




Y1895274

学位论文版权使用授权书

江苏大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、中国学术期刊（光盘版）电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致，允许论文被查阅和借阅，同时授权中国科学技术信息研究所将本论文编入《中国学位论文全文数据库》并向社会提供查询，授权中国学术期刊（光盘版）电子杂志社将本论文编入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》并向社会提供查询。论文的公布（包括刊登）授权江苏大学研究生处办理。

本学位论文属于不保密 。

学位论文作者签名：張毅峰

2011年06月14日

指导教师签名：

2011年6月14日



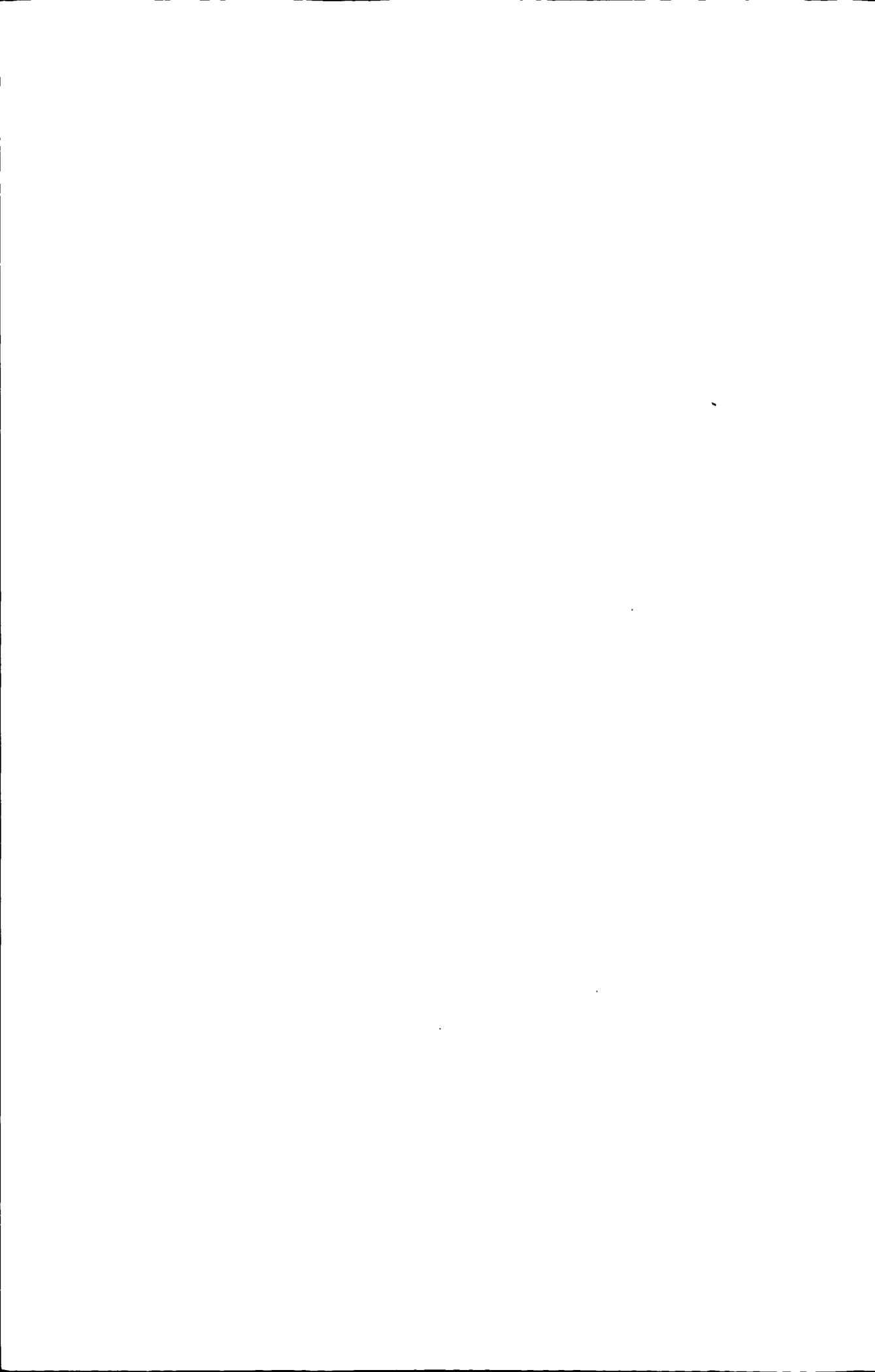
风电用大型环锻件热加工工艺优化与试验研究
Optimization and Experimental Study on the Hot Working
Technology of Large Rings for Wind Power

专业名称 材料加工工程

指导教师 王雷刚

姓 名 张毅峰

2011年6月



摘要

风电用大型环锻件主要用于风电设备的 MW 级风电机组变桨距、偏航塔上的回转支撑圈环锻件、风电塔身塔体的连接紧固件，这些环锻件都是风电设备重要的承重与传动零部件，其锻造工艺、热处理工艺及所用材料的冶金质量、化学成分配比直接影响着机组的正常运行和使用寿命。因此，进行风电用大型环锻件的热加工工艺优化与试验研究是一项急需开展的课题。本文结合企业生产实际，以风电回转支撑为例研究大型环锻件热加工工艺。

本文的研究内容：

- (1) 在欧标材料基础上设计风电回转支撑环锻件的材料化学成分，获得高淬透性、高综合力学性能的新材料，使其更能适应风电机组恶劣的使用环境。
- (2) 通过数值模拟和实际生产验证，制定出最优的大型环锻件的锻造工艺（制坯工艺和辗扩工艺），避免产生椭圆度过大、粗晶、探伤不合格等缺陷。
- (3) 试验研究风电回转支撑环锻件用新材料的第一、二热处理工艺，充分发挥新材料的潜能，各项力学性能均达到最优值。

本文的研究成果：

- (1) 借助有限元软件 Deform-3D 模拟了大型环锻件轧制过程，优化了芯辊进给速度、直径等工艺参数，优化后的参数充分满足咬入条件、锻透条件、刚度条件，并为实际生产提供了理论指导，避免了环锻件产生转不动、锻不透、椭圆度过大等现象。
- (2) 在原有风电环锻件用欧标材料 42CrMo4V 的基础上进行化学成分设计，增加了合金元素 Mn、Cr、Mo 含量，降低了 P、S 含量，得到企业内控的高淬透性、高综合力学性能材料 42CrMoHM。
- (3) 采用“WHF 法拔长+预锻粗 40%+走扁方成形”的制坯工艺，可有效控制夹杂物形态，避免毛坯锻粗过程中夹杂性裂纹的产生，提高了产品探伤的合格率。
- (4) 制定出“两次高温正火+回火”的消除粗晶热处理工艺，解决了大型环锻件的粗晶缺陷，且均匀了组织，为后续的热处理奠定了基础。
- (5) 通过正交试验研究出风电环锻件用 42CrMoHM 的第二热处理工艺参数，即淬火温度、淬火液浓度、冷却时间、回火温度的最佳配比；经过该工艺热处理后，42CrMoHM 钢的各项力学性能指标均达到或超过欧标要求，其中冲击性能增加约 35%。

关键词：风电用大型环锻件，42CrMoHM 钢，锻造工艺，热处理工艺，优化

Abstract

The large rings of wind power are mainly used for MW-class wind turbine pitch parts, slewing rings of yaw tower and wind tower flanges. The rings are important load-bearing and gearing spare parts for wind power equipment, whose forging process, heat treatment process, metallurgical quality and chemical composition ratio of materials directly affect the normal operation and service life of wind turbine. Therefore, the hot working technology's optimization and experimental study for large rings of wind power is an urgently needed subject. In this paper, the hot working technology of large rings was researched, taken slewing rings for wind power as an actual production example.

The contents of the study shows:

(1) To obtain new materials with high hardenability and high mechanical properties, which can adapt to the harsh environment, the materials chemical composition for slewing rings was designed, based on European standard.

(2) To avoid the defects, such as ellipse, coarse grain and failure detection etc, the optimal forging process of large rings was planed, including blanking process and rolling process, which passed the verification of numerical simulation and actual production.

(3) To give full play to the potential of new materials and the optimal value of the mechanical properties, the first and second heat treatment process of new materials used by wind power slewing rings was researched.

The results of the study shows:

(1) Through finite element software Deform-3D simulating the rolling process of large rings, the core roller feed rate, diameter and other parameters were optimized. Which fully meet the biting condition, forging penetration condition, rigidity condition and provided theoretical guidance for actual production, avoiding the ring's no turning, no full forging penetration and ellipse etc.

(2) By adjust chemical composition of 42CrMo4V with European standard, increasing alloying elements Mn, Cr, Mo content, reducing P, S content, the internal control 42CrMoHM steel with high hardenability and high mechanical properties was obtained.

(3) The blanking process of "WHF compaction method + pre-upsetting 40% + spinning

forming” can control the shape of inclusion, avoid producing inclusion crack in upsetting and improve pass rate of product detection.

(4) The heat treatment process of "two high-temperature normalizing + tempering" can solve the problem of coarse grain in large rings, and even uniformize formation.

(5) Developed by the orthogonal experimental, the best ratio of 42CrMoHM steel's second heat treatment parameters was determined, which include quenching temperature, medium water concentration, cooling time and tempering temperature. After the heat treatment process, the mechanical properties of 42CrMoHM steel were met or exceeded European standard requirements. Moreover, impact property was increased by about 35%.

Keywords: Large rings for wind power, 42CrMoHM steel, Forging process, Heat treatment process, Optimization

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 大型环锻件热加工工艺概述及研究现状.....	1
1.1.1 大型环锻件热加工工艺概述.....	1
1.1.2 国内外大型环锻件研究现状.....	3
1.2 数值模拟技术在锻造行业的应用.....	5
1.3 课题研究的意义及研究内容.....	6
第二章 大型环锻件轧制金属成形理论基础.....	8
2.1 大型环锻件轧制理论概述 ^[41]	8
2.1.1 咬入条件分析.....	8
2.1.2 锻透条件分析.....	9
2.1.3 刚度条件分析.....	11
2.2 金属成形过程数值模拟理论基础.....	12
2.2.1 有限单元法简介.....	12
2.2.2 刚粘塑性有限元的基本原理.....	13
第三章 风电用大型环锻件轧制过程数值模拟.....	17
3.1 有限元软件 Deform-3D 介绍.....	17
3.2 试验模型及参数的设定.....	18
3.2.1 建立有限元模型.....	18
3.2.2 划分网格及设置边界条件.....	18
3.3 轧制工艺参数优化.....	20
3.3.1 毛坯尺寸设计方法.....	20
3.3.2 芯辊进给速度对轧制效果影响.....	22
3.3.3 芯辊直径对轧制效果影响.....	25
3.4 模拟结果分析.....	27
3.4.1 应力场分析.....	27
3.4.2 速度场分析.....	29
3.4.3 轧制力分析.....	30
第四章 风电用大型环锻件锻造工艺研究.....	31
4.1 引言.....	31
4.2 风电用回转支撑环锻件技术要求.....	31
4.2.1 化学成分设计要求.....	32
4.2.2 力学性能要求.....	33

4.2.3 超声波探伤要求.....	33
4.3 自由锻制坯工艺研究.....	34
4.3.1 存在缺陷分析.....	35
4.3.2 缺陷形成机理.....	36
4.3.3 工艺优化.....	37
4.4 辗扩成形工艺研究.....	41
4.4.1 辗环机及模具参数.....	41
4.4.2 轧制曲线研究.....	43
4.4.3 工艺参数分析.....	47
第五章 风电用大型环锻件热处理工艺研究.....	49
5.1 引言.....	49
5.2 第一热处理工艺研究.....	50
5.2.1 第一热处理的作用.....	50
5.2.2 产生粗晶的原因.....	51
5.2.3 晶粒细化工艺改进.....	52
5.3 第二热处理工艺研究.....	53
5.3.1 试验概述.....	53
5.3.2 正交试验.....	54
5.3.3 结果分析.....	55
5.4 力学性能检测与组织观察.....	58
第六章 结论与展望.....	62
6.1 结论.....	62
6.2 展望.....	63
参考文献.....	64
致 谢.....	67

第一章 绪论

1.1 大型环锻件热加工工艺概述及研究现状

根据我国重型机械行业标准规定,凡是在 1000 t 以上锻造水压机生产的自由锻件,可称为大型锻件^[1]。大型锻件一般用于机械设备的键和核心部位,是制造重大设备的基础件,其成形制造在能源工业、钢铁工业以及国防工业中都具有举足轻重的地位,体现着国家的极端制造能力与制造水平,是国民经济的重要保障。可以说大型锻件的生产能力与制造技术是衡量一个国家的重工业发展水平与重大、关键技术设备自给能力的重要标志之一^[2]。

大型锻件一般包括大型轴类件、大型饼类件、大型模块件和大型环类件。大型环件作为大锻件中十分键的一个分支,用途极为广泛,是现代化工业尤其核电工业、风电工业、石油化工工业、大型火电站等行业必不可少的零部件,如各种电力设备中的护环,风力发电用风塔法兰、回转支承,石化工业中的非标齿轮等。而大型环锻件的生产能力也随着这些行业的发展而受到越来越多的重视^[3]。

1.1.1 大型环锻件热加工工艺概述

大型环锻件热加工的主要特点^[4]:

(1) 单件体形重大壁厚,需要用钢锭直接锻造。目前大型环锻件最大直径已达 10 m,单件重量达 82 t,最大锻造用钢锭重量近 160 t。

(2) 内在质量要求严格。随着工业技术的发展,大型环锻件内在质量检验项目不断增多,检验标准也不断提高。因此,控制大型钢锭的冶炼质量,改善热变形后的组织、锻合空穴性缺陷、规范第一、二热处理工艺,是提高大型环锻件内在质量的关键。

(3) 生产工艺复杂,技术难度大,生产周期长,工艺环节多。

(4) 生产费用高。生产大型环锻件用的能源消耗大,材料利用率低,所需的大型设备和工装模具多,对设备的损伤大,报废率高,单件生产成本很高。

因此,提高大型环锻件质量,保证其在额定寿命内运行的安全性和可靠性,提高材料利用率,减少废品率,降低能源消耗,在技术上和经济上都有十分重要的意义。

大型环锻件是由钢锭直接开坯锻造而成,其完整的生产过程包括冶炼、铸锭、加热、锻造(制坯与辗环)、预备热处理、最终热处理等多道工序。其中锻造是大型环锻件的

主要工艺过程,其主要任务有成形和控性两个,即经过锻造达到最终锻件所需的形状精度,并消除锻件内部空洞、疏松、夹杂等缺陷。可见,锻造是大型环锻件热加工的重要工序之一,锻造工艺的好坏、锻造设备的性能以及锻造水平的高低往往会对最终成形产品的质量产生很大影响,甚至能造成环锻件报废的后果^[5]。

大型环锻件锻造生产的工艺流程一般为:钢锭下料——锻粗——冲孔——预扩孔——辗环——修整出成品^[6]。在大型环锻件的锻造工艺中,锻粗是一个十分重要的工序。大型环锻件是由钢锭直接开坯锻造而成。受材料质量、冶炼技术和环境等因素的影响,大型钢锭内部不可避免地存在着偏析、微裂纹、微小空洞等冶金缺陷,内部应力场、应变场也很不均匀。而且钢锭越大,这些缺陷越严重。冲孔前合理的锻粗工序则可以破碎碳化物,使其均匀化,破坏钢锭内部铸态树枝状组织,减小锻件内部力学性能的异向性,焊合部分空洞。更为关键的是,大型钢锭坯料在冲孔前进行合理的锻粗,可以增大坯料横截面积,平整坯料的端面,增大锻比,为后续的冲孔工艺做准备。

锻粗可分为平砧锻粗、垫环锻粗和局部锻粗。大型环件锻造成形过程中的锻粗工序属于平砧锻粗,它是整体加载、整体受力。锻粗工序容易出现的问题是坯料在锻粗时产生纵向弯曲,因此,锻粗坯料的高径比一般不超过 2.5~3,最佳是在 2~2.2 之间。对于矮胖钢锭,锻粗坯料的高径比可以降低到 1.5~1.8^[7-8]。

冲孔是大型环件锻造成形过程中必不可少的一个工序。它是在坯料上锻制出透孔或不透孔的工序,有开式冲孔和闭式冲孔两种。很显然,大型环件成形的冲孔工序是属于开式冲孔。冲孔是局部加载、整体受力,坯料受力区可以分为直接受力区和间接受力区。冲孔时容易出现的问题是“走样”和裂纹。为防止这些缺陷,实心坯料的直径和冲头直径之比应大于等于 2.5~3,孔径大于 400 mm 以上的锻件,一般采用空心冲头冲孔,这样可以有效避免产生侧面裂纹,并能除掉钢锭坯料中心部分质量不好的金属^[9]。

扩孔工序是在大型环锻件成形生产过程中最关键的一步。扩孔是为了减小空心坯料壁厚而增加其内、外径的锻造工序。常用的扩孔方法有冲子扩孔、辗压扩孔和马杠扩孔等^[10]。目前对于大型环锻件成形生产而言,一般是采用在卧式辗环机上辗压扩孔精整出成品。

辗压扩孔又称环件轧制,它是借助环件轧制设备——辗环机(又称轧环机或扩孔机)使环件产生壁厚减小、直径扩大、截面轮廓成形的塑性加工工艺。环件轧制设备根据机架的形式可分为立式、卧式和倾斜式三种,根据轧制方式又可分为径向和径轴向轧制两

类^[11]。图 1.1 显示的分别是径向辗环机和径轴向辗环机。图 1.1 (a) 径向辗环机主辊为驱动辊，同时作旋转运动和直线进给运动，芯辊为从动辊，作从动旋转轧制运动，抱辊为自由转动的从动辊，在轧制过程中保证环件的平稳运动。径向辗环机结构简单，广泛应用于中小型环件轧制生产，但轧制的环件端面质量难以保证，环件端面常有凹坑缺陷，为了改善轧制环件端面质量和轧制复杂截面轮廓环件，在径向辗环机的基础上，增设一对锥辊如图 1.1 (b) 所示，从而构成径轴向辗环机，图中主辊为驱动辊，作旋转轧制运动；芯辊作径向直线进给运动，逐渐趋近于主辊轮廓面；两个锥辊以环件线速度同步旋转，且上端面锥辊渐渐地向下移动；两个抱辊从两侧以一定的力抱住环件，对环件起到定心、防振和整圆作用^[12]。大型环锻件的生产一般采用径轴向辗环机。

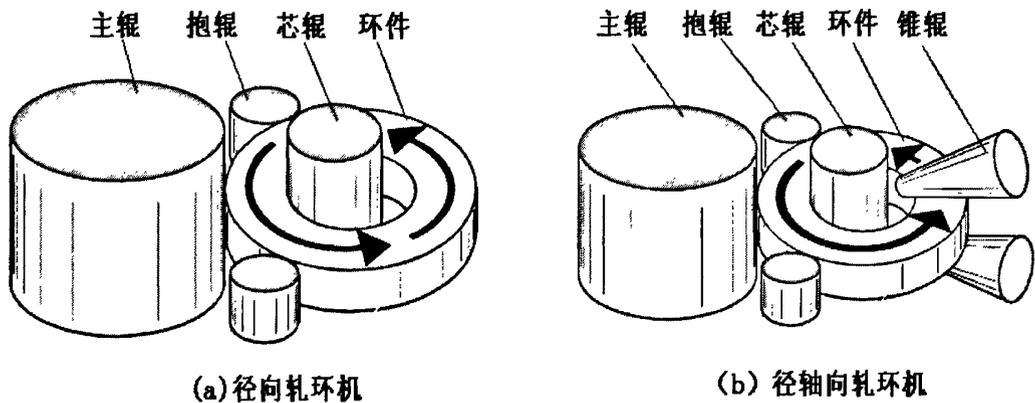


图 1.1 环件轧制工作原理示意图
Fig.1.1 Schematic diagram of ring rolling work

1.1.2 国内外大型环锻件研究现状

国外大型锻件制造业的发展历程大致可分为两个阶段：一是向上发展阶段；二是带有衰退和停滞色彩的发展阶段。第一阶段从 20 世纪四、五十年代开始，延续到七十年代末和八十年代初；第二阶段从八十年代初开始，延续到今后一段时间^[13-14]。

国外主要的大锻件生产厂家有美国伯利恒钢铁公司、日本制钢所室兰工厂、德国蒂森亨利厂、德国联合锻造公司、俄罗斯依若尔斯克重机厂等。在这些国家，大型锻件制造业的第一阶段具有几个比较明显的特点：一是锻件大型化和特大型化；二是内部具有较高的质量；三是大型锻件外形尺寸具有较高的精度。当前，这些国家大锻件的生产正处于一个新的带有停滞和衰退色彩的发展阶段。特点是广泛面临着开工不足、产量下降等问题。出现这种情况的主要原因是大型锻件生产能力过剩，钢铁消耗量已经达到或接

