 较低的焊剂，以此降低焊缝中的含碳量和焊缝中的锰含量，解决热裂纹的问题<sup>[13]</sup>。

2) 冷裂纹倾向 冷裂纹是低合金高强度钢焊接时的一个主要问题。从材料本身考虑，淬硬组织是引起冷裂纹的决定性因素，所产生的裂纹一般是延迟裂纹。因此，焊接时需要对焊缝中氢、接头的冷却速度、焊接线能量和接头的拘束度进行严格控制，采用预热和及时焊后热处理等措施，以防止冷裂纹的产生。母材的碳当量以及合金元素的裂纹敏感指数，可以粗略的估计其冷裂敏感性。一般认为碳当量 CE ≤ 0.4% 时，钢材在焊接时基本无淬硬倾向，焊接性良好，与低碳钢几乎相同。合金元素的裂纹敏感指数可由下面的公式进行计算<sup>[14]</sup>：

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B(\%) \quad (2.1)$$

$P_{cm} = 0.214$ ，其碳当量为 0.327%，可知其冷裂敏感性较小。

3) 接头脆化问题 接头脆化问题主要产生在两个部位：过热区的脆化和加热温度为 200~400℃ 的失效区。对于 Q460 这类正火钢来说，过热区的脆化问题主要与沉淀相溶入和晶粒长大有关。焊接时，如果热输入过大，原来母材在正火态弥散分布的 TiC、VC、VN 溶入到奥氏体中，从而使这些化合物点抑制奥氏体晶粒长大的作用被大大削弱，使过热区的晶粒显著长大；而且由于晶粒粗化引起的奥氏体的稳定性增加，过热区在冷却时还容易产生上贝氏体、M-A 组元等脆性大的组织，因而使过热区严重出现脆化。因此，

相对来说,正火钢的过热敏感性比热轧钢要大<sup>[15]</sup>。

(4)层状撕裂 由于层状撕裂的产生不受钢材的种类和强度级别的限制,即使是在被认为焊接性较好的低碳钢和 $\sigma_s \geq 294 \sim 343 \text{MPa}$ 的非调质钢中也容易产生。从Z向拘束力考虑,撕裂与板厚有关,一般板厚在16mm以下就不容易产生层状撕裂。从钢材本身来说,主要取决于冶炼条件,钢中的片状硫化物与层状硅酸盐或大量成片的密集与同一平面内的氧化铝夹杂物都能导致Z向塑性的降低和层状撕裂的产生,其中以片状硫化物的影响最为严重<sup>[16]</sup>。因此,一般认为,硫的含量和Z向断面收缩率是评定钢材层状撕裂敏感性的主要指标。Q460钢当含S量为0.022%~0.026%和板厚为32mm时,Z向断面收缩率仅10%左右,经Z向窗口试验,在不预热的情况下焊接时有层状撕裂,经150℃预热后无层状撕裂<sup>[17-19]</sup>。

## 2.4 焊接试验方案

为了考察Q460E钢焊接接头的性能,本文从焊接材料、焊接方法、焊接工艺、匹配方式和接头形式等方面设计了一系列试验,从而研究这些因素对焊接接头性能的影响,为Q460E钢焊接工艺规范的制定提供试验依据。

### 2.4.1 焊接材料选择

本文采用了手工电弧焊和CO<sub>2</sub>气体保护焊两种焊接方法,接头匹配方式分为弱匹配和等强匹配,接头形式分为对接和角接,焊接材料的选择主要从以上几个方面考虑。

低合金高强钢焊接材料的选用总的原则是要根据产品对焊缝性能要求选择材料。高强钢焊接时,一般应选择与母材强度相当的焊接材料,必须综合考虑焊缝金属的韧性、塑性及强度,只要焊缝强度或焊接接头的实际强度不低于产品要求即可。焊缝金属的强度高,将导致焊缝韧性、塑性以至抗裂性能下降,从而降低焊接结构的使用安全性<sup>[20]</sup>。这对韧性要求高、抗裂性能差的焊接产品尤为重要,如海洋工程、超高强度钢壳体及压力容器等产品。

石油井架属于大型承载结构,尤其是底座承受着整个井架及钻机的重量,在焊接井架底座时安全性是放在首位的,因此设计的安全系数相对于一般的结构应大一点,即应该保证焊接接头的绝对可靠性,强度上应留有充分的余量来应付载荷的意外波动,韧性上应保证不发生脆断,并能适应低温的侵袭。焊接材料的选择在遵循“等强匹配”的原则下应选择屈强比较低的材料<sup>[21-23]</sup>。

#### A. 弱匹配

Q460E钢的抗拉强度为550MPa~720MPa,弱匹配应选择50公斤级的焊接材料,由此选择大西洋公司的CHE507和CHE507RH焊条作为手工电弧焊焊条,CHW-50C6实芯焊丝作为气体保护焊焊丝,其熔敷金属化学成分及力学性能示于表2-6和2-7。

表 2-6 弱匹配焊材熔敷金属化学成分 (%)

Table.2-6 Molten metal chemical composition of low-matching weld materials

牌号	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cu	其他
CHE507	≤0.10	≤1.60	≤0.60	≤0.015	0.025	0.35~0.80		
CHE507RH	≤0.10	≤1.60	≤0.60	≤0.010	≤0.020	0.35~0.80		
CHW-50C6	0.08	1.52	0.92	0.015	0.020		0.20	≤0.5

表 2-7 弱匹配焊材熔敷金属力学性能

Table.2-7 Molten metal mechanical properties of low-matching weld materials

牌号	抗拉强度	屈服强度	伸长率	冲击功 $A_{kv}(-40^{\circ}\text{C})$
	MPa	MPa	%	J
CHE507	490~590	≥390	≥22	≥34
CHE507RH	≥490	≥410	≥22	≥34
CHW-50C6	550	430	30	≥34

### B. 等强匹配

为了保证焊接结构的强度具有足够的安全性,另外采用了传统的等强匹配原则来选择焊接材料。手工电弧焊选用大西洋 CHE557RH 焊条,该焊条属于 55 公斤级超低氢钠型高韧性焊条,具有良好的缺口冲击韧性和抗裂性能,用于焊接桥梁、压力容器及海洋工程等重要结构。气体保护焊选用林肯公司药芯焊丝 LW81Ni1 和天泰药芯焊丝 TWE-811Ni2,这两种焊丝都是 55 公斤级焊丝,含有较多的 Ni,具有较好的低温韧性。其熔敷金属化学成分和力学性能示于表 2-8 和 2-9。

表 2-8 等强匹配焊材融敷金属成分 (%)

Table.2-8 Molten metal chemical composition of equal-matching weld materials

牌号	C	Mn	Si	S	P	Mo	Ni	Cr	V
CHE557RH	≤0.10	1.0~1.5	≤0.50	≤0.020	≤0.020	≤0.30	0.40~0.90		
LW81Ni1	0.03	0.35	1.3	<0.01	0.01	<0.01	0.85	0.03	0.02
TWE-811Ni2	0.05	0.37	1.03	0.016	0.012		2.40		

表 2-9 等强匹配焊材融敷金属力学性能

Table.3-10 Molten metal mechanical properties of equal-matching weld materials

牌号	抗拉强度	屈服强度	伸长率	冲击功 $A_{kv}(-40^{\circ}\text{C})$
	MPa	MPa	%	J
CHE557RH	≥540	≥440	≥17	≥34
LW81Ni1	550~690	≥470	≥19	≥27
TWE-811Ni2	630	560	26	71

## 2.4.2 焊接工艺

### A. 坡口加工、装配及定位焊

坡口采用机械加工,加工精度较高,坡口用砂轮仔细打磨。在坡口两侧约 50mm 的范围内严格去除水、油、锈及杂物等。焊接件的装配间隙不能过大,避免强力装配定位。为防止定位焊焊缝开裂定位焊缝应有足够的长度,定位点固焊选用同类型的焊接材料。定位焊的顺序应能防止过大的拘束,允许工件有适当的变形,焊点对称均匀分布。定位焊所

用的焊接电流可稍大于焊接时的焊接电流<sup>[24,27]</sup>。

#### B. 药皮清理

每焊一道应仔细清理药皮，用砂轮对焊道表面进行打磨直至全部露出新鲜的焊缝金属，清除磨屑后方可进行下一道焊接，以避免焊缝中夹杂和气孔等焊接缺陷。

#### C. 焊后处理

焊接完成以后应用机械方法修整焊缝外形，使其平滑过渡到母材，减小应力集中。同时，应提高冷却速度，减少焊缝在 600℃左右的停留时间，过长会使热影响区塑性、韧性明显降低<sup>[28,29]</sup>。

#### D. 焊接工艺参数<sup>[30-32]</sup>

表 2-10 焊接工艺参数  
Table.2-10 Weld process parameter

焊接材料	焊材直径	焊接电压	焊接电流	层间温度	坡口形式	
	mm	V	A	℃	对接	角接
CHE507						
CHE507RH	4	25	200			
CHE557RH				100~200	X型	K型
CHW-50C6	1.6	25	300			
LW81Ni1	1.2	25	180			
TWE-811Ni2						

### 2.4.3 试验具体方案

根据试验方法、焊接材料和接头形式等方面制定了试验具体方案，以考察各种因素对焊接接头性能的影响，示于表 2-11。

表 2-11 焊接试验方案  
Table.2-11 Program of welding experiment

焊接材料	焊接方法	接头形式
CHE507	手工电弧焊	对接、角接
CHE507RH	手工电弧焊	对接
CHE557RH	手工电弧焊	对接
CHW-50C6	CO <sub>2</sub> 气体保护焊	对接、角接
LW81Ni1	CO <sub>2</sub> 气体保护焊	对接
TWE-811Ni2	CO <sub>2</sub> 气体保护焊	对接

### 2.5 小结

- (1) Q460E 钢的力学性能良好，适合于做高强度井架结构。
- (2) Q460E 钢的焊接性良好，冷、热裂纹敏感性较小，易于焊接。

### 3 焊接接头力学性能分析

Q460E 作为一种石油井架底座结构材料,其焊接接头的性能对整体井架的质量起着至关重要的作用。为了进一步研究不同的焊接材料和焊接方法对焊接接头性能的影响,同时为了了解焊接接头是否满足工程要求,本节对不同焊接接头进行了拉伸、冲击、冷弯和硬度等试验<sup>[33]</sup>。

#### 3.1 焊接接头拉伸试验

焊接接头拉伸试验按 GB2651-2002《焊接接头拉伸试验法》和 GB228-2002《金属拉力试验法》进行,试验结果示于表 3-1。采用弱匹配的接头的断口位置都位于热影响区,采用等强匹配的接头的断口位置都位于母材区,与此同时,弱匹配的接头的屈服强度普遍高于等强匹配,抗拉强度则远低于等强匹配接头,这表明焊缝与母材的组配方式直接影响着屈服点和抗拉强度。从表中还可以看出,采用气体保护焊的接头的屈强比普遍比手工电弧焊的接头小,这表明气体保护焊相对于手工电弧焊其接头质量更可靠。

表 3-1 Q460E 焊接接头拉伸试验结果

Table.3-1 Tensile test results of Q460E steel weld joint

焊接材料	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	断面收缩率 %	伸长率 %	断口位置
CHE507	462	480	52	30	热影响区
CHE507RH	460	500	55	30	热影响区
CHW-50C6	453	520	64	35	热影响区
CHE557RH	447	588	58	32.2	母材区
LW81Ni1	447	588	60.1	32.2	母材区
TWE-811Ni2	448	590	63.8	33	母材区

#### 3.2 焊接接头冲击试验

焊接接头冲击试验按 GB/T 2649-2002《焊接接头力学性能试验取样方法》和 GB2650-2002《焊接接头冲击试验法》进行,试验结果示于表 3-2。从冲击试验结果来看,热影响区的冲击韧性大部分比焊缝区高,对于弱匹配接头这种趋势相对更加明显,这说明在母材本身冲击韧性较高的情况下,经过焊接热循环后热影响区的冲击韧性仍处于较高的水平。同时还可以发现气体保护焊接头的冲击韧性普遍比手工电弧焊接头高,这说明焊接方法对冲击韧性是有一定影响的,有效的气体保护有利于冲击韧性的提高。从焊接材料来看,含 Ni 较多的接头冲击韧性相对要高,这说明合理的合金系有利于焊接接头冲击韧性的提高。

表 3-2 焊接接头冲击试验结果 (J/cm<sup>2</sup>)  
Table.3-2 Impact test results of welding joints

冲击韧性		CHE507	CHE507RH	CHW-50C6	CHE557RH	LW81Ni1	TWE-811Ni2
室温	焊缝区	151.25	158.23	180.07	187.425	349.375	329.5
	热影响区	264.41	279.43	290.32	231.025	331.238	355
-20℃	焊缝区	133.26	141.85	133.3	151.41	321.93	330.26
	热影响区	230.12	235.21	277.47	155.575	250.39	315.315
-40℃	焊缝区	74.97	85.47	120.05	131.32	236.67	313.6
	热影响区	120.56	150.16	182.92	202.86	262.64	311.64

### 3.3 焊接接头冷弯试验

焊接接头冷弯试验按 GB/T 2649-2002《焊接接头力学性能实验取样方法》GB/T10128-2002《金属室温弯曲试验法》进行, 试验结果示于表 3-3。6 种焊接接头的抗弯性能都较好, 全部冷弯试样都是完好的, 这说明 Q460E 的焊接性良好, 要求匹配的焊接材料在抗弯性能方面要求不高, 一般的低碳钢焊丝都能满足使用要求, 所以在焊材的选择上不用着重考虑这个因素的影响。

表 3-3 冷弯试验结果  
Table.3-3 Results of bending test

试 样	试样面积 mm <sup>2</sup>	最大载荷 KN	断裂 情况
CHE507 (电弧焊)	102.8	7.938	完好
CHE507RH (电弧焊)	104.3	8.477	完好
CHW-50C6 (CO <sub>2</sub> 气保焊)	100	7.889	完好
CHE557RH (电弧焊)	100	8.232	完好
LW81Ni1 (CO <sub>2</sub> 气保焊)	101.2	8.563	完好
TWE-811Ni2 (CO <sub>2</sub> 气保焊)	104.1	8.621	完好

### 3.4 焊接接头硬度测试

焊接接头硬度测试按 GB231-2002《金属布氏硬度试验方法》进行, 试验结果如图 3-1 所示。手工电弧焊和气保焊硬度分布的趋势基本一致, 按焊接接头的三个区来看, 其硬度分布具有如下特点:

- 1) 焊缝区 硬度的变化比较平稳, 约为 250HV;
- 2) 热影响区 熔合线附近硬度有先增加然后减小的趋势, 即在热影响区存在一个硬化区和一个软化区, 手工电弧焊的热影响区硬化区的硬度为 263HV, 软化区硬度为 200HV, CO<sub>2</sub>气体保护焊的热影响区硬化区的硬度为 278HV, 软化区硬度为 200HV;
- 3) 母材区 母材区的硬度变化趋于稳定, 约为 260HV。



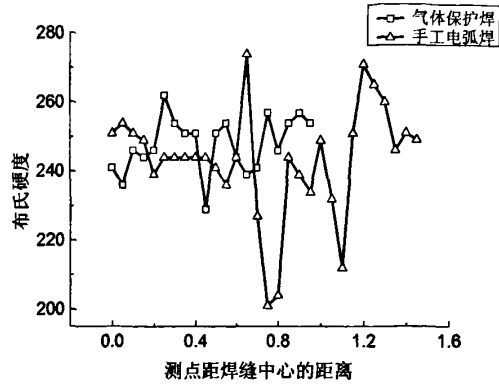


图 3-1 焊接接头硬度分布

Fig.3-1 Hardness value of welding joints

### 3.5 小结

- (1) 弱匹配接头的屈服强度比等强匹配接头高，而抗拉强度则比等强匹配接头低。
- (2) 热影响区的冲击韧性比焊缝区好，对于弱匹配这种趋势更加明显，同时，气保焊接头的韧性比手工电弧焊好。
- (3) 低碳焊材所焊的接头抗弯性能一般都较好，整体来看韧性都较好。
- (4) 焊缝区和母材区的硬度波动不大，热影响区存在软化区和硬化区。

## 4 焊接接头组织分析

焊接接头分为三个区：母材、焊缝和热影响区。影响焊接接头组织的影响因素包括焊接材料、焊接方法、焊接工艺参数及热处理规范等，不同的组织其力学性能也差异较大。本节通过光镜和扫描进行了微观组织观察，并通过定量金相等手段进行了组织分析，确定了各相的比例、晶粒尺寸和组织形态，从而进一步研究不同的焊接材料和焊接方法对焊接接头组织的影响。

### 4.1 定量金相

定量金相工作早在二、三十年前就已经展开，这是因为要比较精确地了解组织与性能之间的关系，找出其规律性，就不能仅仅满足于鉴别组织和对组织特征的大致估量，而需要应用某些可以测量或计算的参数来确切地表征组织的特点，寻找他们与性能的定量关系。例如，晶粒大小与强度或韧性的关系，珠光体中片间距与强度和硬度的关系，中、高回火组织中碳化物粒子间距与机械性能的关系等等。