近顶峰。为提高企业竞争和生存能力,各国相继对旧有企业改造和合并,对大锻件的生产设备配齐配套设施,以提高其质量和等级^[15-19]。

国内主要的大锻件生产厂家有太原重型机械集团、中信集团、第一重型机械集团、第二重型机械集团、上海重型机械厂有限公司等。我国大锻件生产的起步是在上世纪五、六十年代。改革开放以来,我国大锻件生产则处于高速发展时期。至今,我国大锻件生产已经有了一定的规模和水平,锻造生产技术水平有了很大的提高。应该说,目前我们已具备了为国民经济各行业设计和制造各种成套设备和关键产品的能力,已经有能力参与国际市场竞争^[20-21]。

国外生产大型环锻件比较典型的例子是日本制钢所室兰工厂于1980年通过生产两支570 t的特大型钢锭,制造了大型环件;日本川崎重工株式会社曾制造了世界上最大的空心钢锭,用于生产大型圆筒形锻件,其省去了锻粗、冲孔两道工序;德国八十年代生产的1630 MW汽轮发电机护环的尺寸达 $\Phi 2021 \text{ mm} \times \Phi 1800 \text{ mm} \times 1205 \text{ mm}$,可谓护环之王^[22]。

国内生产大型环锻件比较典型的例子有:煤液化反应器筒体锻件,反应器尺寸:筒节外径 $\Phi 5500 \text{ mm}$;壁厚335 mm,由13个筒节和球封头、裙座组成,反应器总重2050 t;加氢反应器(含热壁)封头和筒体锻件,筒体外径 $\Phi 5500 \sim \Phi 6000 \text{ mm}$,壁厚480 mm;可以生产的环形锻件最大直径:用125 MN液压机自由锻约为5700 mm^[23]。我国大型辗环机($\Phi 2000 \text{ mm}$ 以上)一部分从国外进口,例如原洛阳矿山机械厂、无锡大昶重型环件有限公司分别从德国引进了 $\Phi 5500 \text{ mm}$ 、 $\Phi 6000 \text{ mm}$ 辗环机;江阴恒润法兰有限公司从韩国引进了 $\Phi 7500 \text{ mm}$ 辗环机等,另外一部分主要依靠国内大型铸锻设备研究所进行设计、制造和装配,例如无锡派克重型铸锻有限公司的 $\Phi 6500 \text{ mm}$ 辗环机;三一索特传动设备有限公司的 $\Phi 5000 \text{ mm}$ 辗环机;张家港海陆环形锻件有限公司的 $\Phi 3500 \text{ mm}$ 、 $\Phi 5000 \text{ mm}$ 辗环机,另外该公司与武汉理工大学、江苏大学共同签署的产学研合作项目:海上风电 $\Phi 9000 \text{ mm}$ 环锻件生产线正在建设之中,预计2011年初完成。该项目的投产标志着张家港海陆环形锻件有限公司将成为国内最大的环锻件生产基地。

然而,目前我国大型环锻件锻造工艺的制定受制于人为经验,缺乏对环锻件具体的变形规律和工艺规律的认识。因此,要提高大型环锻件的热加工水平,就必须从其具体的制坯与辗环过程入手,研究每一步锻造工艺及其参数对大型环锻件质量的影响,真正了解大型环锻件锻造的目的和实质,从而制定出有效且可行的锻造工艺^[24]。

1.2 数值模拟技术在锻造行业的应用

采用数值模拟技术,是目前改进大锻件锻造工艺水平的主要方法,其在国内外均已取得了一定的成果。它是通过在计算机上模拟大锻件的锻造成形过程,分析工艺参数对锻件质量影响和锻件内部微观组织的演变情况,从而优化工艺过程和工艺参数。

在国外,随着 70 年代 Kobayashi 最早用刚塑性有限元对镦粗过程进行了研究^[25],数值模拟技术更是在大型锻件的锻造分析领域得到了广泛的应用。Dong K.Kim 等用粘弹塑性有限元模拟大锻件平砧拔长,分析了砧宽比、压下率以及预冷却对锻件质量的影响,得出为锻透锻件心部砧宽比要大于 0.6,但当砧宽比大于 0.9 以后,心部等效应变反而降低,所以优选的砧宽比应为 0.6~0.9^[26]。在国内,燕山大学教授刘助柏长期致力于对锻造工艺尤其是拔长工艺的研究,对一系列拔长新工艺及新方法进行了模拟^[27],提出了如锥形砧镦粗和 LZ 锻造法等新的锻造工艺^[28],并运用数值模拟的方法给出了这些新工艺中各锻造参数的最优值^[29];其博士生、江苏大学教授王雷刚在新工艺研究的基础上,运用有限元软件 ANSYS 模拟了大型汽轮机转子的锻造过程,将新工艺的模拟研究运用到实际生产中,取得了一定的成果^[30]。在环件轧制模拟方面,1988 年 D.Y Yang 等人利用平面刚塑性有限元方法,对环件轧制的平面变形作了分析,获得了变形金属的速度场和沿着接触表面的外力,计算出了应变速率分布,驱动辊的转矩和垂直压力分布;1990 年 N.Kim 等人用三维刚塑性有限元方法对环件轧制进行了模拟,并编制了 Ring 的计算机程序^[31-32]。国内清华大学博士后许思广等人^[33-34]用三维刚塑性有限元法分析了横断面为对称的辗环变形过程,以及辗环过程的热耦合问题;谢春雷等人^[35]则采用刚(粘)塑性动力显示有限元法模拟了环件热轧时的金属流动规律,模拟结果不但得到环件轧制的接触力、等效应变速率和等效应变的分布,开发了环件轧制动力显式三维有限元软件 H-ring,并用以进行环件轧制预成形毛坯设计;武汉理工大学教授华林^[36]等人利用 ABAQUS 软件模拟和研究了大型环件的径轴向轧制工艺以及内台阶锥形环件辗扩工艺;华中科技大学博士王泽武^[37]研究了环件虚拟轧制技术及过程优化;太原理工大学硕士赵美荣^[38]利用 DEFORM 软件优化了大型法兰环件的辗轧工艺。

从以上国内外学者的研究成果来看,近几十年来,数值模拟技术在大锻件锻造领域内的研究取得了许多重要的成果,但目前对大锻件工艺过程的模拟,大都停留在理论研究的程度,还未能很好的与实际的工程运用相结合。大型环锻件轧制存在的问题更为复

杂,其是一个多因素耦合作用下的复杂成形过程,如何建立符合实际又能兼顾计算精度和效率的大型环锻件轧制三维有限元模型、采用合理的网格划分技术、开发大型环锻件轧制过程仿真设计软件集成系统平台,实现成形过程仿真模拟,为大型环锻件轧制成形技术的研究开发提供先进的数字化设计分析平台。已成为大型环锻件轧制成形理论与技术发展迫切需要研究解决的重要课题。

因此,如何更好的将数值模拟技术与大锻件的实际生产相结合,通过计算机软件的快速分析,更加高效、精确地优化大锻件制造工艺,指导大锻件的实际生产,缩短产品制造周期,是大锻件模拟技术以后需要解决的中心问题之一。

1.3 课题研究的意义及研究内容

大型环锻件的轧制一般采用径、轴向轧制工艺,其设备结构及控制工艺较普通的辗环机和辗环工艺要复杂得多^[39]。大型环锻件在转移到辗环机之前的自由锻出坯阶段,首先应根据最终产品尺寸确定毛坯的最佳尺寸,然后制定出合理的工艺参数,这些参数包括转速和芯辊进给量,而转速又包含径向驱动辊和轴向锥辊的转速,进给量又包含径向芯辊进给量和轴向锥辊进给量。工艺参数选取的正确与否决定着环锻件是否能够轧制以及最终产品的质量。由于该工艺的复杂性,在计算机模拟和实际生产试验时难度也比较大,国内外很多文献很少涉及大型环锻件径轴向轧制工艺方面,对该工艺进行计算机模拟和实际生产试验分析以揭示其成形规律和机理的研究文献几乎为空白^[40]。另外,大型环锻件力学性能、硬度均匀性较差,表层硬化件的有效硬度层深度较低,造成产品的承载能力与使用寿命底下,加之在锻造过程中易出现锻不透、粗晶;冷却过程中易出现开裂、变形等缺陷。风电环锻件主要用于风电设备的 MW 级风电机组变桨距、偏航塔上的回转支撑圈环锻件、风电塔身塔体的连接紧固件,这些锻件都是风电设备重要的承重与传动件,需要在较大风能变换和恶劣的天气条件的环境下,承载风电机组运转负荷的动力,20年内不能出现质量问题。环锻件的化学成分设计要求、力学性能要求、硬度要求及超声波探伤等内在质量指标要求,直接关系风电设备的安全运行和使用寿命。而目前国内生产的风电用环锻件的质量还不够稳定,主要表现在原材料的冶金质量、化学成分比,锻造及热处理工艺等方面。因此,进行风电用大型环锻件的热加工工艺优化与试验研究是一项急需开展的课题。

本文结合企业生产实际,以风电回转支撑为例研究大型环锻件热加工工艺,具体内

容包括:

(1) 设计风电回转支撑环锻件的材料化学成分。在原有材料的基础上,调整合金元素的含量,增加材料的淬透性,提高环锻件的力学性能。

(2) 研究环锻件毛坯尺寸设计原则和方法;改进制坯工艺,以避免毛坯产生夹杂性裂纹。

(3) 进行环锻件轧制过程数值模拟,分析其变形规律;比较不同进给量、不同芯辊直径条件下环锻件的轧制效果。

(4) 研究环锻件轧制过程中每个阶段轧制参数的最佳配比,选择合理的轧制曲线。

(5) 开展环锻件成形过程的实际生产试验,并与有限元模拟结果进行对比,以验证有限元模拟理论成果的可靠性。

(6) 研究风电用环锻件产生粗晶的原因,通过试验得出细化晶粒的第一热处理工艺。

(7) 采用正交试验研究风电用环锻件新材料的第二热处理工艺,以使得新材料的组织 and 性能最佳。

第二章 大型环锻件轧制金属成形理论基础

环锻件轧制过程可分为：开始咬合阶段，稳定轧制阶段、轧制结束阶段。在环锻件的稳定轧制过程中，芯辊进给速度和驱动辊旋转速度都不大，而且速度变化也较小，近似处于静力平衡状态，因而可依据静力学理论对环锻件的咬入过程、锻透状态和塑性弯曲失稳情况进行分析，同时有限元方法是解决复杂塑性成形问题的有效方法之一。

2.1 大型环锻件轧制理论概述^[41]

2.1.1 咬入条件分析

(1) 咬入力学模型和咬入条件。环锻件轧制类似于轧钢中的穿孔轧制，环锻件连续咬入孔型是环锻件转动并实现稳定轧制的必要条件。忽略导向辊对环锻件的作用力，提出环锻件咬入孔型的力学模型如图 2.1 所示。 P_1 和 T_1 分别为驱动辊对环锻件的正压力和摩擦力， P_2 为芯辊对环锻件的正压力。记 α_1 、 α_2 分别为驱动辊和芯辊与环锻件的接触角， R_1 、 R_2 分别为驱动辊和芯辊的工作半径， h_0 、 h 分别为环锻件在孔型入口处和出口处的壁厚， $\Delta h = h_0 - h$ 为在轧制中环锻件的每转壁厚减小量， ω 为驱动辊转速， L 为接触弧长在周向上的投影长度。近似认为驱动辊对环锻件作用力的合力作用点位于驱动辊与环锻件接触弧的中点。要使环锻件咬入孔型，则环锻件所受的拽入力必须大于或等于它所受的推出力，环锻件在径向上的受力是平衡的。据此由图 2.1 环锻件受力平衡条件求解得环锻件咬入条件为：

$$\beta \geq \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (2.1)$$

式中， β 为环锻件与驱动辊之间的摩擦角，记 μ 为摩擦系数 $\mu = \tan\beta$ ，则。由上式可知，要使环锻件连续咬入孔型，则驱动辊与环锻件之间接触角的平均值不得超过摩擦角。

(2) 咬入条件与进给量。由图 2.1 几何关系看出，由于接触角 α_1 和 α_2 都很小，所以接触弧长在进给方向的投影长度 L 与接触弧长近似相等，于是有环锻件咬入孔型条件与进给量关系为：

$$\Delta h \leq \Delta h_{\max} = \frac{2\beta^2 R_1}{(1 + R_1/R_2)^2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r}\right) \quad (2.2)$$

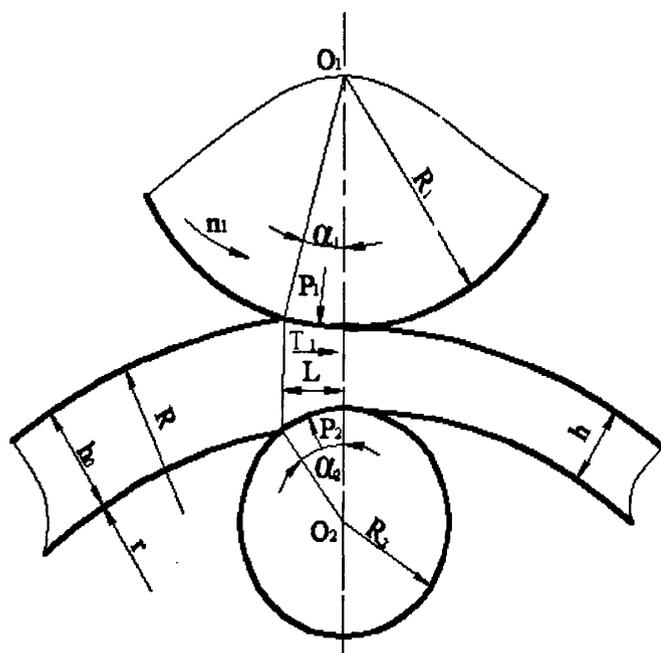


图 2.1 环锻件咬入孔型力学模型

Fig.2.1 Model of bitted ring

式中, Δh_{\max} 为环锻件咬入孔型所允许的最大每转进给量或环锻件最大每转壁厚减小量。式(2.2)表明, 要使环锻件连续咬入孔型, 则每转进给量不得超过环锻件咬入所允许的最大每转进给量。

(3) 咬入条件影响因素。由式(2.2)可知, 环锻件咬入孔型的最大每转进给量与轧制摩擦、轧辊尺寸、环锻件尺寸等有关。即表明环锻件轧制咬入条件受到了轧制摩擦、轧辊尺寸、环锻件尺寸等因袭影响。

(4) 环锻件轧制中不转动的本质。环锻件轧制中的不转动现象是指环锻件与芯辊一起处于静止状态, 驱动辊相对于环锻件作滑动转动, 环锻件无法产生轧制变形, 轧制过程中断。其本质原因是环锻件轧制的咬入条件没得到满足, 亦即实际环锻件轧制的每转进给量超过了咬入条件所允许的最大每转进给量 Δh_{\max} , 环锻件因不能咬入孔型而不转动。要消除环锻件轧制中的不转动现象, 使环锻件连续咬入孔型, 必须满足环锻件轧制咬入条件。环锻件轧制中, 若出现不转动的现象, 应通过改善咬入条件来予以消除。除增大轧制摩擦, 减小轧制用环锻件毛坯厚度、减小每转进给量, 改变轧辊直径等, 都可以有效地改善咬入条件, 有利于环锻件咬入孔型并产生转动。

2.1.2 锻透条件分析

(1) 锻透力学模型和锻透条件。咬入孔型仅是环锻件轧制变形的必要条件, 要使环

锻件既咬入孔型又产生轧制变形,除了满足咬入条件外还应使环锻件锻透,即塑性区穿透整个环锻件的壁厚,也就是满足其锻透条件。环锻件锻透是指塑性区穿透环锻件壁厚,使其产生壁厚减小直径增大的塑性变形,所以锻透条件是环锻件轧制变形的充分条件。环锻件锻透类似有限高度的快料拔长,其锻透力学模型如图 2.2 所示。图中 L 为环锻件接触弧长, h_a 为环锻件轧制变形区的平均壁厚,且 $h_a = \frac{h_0 + h}{2}$ 。根据滑移线理论对图 2.2 塑性变形进行分析得塑性区穿透环锻件壁厚,即环锻件锻透条件为:

$$\frac{L}{h_a} \geq \frac{1}{8.74} \quad (2.3)$$

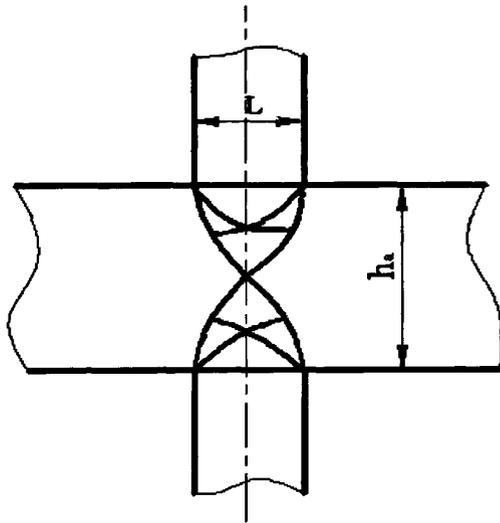


图 2.2 环锻件轧制锻透力学模型
 Fig. 2.2 Force model of bended ring

(2) 锻透条件与进给量。要使环锻件锻透产生轧制变形,则芯辊每转进给量不得小于锻透所要求的最小每转进给量。由进给量表示的锻透条件为:

$$\Delta h \geq \Delta h_{\min} = 6.55 \times 10^{-3} R_1 \left(\frac{R}{R_1} - \frac{r}{R_1} \right)^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1}{r} \right) \quad (2.4)$$

式(2.4)中, Δh_{\min} 为环锻件锻透所要求的芯辊最小每转进给量,亦即环锻件最小的每转壁厚减小量。

(3) 由式(2.4)可知,最小每转进给量与轧辊尺寸和环锻件尺寸有关。增大每转芯辊进给量、增大驱动辊和芯辊的半径、减小毛坯厚度都有利于环锻件锻透。因此,在辗环机轧制能力许可的条件下增大芯辊每转进给量,或在自由锻制坯阶段尽量选用大冲头,减小毛坯的壁厚,是改善环锻件锻透条件的有效方法。

(4) 环锻件轧制中转动但直径不扩大的本质。环锻件转动表明其已满足咬入条件, 而直径不扩大是因为塑性变形区没有穿透环锻件径向壁厚, 也就是环锻件外圆和内孔的表层为塑性区而心部仍为刚性区, 因而不产生周向伸长和直径扩大的塑性变形。消除该现象应通过改善锻造条件予以解决。即增大每转芯辊进给量、增大驱动辊和芯辊的半径、减小毛坯厚度等。

2.1.3 刚度条件分析

环锻件轧制中的塑性失稳现象是指环锻件在导向辊的压力作用下压扁而成为废品。要使环锻件轧制中不产生塑性失稳, 则其壁厚不得小于塑性稳定所要求的最小壁厚 H_{\min} 。式(2.5)为用环锻件壁厚表示的刚度条件:

$$H \geq H_{\min} = \sqrt{13.5 \frac{r_a}{R_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) L^2} \quad (2.5)$$

根据体积不变并忽略环锻件轧制中的轴向宽度, 得 $r_a = \frac{r_{a0} H_0}{H}$, 其中 r_{a0} 、 H_0 分别为环锻件轧制前的平均半径和壁厚, H 为环锻件轧制中的壁厚。当环锻件轧制到壁厚为最小值

时, 其内外径的差值也到达最小值, 即 $R \approx r$, 接触弧长 $L \approx \sqrt{\frac{2\Delta h}{1/R_1 + 1/R_2}}$ 。将 r_a 和 L 带

入式(2.5), 整理得:

$$H \geq H_{\min} = \sqrt[3]{27 r_{a0} H_0 \Delta h} \quad (2.6)$$

式(2.6)中 Δh 为环锻件达到最小壁厚时的每转进给量。若终轧时环锻件壁厚为最小值, 每转进给量也为最小值即 $\Delta h = \Delta h_{\min}$, 同时考虑到:

$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R} - \frac{1}{r} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} - \frac{H_{\min}}{R_1} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$, 将其代入式(2.5)得:

$$\Delta h_{\min} = 6.55 \times 10^{-3} R_1 \left(\frac{H_{\min}}{R_1}\right)^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.7)$$

将式(2.7)代入式(2.6), 环锻件在轧制中不产生塑性失稳的刚度条件为:

$$H \geq H_{\min} = 0.183 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{r_{a0} H_0}{R_1} \quad (2.8)$$

由式(2.8)可知, 轧辊工作半径增大, 使环锻件最小壁厚减小, 有利于环锻件刚度条件。环锻件原始平均和原始壁厚减小, 也有利于环锻件刚度条件。实际生产中, 环锻件的原始尺寸和轧辊都是已知的, 可用式(2.8)校核环锻件的刚度, 或在未知轧辊尺寸时, 可用刚度条件设计轧辊。

2.2 金属成形过程数值模拟理论基础

在金属塑性成形加工中,采用有限元数值模拟可以得到金属塑性变形过程的金属流动、应力、应变、温度分布等规律,可以对模具进行受力分析,并能预测可能的缺陷以及失效形式。与其它塑性加工模拟方法相比,有限元方法功能强、精度高并且解决问题的范围广。它可以采用不同的形状、大小和单元离散任意形状的变形体,并能够方便地处理工件与模具之间的作用力和摩擦、材料的变形性能以及变形速率、温度场等对塑性成形的影响,获得加工过程中任意时刻的诸多信息,包括应力场、应变场、速度场、温度场等^[42-43]。

2.2.1 有限单元法简介

有限元法(Finite Element Method)是求解复杂工程问题的一种近似的数值分析方法,它的基本概念是将一个复杂连续体的求解区域划分为有限多个形状简单的子区域(单元),即将分析区域离散为由有限个单元组成的等效集合体^[44]。通过将求解区域离散成单元,利用在每个单元内假设的近似函数来分片地表达分析域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元节点处的数值和插值函数来表达。这样,未知场函数或其导数在节点的数值就成为新的未知量,从而将一个连续的、具有无限自由度的问题,离散为有限自由度的问题。这些未知量一经求出,就可以通过插值函数确定整个求解区域的值^[45-46]。

在金属塑性成形领域里,有限元法可分为两大类。一类是固体型塑性有限元(Solid Formulation FEM),包括弹塑性和弹粘塑性有限元。这类有限元的特点是同时考虑弹性变形和塑性变形,既可以分析加载过程,又可以分析卸载过程,包括计算残余应力、应变和回弹及模具与工件之间的相互作用,可以处理几何非线性和非稳态问题,缺点是所取的增量步长不能太长,计算量繁重、累积误差大,对于非线性硬化材料的计算比较复杂^[47-48]。另一类是流动型塑性有限元(Flow Formulation FEM),包括刚塑性和刚粘塑性有限元。这类有限元法忽略弹性变形,采用 Levy-Mises 方程作为本构方程,满足体积不变条件,采用 Newton-Raphson 迭代法求解,求解变量为单元节点的速度增量,适用于各类体积成形问题的分析,其特点是所取增量步长较大,计算量小,精度较高,采用在离散区域上对速度积分的方法,避开了几何非线性问题,因而能够模拟复杂的塑性成形过程,但计算弹性变形和卸载过程,故无法求得残余应力、应变和回弹量^[49-50]。

本文在模拟大型环锻件轧制成形过程中, 工件的轧制温度范围为 850~1150 °C, 且工件为塑性变形体、轧辊为刚体, 忽略材料的弹性变形、回弹等问题, 故本文采用刚粘塑性有限元法。

2.2.2 刚粘塑性有限元的基本原理

刚塑性有限元法通常更多适用于冷加工, 对于热加工, 应变硬化效应不显著, 而对变形速度有较大的敏感性, 因此, 热加工时要用粘塑性本构关系, 相应地发展了刚粘塑性有限元法。刚粘塑性有限元法由于忽略弹性变形部分, 减少了计算量, 极大提高了计算效率。但由于忽略了弹性变形, 刚粘塑性有限元仅适合于塑性变形区的分析, 不能直接分析刚性区和弹性区的变形和应力状态, 也不能处理卸载问题和计算残余应力和残余变形。此外由于作了刚粘塑性假设, 对一般的体积不可压缩材料, 引起静水压力与体积应变率无关, 所以必须做特殊的处理, 才能求出应力张量, 否则只能求出应力偏量。这就使得刚粘塑性有限元法在处理方法上很不相同^[51]。

(1) 刚粘塑性材料的边值问题。对刚粘塑性材料, 其基本方程如下, 材料服从 Mises 屈服准则:

$$F = \frac{3}{2} S_{ij} \cdot S_{ij} - Y^2 = 0 \quad (2.9)$$

其中: Y 为流动应力, 它是温度、等效应变、等效应变速率和微观组织的函数。在塑性区 $F=0$, 由正交流动法则:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3 \dot{\varepsilon}}{2Y} S_{ij} \quad (2.10)$$

其中: $\dot{\varepsilon}_{ij}$ 为应变率张量; $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变率; S_{ij} 为应力偏张量。

在刚性区

$$F < 0, \dot{\varepsilon}_{ij} = 0 \quad (2.11)$$

对刚塑性材料, 满足体积不可压缩条件:

$$\varepsilon_{kk} = \dot{\varepsilon}_{kk} = 0 \quad (2.12)$$

不考虑体积力, 平衡方程为:

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (2.13)$$

几何方程:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(\nu_{i,j} + \nu_{j,i}) \quad (2.14)$$

边界条件:

在 S_T 表面上的应力边界条件:

$$\sigma_{ij} \cdot n_j = T_i \quad (2.15)$$

在 S_V 表面上的速度边界条件:

$$V_i = V_i^0 \quad (2.16)$$

其中: V_i 为物体表面上点的速度向量; n_j 为应力边界 S_T 的外法线向量; V_i^0 为速度边界 S_V 上给定的速度向量; T_i 为应力边界 S_T 上给定的分布力向量。

(2) 刚粘塑性变分原理。

变分方程:

$$\phi = \pi_1 + \pi_2 - \pi_F - \pi_T - \pi_C \quad (2.17)$$

泛函表达式为:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \int_V \sigma_e \dot{\varepsilon}_e dV, \quad \pi_2 = \int_V \sigma_m \dot{\varepsilon}_v dV \\ \pi_F &= \int_V \vec{F} \vec{V} dV, \quad \pi_T = \int_{S_T} \vec{T} \vec{V} dV, \quad \pi_C = \int_{S_c} \left[\int_0^{\vec{V}_R} \vec{f}_c d\vec{V}_R \right] dS \end{aligned} \quad (2.18)$$

其中: π_1 为变形能项; π_2 为体积变形能项, 对于实体材料即为不可压缩约束项; σ_m 为静水压力; λ 为拉格朗日乘子; π_F 为体积力做功项; π_T 为外力功项; π_C 为摩擦功项。

对式(2.17)变分后得到:

$$\delta\phi = \int_V X_e \delta\dot{\varepsilon}_e dV + \int_V \sigma_m \delta\dot{\varepsilon}_v dV - \int_V \vec{F} \delta\vec{V} dV - \int_{S_T} \vec{T} \delta\vec{V} dS - \int_{S_c} \vec{f}_c \delta\vec{V}_R dS = 0 \quad (2.19)$$

上式中的摩擦功项:

$$\vec{f}_c = -\frac{2mk}{\pi} \lg^{-1} \left(\frac{V_R}{a} \right) \frac{\vec{V}_R}{V_R}, \quad V_R = |\vec{V}_R|, \vec{V}_R = \vec{V} - \vec{V}^0 \quad (2.20)$$

其中 V^0 为模具速度。使用有限元通用的矩阵符号, 式(2.19)离散化后的形式为:

$$\sum_{j=1}^M \left\{ \delta \bar{V}^T \left[\int_{V_j} \frac{\bar{Y}}{\bar{\varepsilon}_e} \bar{P} dV - \int_{V_j} \bar{N}^T \bar{f} dV - \int_{S_j} \bar{N}^T \bar{N} dS + \int_{S_j} \bar{N}^T \bar{f}_c dS + \lambda_j \int_{V_j} (\bar{m} \bar{B}) dV - \delta \lambda_j \int_{V_j} \bar{m} \bar{B} dV \right] \right\} = 0 \quad (2.21)$$

其中:

$$\bar{f}_c = -\frac{2mk}{\pi} \operatorname{tg}^{-1}(V_R) \frac{\bar{V}_R}{V_R}, \quad \bar{P} = \frac{3}{A} \bar{P}_1 + \frac{1}{3(3-A)} \bar{P}_2$$

$$\bar{P}_1 = \bar{B}^T \bar{D}_1 \bar{B}, \quad \bar{P}_2 = \bar{B}^T \bar{D}_2 \bar{B}, \quad \bar{D} = \frac{3}{A} \bar{D}_1 + \frac{1}{3(3-A)} \bar{D}_2$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 4/9 & -2/9 & -2/9 & 0 & 0 & 0 \\ -2/9 & 4/9 & -2/9 & 0 & 0 & 0 \\ -2/9 & -2/9 & 4/9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/3 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \bar{m} \bar{m}^T, \quad \bar{m} = (1, 1, 1, 0, 0, 0)$$

上式中, 对于疏松材料 $A < 3$, 对于实体材料, 则为:

$$A = 3, \bar{D} = \bar{D}_1, \bar{P} = \bar{P}_1, \dot{\bar{\varepsilon}}_e = \dot{\bar{\varepsilon}}_e \quad (2.22)$$

根据式(2.21), 由于 $\delta \bar{V}^T$ 和 $\delta \lambda_j$ 的任意性, 得单元体内变分方程如下:

$$\begin{bmatrix} \int_{V_j} \frac{\bar{Y}}{\bar{\varepsilon}_e} \bar{P} dV & \int_{V_j} (\bar{m} \bar{B}) dV \\ \int_{V_j} \bar{m} \bar{B} dV & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V} \\ \lambda_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{V_j} \bar{N}^T \bar{f} dV + \int_{S_j} \bar{N}^T \bar{T} dS - \int_{S_j} \bar{N}^T \bar{f}_c dS \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

或记为:

$$K W = P \quad (2.24)$$

由于矩阵 K 和矩阵 P 均为 W 的函数, 故该方程须用迭代法求解。采用 $N-R$ 迭代法, 由

$$\frac{\partial \phi}{\partial W} = K W - P = 0 \quad (2.25)$$

得到:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial^2 \bar{W}^n} \Delta \bar{W}^n + \frac{\partial \phi}{\partial \bar{W}^n} = 0 \quad (2.26)$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} C_1 & \int_V \bar{B}^T \bar{m} dV \\ \int_V \bar{m}^T \bar{B} dV & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$C_1 = \int_V \frac{Y}{\varepsilon_e} \left[\bar{P} - \frac{1-m}{\varepsilon_e} \right] dV - \frac{\partial}{\partial \bar{V}^n} \left[\int_V \bar{N}^T \bar{f} dV - \int_{S_n} \bar{N}^T \bar{T} dS - \int_{S_c} \bar{N}^T \bar{f}_c dS \right] \quad (2.28)$$

为增量 $\Delta \bar{W}^n$ 所满足的方程。经过展开计算后得到 $\Delta \bar{W}^n$ 的刚度矩阵 C 和载荷向量 B 如下:

$$\bar{B} = - \begin{bmatrix} \int_V \frac{Y}{\varepsilon_e} \bar{P} \bar{V}^n dV - \left[\int_V \bar{N}^T \bar{f} dV - \int_{S_n} \bar{N}^T \bar{T} dS - \int_{S_c} \bar{N}^T \bar{f}_c dS \right] \\ \int_V \bar{m}^T \bar{B} \bar{V}^n dV \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\bar{W}^n = \begin{bmatrix} \bar{V}^n \\ \lambda_j^{n+1} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

第三章 风电用大型环锻件轧制过程数值模拟

随着计算机技术和塑性理论的发展,用有限元方法模拟环锻件轧制过程,是当前最有效、精确、详细的工艺分析方法。特别是对于大型环锻件产品,在进行轧制生产前,若进行反复的轧制试验,势必造成大量的材料和能源的浪费。因此,利用计算机对其轧制过程进行模拟,可减少反复的生产试验,节约成本,提高生产效率。本文将运用 Deform-3D 软件对风电用大型环锻件的轧制过程进行数值模拟。

3.1 有限元软件 Deform-3D 介绍

Deform(Design Environment for Forming)是国际上最著名的2D/3D成形加工和热处理工艺模拟分析软件。它是由美国科学成形技术公司(Science Forming Technology Corporation简称SFTC)公司出品,主要用于金属塑性加工、热处理等工艺数值模拟。目前,Deform软件已是国际上流行的金属加工数值模拟的软件之一^[52]。

Deform-3D是一套功能强大的体积成形有限元模拟专用商业软件,集成了综合建模、成形模拟、热传导模拟和成形设备模拟等功能,它可以处理复杂的三维零件和模具几何形状,可进行材料流动、模具填充、锻造负荷、模具应力、晶粒流动、金属微结构和缺陷产生发展情况等方面的数值模拟。

Deform-3D的主要功能:

- (1) 成形分析(包括:锻造、挤压、墩粗、轧制、自由锻、弯曲和其它成形加工手段)和热传导耦合分析;
- (2) 允许用户自定义子函数,定义其材料模型、压力模型、破裂准则和其它函数;
- (3) 材料模型包括刚性、弹性和热粘塑性,特别适用于大变形成形分析;
- (4) 在必要时能够自行触发自动网格重划分器,生成优化的网格系统。在变形精度要求高的区域,可以进行网格细分,从而降低单元数目的规模,显著提高计算效率;
- (5) 质点跟踪可以分析材料内部的流动信息及各种场量分布;
- (6) 多变形体模型允许分析多个成形工件或耦合分析模具应力。

3.2 试验模型及参数的设定

3.2.1 建立有限元模型

平板轧制模型是附加了一系列简化、假设条件,抽象出的最理想的环锻件轧制模型,它能很好的反映出辗扩变形的各种分量,如应力应变场、速度场的变化情况。因此,本文建立了以上两种有限元模型分析环锻件轧制过程中的变形情况,以及不同的芯辊进给速度、毛坯壁厚对轧制效果的影响。环锻件轧制模型是在 Deform-3D 的 Ring-rolling 模块中直接建立模型,并且设置满足式(2.1)、(2.2)咬入条件的工艺参数,即轧制过程中不会出现毛坯转不动的现象,其模型如图 3.1 所示。平板轧制模型在 Deform-3D 软件前处理模块中导入三维实体模型,在模拟前先用三维绘图软件 Pro/E 建立模型,Pro/E 的坐标系与 Deform-3D 中的系统坐标系完全重合,利用这个特点,以 STL 文件格式导入到 Deform-3D 软件中,并通过应用旋转、平移、干涉等操作准确定位平板毛坯与轧辊的相对位置,设置工艺参数及划分网格等,其模型见图 3.2 所示。

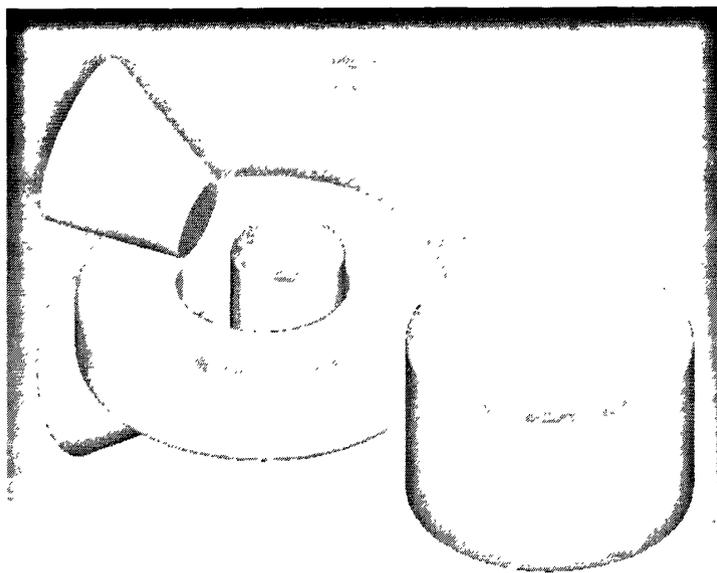


图3.1 环锻件轧制模型

Fig.3.1 The model of ring rolling

两种模型中的工件均采用Deform-3D材料库中的德标材料DIN-42CrMo4,其材料成分及物理性能与中国钢铁牌号的42CrMoA钢近似。

3.2.2 划分网格及设置边界条件

Deform-3D软件中共有两种划分网格的方式:绝对网格和相对网格。相对网格是指

用户指定网格总数，不论工件多么复杂，都生成用户指定的网格数目；绝对网格是指用户指定单元的尺寸，软件参照单元尺寸生成一定数量的网格。

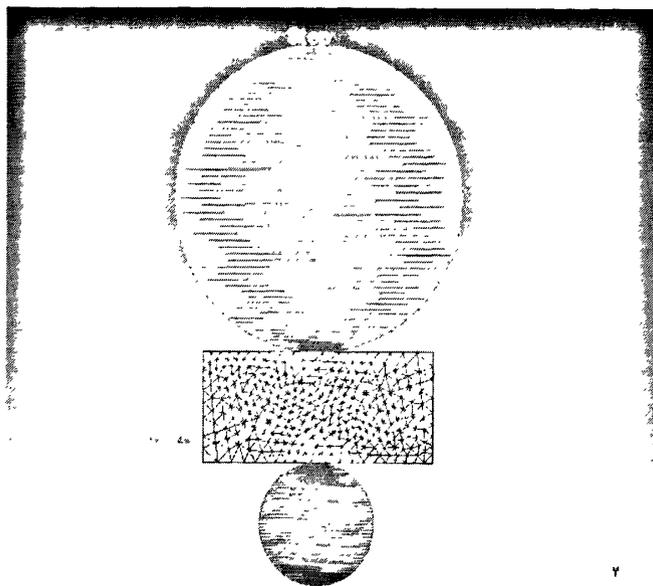


图3.2 平板轧制模型

Fig.3.2 The model of plate rolling

本文中环锻件轧制模型与平板轧制模型中的工件均采用绝对网格划分法，且视为刚粘塑性体，轧辊均视为刚性体。各工件与轧辊的节点数与单元数见表3.1。

表3.1 各对象单元划分情况

Tab.3.1 Element instance of every object

对象	模型一毛坯	模型二毛坯
材料模型	刚粘塑性体	刚粘塑性体
节点数	1892	23400
表面单元数	2024	8400
实体单元数	7966	19080

物体的边界条件就是通过定义物体跟物体之间或物体与环境之间的接触条件。只有定义适当的边界条件才有可能完成复杂的成型模拟。最通常的边界条件是物体跟环境之间的热交换、对称面上的速度，物体的运动方向、物体上的力、物体与物体及物体与模具之间的关系等^[53]。

本文模型一、二需要设置的边界条件主要有：

(1) 模型一中的主轧辊的转速、芯辊的进给速度、锥辊的转速；模型二中的芯辊进

给速度；

(2) 各模型中工件与轧辊的相对位置关系及工件的初锻温度（辗扩过程与平板轧制过程均视为等温锻造过程）；

(3) 各模型中工件与轧辊的摩擦方式及摩擦系数。

3.3 轧制工艺参数优化

3.3.1 毛坯尺寸设计方法

毛坯尺寸设计是优化大型环锻件径轴向轧制过程的前提和基础，合理的毛坯尺寸设计，对于成功满足大型环锻件轧制过程中的咬入条件、锻透条件、刚度条件，以及确保获得精确的环锻件尺寸和良好性能，都具有十分重要的意义。因此，本文提出了一种以体积不变为前提，基于控制辗扩比和径轴向变形量分配比的矩形截面环锻件径轴向轧制毛坯尺寸设计方法。该方法为研究不同尺寸毛坯下的大型环锻件径轴向轧制变形行为、工艺规律、以及包括毛坯在内的工艺过程优化设计提供了重要的方法和基础。

大型环锻件径轴向轧制截面变形如图 3.3 所示，壁厚变薄、高度变小、直径变大。 D_0 、 d_0 、 h_0 、 b_0 分别为毛坯的外径、内径、高度和壁厚； D_f 、 d_f 、 h_f 、 b_f 分别为最终环锻件的外径、内径、高度和壁厚。 α 为变形前后矩形截面顶点连线与水平方向的夹角。