研究中对金相中各相的相对量进行测量，即对组织中的珠光体与铁素体的含量进行了测定。测定依据是：待测向所占体积百分数等于在观察试样面积中他所占的面积百分数，也等于在观察线段中它所截线段的百分比，也等于在观测的总点数中所占的点数百分比。即：

$$P_p = L_L = A_A = V_V \quad (4.1)$$

式中  $P_p$ 、 $L_L$ 、 $A_A$ 、 $V_V$  分别表示待测相所占的点、线、面、体积的百分比。

本次测量采用的是网格计点法进行测量,如图 4-1 所示,绘制一个  $9 \times 4$  的表格,选择具有代表性的区域,使单元表格的大小与晶粒大小成 1:1 比例,然后对小格顶点在各个组织区域的分布进行统计。在一张金相照片上按精度要求取 3~5 个区域分别进行统计,求出平均值,统计的次数越多精度越高。

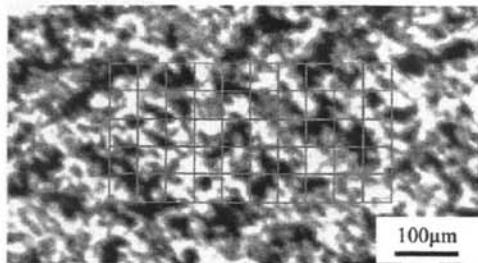


图 4-1 计点法示意图

Fig.4-1 Sketch of point-counting method

### 4.2 光镜组织分析

从图 4-2 中图 a 和图 c 可以看出, CHE507 焊接接头母材区的组织与焊缝区相近,以铁素体和珠光体为主,其中铁素体的含量约为 60%,珠光体的含量约为 40%,铁素体以块状为主,珠光体以层片状为主。从图 c 和图 d 可以看出,热影响区的晶粒明显比焊缝区细小,这也说明了热影响区的冲击韧性比焊缝区好的原因。从图 b 可以看出,热影响区的铁素体含量要高于母材区。此外,从整体来看,各个区的组织都较为均匀,不存在明显的偏析。

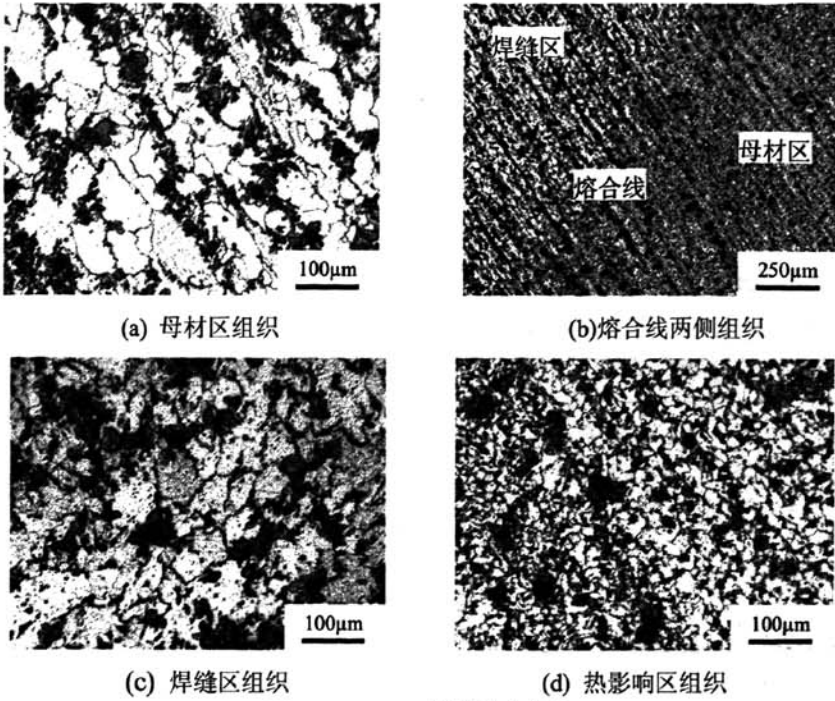


图 4-2 CHE507 焊接接头组织

Fig.4-2 Microstructure of CHE507 welding joints

从图 4-3 中图 a 和图 b 可以看出, CHE507RH 焊接接头热影响区铁素体含量要高于母材区, 其中热影响区铁素体约占 64%, 母材区铁素体约占 60%。从图 c 和图 d 可以看出,

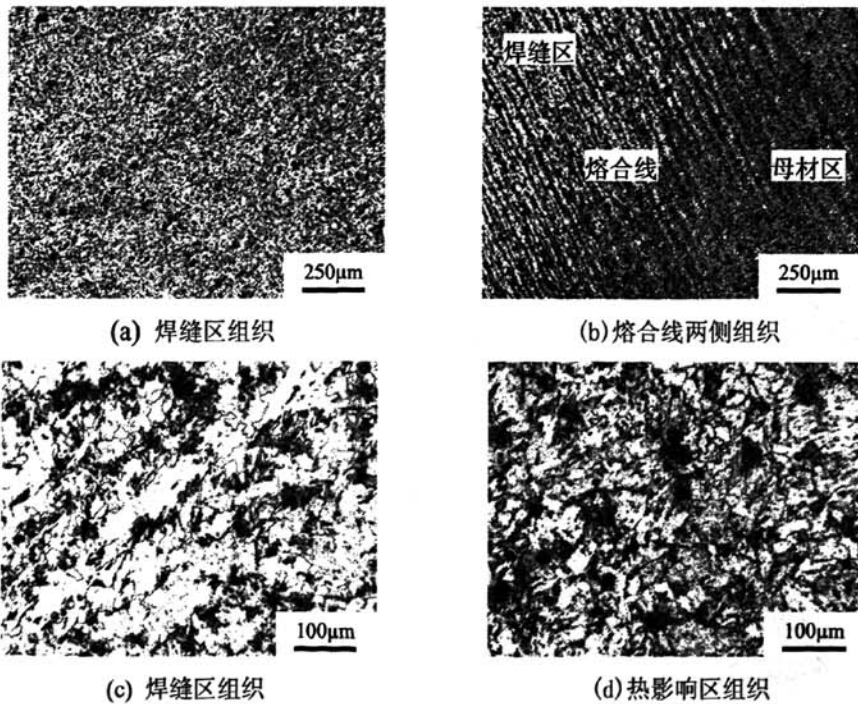


图 4-3 CHE507RH 焊接接头组织

Fig.4-3 Microstructure of CHE507RH welding joints

热影响区晶粒比焊缝区细小，针状铁素体的含量也相对较多。

从图 4-4 中图 a 和图 b 可以看出, CHW-50C6 焊接接头熔合线两侧的组织有明显区别, 其中偏向母材一侧的组织珠光体含量比焊缝高。从图 c 和图 d 可以看出, 焊缝区和热影响区的整体组织都较为均匀, 两个区的晶粒尺寸也相近, 这说明影响冲击韧性的因素除了与晶粒尺寸有关之外, 与各相的比例也有较大的关系。同时, 从图 4-3 中图 c 和图 4-4 中图 c 还可以看出, CHE507RH 接头焊缝区铁素体含量明显高于 CHW-50C6 接头, 这说明 Ni 对焊缝形成铁素体有较大的促进作用。

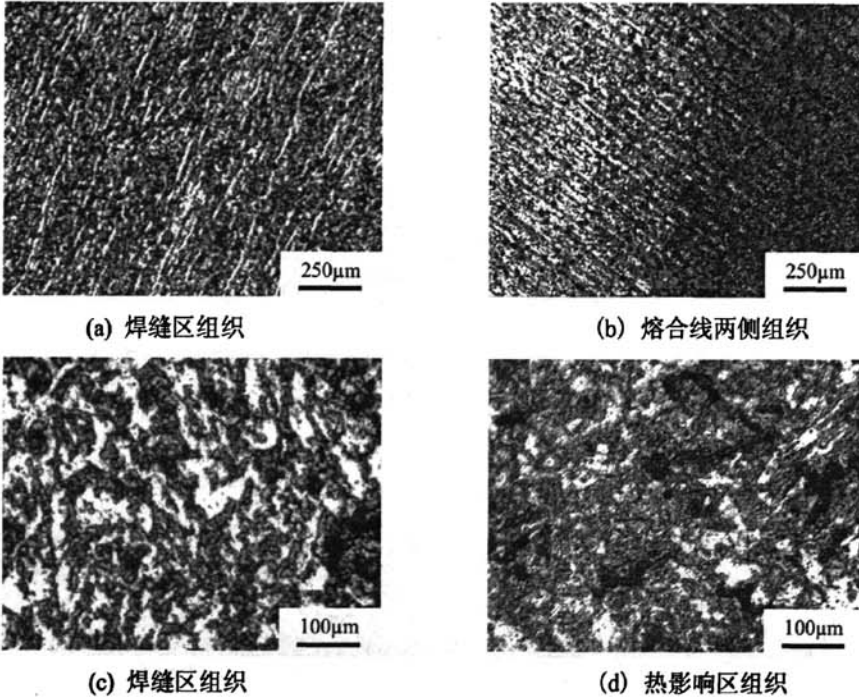


图 4-4 CHW-50C6 焊接接头组织

Fig.4-4 Microstructure of CHW-50C6 welding joints

从图 4-5 中图 a 和图 b 可以看出, CHE557RH 焊接接头母材区的晶粒尺寸要比焊缝区大很多, 母材区的铁素体以块状为主, 而焊缝区以针状为主。从图 b、图 c 和图 d 还可以看出, 焊缝区的铁素体在局部区域有少量聚合, 热影响区的铁素体分布更加弥散均匀。

从图 4-6 中图 a 和图 b 可以看出, LW81Ni1 焊接接头焊缝区的晶粒尺寸比母材区细小, 母材区的铁素体以块状为主, 而焊缝区以针状为主。从图 c 和图 d 还可以看出, 热影响区铁素体的含量高于焊缝区, 并且分布也相对更加弥散, 焊缝区能看到铁素体有块状或者长条状的聚合。从图 4-5 中图 d 和图 4-6 中图 d 可以看出, LW81Ni1 接头热影响区铁素体的形态与 CHE557RH 有明显区别, 前者所含的针状铁素体更多, 结合两种焊材的成分来看, 说明多元微合金化对改善接头组织形态有较大的影响, 在总量相近的情况下, 其效果比单一合金好, 能促进更多针状铁素体的生成。

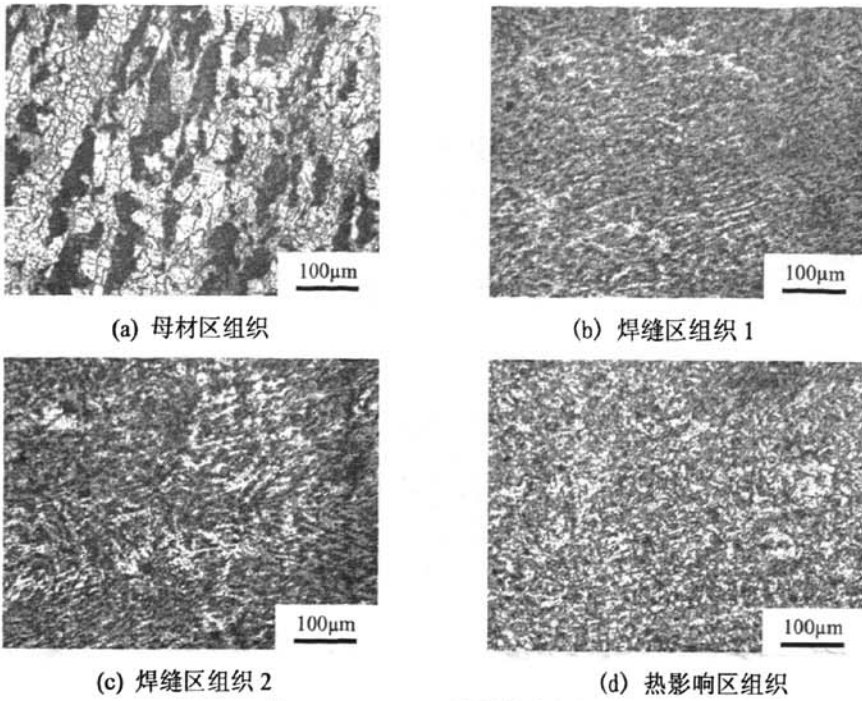


图 4-5 CHE557RH 焊接接头组织

Fig.4-5 Microstructure of CHE557RH welding joints

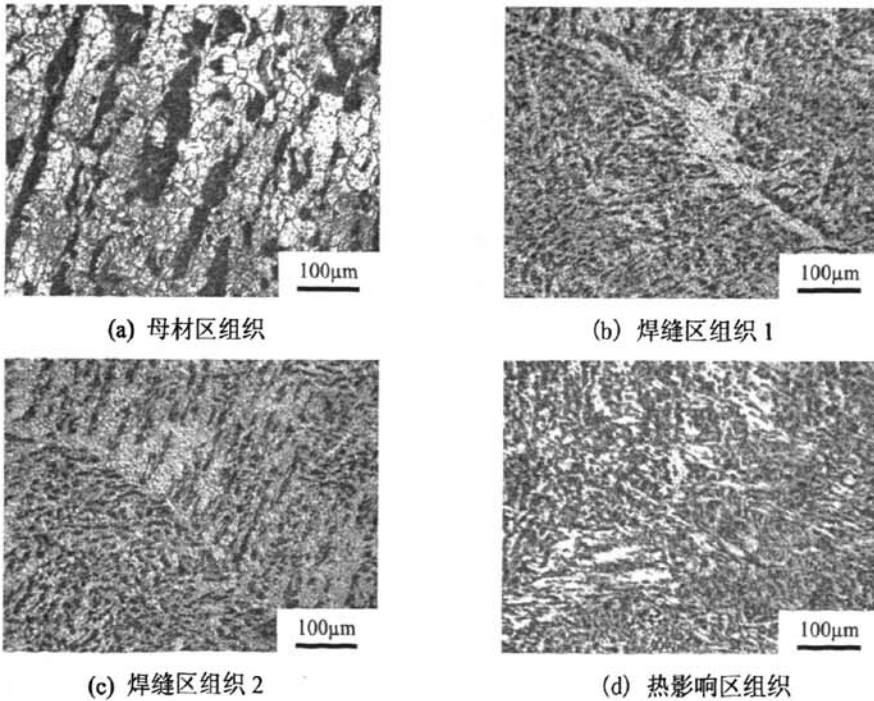


图 4-6 LW81Ni1 焊接接头组织

Fig.4-6 Microstructure of LW81Ni1 welding joints

从图 4-7 中图 a、图 b 和图 d 可以看出，母材区的晶粒较粗大，焊缝区和热影响区的晶粒相差不大，都较细小，焊缝区存在一定量的聚合组织，所占比例较小，晶粒并没有长

大。从图 c 和图 d 可以看出,热影响区的聚合组织很少,铁素体和珠光体的相对含量约为 3:2。从图 4-6 中图 d 和图 4-7 中图 d 还可以看出, TWE-811Ni2 接头的晶粒尺寸更加细小,而 LW81Ni1 接头的针状铁素体含量比 TWE-811Ni2 高,结合两种焊材的成分来看,说明 Ni 对细化晶粒也有较明显的作用,而添加微量的 Cr 和 V 对于形成针状铁素体有较明显的作用。

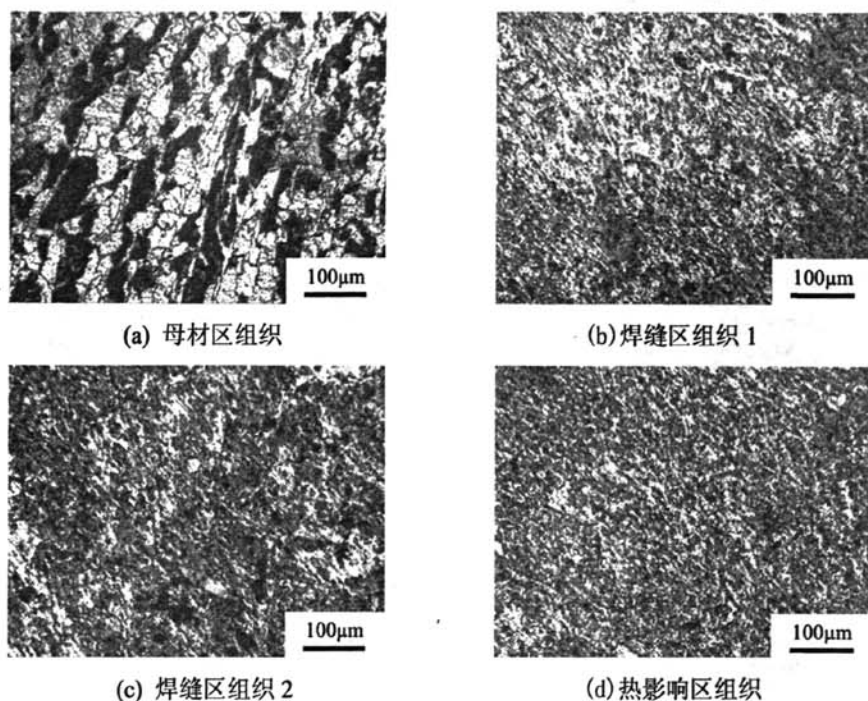


图 4-7 TWE-811Ni2 焊接接头组织

Fig.4-7 Microstructure of TWE-811Ni2 welding joints

### 4.3 扫描组织分析

通过扫描组织分析强化相的形态以及晶界的纯净度,研究不同的焊接接头强化的方式,更进一步分析各种组织的形态。

从图 4-8 中图 a 可以看出,母材的晶界较纯净,铁素体以块状为主,第二相也较少,整体组织很均匀。从图 b 可以看出, CHE507 接头的焊缝组织与母材很相近,晶界较纯净,铁素体以块状为主,晶粒尺寸较大。从图 c 和图 d 可以看出,两者都有枝晶存在,晶界不是很纯净,在晶粒内部存在一定量的强化相,珠光体的形貌以层片状为主,其强化方式以沉淀强化为主。结合焊材的化学成分,从图 b 和图 c 还可以看出严格控制焊缝中 S、P 的含量可以减少偏析,有利于形成更多的枝晶。



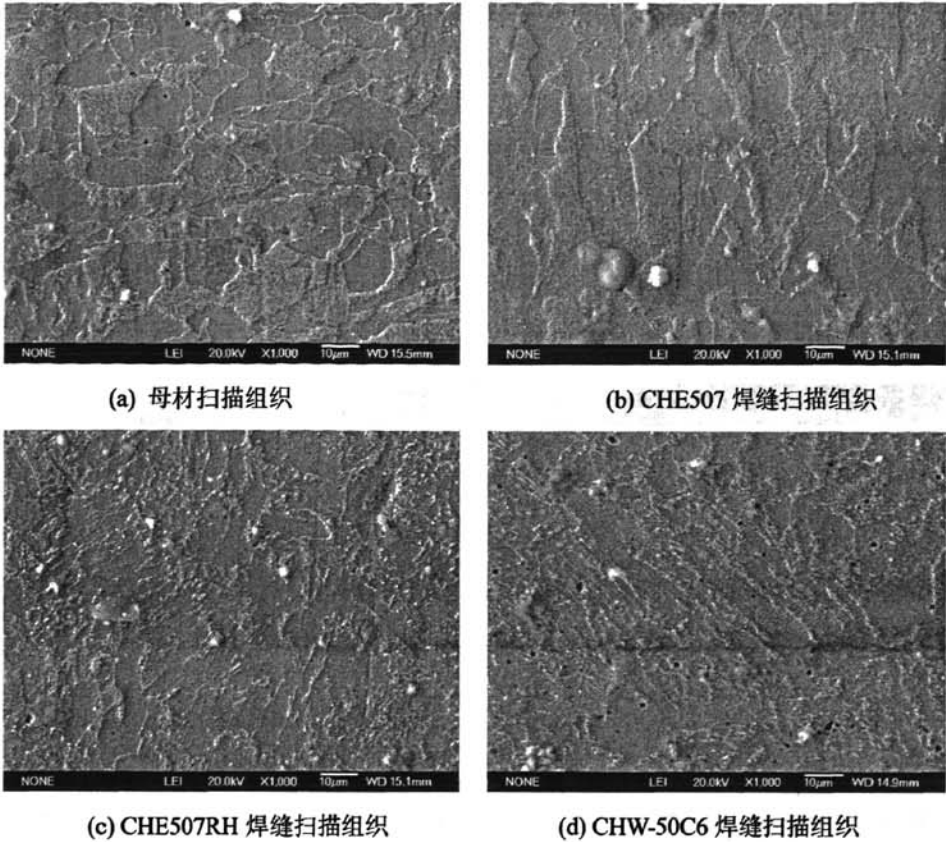


图 4-8 焊接接头扫描组织

Fig.4-8 Scanned photos of welding joints

#### 4.4 小结

(1) 焊缝区的晶粒尺寸普遍母材区的晶粒尺寸小，表明所选的焊材具有较好的匹配性，焊缝的性能要高于母材。

(2) 多元微合金化有利于细化晶粒，提高焊缝中铁素体的含量，促进针状铁素体的形成。

(3) 严格控制焊缝中 S、P 的含量有利于减少偏析，增加枝晶的数量，从而增加焊缝的强度和韧性。

## 5 低氢焊条研制

在第3节和第4节中通过对焊接接头的性能和组织进行分析,发现同级别的焊条和焊丝所焊的接头的冲击韧性存在着一定的差距,焊条的性能有进一步提高的空间和必要。本节结合前面的试验结果,通过针对性地分析几种主要合金元素对焊接接头的性能和组织的影响,对现行焊条的合金系进行调整<sup>[34-37]</sup>,以期通过控制焊缝中的合金元素得到较多的针状铁素体以及晶粒细化来提高焊接接头的冲击韧性。与此同时,针对现行焊条飞溅较大、有断弧现象及脱渣性能有待提高的现状,通过调整药皮配方以期能改善其工艺性能。

### 5.1 焊条合金系设计

根据前述分析,我们了解到合金元素对焊接组织的形成有着显著的影响,典型焊接材料的成分示于表5-1。与CHE507焊条相比,CHE557RH焊条的S、P控制更为严格,Ni的含量稍有提升,并增加了0.30%左右的Mo。林肯焊丝LW81Ni1主要采取了多元微合金化的合金系,Mo、Cr和V都有,但是含量都很小,同时加入了1%左右的Ni,而天泰焊丝TWE811Ni2的合金系较简单,其主要的合金元素是Ni,含量在2%以上。

表5-1 各种焊接材料熔敷金属化学成分(%)

Table.5-1 Molten metal chemical composition of different weld materials

牌号	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	V	Cr
CHE507	≤0.10	≤0.60	≤1.60	≤0.015	≤0.025	0.35~0.80			
CHE557RH	≤0.10	≤0.50	1.0~1.5	≤0.020	≤0.020	0.40~0.90	≤0.30		
LW81Ni1	0.03	0.35	1.3	<0.01	0.01	0.85	<0.01	0.02	0.03
TWE811Ni2	0.05	0.37	1.03	0.016	0.012	2.40			

根据第3节力学性能测试结果来看,现行焊条的强度都能达到要求,主要改进方向是低温冲击韧性,几种典型焊材焊接接头在-20℃时的冲击韧性如表5-2所示。CHE507焊接接头的冲击韧性最低,TWE811Ni2焊接接头的冲击韧性最好。从焊材熔敷金属的成分来看,TWE811Ni2接头的镍含量是最高的,说明镍元素对冲击韧性的影响是很显著的,适量增加镍的含量有助于提高焊接接头的冲击韧性。另外,LW81Ni1接头的冲击韧性也较高,但是其Ni含量比TWE811Ni2焊接接头低很多,但是同时增加了微量的Cr、Mo、V三种合金元素,说明多元微合金化对冲击韧性的提高同样具有明显的作用。

表5-2 -20℃时焊接接头冲击实验结果(J/cm<sup>2</sup>)

Table.5-2 Impact test results of weld joints at -20℃

焊接材料	CHE507	CHE557RH	LW81Ni1	TWE811Ni2
冲击韧性	133.26	151.41	321.93	330.26

根据第4节组织分析结果来看,要提高焊缝的冲击韧性一方面是提高焊缝中铁素体的含量,另一方面是细化晶粒,增加针状铁素体的含量,几种典型焊材焊接接头组织如图5-1所示。从整体来看,各种焊接接头的组织都较为均匀,其中CHE507焊接接头的组织与母材最为接近,后三种焊接接头的晶粒都比母材细小。主要组织都为铁素体和珠光体,



母材的铁素体与珠光体的比例约为 3:2, TWE811Ni2 焊接接头的铁素体含量是最多的。由此可知, 冲击韧性较高的焊接接头中所含的铁素体含量也相对较高, 这是因为铁素体本身属于韧性较好的组织。

从焊接接头的化学成分来看, TWE811Ni2 接头的镍含量最高, 其所含的铁素体比例也是最高的, 其冲击韧性也是最好的。这是因为镍和碳元素不形成化合物, 以互溶的形式存在于钢的  $\alpha$  相和  $\gamma$  相中, 使之强化, 并通过细化  $\alpha$  相的晶粒改善钢的韧性。另外, CHE557RH 焊接接头以及 LW81Ni1 焊接接头的晶粒也都较为细小, CHE557RH 是通过添加了适量的 Mo 元素达到了这一效果, 而 LW81Ni1 则是通过多元微合金化较好的控制了铁素体与珠光体的相对含量, 并且细化了晶粒, 获得了质量优异的焊接接头。

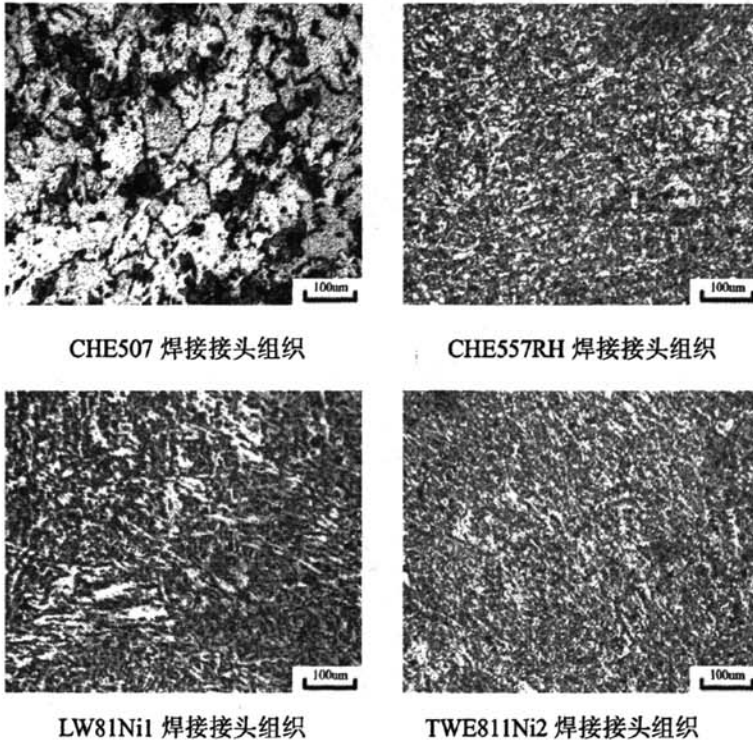


图 5-1 各种焊接接头金相组织

Fig.5-1 Microstructure of different weld joints

通过分析合金元素对焊缝性能的影响及其微观机理, 本文确定焊缝的组织中铁素体与珠光体的含量约为 3:2, 铁素体多以针状铁素体形式存在。针对设计的组织特点, 确定焊条的化学成分, 如表 5-3 所示。

表 5-3 熔敷金属化学成分设计 (%)

Table.5-3 Molten metal chemical composition design

C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	V	S	P
≤0.08	≤0.40	1.0~1.3	0.8~1.0	0.2~0.4	≤0.05	≤0.05	≤0.02	≤0.02

## 5.2 焊条药皮配方设计

低氢型焊条改进的总方向是向高效、超低氢和低毒方向发展，重点放在改善焊条的工艺性能上，主要是稳弧、脱渣及再引弧性能的改善<sup>[36, 37]</sup>。

1) 稳弧的主要途径：K 的电离电位比 Na 低，用钾水玻璃做粘接剂或在药皮中加入  $K_2CO_3$ ，可降低电弧空间的有效电离势，有利于电弧的稳定，但钾水玻璃的粘接性不如钠水玻璃，且易使涂料硬化，不利于焊条的压涂，故推荐采用钾钠混合水玻璃，两者的配比为 0.3 时最佳，可提高焊条的耐吸潮能力。

2) 改善脱渣性能的途径：在通常的低氢型药皮配方中加入 1~10% 的油页岩或者  $ZrO_2$  可达到提高熔渣线膨胀系数，改善脱渣性能的目的。

3) 提高引弧性能的途径：一般低氢型焊条普遍存在引弧性较差和在引弧处易产生气孔的问题。为解决此问题，可采用对焊芯端部进行特殊加工，减少有效面积，提高电流密度，最行之有效的方法是在引弧端涂制引弧剂。

4) 降氢的途径：焊缝中的扩散氢是产生延迟裂纹的主要原因之一。电弧气氛中的氢主要来自于药皮中的水分、含氢物质及空气中的水分。因此，对低氢型焊条来说，影响熔敷金属扩散氢含量的主要因素是焊条药皮的含水量及焊接冶金过程中的去氢能力，主要有如下措施：

表 5-4 药皮配方  
Table.5-4 Composition of coating

类别	粉剂		数 量 (kg)				工艺要求
	号码	名称	Φ2.5	Φ3.2	Φ4.0	Φ5.0	
主 配 方	1	大理石		45			钾钠水玻璃
	2	萤石		23			模数 (M) 3.0~3.2
	3	石英		4.5			浓度 40
	4	天然金红石		1.5			烘干温度 350℃
	5	钛铁		2.5			定径模： Φ2.5/ 4.20~4.30
	6	雾化硅铁		2.5			Φ3.2/ 5.20~5.30
	7	钛白粉		2.5			Φ4.0/ 6.30~6.40
	8	中碳锰铁		5			Φ5.0/ 7.60~7.70
	9	雾化铁粉		15			备 注
	10	$ZrO_2$		1.5			
	11	钾钠水玻璃			其余		
	小 计			99 (不含水玻璃)			

A. 降低药皮中的含水量控制氢的来源,如在焊条药皮配方中常用的白泥、云母、长石、滑石等应尽量不用或少用这些物质;

B. 提高焊接冶金过程中的去氢能力。研究表明,  $\text{CaF}_2$  和  $\text{CaCO}_3$  同时加入可以大大提高去氢能力。在低氢型碱性渣系里,大理石和萤石的总量一般控制在 60~75%,可调范围较小,在大理石与萤石的总量一定的情况下,其对比对焊条的工艺性能影响较大。提高大理石含量降低萤石含量,电弧的稳定性增加,熔渣的碱度和氧化性增大,同时,熔渣的熔点提高,粘度和表面张力增大,流动性变差,焊道变窄,堆高增加;反之,则会使电弧的稳定性变差,药皮熔点降低,焊条套筒变短,电弧吹力不够,飞溅增大,熔渣过稀,保护不良。合适的大理石与萤石的配比在 1~2 之间。

综合考虑焊条工艺性能的各个方面,确定了药皮的配方,如表 5-4 所示。

药皮渣系为  $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-SiO}_2$ ,主要控制大理石与萤石的比例在 1~2 之间,钾钠水玻璃的配比约为 0.3,加入了少量的  $\text{ZrO}_2$  以改善脱渣性能,控制硅酸盐的含量以保持熔渣有足够的碱度,从而保证焊缝拥有足够的韧性,同时又不能使熔渣的粘度过大。

### 5.3 焊条制备及性能测试

按照以上配方委托有关企业进行了焊条的压制,并采用试制的焊条进行了对接焊接试验,母材为 Q460E 钢板,尺寸为  $150\text{mm}\times 600\text{mm}\times 25\text{mm}$ ,坡口为  $45^\circ$  V 型坡口,焊接工艺参数如表 5-5 所示。

表 5-5 焊接工艺参数  
Table.5-5 Welding parameter

焊接电压	焊接电流	焊接速度	层间温度
25V	200A	2mm/s	100~150℃

对焊接接头进行了拉伸试验,试验结果示于表从表 5-6。拉伸断口位于母材上,力学性能与 CHE557RH 焊条相近,说明试制焊条在强度方面完全满足 Q460E 钢的焊接要求。 $-20^\circ\text{C}$  时试制焊条焊接接头的冲击功为 176.4J,比 CHE557RH 焊接接头高 55J 左右,可见试制焊条的低温冲击韧性通过改进有了较为明显的提高,这说明通过多元微合金化尤其是控制 Ni 和 Mo 的含量以及严格控制 S、P 的含量可以改善低氢型焊条的低温冲击性能。与此同时,通过实际焊接测试,发现所试制的焊条在稳弧性能、飞溅以及脱渣性能方面也有所改善。

表 5-6 焊接接头力学性能  
Table.5-6 Mechanical properties of welding joints

焊接材料	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	断面收缩率 %	延伸率 %	冲击功 J (-20℃)	拉伸试样 断裂位置
试制焊条	442	580	37.5	34	176.4	母材
CHE557RH	447	588	38	34.5	121.128	母材