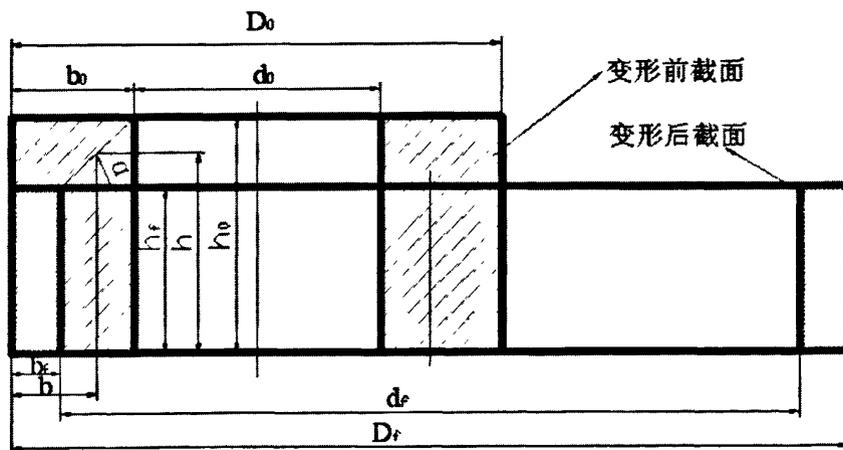


图 3.3 环锻件截面变形图

Fig.3.3 Section deformation of ring

$\tan\alpha$ 定义为环锻件径轴向轧制径轴向变形量分配比，根据图 3.3 中的几何关系得：

$$\tan \alpha = (h_0 - h_f) / (b_0 - b_f) \quad (3.1)$$

其中 $\tan\alpha > 0$ ， $0 < \alpha < \pi/2$ ， $\tan\alpha$ 的取值对于实现径轴向双变形区的变形协调，以成

功建立稳定轧制过程、获得无成形缺陷的合格环锻件，起着至关重要的作用。

辗扩比 k 定义为变形前后截面面积之比^[54]，如式(3.2)所示：

$$k = b_0 h_0 / b_f h_f \quad (3.2)$$

其中辗扩比 k 大于1， k 值越大，表示轧制变形程度越大。根据式(3.2)，对于某一给定的最终环锻件尺寸，已知 k 的取值，从而也就确定了毛坯的尺寸。

基于上述环锻件径轴向变形量分配比 $\tan\alpha$ 和辗扩比 k 对毛坯尺寸设计的重要影响，因此，本文推导出了毛坯尺寸设计公式。

由式(3.1)和(3.2)可得：

$$b_0^2 \tan \alpha - b_0 (b_f \tan \alpha - h_f) - k b_f h_f = 0 \quad (3.3)$$

要使式(3.3)关于毛坯壁厚 b_0 的一元二次方程有解，需满足：

$$(b_f \tan \alpha - h_f)^2 + 4k b_f h_f \tan \alpha \geq 0 \quad (3.4)$$

由于 $\tan\alpha > 0$ ，不等式(3.4)恒成立，故求解方程(3.3)可得：

$$b_0 = \frac{(b_f \tan \alpha - h_f) + \sqrt{(b_f \tan \alpha - h_f)^2 + 4k b_f h_f \tan \alpha}}{2 \tan \alpha} \quad (\text{负值舍去}) \quad (3.5)$$

根据式(3.5)，只要给定最终环锻件尺寸、辗扩比 k 及径轴向变形量分配比 $\tan\alpha$ ，即可计算求得毛坯的尺寸。但根据实际生产经验， k 和 $\tan\alpha$ 只有在合理的取值范围内，轧制过程才能平稳。

辗扩比 k 表示环锻件轧制的变形程度，通常情况下 $k > 1$ 。同时考虑到设计的毛坯内径 d_0 要大于芯辊的直径 d_m ：

$$(D_f - b_f) b_f h_f / h_0 b_0 - b_0 > d_m \quad (3.6)$$

再根据式(3.2)可得：

$$(D_f - b_f) / k - d_m \geq b_0 \quad (3.7)$$

进一步整理，可得：

$$k < (D_f - b_f) / (b_0 + d_m) \quad (3.8)$$

当 $b_0 = b_f$ 时， $(D_f - b_f) / (b_0 + d_m)$ 取得最小值。若使式(3.8)恒成立，则 k 应小于这个最小值。因此，辗扩比 k 的取值范围为：

$$1 < k < (D_f - b_f) / (b_f + d_m) \quad (3.9)$$

径轴向变形量分配比 $\tan\alpha$ 反映了径轴向变形量的分配关系，其取值范围主要根据实

际生产经验。本文根据理论分析的方法, 确定 $\tan\alpha$ 的取值范围。

将式(3.5)代入式 (3.7), 并令 $u = (D_f - b_f)/k - d_m$, 可得:

$$u > \frac{(b_f \tan \alpha - h_f) + \sqrt{(b_f \tan \alpha - h_f)^2 + 4kb_f h_f \tan \alpha}}{2 \tan \alpha} \quad (3.10)$$

经整理可得:

$$[(2u - b_f)^2 - b_f^2] \tan^2 \alpha + [2(2u - b_f)h_f + 2b_f h_f - 4kb_f h_f] \tan \alpha > 0 \quad (3.11)$$

根据 $(2u - b_f)^2 - b_f^2 > 0$, $\tan \alpha > 0$ 及 $1 < k < (D_f - b_f)/(b_f + d_m)$,

k 在此范围取值时, 若 $\tan \alpha = -\frac{2(2u - b_f)h_f + 2b_f h_f - 4kb_f h_f}{(2u - b_f)^2 - b_f^2} > 0$, 则:

$$\tan \alpha > -\frac{2(2u - b_f)h_f + 2b_f h_f - 4kb_f h_f}{(2u - b_f)^2 - b_f^2} \quad (3.12)$$

若 $\tan \alpha = -\frac{2(2u - b_f)h_f + 2b_f h_f - 4kb_f h_f}{(2u - b_f)^2 - b_f^2} < 0$, 则:

$$\tan \alpha > 0 \quad (3.13)$$

因此 $\tan \alpha > 0$ 时, 给定 k 的取值范围 $1 < k < (D_f - b_f)/(b_f + d_m)$, $\tan \alpha$ 的取值由式(3.14)

确定:

$$\tan \alpha > \left\{ 0, -\frac{2(2u - b_f)h_f + 2b_f h_f - 4kb_f h_f}{(2u - b_f)^2 - b_f^2} \right\}_{\max} \quad (3.14)$$

3.3.2 芯辊进给速度对轧制效果影响

(1) 芯辊进给速度对成形的影响

芯辊进给速度是轧制过程中一个相当重要的工艺参数, 它与环锻件的内在质量和生产效率有着密切的关系。本文在模型一中分别取进给速度为 0.05 mm/s、0.10 mm/s、0.15 mm/s、0.20 mm/s。图 3.4 反映出不同进给速度对环锻件成形的影响。

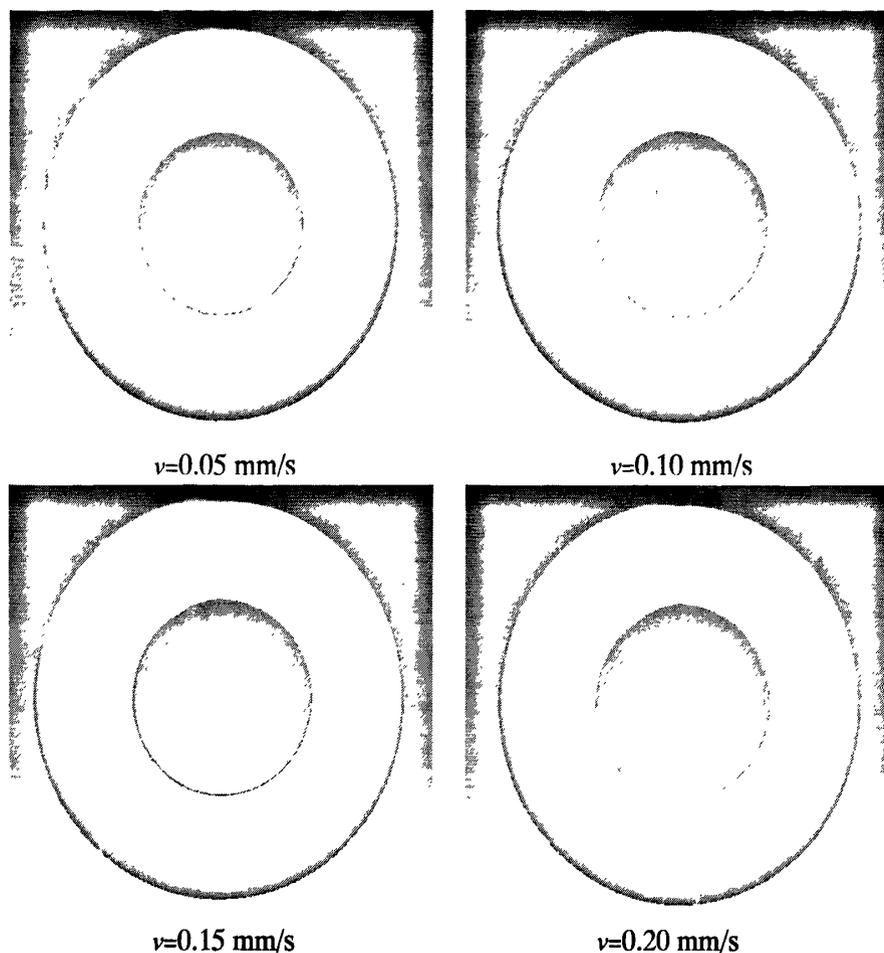


图 3.4 芯辊进给速度对成形的影响

Fig.3.4 The affection to rolling by core roller rate

为了比较不同的芯辊进给速度对环锻件轧制过程成形的影响，首先对环锻件轧制成形的圆度进行定义，而该圆度通常用环锻件的椭圆度值来衡量。环锻件椭圆度有环锻件外径椭圆度 e_1 和内径椭圆度 e_2 之分，则环锻件的椭圆度可定义为：

$$e_1 = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \quad , \quad e_2 = \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \quad (3.15)$$

表 3.2 进给量对椭圆度的影响

Tab.3.2 The affection to ring ovality by core roller rate

进给速度 v (mm/s)	0.05	0.10	0.15	0.20
外径椭圆度 e_1	1.006	1.017	1.028	1.033
内径椭圆度 e_2	1.013	1.021	1.032	1.042

根据式(3.15)得出不同芯辊进给速度对环锻件外、内径椭圆度影响的模拟数值表 3.2。

从图 3.5 可以看出,随着芯辊进给速度的增加,环锻件椭圆度增大,因此在模拟试验和实际生产中,在满足锻件质量和轧制过程平稳的前提下,随着环锻件直径不断增大,壁厚不断减薄,应该逐渐减小芯辊进给速度,以减小椭圆度。当进入轧制后期的整圆阶段时,可停止芯辊进给,以利环锻件归圆。同时也可以看出,同一进给速度在相同的时刻,内径椭圆度总是大于外径的椭圆度,这是由于芯辊的直径小于主辊的直径的缘故。

(2) 芯辊进给速度对锻透的影响

环锻件轧制过程既要满足连续咬入条件,同时还要满足锻透条件,因此,环锻件只产生轧制运动,并不一定能保证环锻件产生轧制变形,即壁厚减小而直径扩大的塑性变形。环锻件锻透是指塑性区穿透环锻件壁厚,环锻件产生壁厚减小、直径扩大的塑性变形。对于径向轧制,锻透条件与毛坯的壁厚、芯辊进给量等有关,对于轴向轧制,锻透条件与锥辊的进给量和毛坯高度等有关。环锻件轧制是一个塑性区连续变形的过程,为了研究变形区的锻透条件与芯辊进给量的瞬时关系,同时不考虑锥辊轴向的进给量和毛坯壁厚和高度的影响,本文在模型二中分别取芯辊进给速度为 0.05 mm/s、0.10 mm/s、0.15 mm/s、0.20 mm/s。

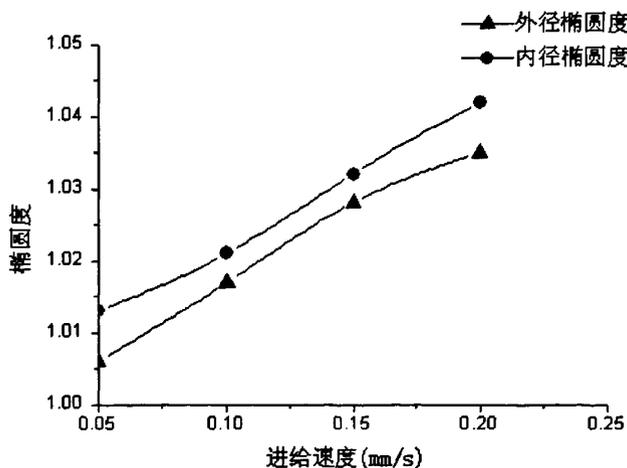


图 3.5 芯辊进给速度对椭圆度的影响曲线

Fig.3.5 The curve of affection to rolling by core roller rate

随着轧制过程的不断进行,环锻件的壁厚逐渐减小,其更加容易锻透,因此,只要对轧制初始时段进行锻透的分析即可,图 3.6 反映了在不同芯辊进给速度情况下的等效应变云图,即毛坯环锻件轧制锻透状况,从图 3.6 可以看出,芯辊进给速度为 0.05 mm/s 时,塑性变形区没有穿透轧制区,芯辊进给速度为 0.10 mm/s 时,塑性变形区逐渐穿透

轧制区，芯辊进给速度为 0.15 mm/s 时，塑性区完全进入了轧制区，出现锻透。因此，只要芯辊初始进给速度大于 0.10 mm/s 就可以满足锻透条件。

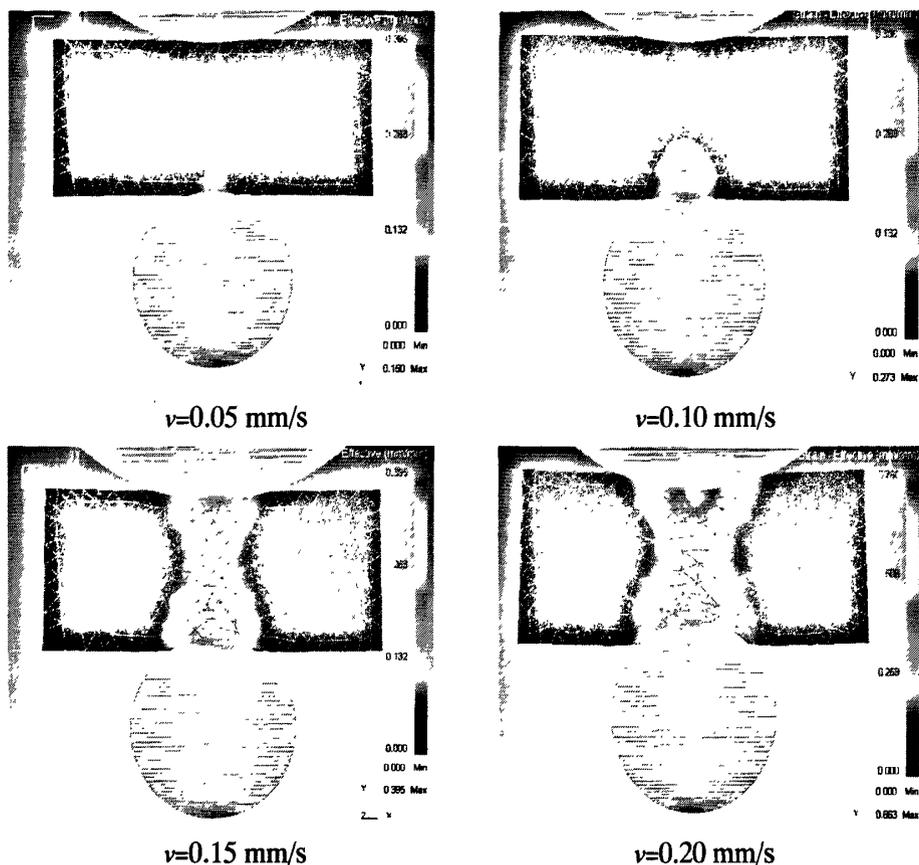


图 3.6 芯辊进给速度对锻透的影响

Fig.3.6 The affection to bended ring by core roller rate

综上所述，选取芯辊的进给速度为 0.15 m/s 时，可以同时满足环锻件的成形和锻透要求。随着轧制的进行，环锻件的直径不断增大，壁厚不断减小，锻透变得更加容易，再加上从减小椭圆度的角度考虑，故可以在轧制后期相应地降低芯辊进给速度。

3.3.3 芯辊直径对轧制效果影响

(1) 芯辊直径对成形效率的影响

驱动辊直径和芯辊直径的大小与环锻件的成形效率有着密切的关系，在目前使用普遍的辘环机中，驱动辊的安装与拆卸一般比较繁琐，因此，环锻件的成形效率主要靠芯辊的直径和进给速度控制。芯辊的直径可根据环锻件的尺寸和重量来选择。本文为了研究芯辊直径对成形效率的影响，在模型一中分别取芯辊直径 d_m 为 150 mm、200 mm、250 mm、300 mm，芯辊进给速率为 0.15 m/s，且轧制时间为 20 s。图 3.7 反映出不同芯

辊直径对环锻件成形效率的影响。

从图 3.7 可以看出,随着芯辊直径的增加,环锻件的直径变大速率增大,成形速率增大。在实际生产中,毛坯第一火轧制时的芯辊可根据冲孔大小选取,即 $d_m = d_0 - (10 \sim 20 \text{ mm})$,随着环锻件的直径不断增大,可更换直径大的芯辊,这样既可以保证锻透,还可以提高生产效率。

(2) 芯辊直径对锻透的影响

在模型二中分别取芯辊直径 d_m 为 150 mm、200 mm、250 mm、300 mm,芯辊进给速率为 0.15 m/s,且轧制时间为 10 s。图 3.8 反映了不同芯辊直径对锻透的影响。从图中可以得出,以上四种不同直径的芯辊在进给速率 0.15 m/s 的情况下,都可以满足锻透条件,且随着芯辊直径的增大,变形区域增大,锻透效果越来越好。

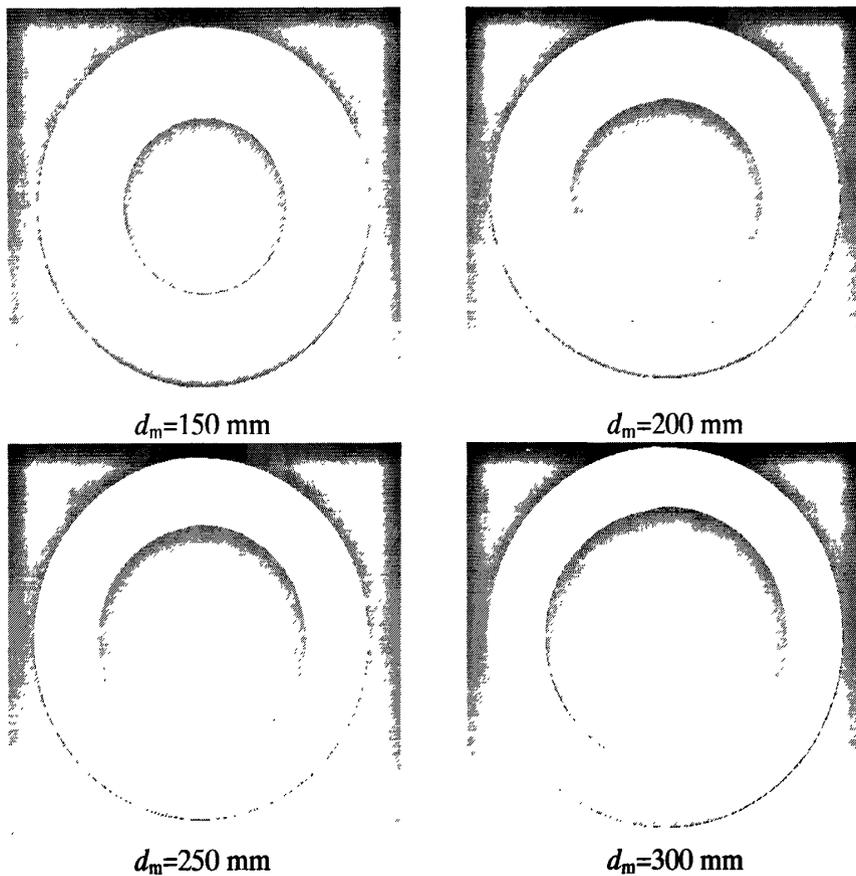


图 3.7 芯辊直径对成形效率的影响

Fig.3.7 The affection to rolling efficiency by core roller diameter

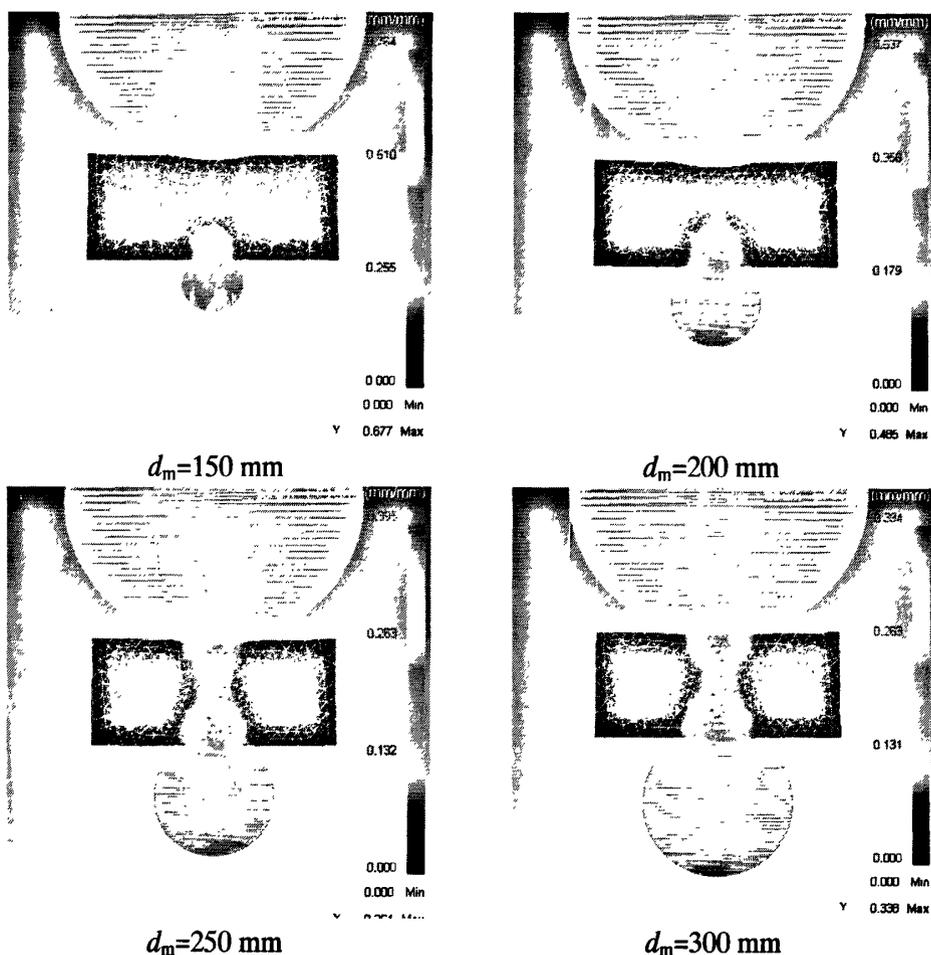


图 3.8 芯辊直径对锻透的影响

Fig.3.8 The affection to bended ring by core roller diameter

综上所述，在满足环锻件轧制的咬入和锻透条件下，应尽可能增大芯辊的直径，这是因为：增大芯辊直径可以加快环锻件的成形速率，提高生产效率，减少火次；变形区域随着芯辊直径的增大而增大，即可以提高锻透效果；增大芯辊直径还可以有效地增加芯辊的寿命，避免其在交变应力作用下过早的出现断裂失效。