## 5.4 小结

(1) 为了提高焊缝的冲击韧性，采用多元微合金化和严格控制 S、P 的含量是有效的途径。

(2) 试制焊条在强度方面完全满足 Q460E 钢焊接要求，屈服比较小，安全系数较高。

(3) 试制焊条在低温冲击韧性方面有明显的改善， $-20^{\circ}\text{C}$  时冲击功提高了 50J 以上，并改进了稳弧、飞溅及脱渣性能。

## 6 温度及残余应力场分析

焊接过程中由于不均匀温度场会在焊接结构中产生残余应力,其大小和分布状态对焊接结构有较大的影响。石油井架底座是重要的承载结构,其应力状态直接关系到整体井架的安全性及使用寿命。因此,研究焊接结构的残余应力具有十分重要的意义。本节通过对焊接过程进行数值模拟,研究了焊接过程中瞬时温度场和应力应变场的变化规律,并将模拟结果与实际测试结果进行了对比分析。

### 6.1 焊接过程数值模拟

用盲孔法进行焊接变形及残余应力的测试是一项非常耗时耗力的工作,并且属于破坏性测试,具有很大的局限性,与此同时,盲孔法所选择的测试点的数目也很有限,并且只能测试表面的状态。由此可见,有限元模拟是完全有必要的,并且具有实际测试所不具备的一些优势,主要体现在以下几个方面:

- a) 有限元模拟所需时间较少,所需要的人力和物力也较少;
- b) 在模型及参数合理的情况下,计算结果具有较高的精度,能满足实际需求;
- c) 参数可反复进行调整,采用命令流的操作方式使整个计算过程简单;
- d) 可即时输出运算结果,以表格、曲线图或云图的方式显示结果,快速准确;
- e) 既可显示整体的状态又可显示沿某条曲线或某个截面的状态;
- f) 可精确显示每一个节点的运算结果,不受实测条件的限制。

有限元模拟具有上述优势,通过有限元模拟我们可以预测某些焊接过程的可能产生的变形以及残余应力,从而通过调整一些参数来优化焊接工艺,避免不必要的损失,节省了大量的实验时间。

#### 6.1.1 热源模型的选取

焊接热循环温度场的准确计算是准确模拟焊接残余应力与变形的前提。用于计算温度场的热源模型有许多种。最早使用的是点热源、线热源和面热源,分别用于不同形式焊件的温度场解析解。这些热源形式简单,但计算结果精度差。在焊接温度场分析中广泛运用的是经典的高斯热源模型,以及双椭球热源模型。

高斯热源模型<sup>[38-43]</sup>

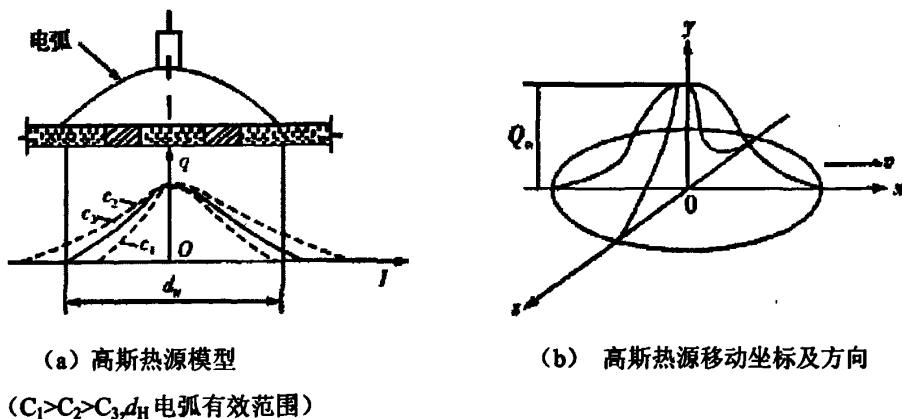
Eagar 和 Tsai 将焊接加热斑点上热流密度的分布近似地用高斯数学模型来描述,即焊接热源的热流密度可表示为如下高斯分布函数:

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (6.1)$$

式中  $q_m = \frac{3}{\pi R^2} Q$ , 而  $Q = \eta UI$

$q_m$  为加热斑点中心最大热流密度  $J/(m^2 \cdot s)$ ;  $R$  为电弧有效加热半径 mm;  $r$  为热源

某点至电弧加热斑点中心的距离 mm;  $Q$  为热源瞬时给焊件的热能 W;  $\eta$  为焊接热效率;  
 $U$  为电弧电压 V;  $I$  为焊接电流 A。



(a) 高斯热源模型

(b) 高斯热源移动坐标及方向

( $C_1 > C_2 > C_3, d_H$  电弧有效范围)

图 6-1 高斯热源模型

Fig.6-1 Gauss heating source model

由于高斯分布函数没有考虑电弧的穿透作用, 为了克服这个缺点, A Goldak 提出了双椭球形热源模型。这种模型将焊接熔池的前半部分作为一个 1/4 椭球, 后半部分作为另一个 1/4 椭球。设前半部分椭球能量分数为  $f_1$ , 后半部分椭球能量分数为  $f_2$ , 且  $f_1 + f_2 = 2$ 。

前半部分椭球内热源分布函数:

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi^{3/2}abc_f} \exp\left\{-3\left[\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c_f}\right)^2\right]\right\} \quad (6.2)$$

后半部分椭球内热源分布函数:

$$q(r) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi^{3/2}abc_r} \exp\left\{-3\left[\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c_r}\right)^2\right]\right\} \quad (6.3)$$

式中的  $a, b, c_b, c_r$  可取不同的值, 它们相互独立。在焊接不同材质时, 可将双椭球分成 4 个 1/8 的椭球瓣, 每个可对应不同的  $a, b, c_b, c_r$  值。

生死单元热源加载

高斯、双椭球 2 种热源模型将焊接热流直接施加在整个焊件有限元模型上, 不能模拟焊缝金属熔化和填充, 无法模拟实际焊接过程, 而生死单元能够克服这个缺点。生死单元技术就是采用生死单元模拟焊缝填充的方法来模拟焊接热输入过程。通过试验测量, 将全部焊接热均匀分布在焊缝上, 假设所有焊缝单元在计算前是不激活的。

B.Brickstad 和 B.L.Josefson<sup>[44]</sup> 采用在焊缝单元上加载均匀热流的热源模式, 使单位体积上的热流或者热生成率恒定, 所采用的热源计算公式为:

$$q = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{V} \quad (6.4)$$

其中  $U$  - 电压,  $I$  - 电流,  $\eta$  - 电弧效率,  $V$  - 热源作用体积。

在开始计算前，将焊缝中所有单元“杀死”。在计算过程中，按顺序将被杀死的单元“激活”，模拟焊缝金属的填充。同时，给激活的单元施加生热率，热载荷的作用时间等于实际焊接时间。每一步计算完成之后，删除该步的生热率，重新进入下一步加载计算，得到最终的焊接残余应力。由广西大学机械学院<sup>[45]</sup>的试验结果可以得到，在焊接热参数输入一致的情况下，高斯热源和双椭球形热源计算出的焊件底部温度均低于金属的熔点，未能达到真正焊透的效果，而采用生死单元技术施加热载荷，焊件表面至焊件底部的温度都能达到金属的熔点，确保整个工件能被焊透，从而能够较好地模拟深熔焊缝的温度场。

应用生死单元方法加载，能够更有效地模拟焊缝的形成过程和焊接热载荷的输入，而且这种处理方法较构造焊接热流密度函数的方法简单，更适用于复杂结构的焊接过程模拟，且计算效率和精度均高于高斯热源模型法和双椭球热源模型法<sup>[46,47]</sup>。

### 6.1.2 Ansys 有限元模拟分析

Ansys 分析过程一般包括建立模型、加载边界条件并求解和检查分析结果三个大的步骤，其分析流程如图 6-2 所示。

#### 6.1.2.1 单元属性设置

1) 单元类型 本文的单元分为二维单元和三维单元，其中二维单元选择couple field下的vector quad13，三维单元选择默认即可。

2) 定义材料属性 Q460E的性能参数如表6-1所示<sup>[48-52]</sup>。

表6-1 Q460E的材料性能参数

Table.6-1 Properties parameter of Q460E steel

摄氏 温度/°C	弹性模量 Pa	屈服强度 Pa	切变模量 Pa	材料密度 kg/m <sup>3</sup>	泊松比	传热系数 W/(m <sup>2</sup> ·°C)	线胀系数 1/°C	比热容 J/(kg·°C)
20	1.93e11	4.6e8	1.93e10			53.2	1.1e-5	442
100						51.1	1.2e-5	450
300						44	1.25e-5	502
500	1.5e11	4e8	1.5e10			36	1.35e-5	
600								586
700						28.9		
800				7800	0.29			716
900						21.6		703
1000	0.7e11	2.5e8	7e9				1.4e-5	
1100								687
1200						9.195		682
1500	0.1e11	1e6	1e9					
2000	0.01e11	1e3	1e8					

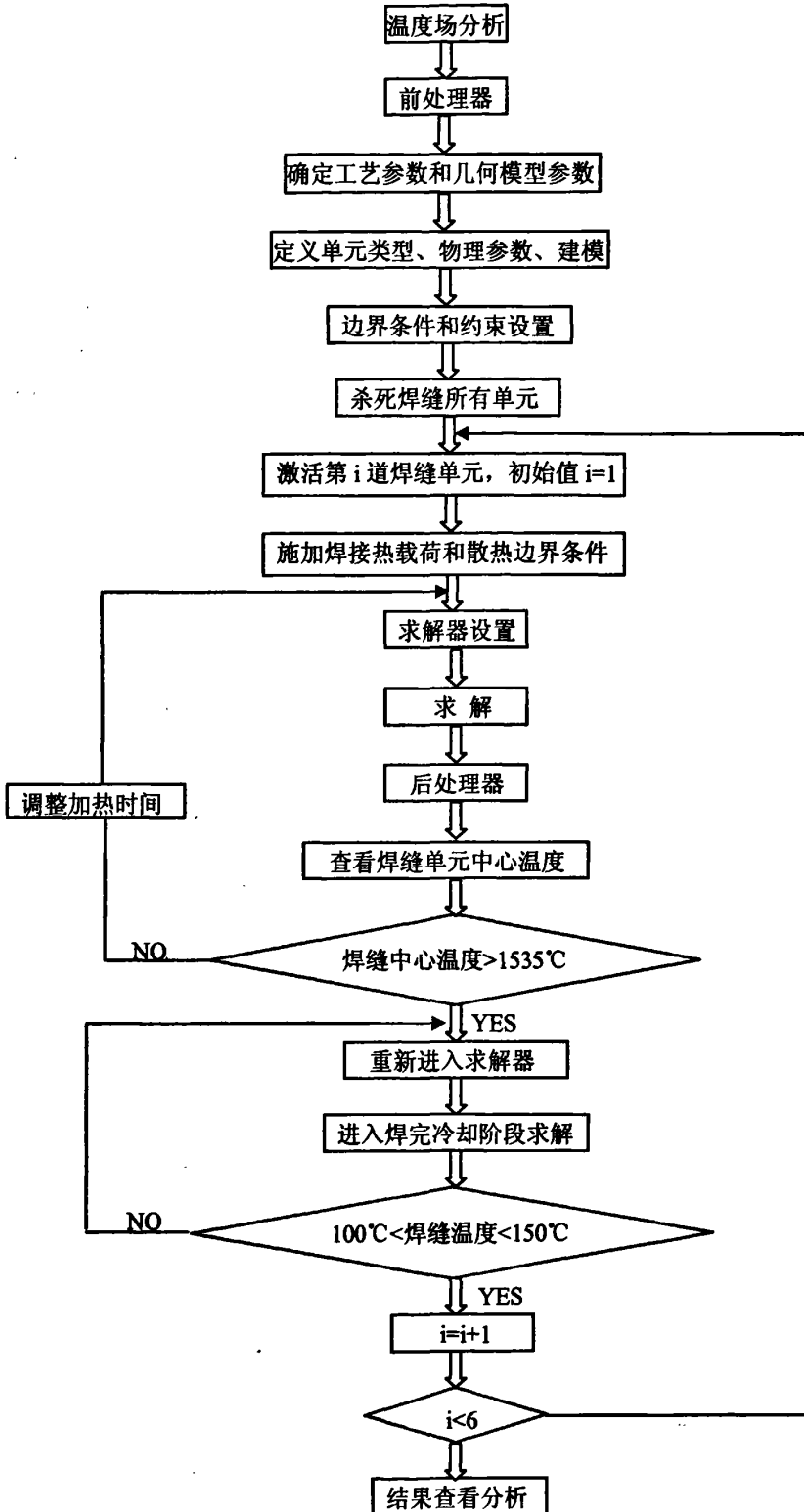


图 6-2 计算流程图

Fig.6-2 Simulation flow sketch

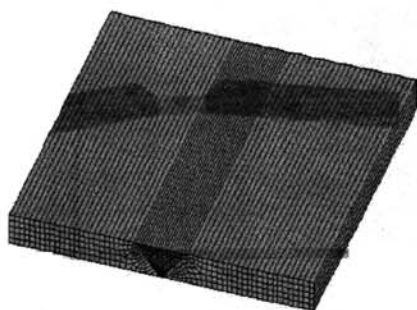


### 6.1.2.2 建立模型、划分网络及施加载荷

1) 建模、划分网络 二维模型只能分析X和Y两个方向的参量,为了分析沿焊缝方向参量的变化规律将二维模型沿垂直方向进行拉伸,拉伸的距离对应于焊缝的长度,为了使计算易于收敛,在沿焊缝方向只划分一个单元长度,划分网格后的模型如图7-3所示<sup>[53-59]</sup>。



(a) 二维Ansys模型网格



(b) 三维Ansys模型网格

图6-3 Ansys模型网格

Fig.6-3 Ansys model mesh

#### 2) 加载边界条件<sup>[60-63]</sup>

A. 加载温度边界条件,假定环境温度和工件初始温度都为  $20^{\circ}\text{C}$ ,故给所建模型的所有节点加载温度  $20^{\circ}\text{C}$ 。

B. 加载热对流边界条件,假定空气对流换热系数不随温度变化而变化,其值为  $13\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

### 6.1.2.3 进入求解器、执行求解和后处理

设置载荷步 整个焊缝分为5道,每一道焊缝都要经历施加热载荷升温 and 删掉热载荷然后降温的热循环过程,因此整个计算过程共循环5次,每一次的载荷步设置为4步。设置如下:施加生热率,  $\text{time}=4\text{s}$ ; 删掉生热率,  $\text{time}=6\text{s}$ ; 降温,  $\text{time}=20\text{s}$ ; 继续降温,  $\text{time}=200\text{s}$ 。第2~5道焊缝依此类推,最后一道焊缝的降温时间设置长一点,直至模型的温度冷却到室温。三维模拟的载荷步设置见附录3。

求解和后处理 施加载荷后执行求解,并用通用后处理器进行结果分析,结果采用等值图显示方式,便于观察温度场和应力应变场在整个板中的分布<sup>[64-68]</sup>。

## 6.1.3 模拟结果及分析

### 6.1.3.1 温度场模拟结果

焊接过程中,焊缝上作用的是一个非常强烈的移动热源,形成了焊接温度场,其温度场如图6-4所示。从图a和图b可以看出,二维温度场就是三维温度场的一个横截面图,两者非常吻合。从图b上还能明显看到沿焊缝方向的温度梯度,温度的最大值位于焊缝的最边缘处,温度沿焊缝方向递减,与实际情况吻合。整个温度场基本是以焊缝中心向两边对称地扩散。从图b、图d和图f还可以看出,温度梯度的方向从最初的垂直于焊缝方向逐渐向平行于焊缝方向偏转,并且在沿厚度方向上温度差较小,这是因为钢的比热较小,传热很快,厚度对温度场的影响较小。

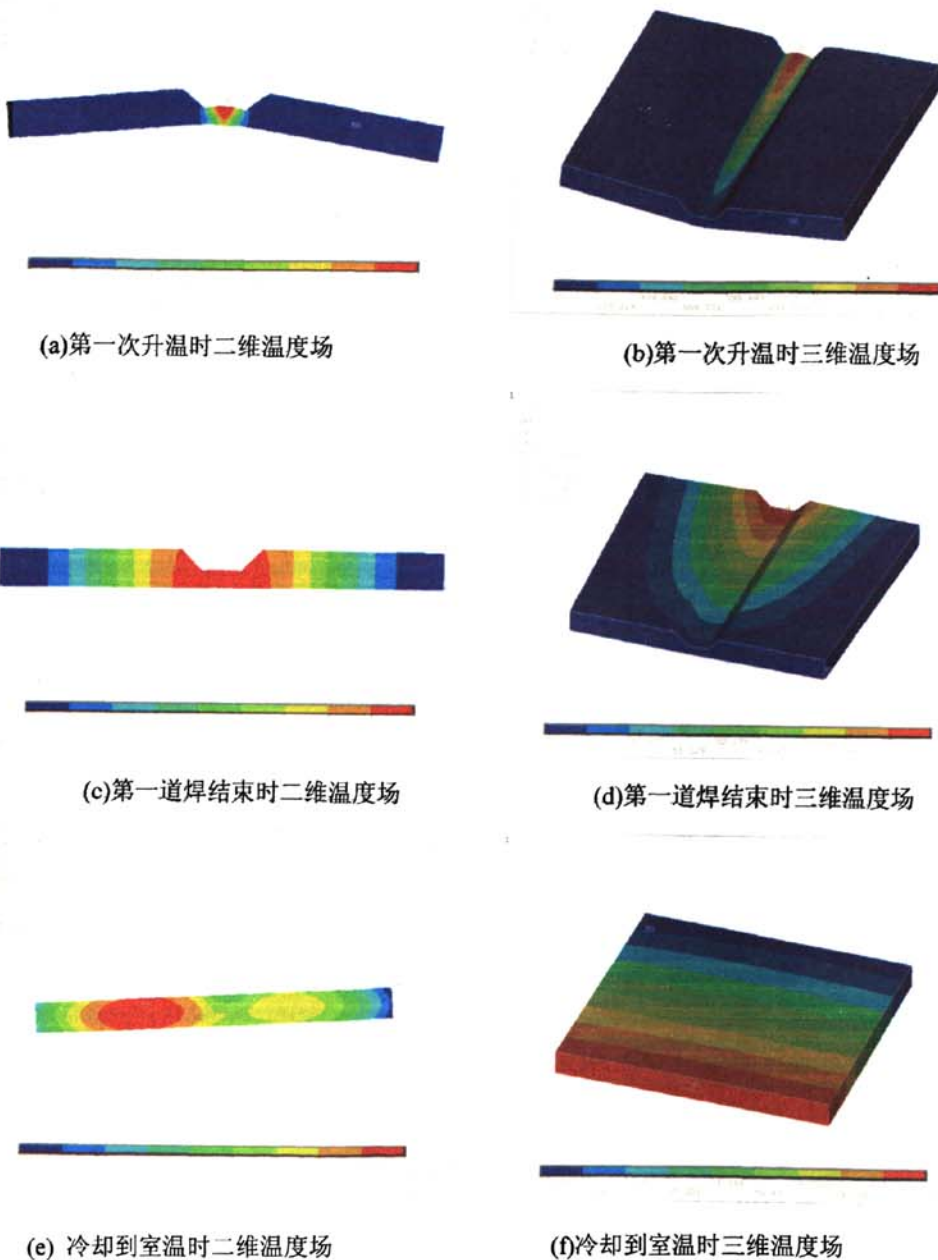


图6-4 焊缝温度场

Fig.6-4 Temperature field of the weld

### 6.1.3.2 X 向应力场模拟结果

在焊接热循环过程中伴随着热胀冷缩，母材及焊缝的变形会受到拘束，同时热影响区还会发生相变，整个板在各个方向都会受到应力，X向应力对应与垂直于焊缝方向的应力，其应力场如图6-5所示。从图a和图c可以看出，在升温阶段母材主要受拉应力，大小约为25MPa左右，处于高温中心的焊缝受压应力作用，这是由于焊缝的膨胀受到了母材的限制所产生的压应力，压应力场呈蝴蝶形，平均值为45MPa左右，峰值为93.5MPa。降温后，

应力场的形状基本不变，压应力场区域扩大，母材所受的拉应力减小，整体应力平均值也有所减小，在焊缝中心原来是压应力的区域产生了一个蝴蝶状的拉应力场，压应力的峰值有所增加，整体应力平均值也有所增加。从图b和图d可以看出，三维应力场在横垂直于焊缝方向上的分布趋势与二维结果相吻合，而在沿焊缝方向，先焊的地方受拉应力，后焊的地方受压应力，随着时间的延长，当焊缝逐渐向室温冷却的过程中整个应力场也趋于均匀，X应力的梯度方向也由垂直于焊缝方向逐渐向平行于焊缝方向偏转，与温度场梯度的变化规律一致。从整体来看，X向应力平均值约为100MPa。

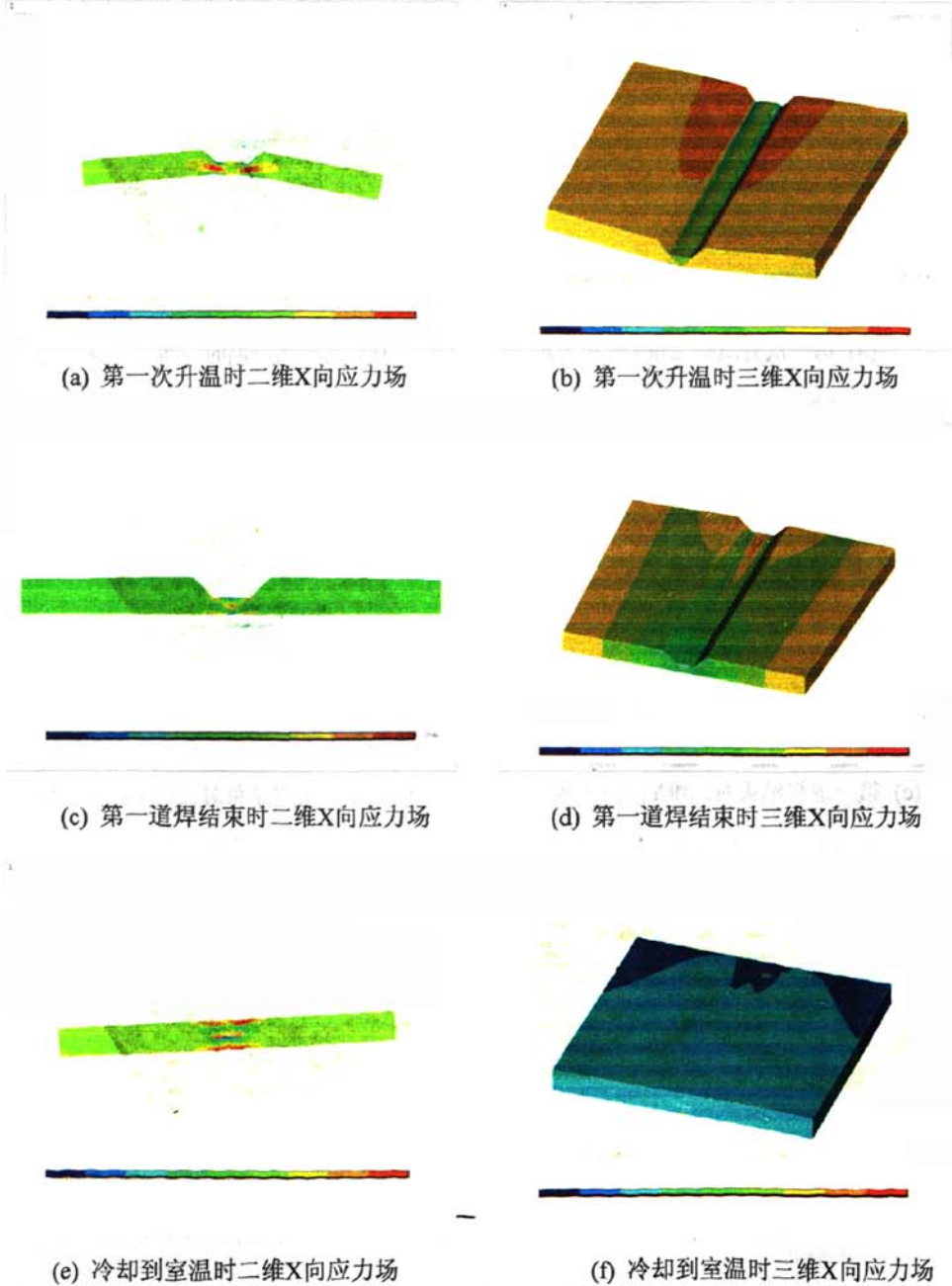


图6-5 焊缝的X向应力场

Fig.6-5 X direction stress field of the weld

### 6.1.3.3 Y 向应力场模拟结果

从图 6-6 中图 a 和图 b 可以看出，母材区基本处于拉应力状态，应力集中在焊缝区，峰值出现在焊缝的根部，基本以焊缝为中心呈对称分布，在厚度方向上 Y 应力的变化幅度较小，同时在沿焊缝方向应力也由拉应力逐渐向压应力过渡，先焊的地方受拉应力，后焊的地方受压应力，与 X 应力的分布规律一致，其平均值约为 70MPa。

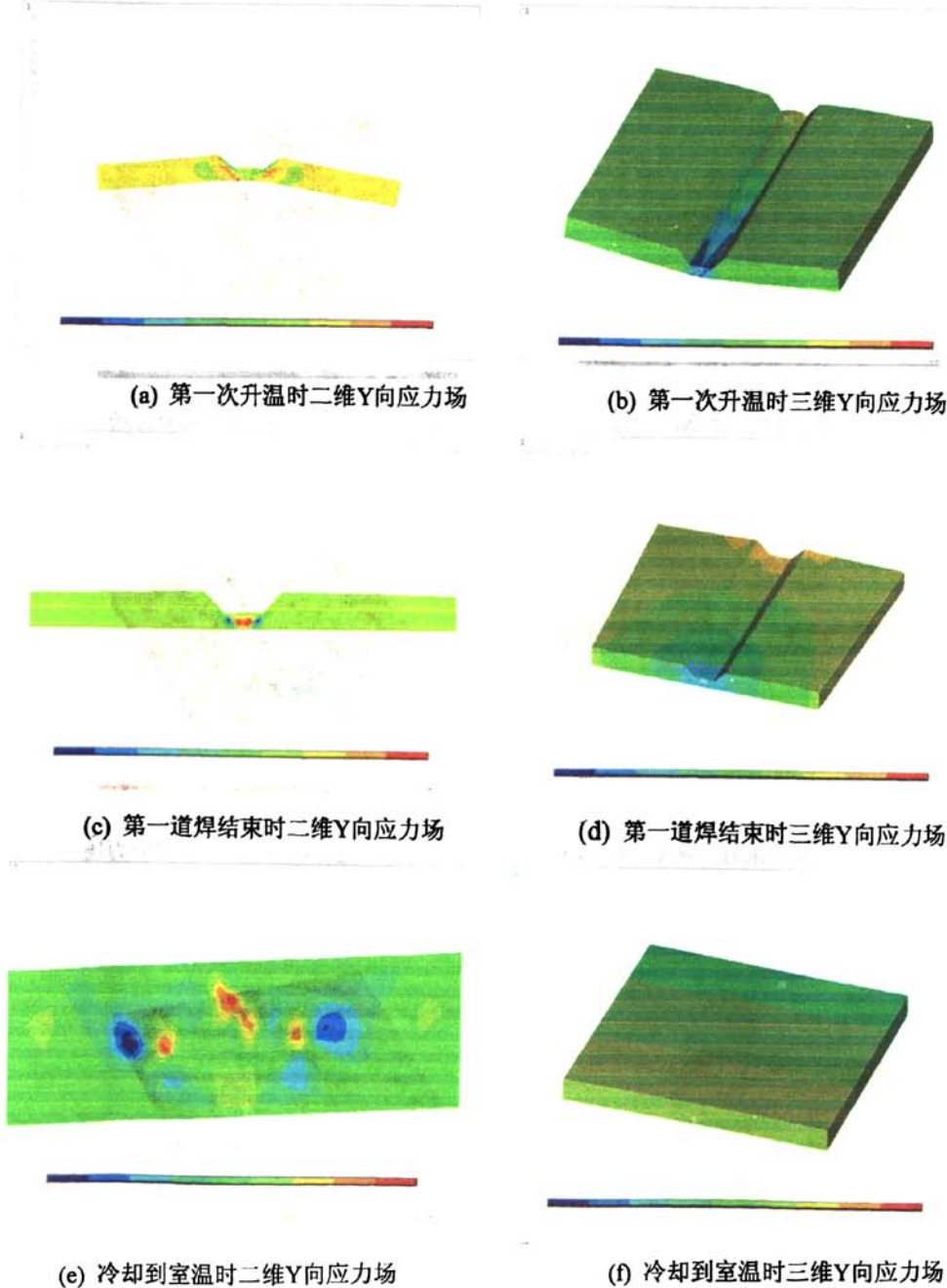


图6-6 焊缝的Y向应力场

Fig.6-6 Y direction stress field of the weld



从图6-7中图e可以看出,最终残余应力集中的点仍然分布在每一道焊缝的根部,这提示我们在焊接过程要注意清理焊缝根部的药皮以免产生夹杂或气孔等缺陷,否则容易从这些应力集中点萌生裂纹导致整个焊接结构失效。从图f可以看出,在焊板冷却到室温后Y向应力基本在与焊缝垂直的方向平行分布。

#### 6.1.3.4 Z向应力场模拟结果

只有三维模型才能计算Z向应力场,结果如图6-7所示。从图a和图b可以看出,Z向应力场的方向基本与焊缝方向平行,在施焊阶段,Z向应力主要集中在焊缝区域,母材区的Z向应力分布较均匀,大部分区域受拉应力,平均值较小,压应力集中在焊缝区域,平均值较大。从整体来看,Z向应力比X和Y向都小,约为35MPa左右。

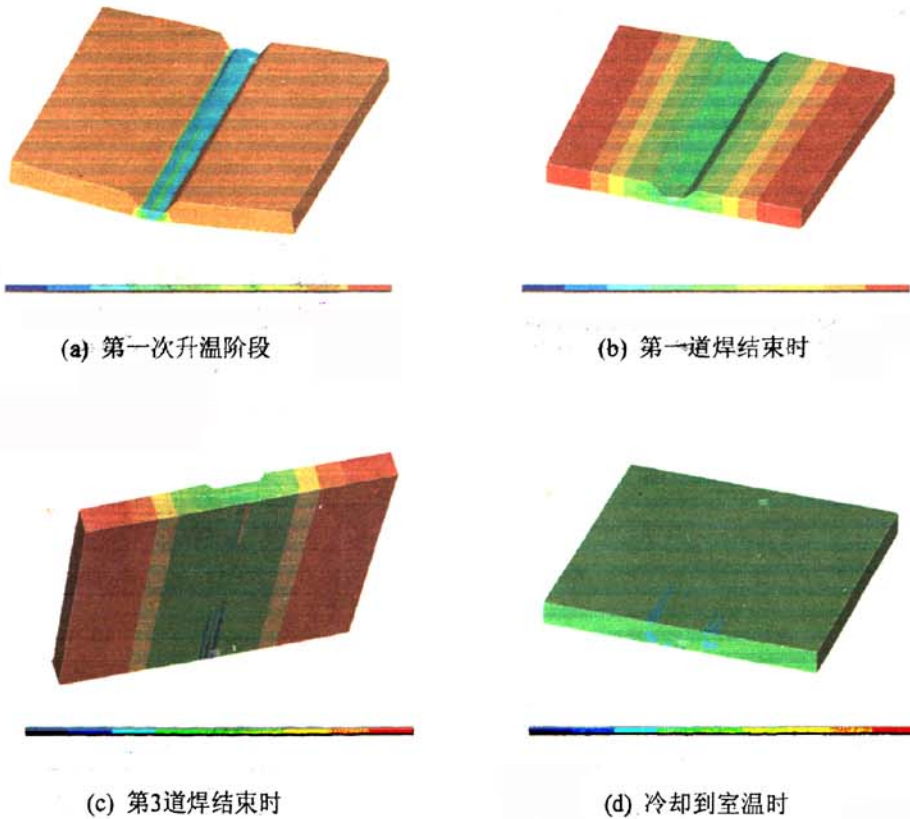


图6-7 焊缝的Z向应力场

Fig.6-7 Z direction stress field of the weld

#### 6.1.3.5 应变场模拟结果

通过查看应变场结果可以分析焊接过程中整个焊板的变形规律,模拟结果如图6-8所示。从图a和图c可以看出,在升温阶段即热源作用阶段,由于焊缝在厚度方向上的不同程度的膨胀使得两块对接的钢板产生了一定的角变形,撤掉热源后温度开始下降,焊缝由膨胀转向收缩,角变形逐渐减小,板的温度降到了所要求的层间温度100℃左右时,角变形已经变得很小。从图f可以看出,整个板最终的角变形很小,在模拟过程中每一道焊都

是冷却到 100℃之后再行进行下一道焊接，这样使得每一道焊缝得到了充分的冷却，所以最终的变形程度较轻。从图 e 可以看出，冷却到室温时板的最大应变出现在第 3 道焊缝的根部，这是因为通过前面两道焊缝使得整个板具有了较大的拘束度，同时第 4 和 5 道焊缝在