3.4 模拟结果分析

3.4.1 应力场分析

图 3.9、图 3.10 分别为环锻件在轧制过程中不同时刻的应力、应变云图，从图中可以看出，采用计算机数值模拟的方法，真实地反映了环锻件在轧制中的动态成形过程。应力值最大区域反映了金属主要变形区域，且随着轧制过程的进行，应力值越来越大；通过分析应变云图也可以得出，环锻件在轧制过程中，内外轮廓表面区域发生主要塑性

变形。轧制结束时，环锻件成形圆度和效果都非常良好，与实际轧制现象比较接近。

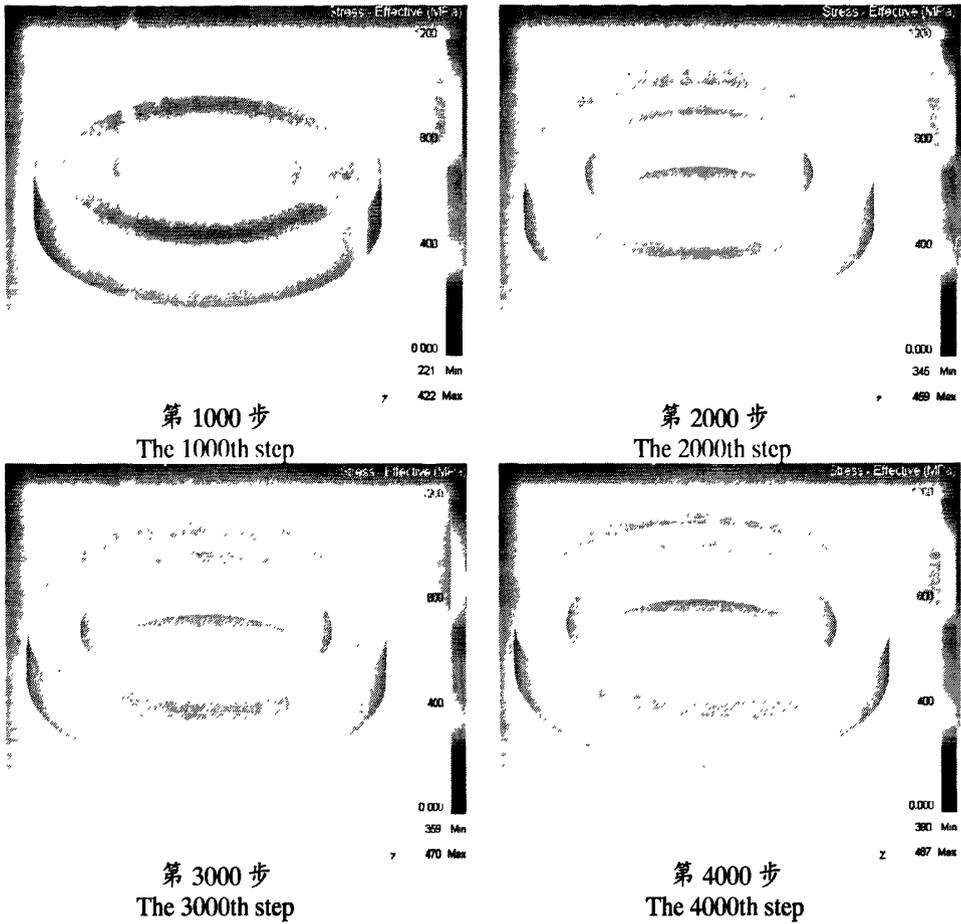
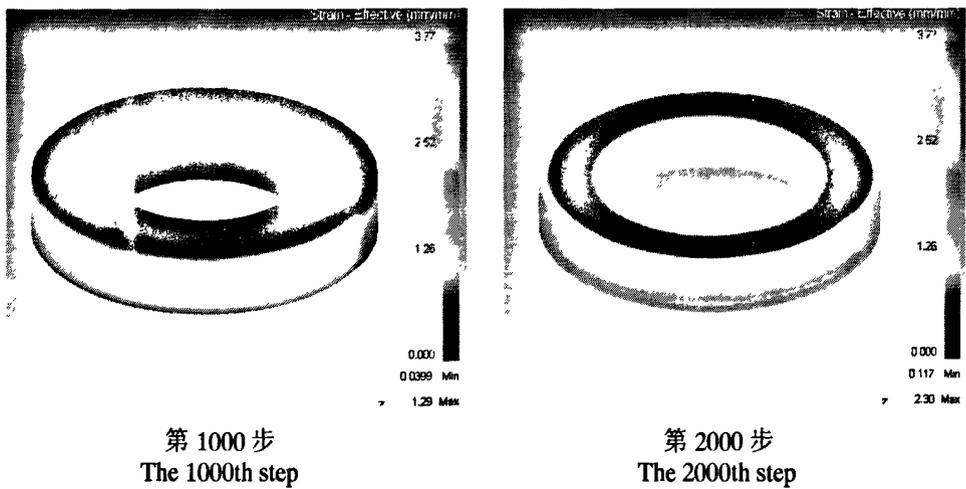


图 3.9 不同时刻应力分布

Fig.3.9 The stress distribution at different time



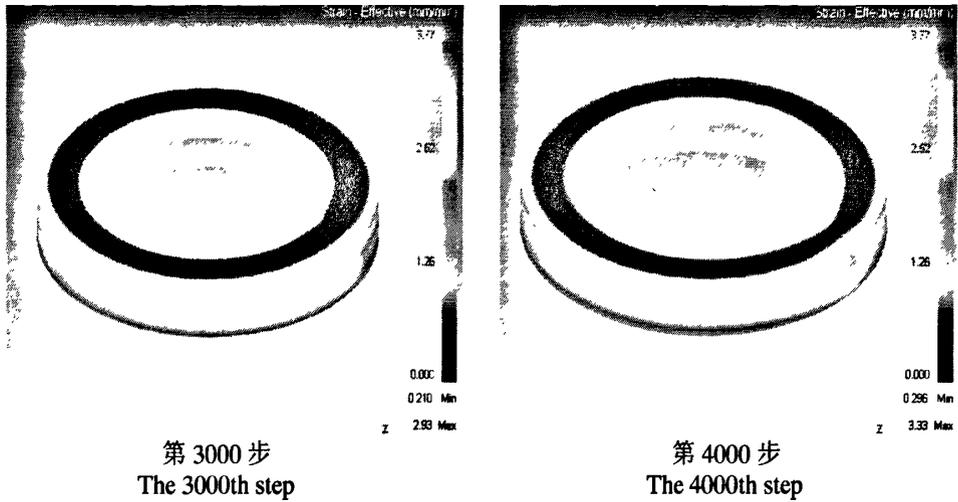
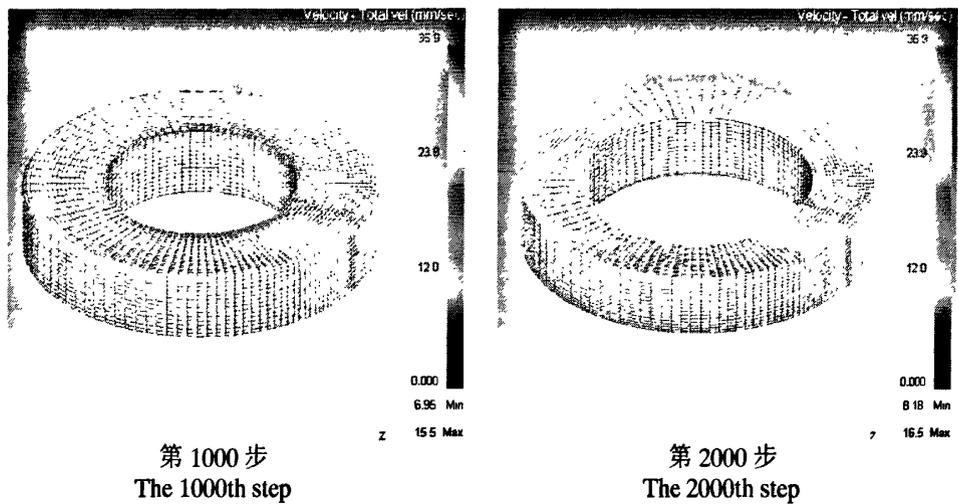


图 3.10 不同时刻应变分布
Fig.3.10 The strain distribution at different time

3.4.2 速度场分析

从环锻件轧制过程中不同时刻的速度矢量云图（图 3.11）可以看出，随着颜色由蓝变红，速度值不断增大，当驱动辊的转速恒定时，随着环锻件直径的增大，速度值也不断增大；通过对各节点的速度分析，可以计算出任何时间的滑移率，从而估算出直径扩大速度，同时还可作为摩擦系数的选用提供依据。



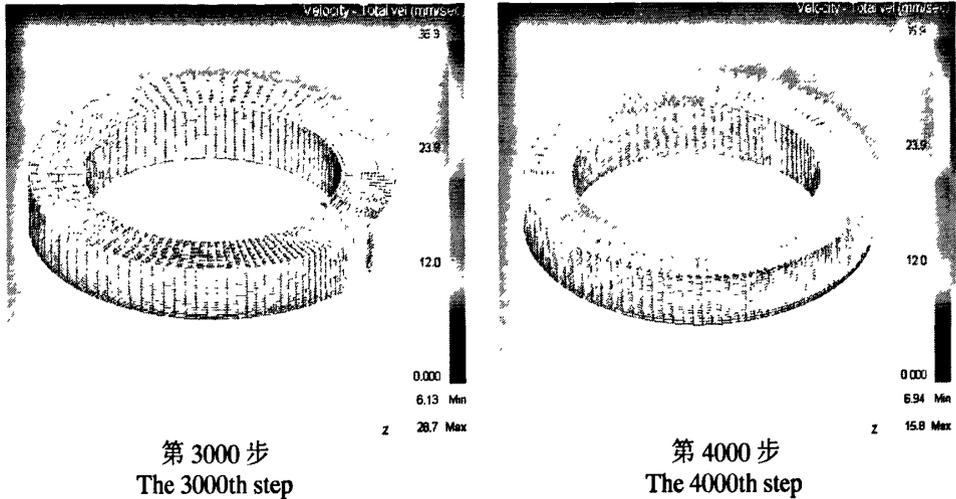


图 3.11 不同时刻速度分布
Fig.3.11 The velocity distribution at different time

3.4.3 轧制力分析

芯辊和锥辊进给量与辗环机电机功率有着非常重要的关系,随着芯辊和锥辊进给量的增大,电机提供的功率也要求增大,一般说来,电机的功率是恒定的,因此在额定的功率范围内,通过调节芯辊和锥辊的进给量,可实现辗环机最大容量范围内轧制^[55]。从图 3.12 芯辊载荷行程图可以看出,轧制荷载波动幅度较大时,轧制过程振动较为严重,且每次减小芯辊的进给速度时,都有一次较明显的波动;在轧制后期归圆阶段,载荷相对于芯辊持续进给时有渐渐变小的趋势,这些情况和实际轧制情况较为符合。

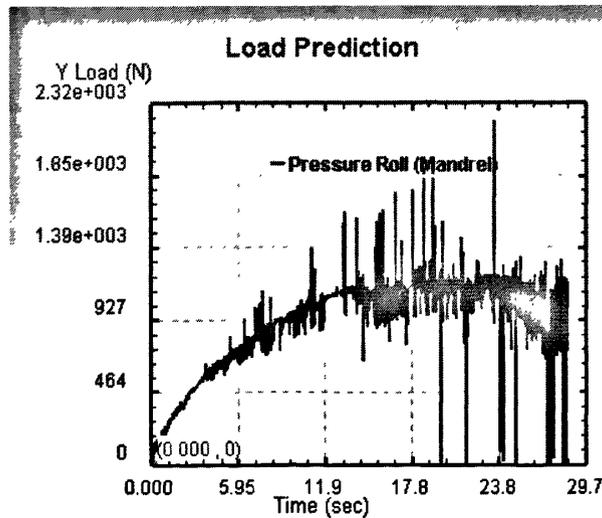


图 3.12 芯辊载荷图
Fig.3.12 The curve of core roller load stroke

第四章 风电用大型环锻件锻造工艺研究

针对 6 力发电机组用主要环锻件的技术要求,重新设计了材料的化学成分。在分析了制坯工艺缺陷形成机理的基础上,制定了优化的锻造工艺参数,提高了制坯成品率。研究了环锻件轧制过程中毛坯整形、联合主轧、整圆三个阶段的变形规律,提出了最佳的轧制工艺。最后验证了合理的轧制工艺参数对最终成品质量的重要性。

4.1 引言

MW 级风力发电机组用主要环锻件包括:大型回转支撑圈 42CrMo4V 环锻件,用于风电机组变桨距、偏航部件;大型齿轮圈 42CrMoA 环锻件,用于风电机组主传动齿轮箱的齿轮转动件;大型法兰圈 Q345E 环锻件,用于风电塔身塔体的连接紧固件。这些环锻件装配在风电机组动力核心部件,需要在较大风能变换的环境及 +40~-40 °C 环境温度下,承载风电机组运转负荷。其中回转支撑环圈,更是要求在此恶劣的天气条件下,20 年内不能出现质量问题。因此,该环锻件的化学成分设计要求、力学性能要求、硬度要求及超声波探伤等内在质量指标要求,直接关系风电设备的安全运行和使用寿命。

4.2 风电用回转支撑环锻件技术要求

成品风电用回转支撑环锻件如图 4.1 所示,其主要特征为直径大、壁厚宽,硬度均匀性好、加工精度高。目前,国内、外生产回转支撑环锻件一般选用欧标 EN10083-1:2006 中的 42CrMo4V 材质制成的坯钢作为原料。

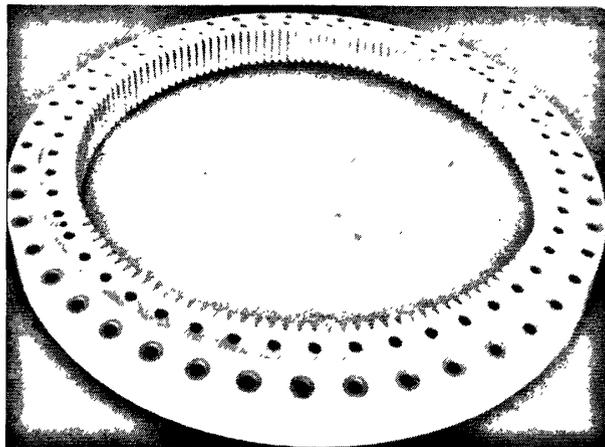


图 4.1 风电用回转支撑

Fig. 4.1 Slewing Rings for Wind Power

4.2.1 化学成分设计要求

欧标 42CrMo4V 材料涉及的主要合金元素有 C、Si、Mn、Cr、Ni、Mo、P、S 以及其余杂质元素等。在钢加热转变时，C、P、Mn 都是促进奥氏体晶粒长大的元素，而 Cr、Mo 是阻止奥氏体晶粒长大的元素，奥氏体晶粒的大小对钢的综合机械性能有影响。Ni、Si、Cr、Mo、Mn、C 都增加钢的淬透性，其增加淬透性的能力顺序增高，随着钢的淬透性提高，其综合机械性能也提高。42CrMo4V 钢合金化的主要原则是，保证必需具有的淬透性，使工件在淬火后具有足够厚的马氏体层，并使马氏体保持细的隐晶组织，经回火处理以后，得到回火索氏体组织，以此获得良好的综合力学性能，因此，若只单纯考虑淬透性问题，Ni、Si、Cr、Mo、Mn、C 这些合金元素都是有利的。但是应注意各种合金元素对高温回火后钢的韧性的影响和高温回火脆化这两面的问题。在设计化学成份时必须给以这两方面的问题足够的重视。

C 是不利于冲击韧性的元素，因此在选择含 C 量时，在保证调质后的硬度和强度的前提下，应把含 C 量控制在较低的范围；杂质元素 P、S 对冲击韧性危害很大，它提高脆性转化温度，降低冲击值；Mn 能改善冲击韧性，表现在稍微降低其脆性转化温度；Cr 对脆性转化温度没有明显的影响；Ni 含量增加时，脆性转化温度降低；加入少量的 Mo，可以减弱高温回火脆性倾向；Si 被认为是对回火索氏体的冲击韧性起不良作用的元素^[56]。

综合以上分析，本文在欧标 42CrMo4V 的基础上增加化学元素 Mn、Cr、Mo 的含量，降低 P、S 的含量，严格控制 [O]、[H] 的含量，通过电炉、真空脱气的冶炼方法得到改进型 42CrMo4V 钢（以下简称 42CrMoHM 钢）。其化学成分对比如表 4.1 所示。

表 4.1 42CrMo4V 与 42CrMoHM 化学成分 (质量分数)%
Tab. 4.1 Chemical constituents of 42CrMo4V and 42CrMoHM (mass) %

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	[O]	[H]
42CrMo4V	0.38	0.17	0.50	≤	≤	≤	0.90	≤	0.15	0.01	≤20	≤2.0
	~	~	~	0.035	0.035	0.20	~	0.60	~	~	PPM	PPM
	0.45	0.40	0.80	≤	≤	≤	1.20	≤	0.30	0.04	≤20	≤2.0
42CrMoHM	0.41	0.17	0.80	≤	≤	≤	1.05	≤	0.20	0.02	≤20	≤2.0
	~	~	~	0.020	0.020	0.20	~	0.70	~	~	PPM	PPM
实例 1	0.422	0.211	0.88	0.014	0.010	0.01	1.12	0.038	0.205	0.022	11	0.9
实例 2	0.431	0.219	0.91	0.013	0.009	0.01	1.13	0.036	0.214	0.026	12	1.1
实例 3	0.429	0.221	0.91	0.012	0.012	0.01	1.15	0.039	0.208	0.024	11	1.0

4.2.2 力学性能要求

抽取每同一批熔炼炉号同一批热处理炉号的一件回转支撑环锻件进行力学性能测试，试样用火焰切割取自该环锻件车削出的圆环件上，试样位置如图 4.2 所示，试样尺寸为 40 mm×40 mm×200 mm，且每个试样进行一套力学性能试验。一组力学试样包含：1 个拉伸试样和 3 个夏比 V 型缺口冲击试样。

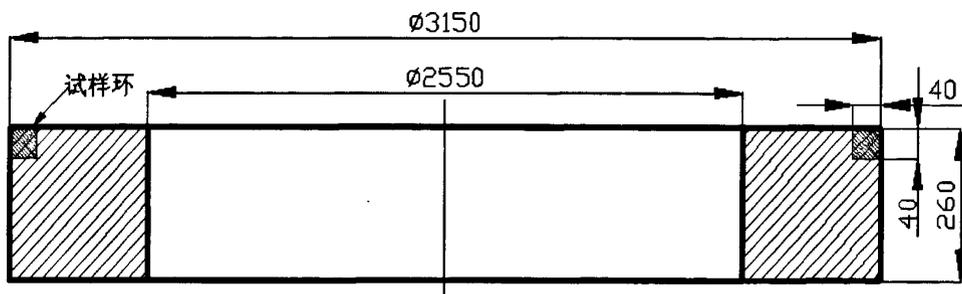


图 4.2 试样环位置示意图

Fig.4.2 Schematic diagram of sample ring position

回转支撑用材料 42CrMo4V 与 42CrMoHM 力学性能对比如表 4.2 所示：

表 4.2 42CrMo4V 与 42CrMoHM 力学性能
Tab.4.2 Mechanical properties of 42CrMo4V and 42CrMoHM

牌号	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	延伸率 (%)	断面收缩 (%)	-40℃冲击 (J)	硬度 (HB)
42CrMo4V	800-950	≥600	≥13	≥50	≥37	250-290
42CrMoHM	820-952	≥652	≥14	≥52	≥50	260-290

注：允许其中一个试样冲击值低于 3 个冲击试样的平均值，但不得低于平均值的 70%。

应保证硬度的均匀性，在环锻件的上下端面和内外径方向上选择 16 个测试点进行硬度检测。要求同一个环锻件的硬度差小于 20 HB，同一热处理炉的硬度差小于 30 HB。

4.2.3 超声波探伤要求

回转支撑环锻件在粗加工后及第二热处理后都要按 DINEN10228-3:1998、GB/T6402-1991 标准进行 100%超声波探伤，采用 2.5 MHz 探头按照质量等级 II 进行检查，必要时采用双晶探头检查。

经第二热处理后的超声波检查，锻件内不允许有白点、夹杂性裂纹、混晶等缺陷，晶粒度要求六级以上。

4.3 自由锻制坯工艺研究

某型号大型回转支撑锻件图如图 4.3 所示, 单重 4650 kg, 选用 7.45 t 的八角钢锭(一锭一件), 材质 42CrMoHM。经 35 MN 油压机(如图 4.5 所示)开坯、拔长、镦粗、冲孔后制的毛坯。毛坯示意图如图 4.4 所示,

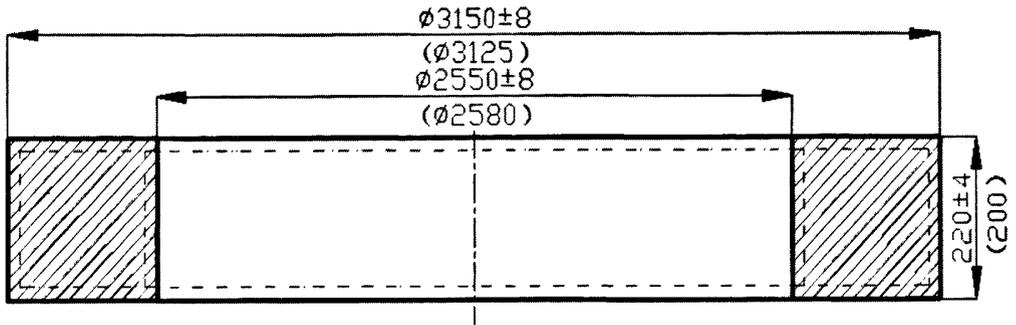


图 4.3 锻件图
Fig.4.3 Forgings drawing

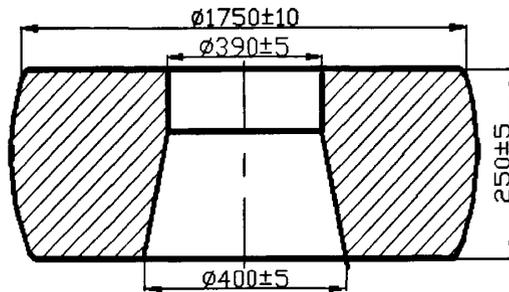


图 4.4 毛坯示意图
Fig.4.4 Blank drawing

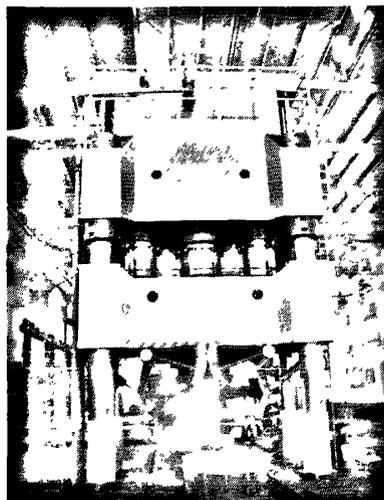


图 4.5 35 MN 油压机
Fig.4.5 35 MN oil press

4.3.1 存在缺陷分析

某公司近期生产了 5 件以上规格的大型回转支撑环锻件，其中 3 件因出现大面积密集性缺陷和 4 处单个缺陷大于 $\phi 4\text{ mm}$ 而报废，缺陷位置径向集中在距内径 20~70 mm 的环形区域，轴向集中在中间区域；另外 1 件出现大面积粗晶（晶粒度小于 3 级），经常规正火热处理后，该粗晶缺陷未得到明显改善。某公司为了确定以上缺陷是在制坯工序还是在辗环工序产生，采用原先的制坯工艺又生产了 4 件毛坯，待其充分冷却后粗车平上下端面，超声波探伤过程中发现都有底波下降和消失的现象，可判断出有大面积的密集性缺陷，缺陷类型与原先直接报废的 3 件成品的基本一致，据此可以确定缺陷是由于自由锻制坯工艺不当造成的。

4 件毛坯的缺陷位置如图 4.6 所示，该大面积的密集性缺陷可能为白点、疏松以及夹杂性裂纹等空穴型缺陷。该批大型回转支撑环锻件用钢是由国内某知名钢厂生产，且经过电炉冶炼+真空脱气制成，根据钢厂的质保书显示，氢的含量控制在 2 PPM 以内；锻件在锻后冷却到 500 $^{\circ}\text{C}$ 左右就装炉进行第一热处理，避免了产生较大的组织应力和热应力；在 290~310 $^{\circ}\text{C}$ 和 640~660 $^{\circ}\text{C}$ 两段扩氢温度范围内保温时间分别为 7 h 和 15 h，因此可断定该缺陷不是白点。制坯工艺采用两次 WHF 法拔长+一次镦粗成形，锻造比达 8.8，钢锭内的孔洞、疏松等内控缺陷可基本锻合，就排除了疏松的可能。通过上面的分析，3 件报废大型环锻件探伤超标的孔隙性缺陷可判定为夹杂性裂纹。另外，镦粗后的冲孔工序又不能将中心缺陷区域全部冲掉，因此，剩余缺陷区域的微小裂纹在辗环工序中聚集长大成为夹杂性裂纹。

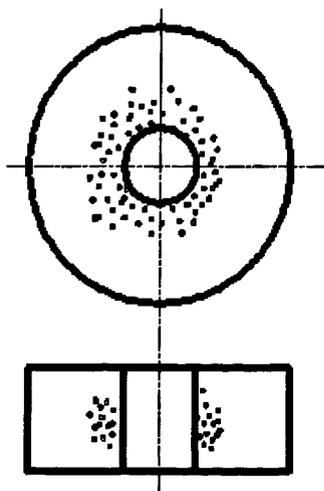


图 4.6 毛坯缺陷分布

Fig.4.6 Defect distribution of blank

4.3.2 缺陷形成机理

由于钢中不可避免会存在非金属夹杂物，其物理性能与基体金属间的差异，使锻件在锻造变形过程中产生应变应力集中并形成微裂纹。微裂纹在一定条件下聚合，进而形成探伤可见缺陷。金属在压力作用下产生压缩变形是塑性加工过程中最主要的成形方式之一。此时在变形金属内部的夹杂物将由圆形逐渐变为椭圆形。假设变形过程中的任一时刻，椭圆的长轴为 R_a ，短轴为 R_b ，则在夹杂物邻域应变集中而导致的应力集中影响区域将如图 4.7 所示，图中 L_a 、 L_b 和 L 分别为夹杂物影响区的长轴、短轴和最大长度， θ 为最大影响区长度与长轴之间的夹角。随变形的进行，夹杂物逐渐片状化， R_a 增加，不同片层的间距缩短，使得夹杂物之间的影响相遇，在一定条件下聚合并导致产生变形体内宏观可见的裂纹，如图 4.8 所示。这就是所谓的夹杂物裂纹的聚合模型。

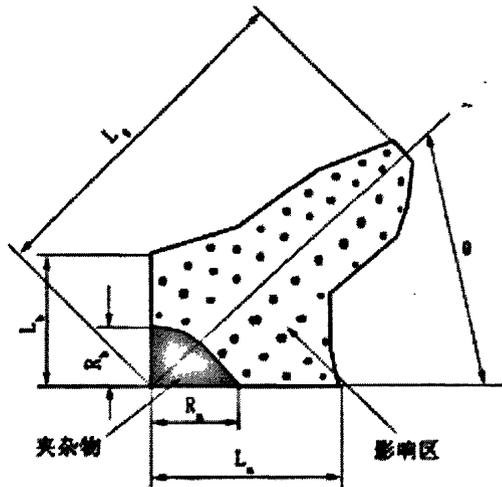


图 4.7 夹杂物及其影响区

Fig.4.7 The inclusions and affective area

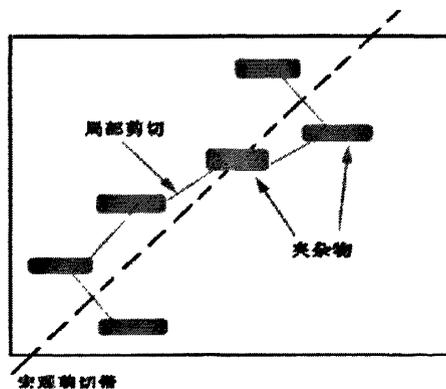


图 4.8 夹杂性裂纹的聚合模型

Fig.4.8 The polymerism model of the inclusion cracking

在金属塑性成形过程中，随着塑性夹杂物被压扁，在其顶端不但有因应力集中释放而形成的微观剪切带，又有因塑性变形不均匀而引起的宏观剪切带。当二者的作用区域重合时，将导致激烈的剪切变形并形成夹杂性裂纹。因此，夹杂性裂纹是变形体内部分夹杂物和剪切带共同作用的结果。图 4.9 所示为与锻造方向平行分布的两个夹杂物之间夹杂性微裂纹的聚合过程。当变形量较小时（图 4.9a），夹杂物被压为薄片。但这种微裂纹尚未达到聚合所需的临界条件。两微裂纹随基体变形并扩展，随着变形量的增加，微裂纹间距逐渐缩短，达到了微裂纹聚合的临界条件。 $AA'BB'$ 区域内的金属在水平方向的流动速度 V' 高于周围金属基体的流动速度 V ，表现为局部颈缩的发生（图 4.9b）。随着基体金属变形的持续进行， $AA'BB'$ 区域颈缩程度逐渐扩展，直到两个微裂纹之间的基体完全破坏（图 4.9c）。

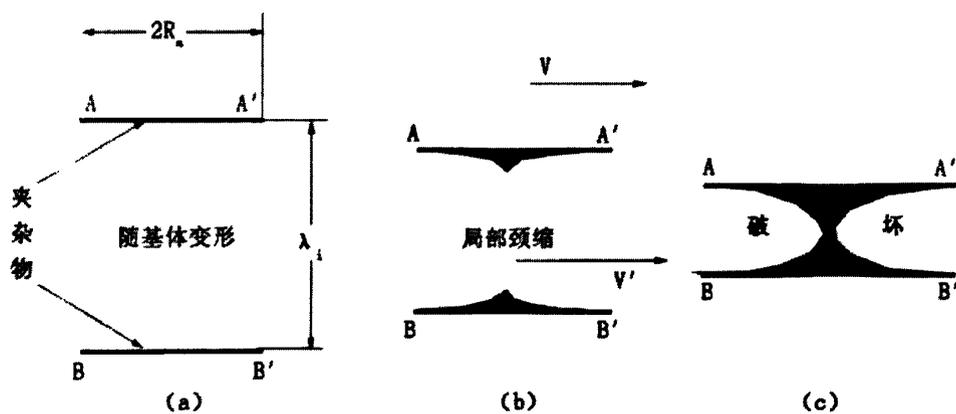


图 4.9 夹杂性裂纹聚合过程

Fig.4.9 The polymerism process of inclusion crack

通过分析夹杂性裂纹形成机理，可以得出避免此类裂纹的有效措施就是控制夹杂物的形状变化和防止裂纹聚合，因此要求自由锻制坯过程中，特别是镦粗环节中一定要使金属变形均匀，迫使刚性区变形（高径比 $H/D > 1$ ），消除（ $H/D < 1$ ）或降低（ $H/D \ll 1$ ）静水应力区的抗剪强度，减小毛坯鼓形程度^[57]。

4.3.3 工艺优化

采用有限元软件 DEFORM-3D 对毛坯镦粗过程进行模拟，分别建立两种模型，即 a、一次镦粗成形，b、预镦粗 40%+走扁方成形。根据两种模型的网格变形和等效应变分布的对比显示，在 b 模型中毛坯网格变形与等效应力分布都较均匀，因此，可有效控制心部夹杂物的形貌，避免出现夹杂物在剧烈的剪切变形下成为片状，并与基体形成微裂纹的现象。

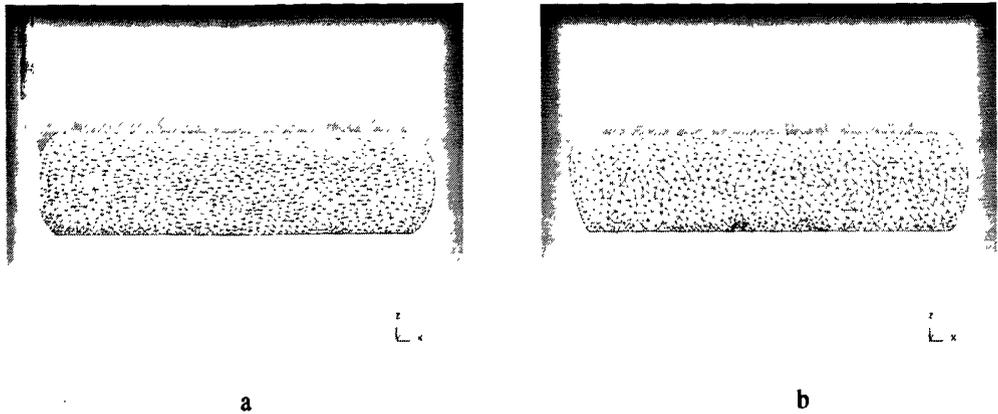


图 4.10 网格变形对比
Fig.4.10 Comparison of mesh deformation

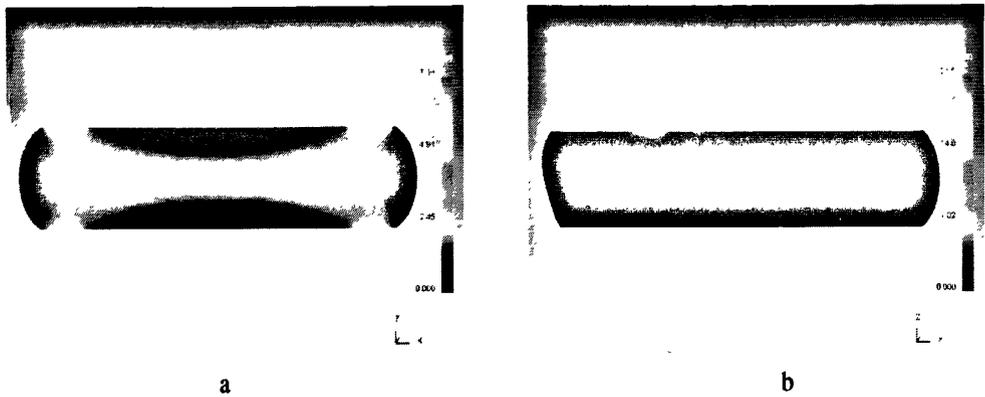


图 4.11 等效应力分布对比
Fig.4.11 Comparison of the equivalent stress distribution

通过分析大型回转支撑环锻件毛坯夹杂性裂纹形成机理和有限元模拟试验结果，在原先制坯工艺基础上进行改进，提出以下制坯工艺：钢锭预镦粗——两次 WHF 法拔长——预镦粗 40%——走扁方成形——冲孔。具体锻造工艺如下：

I 火：锻造温度 1240~800 °C。压钳把 $\phi 540 \text{ mm} \times 650 \text{ mm}$ （压住锭身 50 mm）、倒棱、锉锭尾。I 火变形过程如图 4.12 所示。



图 4.12 I 火的锻造坯
Fig.4.12 Forging of Pass I

II 火：锻造温度 1240~800 °C。①镦粗至 700 mm \times $\phi 1150 \text{ mm}$ ；②用 700 mm 宽上下平砧

按 WHF 法拔方，搭接量 70 mm，两趟间要错开砧子以免产生死角，参数如表 4.3 所示；
③倒八方，倒圆 $\phi 750 \text{ mm} \times 1615 \text{ mm}$ 返炉加热。II 火变形过程如图 4.13 所示。

表 4.3 II 火 WHF 法拔方参数表
Tab.4.3 WHF method pull square of II

趟数	1	2	3	4	5	6	7	8
压后高度/mm	920	980	780	870	720	780	700	750
进砧量/mm	700	700	700	600	600	600	500	500
翻转角度/ $^{\circ}$	90	90	90	90	90	90	90	90

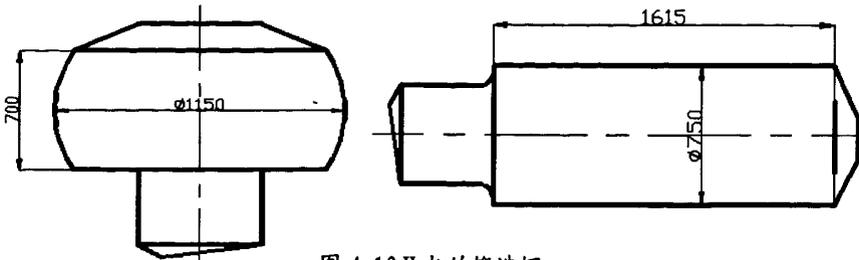


图 4.13 II 火的锻造坯
Fig.4.13 Forging of Pass II

III 火：锻造温度 1240~800 $^{\circ}\text{C}$ 。① 锻粗至 800 mm $\times\phi 1055$ mm；②用 700 mm 宽上下平砧按 WHF 法拔方 700 mm，参数如表 4.4 所示；③倒八方，倒圆，切去水口、冒口，下料 $\phi 700 \text{ mm} \times 1760 \text{ mm}$ 返炉加热。III 火变形过程如图 4.14 所示。

表 4.4 III 火 WHF 法拔方参数表
Tab.4.4 WHF method pull square of III

趟数	1	2	3	4	5	6
压后高度/mm	840	900	720	800	660	700
进砧量/mm	700	700	700	600	500	500
翻转角度/ $^{\circ}$	90	90	90	90	90	90

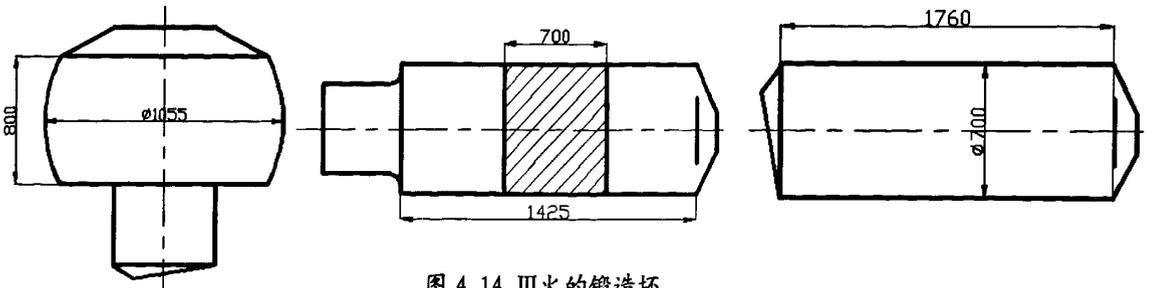


图 4.14 III 火的锻造坯
Fig.4.14 Forging of Pass III

IV 火：锻造温度 1240~800 $^{\circ}\text{C}$ 。① 锻粗至 700 mm $\times\phi 1050$ mm、滚锻外圆；②按图 4.15 所示顺序走扁方，每趟压后尺寸如表 4.5 所示；③冲孔、整平返炉加热。IV 火变形和冲

孔过程分别如图 4.16, 图 4.17 所示。

表 4.5 走扁方参数表
Tab.4.5 Spinning order

趟数	1	2	3	4	5
压后高度/mm	560	450	380	300	260
进砧量/mm	700	600	500	400	300
翻转角度/°	180	180	180	180	180