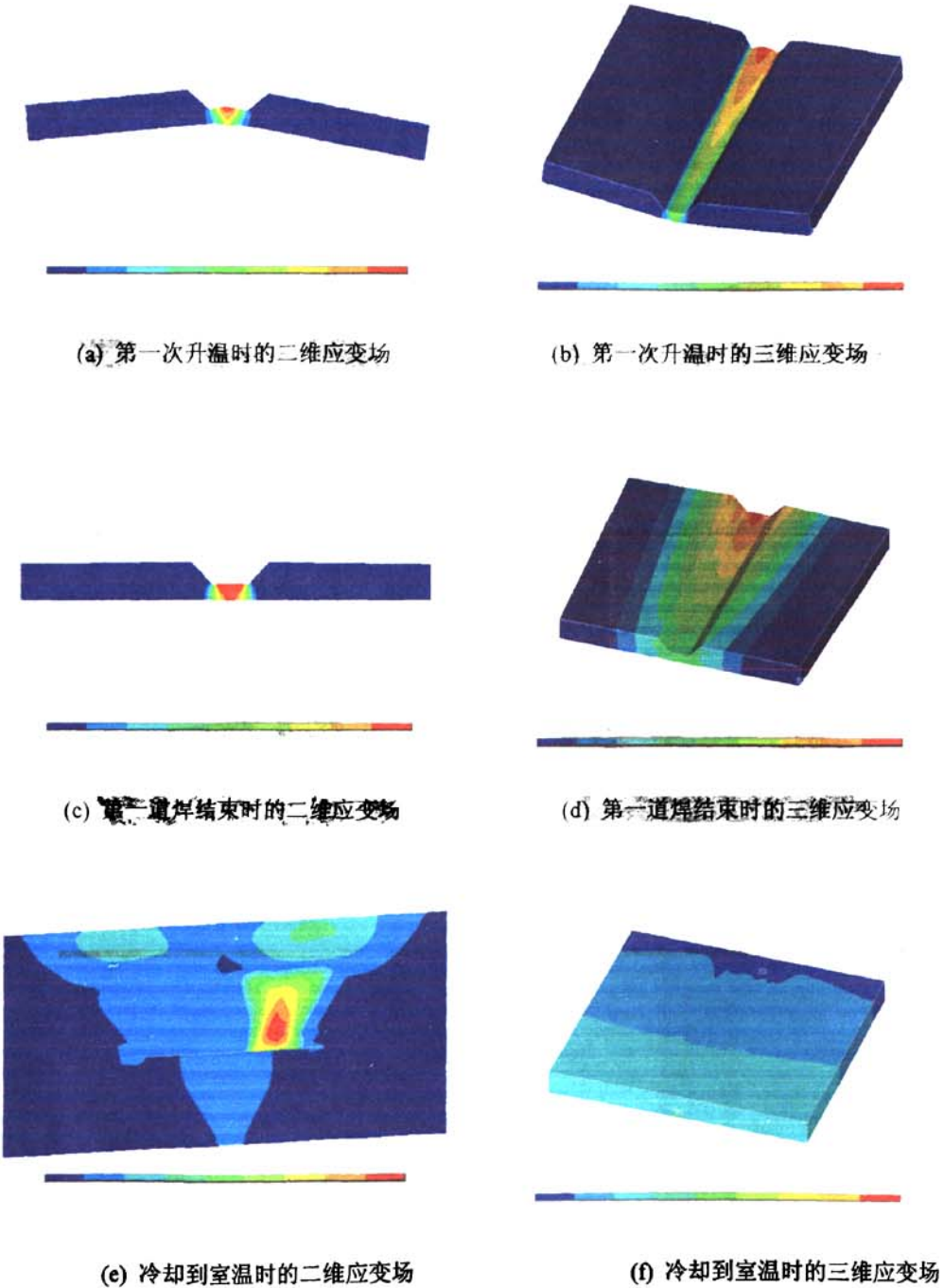


图 6-8 焊缝的应变场

Fig.6-8 Strain field of the weld

焊接过程中继续对其施加变形。从整体来看，应变场的变化规律与温度场相似，其梯度方向都是由垂直于焊缝方向逐渐向平行于焊缝方向偏转。

### 6.1.3.6 应力场随时间的变化规律

X应力随时变化的曲线如图6-9中图a所示。母材区的X应力在2000秒之前波动比较大，2000秒之后变化逐渐趋于平缓，最后处于较小的拉应力状态。实际焊接过程中，前2000秒是施焊阶段，2000秒之后是空冷阶段，模拟结果与实际应力状态的变化比较相符，此外还可以看出，焊缝区的应力变化趋势与母材基本一致。Y向应力和Z向应力随时间的变化趋势上与X向应力是一致的，从大小上来看，X向应力最大，Y向应力次之，Z向应力最小。

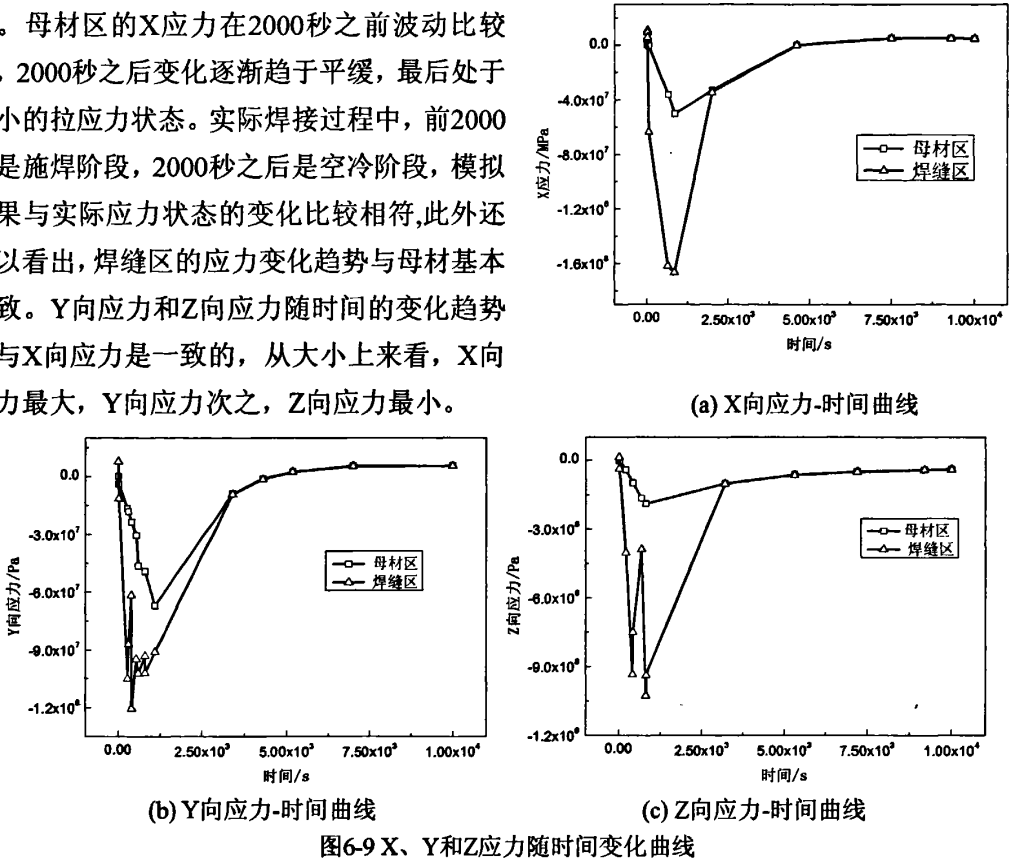


Fig.6-9 X、Y and Z direction stress-time curve

## 6.2 残余应力测试

通过对焊接过程进行数值模拟了解了焊接过程中应力场的变化规律和分布状态，为了进一步验证模拟方法的正确性和精度，本节对焊接试板的残余应力进行了实际测试。根据测试结果，了解实际应力的大小和分布状态，并为数值模拟的修正提供数据支持。

### 6.2.1 测试原理

小孔释放法是常用的测定焊接残余应力的一种半破坏性方法<sup>[69]</sup>。它是在要测试残余应力的部位，用钻孔工具加工一个小孔。小孔加工后，由于其残余应力释放，因而引起残余应力的重新分布，如果测量小孔附近由于小孔加工而引起的应变释放量，通过弹性力学计算即可换算出小孔原有的残余应力值。根据小孔的类型不同，小孔释放法又可分为盲孔法和通孔法。小孔释放法在力学效应上等效于反向加载，对于通孔法，由弹性力学可知，被测量点的主应力 ( $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ ) 和主应力角 ( $\gamma$ ) 计算公式<sup>[70]</sup>：

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{4B \cos \gamma} \quad (6.5)$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{4B \cos \gamma} \quad (6.6)$$

$$\gamma = \arctan \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (6.7)$$

公式中 A、B 称为应变释放系数，其表达式为：

$$A = -\frac{1 + \mu R^2}{2Er_1r_2} \quad (6.8)$$

$$B = -\frac{1}{E} \frac{2R^2}{r_1r_2} \left[ 1 - \frac{1 + \mu}{4} \frac{R^2(r_1^2 + r_2^2)}{r_1r_2} \right] \quad (6.9)$$

而对于盲孔法，上述 A、B 系数的计算公式不再适用，而需要根据实际钻孔深度进行实验标定，以确定实验条件下的 A、B 系数。但研究表明，如果钻孔深度  $h \geq (1.2 \sim 1.5)d$  (其中  $d$  为孔径)，那么测点处表面的残余应力完全得到释放，此时计算可采用式 (6.4)、(6.5) 得到 A、B 系数。

当残余应力较高时，小孔边缘由于应力集中而产生塑性变形，此时需对测量结果进行修正。本文采用 Scaramangas 等归纳的经验修正公式：

$$\sigma_c = -\frac{\sigma_c'}{0.2(\sigma_c'/\sigma_s) + 0.87} \quad (\sigma_c'/\sigma_s \geq 0.65) \quad (6.10)$$

式中： $\sigma_c'$  为测量应力； $\sigma_c$  为修正应力； $\sigma_s$  为材料屈服极限。

焊接残余应力计算公式 ( $\sigma_x$  为平行焊缝方向的纵向残余应力、 $\sigma_y$  为垂直焊缝方向的横向残余应力)：

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos \gamma \quad (6.11)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos \gamma \quad (6.12)$$

## 6.2.2 测试步骤

测定焊接残余应力的具体步骤如下：清理→划线→粘贴应变片→接线→调零→钻盲孔→记录测试数据。

1) 清理 将被测试件依次用 80#, 100#, 120# 砂布打磨光滑，去除铁锈，氧化皮，直到露出金属光泽。

2) 划线 被测试件的划线分为两部分，即纵向线和横向线（相对于焊缝），用高度游标卡尺划线，具体测点分布如图 6-10 所示。要求交点（即测试钻孔点）周围 10mm 处



的线条在清晰的基础上，划痕尽可能短而浅，这样在方便应变片对中的同时，也避免附加应力的产生。

3) 本次实验采用 BZ2206 静态电阻应变仪来读取数字，具体连线操作如下：采用半桥测量法，连接补偿片和导线，用电烙铁将导线的另一端按编号连在引线板上，在连接完成后，用万用表检查连线的可靠性。

4) 粘贴应变片 先用沾有丙酮的脱脂棉擦洗需要测量点的周围 10mm 范围，直至脱脂棉上没有黑色污痕为止。用数字万用表测量 BE120-2CA-K 型电阻应变片，检查是否有

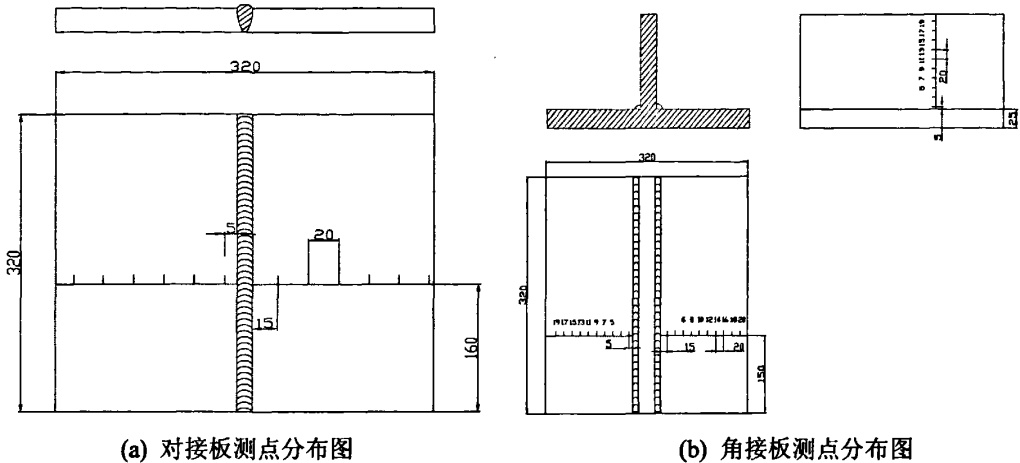


图 6-10 测点分布图

Fig.6-10 Distribution of test points

短路或断路的应变片。涂抹 502 胶水于试件所需要测的点周围，迅速准确贴上应变片，并迅速用放大镜观察是否对中并调整。用手指垫上塑料纸柔和的滚压应变片，挤出多余的 502 胶水和气泡，使应变片和试件表面完全粘合。

5) 连接引线接板 引线接板用于信号线与应变花的连接，三个引线板相对于三个被测方向，用电烙铁进行连接。连接完后用万用表检测是否有短路和断路情况。

6) 钻盲孔 钻孔采用 JS20 型磁力钻钻孔，百分表用以控制钻孔深度，在钻头接近钻孔点时，用放大镜进行微调；对正后，打开磁力开关，固定磁力钻；把百分表放置于钻头电机上。调零后开始钻孔，钻孔孔径 2mm，孔深 3mm，钻完后吹去铁屑。

7) 记录数据 钻孔停后，每隔五分钟记录一次应变仪读数，取 10 个点读数，取趋于稳定的数据的平均值作为测试结果。试验测得的数据经过计算，计算出了焊接残余应力和主应力角。计算中，由于钻孔的孔径  $d=2\text{mm}$ ，孔深  $h=3\text{mm}$ ， $h=1.5d$ ，所以根据式 (6.8)、(6.9)，参照求通孔的 A、B 系数求出 A、B：

其中  $E=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ ， $\mu=0.3$  为已知值，由此计算出  $A=-0.4173731$ 、 $B=-1.076537$ 。

### 6.2.3 试验结果及分析

平板对接接头所引起的残余应力分为  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ ，而  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  又有一定的分布规律。

纵向残余应力  $\sigma_x$  是由于焊缝冷却纵向收缩而产生的，但在某些情况下有相反作用的过程叠加。在低合金钢中，呈现为在焊缝上高拉应力（达到屈服极限）和近傍低压应力的 W 形。另外，压缩应力波谷出现在左右热影响区，这是由于基本金属加热到相变温度  $A_{C1}$  以上产生相变所致。再向外，由于加热温度低于  $A_{C1}$ ，焊接残余应力可达到基本金属的屈服极限  $\sigma_x$ 。进一步向外，又反向出现较低的与相邻残余拉应力相平衡的残余压应力区。

而横向残余应力  $\sigma_y$  的分布情况与  $\sigma_x$  的分布规律不同。横向残余应力产生的直接原因，是来自焊缝冷却的横向收缩，间接原因来自焊缝的纵向收缩。对于厚板多道对接接头，板厚方向不同深度断面的残余应力分布的不均匀程度进一步增大了。横向拉应力多发生在单边多道对接焊缝的根部焊道。

CHE507RH 焊条所焊对接试板的残余应力分布如图 6-11 所示。残余应力在接近焊缝处为拉应力，拉应力随着对焊缝距离的增大而减小，逐渐向压应力过渡，最终改变为压应力，同一个点的 X 应力比 Y 应力大。

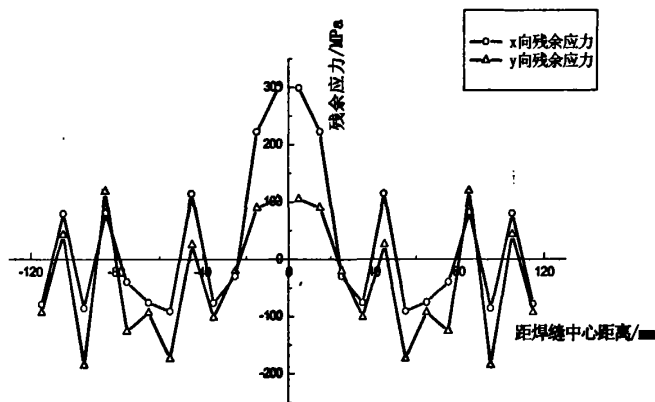


图 6-11 焊条 CHE507RH 对接焊残余应力分布

Fig.6-11 Residual stress of butt joint welded by CHE507RH electrode

CHE507 焊条所焊对接试板的残余应力分布如图 6-12 所示。其分布规律与 CHE507RH 焊条所焊的试板基本相同，即在接近焊缝处为拉应力，拉应力随着对焊缝距离的增大而减小，逐渐向压应力过渡，最终改变为压应力。由此可知，采用不同的焊接材料对  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  的分布影响不大。