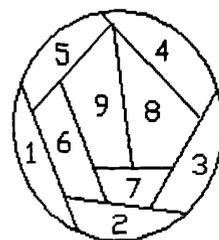


图 4.15 走扁方顺序图
Fig.4.15 Spinning parameter

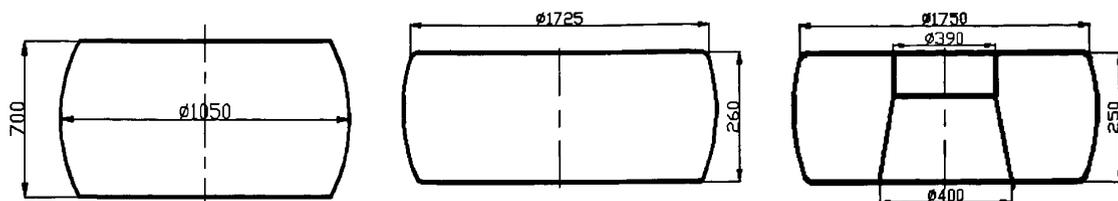


图 4.16 IV火的锻造坯
Fig.4.16 Forging of Pass IV



图 4.17 冲孔、整平
Fig.4.17 Punching and leveling

该回转支撑环锻件毛坯经两次 WHF 法拔长, 具有足够的锻造比 (8.8) 将钢锭内部

的疏松、孔洞锻合。预锻粗后的滚锻外圆工序是十分必要的,它既能消除鼓肚避免外表面拉应力过大产生裂纹,又能最大程度地修复已变形趋向于片状的夹杂物。走扁方过程中要严格控制砧宽比(0.85-1.25)、单面压下量($\leq 15\%$),其作用在于使毛坯各部分均匀变形,控制夹杂物不成为片状,且最后一砧变形由于其外环相当于封闭式的模具使坯料中心具有很高的静水压力,进一步减小夹杂物成为片状的倾向。

某公司在锻制第二批共6件同规格、同材质的大型回转支撑环锻件,采用上述改进制坯工艺后,毛坯经超声波探伤单个缺陷小于 $\phi 3\text{ mm}$,无大面积密集性缺陷,符合探伤要求,可返炉加热进行辗环工序。

4.4 辗扩成形工艺研究

大型回转支撑环锻件的轧制采用径、轴向轧制工艺,其设备结构及控制工艺较普通的辗环机和辗扩成形工艺要复杂得多,其在进行径轴向轧制前,除了制定出合理的自由锻制坯工艺,还应制定出匹配的轧制工艺和加热工艺参数,若轧制工艺参数不匹配,会导致环锻件椭圆度超标甚至变形;若轧制速度过快或者毛坯最后一火辗扩比 k 过小,会引起环锻件粗晶甚至混晶缺陷,这对于没有相变的钢种只能报废,而对于有相变的钢种需要制定正确的第一热处理工艺才能消除。若加热温度过高或者保温时间过长,会导致毛坯过热甚至过烧;若加热温度过低或者保温时间不够,金属塑性差,毛坯会在辗扩过程中出现裂纹,同时也会降低辗环机的使用寿命。因此,轧制工艺和加热工艺参数选取的正确与否决定着环锻件的轧制过程是否能完成以及最终产品的质量。

4.4.1 辗环机及模具参数

环锻件轧制设备按照轧制变形特点,可分为径向辗环机、径轴向辗环机和多任务位辗环机。径向辗环机即只是使环锻件在径向发生直径扩大的运动,而轴向不变;径轴向辗环机即不仅使环件在径向发生变化而且在轴向也会发生变化;多任务辗环机即有多个芯辊同时可以轧制多个环锻件。按照环锻件轧制设备结构的特点分类,又可分为立式辗环机和卧式辗环机两类。立式辗环机即毛坯环端面与驱动辊、芯辊的端面均在竖直面上;卧式辗环机即毛坯环端面与驱动辊、芯辊的端面均在水平面上。立式辗环机通常采用径向轧制变形,属于径向辗环机,适用于中小型环锻件轧制变形。卧式辗环机既有径向变形又有轴向变形,适用于大型和特大型环锻件轧制成形。多任务位辗环机通常也采用径向变形,且同时轧制多个环锻件,适用于小型环锻件轧制成形。

本试验所用辗环机型号为 D53-5000, 即 $\phi 5000$ mm 卧式径向辗环机, 其主要技术参数和实物图分别如表 4.6, 图 4.18 所示。

表 4.6 D53-5000 辗环机
Tab.4.6 D53-5000 ring rolling machine

序号	名称	单位	规格
1	环外径	mm	500~5000
2	环高度	mm	100~600
3	环单重	kg	200~6500
4	环壁厚	mm	50~400
5	径向轧制力	kN	2000
6	轴向轧制力	kN	1500
7	滑块行程	mm	800
8	锥辊间距离	mm	100~600
9	轴向机架行程	mm	5200
10	主电机 1564-4		1000 伏 5000 KW 1484 转/分
11	轴向轧制电机 Z4-250-12		440 伏 2×160 KW 1500 转/分
12	工作台至地面距离	mm	150

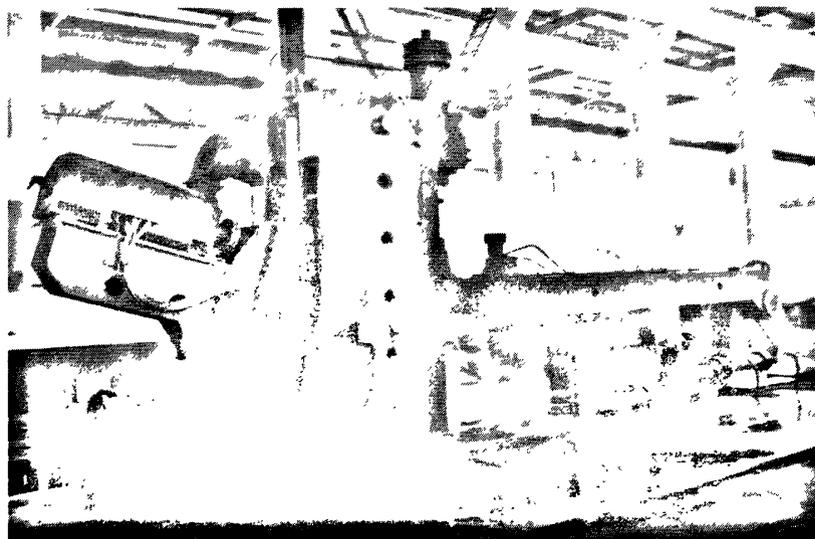


图 4.18 D53-5000 辗环机
Fig.4.18 D53-5000 ring rolling machine

芯辊的零件图如图4.19所示, 有效工作区域的直径为 $\phi 350$ mm, 其始终紧贴环锻件的内表面, 主要承受垂直于轴向的挤压力和切向扭转力, 工作时芯辊中间部位的颜色呈桔红色, 其表面温度至少达到 600°C 以上。芯辊是辗环机所需模具中最易磨损的, 也是最易断裂的工装。一般一根芯辊要轧制200 t以上的环锻件, 因此, 要求具有良好的强度、

塑性和韧性等综合指标以及高温使用性能。材质为5CrMnMo，热处理方式为退火+调质，晶粒度为6级以上，使用要求为①按JB/T5000.8—1998标准II级锻件做探伤检查；②倒角2×45°；③热处理硬度42~46 HRC；④圆角处需抛光。

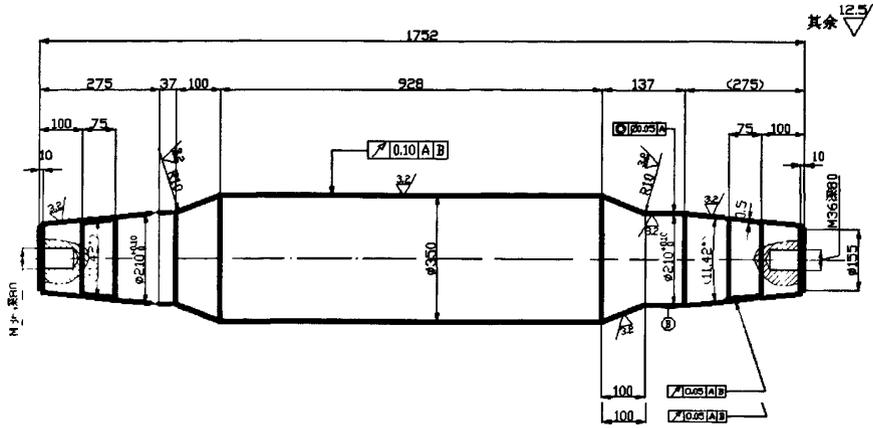


图 4.19 芯辊零件图

Fig.4.19 Core roller drawing

4.4.2 轧制曲线研究

轧制曲线的设计与环锻件的截面形状、材质及制坯方式有关，它是大型环锻件径轴向轧制技术的关键程序，间接体现了辗环成形工艺参数的设计是否合理，若忽略大型回转支撑环锻件的质量和体积变化及与温度有关的收缩和氧化，且在理想情况下，即芯辊

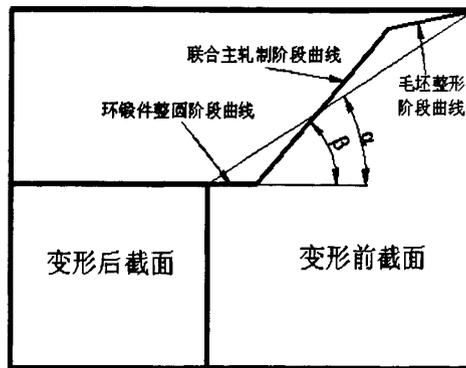


图 4.20 线性轧制曲线

Fig.4.20 Curve of linear rolling

径向进给速度和锥辊轴向进给速度之比为恒定时，可将其截面轮廓的实时变化情况简化成图 4.20 所示的“S”形曲线，即轧制曲线。该曲线表示了轧制过程中径向变形量和轴向变形量的瞬时分配关系，它包括以下 3 个主要轧制阶段^[58]：

(1) 毛坯整形阶段曲线。经过35 MN油压机制得的大型回转支撑毛坯都存在着不同程度的高度差、壁厚差、椭圆度和冲孔偏心等缺陷，所以在初始轧制阶段需对毛坯进行整圆，消除预制坯带来的缺陷，并为后续稳定轧制的顺利进行奠定基础。该阶段芯辊的径向进给量较大，锥辊的轴向压下量很小，且环锻件存在不同程度的振动现象，这与毛坯质量的好坏有关，毛坯椭圆度越大、冲孔偏心越大，振动越剧烈。毛坯整形曲线一般占整个轧制曲线的比例为10%~40%，本试验中取约30%，即毛坯壁厚从675 mm至560 mm，外径从 $\phi 1750$ mm至 $\phi 1935$ mm，高度变化可忽略，如图4.21和图4.22所示。



图4.21 整形阶段

Fig.4.21 The stage of shaping



图4.22 回炉加热

Fig.4.22 Reheating

(2) 联合主轧制阶段曲线。经过整形的大型回转支撑毛坯进入稳定的径向和轴向联合轧制阶段，该阶段关键在于控制芯辊与锥辊的进给速度，如果两个速度和环锻件直径增长速度不匹配，则环锻件在轧制过程中可能会出现毛刺、端面波纹起伏、折叠等缺陷，

甚至还会导致环锻件椭圆引起轧制振动，爬滚等现象，从而影响轧制过程的顺利进行。联合主轧制阶段一般占整个轧制曲线的比例为40%~60%，结合本型号产品壁厚宽、高度低的特点，因此，本试验中取约55%， α 取约8°。即环锻件壁厚从560 mm至350 mm，外径从 $\phi 1935$ mm至 $\phi 2800$ mm，高度从250 mm至220 mm，如图4.23所示。



图4.23 联合主轧制阶段

Fig.4.23 The stage of joint rolling

(3) 环锻件整圆阶段曲线。由于环锻件外径是实时变化的，其大小可以通过信号辊显示在操作屏幕上，如图4.24所示，但是芯辊与锥辊的进给速度是靠人工控制的，难免会出现两个速度和环锻件直径增长速度不匹配的现象，因此，环锻件圆度不是很好，需要抬起锥辊使环锻件在仅有径向轧制的过程中进行整圆，同时消除因回弹引起的尺寸误差。整圆阶段曲线一般占整个轧制曲线的比例为5%~15%，本试验中取约10%，即环锻件壁厚从350 mm至300 mm，外径从 $\phi 2800$ mm至 $\phi 3150$ mm，高度基本没有变化，如图4.25所示。

实际生产中，芯辊径向进给速度和锥辊轴向进给速度之比为非恒定时，轧制曲线就应为非线性轧制曲线，如图4.26所示，该轧制曲线将图4.20中理论线性轧制曲线的联合主轧制阶段分成以径向或轴向轧制为主的若干个阶段，这样可以最大限度地使芯辊与锥辊的进给速度与环锻件直径增长速度匹配，另外每个阶段相对较小的径向或轴向变形能避免环锻件剧烈变形引起温升过高而影响零件微观组织和机械性能。



图4.24 辗环控制系统

Fig.4.24 Ring rolling control system

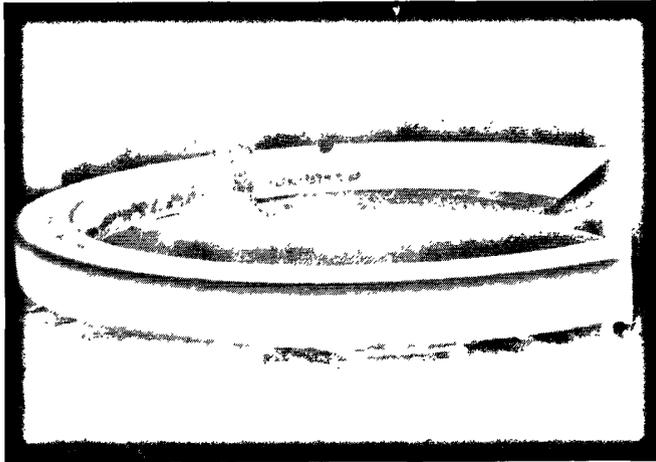


图4.25 整圆阶段

Fig.4.25 The stage of being round

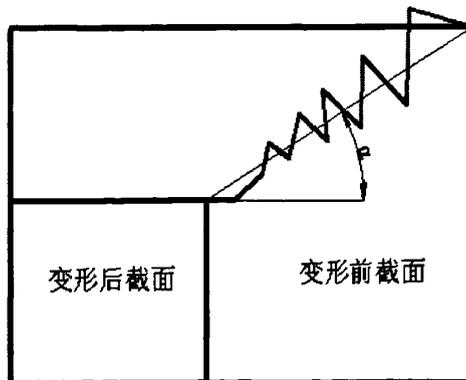


图 4.26 非线性轧制曲线

Fig.4.26 Curve of non-linear rolling

4.4.3 工艺参数分析

辗环成形工艺参数对环锻件轧制过程的顺利进行和最终成形质量有着非常重要的影响,工艺参数的设计必须考虑辗环机设备、环锻件材料、工艺规程、生产效率等因素,大型回转支撑环锻件径轴向轧制工艺参数主要包括以下几个方面^[59]。

(1) 轧辊转速分析: D53-5000辗环机的轧辊转速包括驱动辊转速和锥辊转速。当驱动辊电机采用交流电机时轧制线速度恒定,若驱动辊电机采用直流调速电机时轧制线速度可调,一般在0.4~1.6 m/s的范围内。在模拟试验和实际生产中,驱动辊的转速均一般设为恒定值(1.3 m/s)。轴向锥辊的转速则是根据与轧制线速度相等的原则进行匹配: $v = r\omega = 2\pi rn$ 。由于本试验中的D53-5000辗环机的锥辊转速是恒定的,为了保证与轧制线速度相等,在轧制过程中锥辊必须随环锻件直径的增大而不断后移。

如果在轧制过程中驱动辊和锥辊的线速度不一致,轧制过程就会不稳定。若驱动辊转速过大会导致环锻件发生调动,过小则会使环锻件单位时间内转速变小,导致每转进给量增大从而无法满足咬入条件;若锥辊的转速过大或过小,环锻件都会向两侧摆动,导致环锻件的椭圆度增大。在实际生产中,当驱动辊和锥辊的线速度严重不一致时,环锻件两端面有可能产生波浪状起伏缺陷,甚至会由于受力不均导致环锻件变形成椭圆,从而影响轧制过程的顺利进行。

(2) 进给速度分析:大型环锻件径轴向轧制时进给速度(包括芯辊径向进给速度和锥辊轴向进给速度)与环锻件直径增长速度、轧制时间存在着一定的规律关系^[60]。根据模拟试验结果和实际生产经验,环锻件直径增长速度太大会造成轧制过程不稳定,环锻件的刚度条件无法保证,但如果增长速度太小,就会延长轧制时间,增加火次,降低生产效率,浪费能源,因此选择合适的进给速度十分重要。

在设计芯辊进给速度时,首先应该满足进给咬入条件和锻透条件,在设计好毛坯后,通过参考径向轧制规律,可以初步估算满足锻透条件的进给速度 v_{\min} 和满足咬入条件的进给速度 v_{\max} ,而芯辊进给速度 v 应满足 $v_{\min} < v < v_{\max}$,由于锥辊也有轴向进给速度,因此该范围为参考值。在实际试验中发现,对于该规格环锻件的轧制,芯辊进给速度的取值不应大于2.5 mm/s,锥辊进给速度的取值不应大于0.2 mm/s,而且两个方向的进给速

度应随着环锻件直径的增大而逐渐减小，整个轧制过程用时145 s，环锻件直径的增大速度控制在5~15 mm/s的范围内，轧制过程稳定。

(3) 辗扩比及径轴向变形量分配比分析：辗扩比 k 定义为变形前后截面面积之比，它是衡量轧制变形程度的一个重要参数，对轧制模具和毛坯设计，轧制过程的顺利进行及轧制质量均有重要影响；径轴向变形量分配比 $\tan\alpha$ 定义为环锻件径轴向轧制径轴向变形量分配比，它对实现径轴向双变形区的变形协调，以成功建立稳定轧制过程、获得无成形缺陷的合格环锻件，起着至关重要的作用。

根据公式(3.1)、(3.2)以及截面变形图 4.21 可以得出该型号大型回转支撑环锻件的径轴向轧制径轴向变形量分配比 $\tan\alpha$ 及辗扩比 k ，其中 $\tan\alpha = 0.08$ 、 $k = 2.56$ 。由公式(3.9)、(3.14)得： $1 < k < 4.38$ 、 $\tan\alpha > \{0, 0.003\}_{\max}$ ，以上两值均在此范围之内，说明毛坯设计合理，轧制曲线选择恰当。

(4) 轧制力及力矩分析：影响环锻件轧制力和力矩的因素主要有：环锻件材料及尺寸、进给速度、芯辊、锥辊尺寸和轧制摩擦等。通过模拟试验和实际试生产发现，对于给定的进给速度，轧制力随着环件平均半径的增大而减小，但轧制力矩却随着环件平均半径的增大而增大。而在环件平均半径一定的情况下，轧制力矩则随着进给速度的增大或芯辊、锥辊半径的减小而增大。若进给速度和环锻件平均半径均一定，则轧制力矩随着驱动辊转速的增大而减小。

第五章 风电用大型环锻件热处理工艺研究

针对风电用大型环锻件用新材料 42CrMoHM 钢,分析了产生的粗晶原因,提出了改进后的第一热处理工艺。采用正交试验研究了最佳的第二热处理的工艺参数配比,以及经过该最佳工艺处理后,新材料的综合力学性能、显微组织以及晶粒度等级。

5.1 引言

大型回转支撑圈作为风力发电机组中最为重要的传动和承载零部件之一,其质量直接影响到发电机组的运行安全。在现行制造工艺中其几何尺寸由钢锭开坯、锻粗、冲孔和辗环扩孔或马杠扩孔后,经机械加工保证,而其各项力学性能及显微组织等技术条件则要通过热处理来实现。为了增加大型回转支撑圈的淬透性,提高其使用寿命,在原有欧标材料 42CrMo4V 钢的基础上增加化学元素 Mn、Cr、Mo 的含量,得到企业内控材料 42CrMoHM 钢,但这些元素含量的提高增大了淬火开裂的风险,加之国内外关于这种材料的热处理研究几乎为空白,没有成熟工艺作为参考,因此,如果制定的淬火工艺不当,极易造成环锻件开裂、变形。另外,由于其有效壁厚太大及辗环过程中变形速率过快,极易产生粗晶缺陷。粗晶一般有两种情况:一种是在整个环锻件内,宏观上不同区域晶粒度过大,这种粗晶多是由于不同位置的温度、变形或初始晶粒度不同所造成的;第二种是在局部区域内,晶粒度过大,这与最后一火变形量不够,变形速率过快,动态再结晶过程没有完成有关。严重的粗晶缺陷将导致大型回转支撑圈环锻件的屈服强度下降,冲击韧性降低,脆性转变温度上升,这给整个风电机组的运转带来了严重隐患。