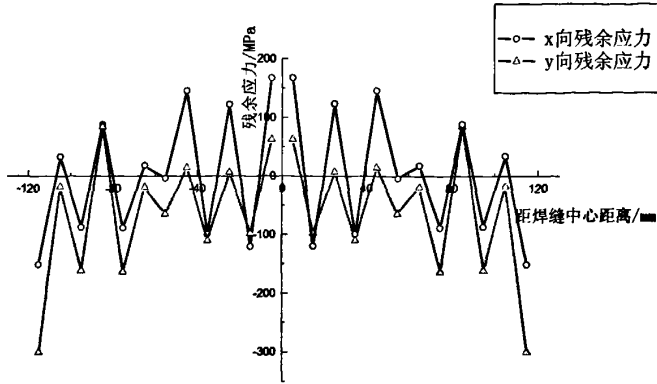


图 6-12 CHE507 对接接头残余应力分布

Fig.6-12 Residual stress of butt joint welded by CHE507 electrode

CHW-50C6 焊丝所焊对接试板的残余应力分布如图 6-13 所示。残余应力在接近焊缝处为拉应力，拉应力随着与焊缝距离的增大而减小，逐渐向压应力过渡，最终改变为压应力。X 应力的平均值约为 100MPa，Y 应力的平均值约为 70MPa。

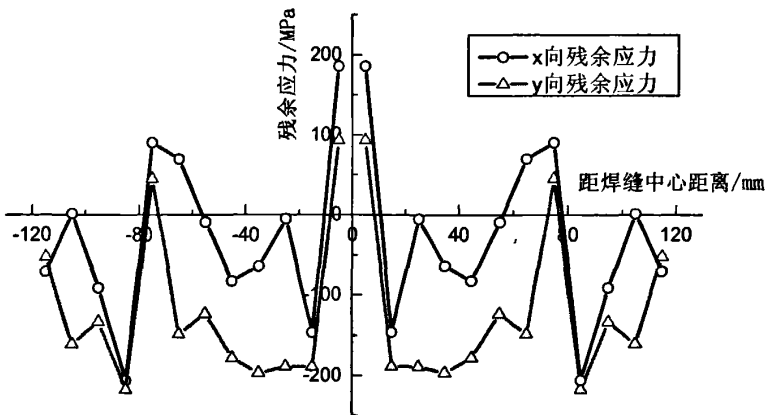


图 6-13 CHW-50C6 对接接头残余应力分布

Fig.6-13 Residual stress of CHW-50C6 butt welding joint

由于在焊接过程中,角接接头的拘束比对接接头要多,所以角接接头的焊接残余应力的分布比较复杂,而且角接接头的横板和竖板上的残余应力分布和大小很不相同。角接接头横板的残余应力分布为:在焊缝区有高值拉应力,在板两边为与焊缝区拉应力相平衡的压应力。角接接头竖板的上部边缘出现了拉应力,这是由于焊缝在轴线方向的收缩力与 T 形构件截面面积上的偏心矩在长度方向上产生弯矩,弯矩的方向取决于 T 形构件的几何形状。

CHE507 焊条所焊角接试板的横板残余应力分布如图 6-14 所示。残余应力在角接横板中多为拉应力,在边缘离焊缝较远区域,有向压应力转变的趋势。X 应力与 Y 应力的分布趋势一致, X 向多为压应力。

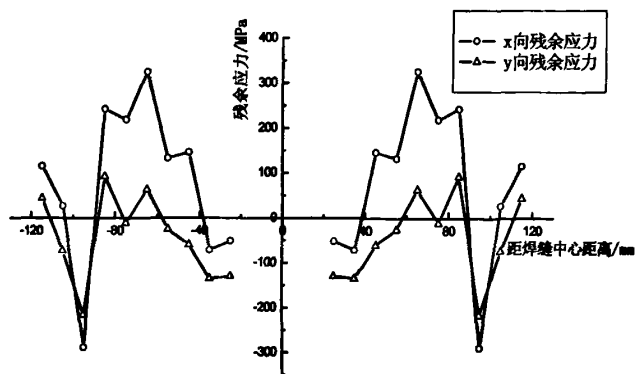


图 6-14 CHE507 角接横板残余应力分布

Fig.6-14 Residual stress of CHE507 T-connector joint's cross plate

CHE507 焊条所焊角接试板的竖板残余应力分布如图 6-15 所示。Y 向的残余应力大多为拉应力，平均在 100MPa 左右，X 向残余应力在近焊缝区为压应力，远离焊缝逐渐向拉应力过渡。

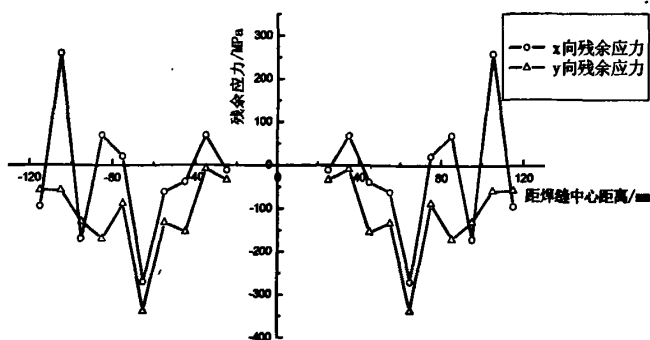


图 6-15 CHE507 角接竖板残余应力分布

Fig.6-15 Residual stress of CHE507 T-connector joint's vertical plate

CHW-50C6 焊丝所焊的角接试板横板的残余应力分布如图 6-16 所示。横板上多为拉应力，并且应力峰值随着与焊缝轴线的距离呈现波动，有些区域压应力逐渐减小向压应力过渡，X 应力的平均水平为 100MPa 左右。

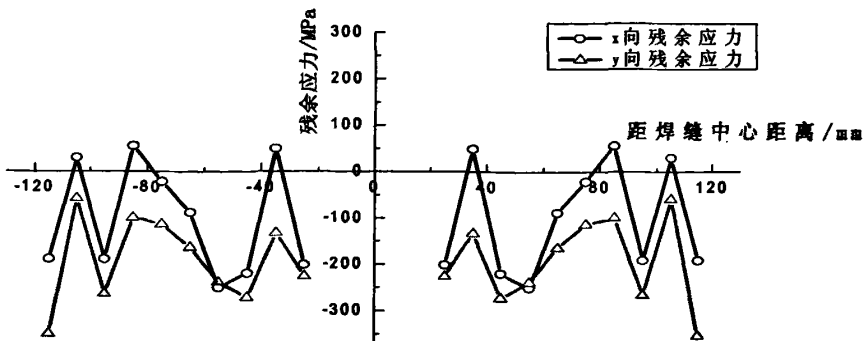


图 6-16 CHW-50C6 角接横板残余应力分布

Fig.6-16 Residual stress of CHW-50C6 T-connector joint's cross board

CHW-50C6 焊丝所焊的角接试板竖板的残余应力分布如图 6-17 所示。在近焊缝区, X 方向的残余应力为压应力, 随着距焊缝距离的增加, 压应力逐渐减小, 向拉应力过渡, 到焊缝边缘的时候完全变成拉应力, Y 向应力的变化趋势与 X 向基本一致

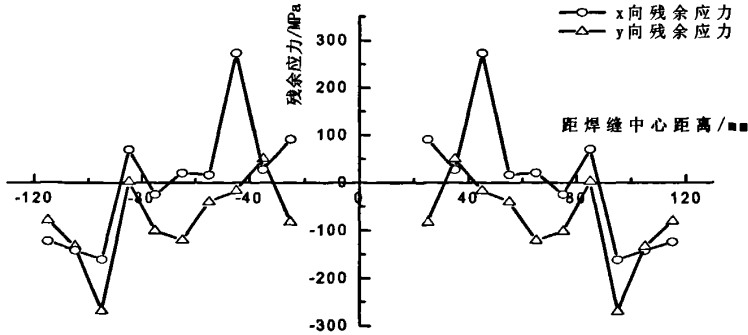
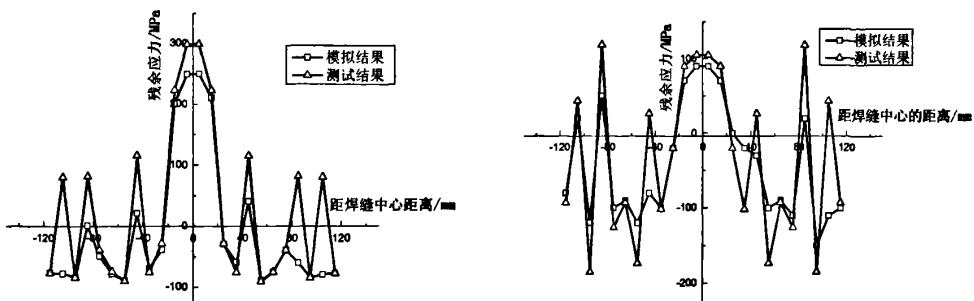


图 6-17 CHW-50C6 角接竖板残余应力分布

Fig.6-17 Residual stress of CHW-50C6 T-connector joint's vertical plate

### 6.3 模拟结果与实测结果对比分析

在 6.2 节中对焊接试板的残余应力进行了测试分析, 为了验证模拟结果的准确性和精度, 将模拟结果与实际测试的结果进行了对比分析, 结果示于图 6-18。从图 a 和图 b 可以看出, 模拟结果与测试结果的分布趋势是基本一致的。在距离焊缝中心较远的地区即母材区, 模拟结果的分布比测试结果平稳, 大部分为拉应力。焊缝区的应力模拟结果与测试结果基本吻合, 模拟结果的峰值略低于测试值。从平均值来看, 模拟结果与测试结果基本相同, X 向应力约为 100MPa, Y 向应力约为 70MPa。从上述分析可以看出, 模拟结果具有较高的精度, 反映了残余应力的实际分布规律, 为实际工程应用提供了一定的依据。



(a) X 向应力对比分析图

(b) Y 向应力对比分析图

图 6-18 手工电弧焊对接板残余应力对比分析图

Fig.6-18 Comparative analysis of manual metal arc welding butt on residual stress

### 6.4 小结

(1) X 向应力、Y 向应力和 Z 向应力随时间的变化规律相同, 焊缝区随焊道数目的增加出现相应的应力峰值, 母材区的应力变化较为平稳, 且大部分区域为拉应力, 随着时间

的增加而增大最终趋于恒定。

(2) X向应力、Y向应力和Z向应力在焊缝方向上的变化规律基本相同，焊缝区先焊的地方多为拉应力，后焊的地方多为压应力，从大小上来看，X应力>Y应力>Z应力，其平均值依次为100MPa, 70MPa, 35MPa。

(3) 总体来看，焊缝中的残余应力较小，远小于母材的屈服强度 460MPa，焊接结构在焊态下可直接使用，不用进行焊后热处理。

(4) 温度场在焊接阶段是以热源为中心向周围扩散，冷却阶段等温线逐渐变得与焊缝方向垂直，形成一系列平行的等温线。对于25mm厚的Q460E钢板对接焊，控制层间温度100~150℃，冷却到室温后所产生的角变形较小，且应变场的变化规律与温度场的变化规律基本一致。

(5) 模拟结果与实际测试结果吻合较好，模拟结果具有较高的精度。

## 7 结论

通过对 Q460E 进行母材性能测试、焊接性分析和焊接试验,确定了 Q460E 钢的焊接工艺规范,并通过力学性能测试和组织分析,进一步研究了合金元素对焊接组织和性能的影响。在此基础上,通过调整合金系和药皮配方对现行焊条进行了改进。与此同时,本文对焊接过程进行了数值模拟,并对残余应力进行了测试,深入研究了焊接过程中温度场和应力应变场的变化规律,主要结论如下:

1) 相对于 Q345 等传统中低强度级别结构钢,Q460E 具有良好的焊接性和优异的低温韧性,焊接接头具有良好的力学性能,完全满足石油井架结构钢要求,其焊接工艺规范如附录 1 所示;

2) 母材及其匹配焊接材料所焊接头的组织以铁素体和珠光体为主,母材中铁素体的含量相对于焊缝要多,焊缝区的晶粒尺寸普遍比母材细小,晶界较纯净,焊缝中的针状铁素体较多,母材的铁素体以块状为主。

3) 通过多元微合金化尤其是添加适量的 Ni 和 Mo 和严格控制 S、P 含量所试制的低氢焊条能满足 Q460E 的焊接要求,同时其低温冲击韧性与 CHE557RH 等同类焊条相比有明显的改善,飞溅、稳弧和脱渣等工艺性能也有相应改善;

4) Q460E 在石油井架底座结构中多为厚板焊接结构,其母材区大部分区域承受逐渐增大的拉应力,压应力集中在焊缝区域。在焊接的初期阶段,温度场和应力应变场的梯度方向多垂直于焊缝,在后期冷却至室温的过程中,梯度的方向逐渐向平行于焊缝方向偏转;

5) 模拟结果与测试结果吻合较好,模拟结果具有较高的精度。焊接试板中的残余应力在垂直于焊缝方向最大,其次是沿厚度方向,沿焊缝方向的应力最小,平均值依次为 100MPa, 70MPa, 35MPa, 残余应力总体水平较小,在焊态下可以直接使用。

## 致谢

课题的进行和论文的撰写是在导师张敏教授的悉心指导下完成的。导师渊博的知识、严谨的治学态度和开阔的思路将令我终身受益。尤其是当课题遇到困难或者个人思路出现偏差时，总能得到导师及时的指正。在此，学生谨向张老师表示最诚挚的感谢和最崇高的敬意。

非常感谢周小华硕士、刘斌硕士以及李继红讲师，还有师弟王超、吕娜、张美丽在论文进展期间对作者提供的帮助。

向所有评阅论文和参加答辩的老师表示崇高的敬意和衷心的感谢！



## 参考文献

- 【1】 陈立人, 张冠军. 国内外钢科技的新进展与石油机械用钢研究[J]. 石油机械, 2005, 33(12): 50-55.
- 【2】 潘浩, 李佳玲, 池胜高等. 新型钻机井架及底座设计模型[J]. 石油机械, 2005, 33(2): 21-24.
- 【3】 苗建军, 苏斯君. 理想钻机的设计思想与现代设计理念[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(5): 16-18.
- 【4】 李久林, 芦广平, 沈李强等. 国家体育场钢结构工程低温焊接技术应用研究[J]. 钢结构焊接国际论坛论文集, 2006, 162-172.
- 【5】 戴为志. 国家体育场(鸟巢)钢结构安装工程焊接质量控制的有效途径[J]. 中国学术会议在线.
- 【6】 丁韦, 宋宏图, 项彬等. L-B形组合制动梁焊接裂纹分析[J]. 焊接质量与控制, 2006(2): 55-58.
- 【7】 张韶华, 徐伟. ZL50装载机前后桥壳体的设计与生产(一)[J]. 机械工人, 2005, (6): 79-82.
- 【8】 黄淑荣. 箱形井架的制造工艺研究[J]. 煤矿机械, 2006, 27(1): 105-106.
- 【9】 傅积和, 孙玉林. 焊接数据资料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- 【10】 中国机械工程学会焊接学会编. 焊手册第1卷, 焊接方法及设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- 【11】 中国机械工程学会焊接学会编. 焊手册第2卷, 材料的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- 【12】 American Welding Society. Welding Handbook. Section 3 1965; Section 3A 1970; Vol 2 1978; Vol3 1980.
- 【13】 贾沛泰, 宋崧, 洪泉等. 国内外金属材料手册[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1999. 61-62.
- 【14】 周振丰. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 20-30.
- 【15】 王永达, 谢仕炬. 低合金钢焊接基本数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- 【16】 周振丰. 金属熔焊原理及工艺(下)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- 【17】 贺运佳主编. 金属材料熔焊工艺[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1988.
- 【18】 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- 【19】 Li Yajiang. Phase constitution characteristics of the Fe-Al alloy layer in the HAZ of Calorized steel pipe. Welding Journal, 1997, 76(9): 356s-360s.
- 【20】 孙珍宝, 朱谱藩. 合金钢手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
- 【21】 American Society for Metal Handbook Committee. 《Metals Handbook, Welding, Brazing and Soldering》, ninth edition, Vol6, 1983; eighth edition Vol6, 1972.
- 【22】 Houldcroft P T. Welding Process Technology. Cambridge University Press, 1997.
- 【23】 芮树祥. 焊接工艺学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- 【24】 陈裕川. 低合金结构钢的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- 【25】 李亚江, 杨虎重, 任树全. 焊接材料选用指南[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1997.
- 【26】 尹士科. 焊接材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- 【27】 李亚江, 王娟, 刘鹏等. 低合金钢焊接及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

- 【28】 Savge W F, Lundin C D. 《Welding Research Supplement》, 45(1966), 4975-5035.
- 【29】 王宗杰, 臧汝恒, 李德元等. 工程材料焊接技术问答[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- 【30】 曾乐. 现代焊接技术手册[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1993.
- 【31】 李久林, 芦广平, 沈李强等. 国家体育场钢结构工程低温焊接技术应用研究[M]. 钢结构焊接国际论坛论文集, 2006.
- 【32】 陈裕川主编. 焊接工艺评定手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- 【33】 王宗杰主编. 焊接综合测试技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- 【34】 孙学君. 高韧性烧结焊剂的研制及在 Q460 钢中的应用[M]. 钢结构焊接国际论坛论文集, 2006.
- 【35】 李志提, 催伟. THJ607RH 电焊条的研制. [J]机械工人, 2005 年第 8 期: 45-46.
- 【36】 顾建清. 超低氢高韧性 PPJ607RH 焊条的工业性试验及生产[J]. 电力建设, 1999 年第 9 期: 11-15.
- 【37】 郭军, 陈玉成, 徐德录等. 超低氢碱性焊条的研制[J]. 电力建设, 1999 年第 11 期: 1-4.
- 【38】 陈家权, 沈炜良, 尹志新等. 基于单元生死的焊接温度场模拟计算[J]. 热加工工艺. 2005 年第 7 期:64-65.
- 【39】 韩海玲, 赵波, 李茂福. T 型接头焊接温度场的有限元模拟[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报. 2004,6(4):41-43.
- 【40】 张光明, 李志宏, 彭显平. 基于 ANSYS APDL 的堆焊热过程数值模拟[J]. 机械 2005, 32(9):45-47.
- 【41】 刘兴龙, 曲仕尧, 邹增大, 王新洪. 基于 ANSYS 的中厚板补焊焊接温度场的数值模拟[J]. 焊接技术. 2005, 34(1):14-16.
- 【42】 倪红芳, 凌祥, 涂善东. 多道焊三维残余应力场有限元模拟[J]. 机械强度. 2004, 26(2):218-222.
- 【43】 薛小龙, 桑芝富, 朱加贵. 多道间断焊 T 型接头的数值模拟[J]. 压力容器. 2004 第 21 卷第 11 期. 27-31.
- 【44】 陈家权, 肖顺湖, 吴刚, 杨新彦. 焊接过程数值模拟热源模式的比较[J]. 焊接技术. 2006 , 35(1):9-11.
- 【45】 Brickstad B, Josefson B L. A parametric study of residual stresses in multi-pass but-welded stainless steel pipes International Journal of Pressure Vessels and Piping 1998, 75:11-25.
- 【46】 陈家权, 吴刚, 肖顺湖. 基于“生死单元”技术的焊缝缺陷模拟[J]. 装备制造技术. 2005 年第 4 期:3-6.
- 【47】 汪建华等编著. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海交通大学出版社. 89-91.
- 【48】 Goldak J. A New FiniteElement Model for Weldiing Heat Sources[J]. Metallurgical Transaction B, 1984, 15B:299-305.
- 【49】 Ueda Y, Yao T, Nakacho K. Prediction of welding residual stress, deformation and ultimate strength of plate panels. Trans of JWRI, 1992, 21(2): 127-143.

- 【50】 李冬林. 基于 ANSYS 软件焊接温度场应力场模拟研究[J]. 湖北工业大学学报. 2005, 20 (5): 81-83.
- 【51】 朱援祥, 王勤, 赵学荣等. 基于 ANSYS 平台的焊接残余应力模拟[J]. 武汉理工大学学报. 2004, 26 (2): 69-72.
- 【52】 郭桂芳, 陈芙蓉, 李林贺. 7075 铝合金真空电子束焊接残余应力场数值分析[J]. 热加工工艺. 2006, 35 (3): 43-45.
- 【53】 Satoh K, Terasaki T. Effect of welding conditions on welding deformation in welded structure materials. Journal of JWS. 1976,45(4):302-308.
- 【54】 梁晓燕. 中厚板多道焊接过程中温度场和应力场的三维数值模拟[D]. 硕士学位论文. 2004, 15-16.
- 【55】 周建新, 李栋才, 徐宏伟. 焊接残余应力数值模拟的研究与发展[J]. 金属成型工艺, 2003, 21 (6): 62-64.
- 【56】 王长利. 焊接温度场和应力场的数值模拟[D]. 硕士学位论文. 2005, 29-30.
- 【57】 陈海洋, 俞建荣, 赵增慧, 朱加雷. 薄形焊件变形数值模拟的研究现状[J]. 焊接技术. 2006, 35 (3): 4-7.
- 【58】 张亚欧, 谷志飞, 宋勇. ANSYS7.0 有限元分析实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 【59】 张朝晖, 范群波, 贵大勇等. ANSYS8.0 热分析教程与实例分析 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- 【60】 徐济进, 陈立功, 汪建华等. 基于固有应变法筒体对接多道焊接变形的预测[J]. 焊接学报, 2007, 28 (1): 77-81.
- 【61】 汪建华, 戚新海, 钟小敏等. 焊接结构三维热变形的有限元模拟. 上海交通大学学报, 1994, 28 (6): 59-65.
- 【62】 汪建华, 陆皓. 预测焊接变形的残余塑变有限元方法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31 (4): 53-56.
- 【63】 李凌, 廉金瑞. 中厚板温度场及应力场数值计算[D]. 天津大学硕士论文. 天津, 2006.
- 【64】 汪建华等. 三维瞬态焊接温度场的有限元模拟[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30 (3): 120-125.
- 【65】 Muraki T. Analysis of Thermal Stress and Metal Movement during Welding[J]. Journal of Engineering Material and Technology, 1975, 82: 81-91.
- 【66】 Tall L. Residual Stress in Welding Plates-A Theoretical Study[J]. Welding Journal, 1964, 43(1): 10-23.
- 【67】 Carlson R L. Thermal Stress in Welding[M]. Chapter 5, Thermal Stress I, 1985.
- 【68】 Goldak J. Computer Modeling of Heat Flow in Welding[J]. Metallurgical Transaction B, 1986, 17B: 587-600.
- 【69】 陆才善. 残余应力测试-小孔释放法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991. 15-18, 59-60.
- 【70】 王辉等. 钢制压力容器焊接残余应力测试分析[J]. 化工设计通讯, 2004, 1: 60-62.

## 附录1 Q460E 焊接工艺

表1 手工电弧焊焊接工艺参数

Table.1 weld parameter of manual arc welding

焊接材料	坡口形式		焊条直径 Φ/mm	焊接电压 V	焊接电流 A	层间温度 ℃
	对接	角接				
CHE507	X 型	K 型	4	25	200	100~200
CHE507RH						
CHE557RH						

注意事项:

- 【1】焊前需仔细清理坡口的油污和杂质等;
- 【2】对于 20mm 以下的中厚板或薄板可以用 V 型坡口, 对于 20mm 以上的厚板需采用 X 型坡口;
- 【3】用 V 型坡口时可事先采用反变形法, 角度为 15~20°, 以减小焊接变形, 采用 X 型坡口需进行双面对称焊;
- 【4】对接点焊时两块板的间距保持在 3mm 左右, 过大则需要加垫板, 过小会造成反面清根焊接困难;
- 【5】每焊一道需仔细清理药皮, 如有必要需用砂轮打磨, 使焊根得到彻底清理, 以避免夹杂和气孔等焊接缺陷。

表2 CO<sub>2</sub> 气体保护焊焊接工艺参数Table.2 weld parameter of CO<sub>2</sub> arc welding

焊接材料	坡口形式		焊丝直径 Φ/mm	焊接电压 V	焊接电流 A	气体流量 L/min	层间温度 ℃
	对接	角接					
CHW-50C6	X 型	K 型	1.6	25	300	20	100~200
LW81Ni1 TWE-811Ni2	X 型	K 型	1.2	25	180	20	100~200

注意事项:

- 【1】焊前需仔细清理坡口的油污和杂质等;
- 【2】对于 20mm 以下的中厚板或薄板可以用 V 型坡口, 对于 20mm 以上的厚板需采用 X 型坡口;
- 【3】用 V 型坡口时可事先采用反变形法, 角度为 15~20°, 以减小焊接变形, 采用 X 型坡口需进行双面对称焊;
- 【4】露天焊接时需避免在风速很大的时候焊接, 否则气体保护效果会变差;
- 【5】尽量控制焊接速度, 匀速焊接为好, 使焊缝的成型尽量美观;
- 【6】焊道之间的时间间隔不要太长, 失去了气体保护的焊缝金属容易被氧化; 采用少量多次的原则, 不要使一道焊缝堆得过高, 否则容易产生气孔或未焊透。

## 附录2 各种焊材焊接接头力学性能一览表

表3 焊接接头力学性能

Table.3 mechanical properties of weld joints

材料 编号	牌 号	对应国 标牌号	母材力学性能				焊接接头力学性能				备注 (强韧类型)
			屈服 强度 MPa	抗拉 强度 MPa	延伸率 %	冲击 韧性 (-40℃) J/cm <sup>2</sup>	屈服 强度 MPa	抗拉 强度 MPa	延伸率 %	冲击 韧性 (-40℃) J/cm <sup>2</sup>	
1	CHE507	E5015-G	460				462	480	30	75	中强中韧
2	CHE507RH	E5015-G		601			460	500	30	80	中强中韧
3	CHW-50C6	ER50-6					453	520	35	120	中强高韧
4	CHE57RH	E5515-G			30		447	588	32.2	160	高强高韧
5	LW81Ni1	E551T1-Ni2					447	588	32.2	245	高强高韧
6	TWE-811Ni2	E81T1-Ni				189	448	590	33	310	高强高韧

## 附录3 三维模拟命令流文件

```
/SOLU
!*
ANTYPE, 4
!*
TRNOPT, FULL
LUMPM, 0
!*
TUNIF, 20,
VSEL, S, VOLUMES, , 1
ESLV, S
EALIVE, ALL
ASEL, S, AREAS,, 1
ESLA, S
EALIVE, ALL
ALLSEL, ALL
EPLOT
FLST, 2, 14, 5, ORDE, 8
FITEM, 2, 1
FITEM, 2, -8
FITEM, 2, 13
FITEM, 2, 18
FITEM, 2, 22
FITEM, 2, 26
FITEM, 2, 29
FITEM, 2, 33
!*
/GO
DA, P51X, UZ, 0
ALLSEL, ALL
EPLOT
FLST, 2, 1, 5, ORDE, 1
FITEM, 2, 9
!*
/GO
DA, P51X, UY, 0
FLST, 2, 18, 5, ORDE, 10
FITEM, 2, 1
FITEM, 2, 6
FITEM, 2, -9
FITEM, 2, 11
FITEM, 2, 14
FITEM, 2, 20
FITEM, 2, 23
FITEM, 2, 27
FITEM, 2, 29
FITEM, 2, -36
/GO
!*
SFA, P51X, 1, CONV, 13, 20
/DIST, 1, 0.924021086472, 1
/REP, FAST
/DIST, 1, 0.924021086472, 1
/REP, FAST
/DIST, 1, 1.08222638492, 1
/REP, FAST
/DIST, 1, 1.08222638492, 1
/REP, FAST
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 1
```

```
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 2.3E9
!*
OUTRES, ALL, ALL,
TIMINT, 1, STRUCT
TIMINT, 1, THERM
TIMINT, 0, MAG
TIMINT, 0, ELECT
TINTP, 0.005, , , 1, 0.5, 0.2,
!*
!*
TIME, 4.0
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
ALLSEL, ALL
EPLOT
LSWRITE, 1,
BFVDELE, , 1, HGEN
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 1
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 0
!*
TIME, 7.5
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 2,
!*
TIME, 20
AUTOTS, -1
DELTIM, 4, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 3,
/REPLOT, RESIZE
!*
OUTRES, ALL, ALL,
!*
TIME, 200
AUTOTS, -1
DELTIM, 30, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 4,
ALLSEL, ALL
VSEL, S, VOLUMES,, 2
ESLV, S
EALIVE, ALL
ASEL, S, AREAS,, 2
ESLA, S
EALIVE, ALL
```

```
ALLSEL, ALL
EPLIT
EPLIT
/DIST, 1, 1.08222638492, 1
/REP, FAST
/DIST, 1, 0.924021086472, 1
/REP, FAST
/DIST, 1, 0.924021086472, 1
/REP, FAST
ALLSEL, ALL
EPLIT
/DIST, 1, 1.08222638492, 1
/REP, FAST
FLST, 2, 2, 5, ORDE, 2
FITEM, 2, 11
FITEM, 2, 14
SFADELE, P51X, 1, CONV
BFVDELE, 1, HGEN
FLST, 2, 3, 5, ORDE, 3
FITEM, 2, 15
FITEM, 2, -16
FITEM, 2, 19
/GO
!*
SFA, P51X, 1, CONV, 13, 20
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 2
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 2.3E9
!*
TIME, 204
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 5,
BFVDELE, 2, HGEN
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 2
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 0
!*
TIME, 206
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 6,
!*
TIME, 220
AUTOTS, -1
DELTIM, 3, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 7,
!*

```



```
TIME, 400
AUTOTS, -1
DELTIM, 30, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 8,
VSEL, S, VOLUMES,, 3
ESLV, S
EALIVE, ALL
ASEL, S, AREAS,, 3
ESLA, S
EALIVE, ALL
ALLSEL, ALL
FLST, 2, 3, 5, ORDE, 3
FITEM, 2, 16
FITEM, 2, 19
FITEM, 2, -20
SFADELE, P51X, 1, CONV
BFVDELE, , 2, HGEN
FLST, 2, 1, 5, ORDE, 1
FITEM, 2, 21
/GO
!*
SFA, P51X, 1, CONV, 13, 20
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 3
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 2.3E9
!*
OUTRES, ALL, ALL,
!*
TIME, 404
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 9,
BFVDELE, , 3, HGEN
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 3
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 0
!*
TIME, 406
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 10,
!*
TIME, 420
AUTOTS, -1
DELTIM, 3, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
```

```

LSWRITE, 11,
!*
TIME, 600
AUTOTS, -1
DELTIM, 30, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 12,
VSEL, S, VOLUMES,, 4
ESLV, S
EALIVE, ALL
ASEL, S, AREAS,, 4
ESLA, S
EALIVE, ALL
ALLSEL, ALL
FLST, 2, 2, 5, ORDE, 2
FITEM, 2, 15
FITEM, 2, 23
SFADELE, P51X, 1, CONV
BFVDELE, 3, HGEN
FLST, 2, 2, 5, ORDE, 2
FITEM, 2, 24
FITEM, 2, -25
/GO
!*
SFA, P51X, 1, CONV, 13, 20
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 4
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 2.3E9
!*
TIME, 604
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 13,
BFVDELE, 4, HGEN
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 4
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 0
!*
TIME, 606
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 14,
!*
TIME, 620
AUTOTS, -1
DELTIM, 3, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE

```

```
LSWRITE, 15,
!*
TIME, 800
AUTOTS, -1
DELTIM, 30, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 16,
VSEL, S, VOLUMES,, 5
ESLV, S
EALIVE, ALL
ASEL, S, AREAS,, 5
ESLA, S
EALIVE, ALL
ALLSEL, ALL
FLST, 2, 3, 5, ORDE, 3
FITEM, 2, 21
FITEM, 2, 25
FITEM, 2, 27
SFADELE, P51X, 1, CONV
BFVDELE, 4, HGEN
FLST, 2, 1, 5, ORDE, 1
FITEM, 2, 28
/GO
!*
SFA, P51X, 1, CONV, 13, 20
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 5
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 2.3E9
!*
TIME, 804
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 17,
BFVDELE, 5, HGEN
FLST, 2, 1, 6, ORDE, 1
FITEM, 2, 5
/GO
!*
BFV, P51X, HGEN, 0
!*
TIME, 806
AUTOTS, -1
DELTIM, 0.5, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 18,
!*
TIME, 820
AUTOTS, -1
DELTIM, 3, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
```

```

LSWRITE, 19,
!*
TIME, 1000
AUTOTS, -1
DELTIM, 30, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 20,
!*
TIME, 2000
AUTOTS, -1
DELTIM, 100, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 21,
!*
TIME, 3000
AUTOTS, -1
DELTIM, 100, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 22,
!*
TIME, 4000
AUTOTS, -1
DELTIM, 100, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 23,
!*
TIME, 5000
AUTOTS, -1
DELTIM, 100, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 24,
!*
TIME, 10000
AUTOTS, -1
DELTIM, 100, , , 1
KBC, 1
!*
TSRES, ERASE
LSWRITE, 25,
LSSOLVE, 1, 25, 1,

```

## 附录 4 在校期间发表的论文

- 1) 付翀, 黄东鏊, 周小华, 李继红, 张敏. 熔合线含裂纹焊接接头复合角的研究. (铸造技术) 已发表.
- 2) 张敏, 黄东鏊, 周小华, 刘斌. Q460E 在石油井架底座焊接中的应用. (焊接) 已投稿.
- 3) 张敏, 黄东鏊, 周小华, 刘斌. 不同元素对 Q460E 钢焊接性能的影响. (机械工程材料) 已投稿.
- 4) 张敏, 黄东鏊, 周小华, 刘斌. Q460E 钢对接焊有限元模拟. (石油矿场机械) 已投稿.