大型环锻件由于其直径大,质量大,壁厚宽的特点,其热处理过程也具有独特的特点^[61]:

(1) 大型环锻件在加热冷却过程中,由于直径大,壁厚宽等原因,内外产生的温差大,由此而引起热应力和组织应力也比较大,因此,大型环锻件的加热和冷却速度比较缓慢。

(2) 大型环锻件由于其质量大,加热冷却过程中相变产生的相变潜热对其温度场会产生明显的影响,所以在适当的温度范围内应进行适当的均温停留。

因此,制定大型环锻件的热处理工艺必须考虑冶炼、铸锭、锻造等过程对锻件内部质量的影响,如化学成分不均匀、晶粒粗大不均匀、较多气体如氢气,以及较大锻造应

力和热处理应力等。大型环锻件的热处理分为第一热处理和第二热处理。

5.2 第一热处理工艺研究

5.2.1 第一热处理的作用

大型环锻件的第一热处理又称作预备热处理或锻后热处理，是紧接在辗环工序完成之后进行的，其主要作用是^[62]：

- (1) 消除锻造应力，降低硬度，提高切削加工性能，为后续的粗车做准备。
- (2) 对于不进行第二热处理的环锻件（材料大多为碳钢或低合金钢），通过锻后热处理还应使之达到产品技术条件所要求的力学性能。
- (3) 调整和改善在锻造过程中形成的粗大、不均匀组织，细化奥氏体晶粒，为后续超声波探伤和第二热处理做准备。因为如果环锻件的晶粒粗大和不均匀，会大大增加超声波的吸收和散射，以致得不到反射信号。细化和调整锻后组织，可减少大型环锻件第二热处理时的淬裂倾向，改善其组织和力学性能。
- (4) 防止产生白点。随着炼钢技术的发展，当钢液进行真空热处理时，钢锭中的原始含氢量可降至 3 PPM 以下，但仍不能完全排除出现白点的可能性，因此在制定第一热处理工艺时，考虑扩氢问题是必不可少的。

本文所述大型回转支撑环锻件的第一热处理工艺形式采用“正火+回火”，为了尽可能细化晶粒，防止粗晶，正火冷却采用吊下台车空冷。由于提高 Mn、Cr 以后，白点敏感性稍有增加，所以延长了回火保温时间，以确保去氢充分，防止白点的产生。其第一热处理工艺见图 5.1，

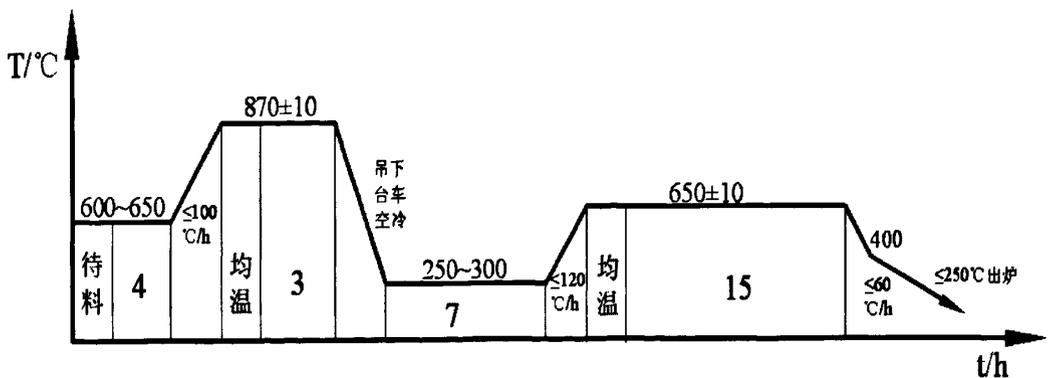


图 5.1 第一热处理工艺

Fig.5.1 The first heat treatment process

某公司第二批生产的 4 件产品，经图 5.1 的工艺热处理、粗车后，探伤未发现有白

点、夹杂性裂纹缺陷，且单个缺陷和密集性缺陷均未超标，但其中 2 件局部有晶粒粗大现象（晶粒度小于 3 级），集中表现在锻件的内外表面，加上第一批中经普通正火处理未消除粗晶缺陷的锻件，共有 3 件出现局部粗晶缺陷，而不能进行后道工序。

5.2.2 产生粗晶的原因

(1) 大型环锻件所用钢锭尺寸大，结晶过程缓慢，导致铸态组织粗大和偏析严重，碳和合金元素富集的偏析区奥氏体特别稳定，其粗大晶粒更难以消除，甚至在第二热处理时仍不能充分转变而残留下来。

(2) 大型环锻件锻造周期长，加热次数多，最后一火变形量小且变形不均匀，所以再结晶后晶粒较粗大、不均匀。

(3) 大型环锻件不同部位的终锻温度很不一致，锻件表面与心部的温差也很大，以致有的部位终锻后仍在 1000 °C 以上的高温长时间停留，导致锻件的晶粒大且不均匀。

(4) 大型环锻件的奥氏体化温度比同钢种的中、小件要高，这是因为前者偏析较严重，必须保证 A_{c3} 较高的偏析区也能充分奥氏体化，而对于正常的非偏析区，这一奥氏体化温度就比 A_{c3} 高很多，加上大型环锻件保温时间长，致使锻件表面区域在高温下停留时间过长，造成晶粒粗大。

(5) 大型环锻件奥氏体化加热时，在 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变区的加热速度很低，而这一加热温度越小，奥氏体晶粒越粗大。

(6) 大型环锻件用钢的组织遗传倾向强烈，导致锻件的晶粒度粗大而不均匀。即原始奥氏体晶粒越粗，再奥氏体化的晶粒也越粗大。

(7) 一些高淬透性钢在第一热处理的过冷温度下奥氏体转变不完全，在随后的略低于 A_1 温度等温的过程中，这部分奥氏体并不分解，从而造成局部粗大的晶粒。

结合以上七点，分析本试验中 3 件环锻件产生局部粗晶的原因可能为：钢锭或者毛坯在加热时，烧嘴直接对准其表面且距离过近，造成局部过热现象；毛坯在辗环成形时，变形过快导致毛坯与驱动辊、芯辊接触区域的温度急剧上升，同样造成局部过热现象；毛坯最后一火加热温度高于 1000 °C，而变形量小（辗扩比 $k < 1.2$ ），造成终锻温度过高，再结晶后晶粒较粗大、不均匀；42CrMoHM 钢属高淬透性钢，它在第一热处理的过冷温度下奥氏体转变不完全，在随后的略低于 A_1 温度等温的过程中，这部分奥氏体并不分解，从而产生局部粗大的晶粒。

5.2.3 晶粒细化工艺改进

对于大多数碳钢和低、中合金钢大锻件，可采用退火、正火和调质等工艺，通过相变重结晶使之晶粒细化。但对于含 Cr、Mn、Ni 等元素的高淬透性钢，由于锻造冷却后得到的是马氏体或贝氏体等非平衡组织，而且在重新加热通过临界区时又不可能获得较快的加热速度，这就有利于粗大的原始奥氏体晶粒的恢复与遗传，所以对这类大型或特大型锻件，本试验中的 42CrMoHM 回转支撑环锻件就属于这种大型锻件，为使其晶粒细化，需采用比较复杂而费时的热处理工艺。具体工艺措施简述如图 5.2^[63]，

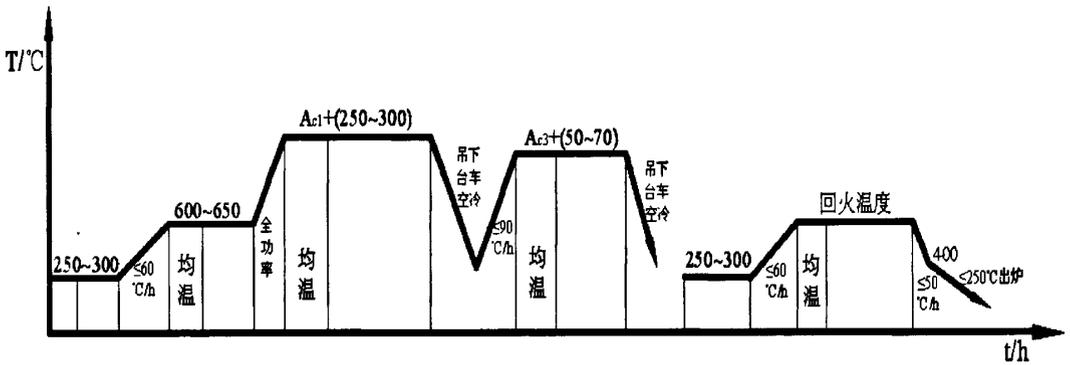


图 5.2 合金钢环锻件消除粗晶的一般热处理工艺

Fig.5.2 General heat treatment process of alloy steel for eliminating the coarse grain

合金钢 42CrMoHM 的 A_{c1} 、 A_{c3} 近似为 735 °C、780 °C。因此本试验中的消除粗晶热处理工艺如图 5.3 所示，

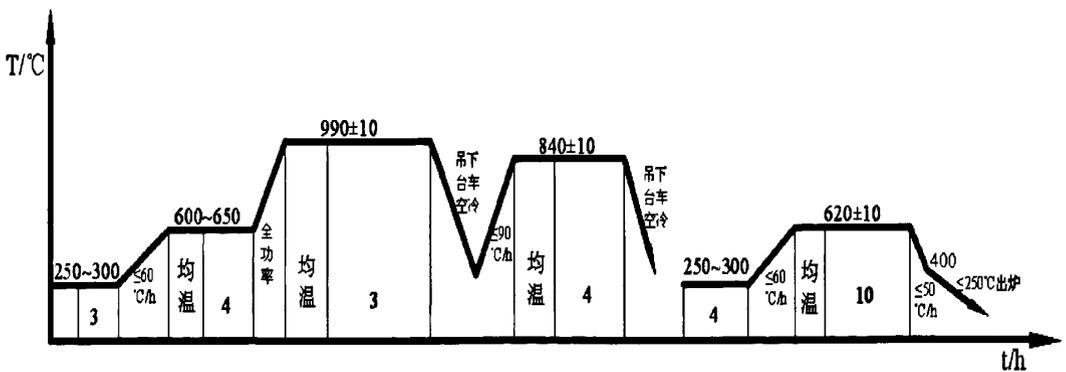


图 5.3 42CrMoHM 回转支撑环锻件消除粗晶热处理工艺

Fig.5.3 Heat treatment process of 42CrMoHM steel for eliminating the coarse grain

3 件局部粗晶的锻件经过图 5.3 的消除粗晶热处理工艺后，晶粒大幅度细化（晶粒度大于 5 级），且探伤过程中草状波明显减少，声波信号无迅速衰减现象，增大了超声波探伤对锻件的内在质量判断的准确性。结果表明图 5.3 的热处理工艺制定合理，可起

到细化晶粒的作用。

5.3 第二热处理工艺研究

大型环锻件的第二热处理又称最终热处理，在粗加工后进行，其目的是使之获得所要求的组织和性能。通常采用的工艺方法有调质、正火和时效。本试验中的最终热处理为调质处理。由于 42CrMoHM 钢为企业首次试验材料，没有成熟工艺作为参考，若直接采用本体做试验，一旦发生开裂、变形或者综合性能不符合要求等现象，势必造成材料和能源的浪费，因此先采用小试样进行试验，然后再将成功工艺推算到本体试验中，试样位置如图 4.2 所示，试样尺寸为 40 mm×40 mm×200 mm。

5.3.1 试验概述

试验目的：42CrMoHM 钢为高淬透性钢，其主要依靠调质处理来进行强化，所以寻求正确的调质工艺制度，对有效地发挥钢的潜力是非常重要的。本试验在参考室温力学性能要求（表 4.2）的基础上，寻求热处理工艺参数：淬火温度、淬火液浓度、冷却时间、回火温度的最佳配合，以使得大型风电用回转支撑环锻件用 42CrMoHM 钢的综合力学性能最佳。

试验内容：（1）淬火温度、淬火液浓度、冷却时间、回火温度对综合力学性能的影响；（2）非金属夹杂物及显微组织。

试验仪器：拉伸采用 CMT5305-GL 电子万能试验机，冲击采用 JB-300B 冲击试验机，硬度采用 HB-3000 布氏硬度计，非金属夹杂及显微组织采用 XJG-0.5 金相显微镜，淬火、回火加热采用 SX2-15-12 试验电阻炉。

试验标准：拉伸采用 GB/T228-2002 “金属拉伸试验方法”，冲击采用 GB/T229-1994 “金属冲击（V 型）试验法”，硬度采用 GB/T231-1994 “金属材料布氏硬度试验方法”，非金属夹杂物采用 GB/T10561-2005 “钢中非金属夹杂物显微评定方法”，晶粒度采用 GB/T 6394-2002 “金属平均晶粒度测定方法”，显微组织采用 GB/T 13299-1991 “钢的显微组织评定方法”，末端淬透性采用 GB/T 255-1988 “钢的淬透性末端淬火试验方法”。

拉伸试样、冲击试样分别如图 5.4 和图 5.5 所示：

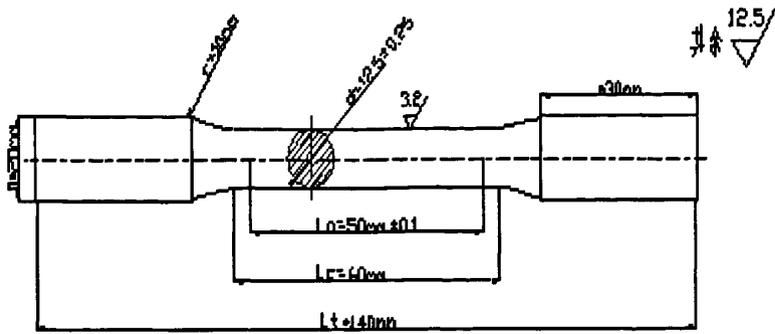


图 5.4 拉伸试样尺寸

Fig.5.4 Sketch of sample for tensile test

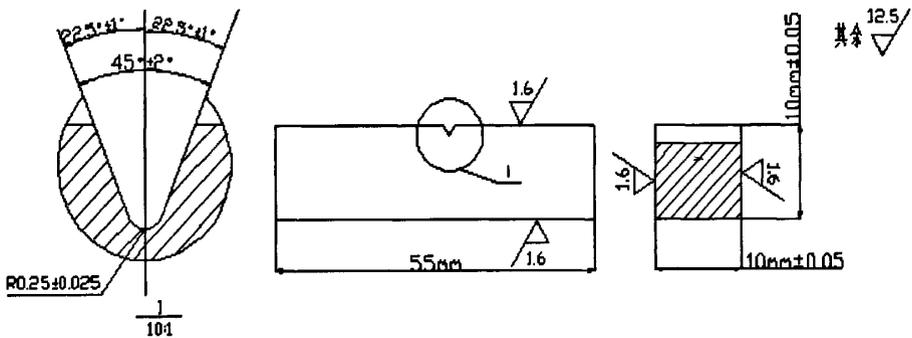


图 5.5 冲击试样尺寸

Fig.5.5 Sketch of sample for impact test

5.3.2 正交试验

选用正交试验是因为其具有优良的均衡分散性和整齐性，其设计的试验点具有强烈的代表性，能以较少的试验次数分析出各因素的主次顺序以及对试验指标的影响规律，筛选出较满意的试验结果^[64]。通过对试验结果运用多目标值经验法和综合加权评分法分析，得到最佳的工艺参数组合。

表 5.1 正交试验及水平

Tab.5.1 Factors and level in orthogonal test

试验水平	试验因素			
	淬火温度/°C	淬火液浓度/%	冷却时间/min	回火温度/°C
水平 1	820	3	2.5	570
水平 2	840	6	3.0	590
水平 3	860	9	3.5	610
水平 4	880	12	4.0	630

影响力学性能的热处理因素有很多，主要考虑淬火温度、淬火液浓度、冷却时间、

回火温度四个因素。淬火温度范围为 820~880 ℃，淬火液采用 AQ251 介质水溶液，使用温度控制小于 40 ℃，其浓度范围为 3%~13%；冷却时间为 2.5~4.0 min；回火温度范围为 570~630 ℃。将这四个因素选 4 个水平进行正交试验见表 5.1，选 $L_{16}(4^4)$ 型正交表，根据试验水平设计的正交试验方案见表 5.2。

表 5.2 正交试验方案
Tab.5.2 Orthogonal test program

试验号	试验因素			
	淬火温度/℃	淬火液浓度/%	冷却时间/min	回火温度/℃
1	1 (820)	1 (3)	1 (2.5)	1 (570)
2	1 (820)	2 (6)	2 (3.0)	2 (590)
3	1 (820)	3 (9)	3 (3.5)	3 (610)
4	1 (820)	4 (12)	4 (4.0)	4 (630)
5	2 (840)	1 (3)	2 (3.0)	3 (610)
6	2 (840)	2 (6)	1 (2.5)	4 (630)
7	2 (840)	3 (9)	4 (4.0)	1 (570)
8	2 (840)	4 (12)	3 (3.5)	2 (590)
9	3 (860)	1 (3)	3 (3.5)	4 (630)
10	3 (860)	2 (6)	4 (4.0)	3 (610)
11	3 (860)	3 (9)	1 (2.5)	2 (590)
12	3 (860)	4 (12)	2 (3.0)	1 (570)
13	4 (880)	1 (3)	4 (4.0)	2 (590)
14	4 (880)	2 (6)	3 (3.5)	1 (570)
15	4 (880)	3 (9)	2 (3.0)	4 (630)
16	4 (880)	4 (12)	1 (2.5)	3 (610)

16 组试样均包括 1 个拉伸试样和 3 个冲击试样，冲击功取 3 个试样的平均值，硬度在冲击试样上测得，取 3 个测量点的平均值。

5.3.3 结果分析

从表 5.3 可以看出，随着淬火温度的升高，钢的强度指标逐渐上升，而塑性指标逐渐下降，在保证材料的高温力学性能以及室温综合力学性能优良的前提下，应尽量提高淬火温度，但过高的淬火温度会使钢的晶粒长大，残余奥氏体增多，加之冷却速率过快，极易造成开裂。溶性淬火液是一种比油冷却速度快，介质升温速率慢，比水冷却速率慢、有更小的畸变和开裂倾向的清洁、安全的淬火介质，其浓度越高，冷却速率越慢^[65]。上述正交试验中的 9 和 13 号试验就是由于淬火温度高，介质水浓度低，冷却速率快导致试样在热应力和组织应力的叠加超过了零件的断裂强度，形成不同形态的淬火裂纹。本

试验中淬火液浓度在 10%~13% 的范围内, 冷却速率及冷却均匀性最佳。由于 Mn、Cr 合金元素含量提高, 42CrMoHM 钢淬透性增强, 冷却时间在 2.5~4 min 范围内, 对试样的综合力学性能没有太大影响, 只要保证试样出介质水后温度不低于 250 °C 即可。回火温度对钢的强度指标、塑性指标影响比较大, 在 570~630 °C 范围内, 随回火温度的升高, 强度和硬度逐渐下降, 当温度升到 630 °C 时, 强度和硬度均低于参考力学性能的要求, 延伸率、断面收缩率和冲击值均随回火温度的降低而逐渐下降, 当温度降到 570 °C 时, 塑性指标都很低, 其中以延伸率和断面收缩率最为敏感。

(1) 经验法分析

9、13 号试验冷却过程中发生开裂; 3、4、6、15 号试验硬度小于参考硬度下限 250 HB, 不必做后续检测; 5、16 号试验抗拉强度小于参考下限 820 MPa; 1、7、12、14 号试验硬度偏高, 延伸率、断面收缩率、冲击功分别小于参考下限; 2、8、10、11 号试验符合参考力学性能的要求, 但是试样的各项力学性能指标要求均高于本体, 根据生产经验, 若要得出本体的力学性能, 试样的力学性能要在参考力学性能的基础上留有一定的保险量, 因此, 2、10、11 号试验的抗拉强度虽满足试样要求, 但不一定满足本体要求, 而 8 号试验的各项力学性能指标匹配合理, 其因素水平组合最为理想, 符合本体的热处理工艺参数要求。

(2) 综合加权评分法分析

综合加权评分法是把多指标的情况化为一个指标, 用每次试验的得分(即各项指标得分的总和)来代表这次试验的结果, 然后进行统计分析。各项指标的评分值分别按其重要程度, 相应地乘以适当的系数(试验指标权重值)作为分数, 因此, 每次试验所得分数为综合加权评分值。

试验指标权重值用 w_j 表示, 其中 j 表示第 j 种试验指标, 设各项试验指标权重值之和等于 1。权重设置时须正确分析各试验指标对 42CrMoHM 钢的强度指标、塑性指标、韧性指标影响重要程度, 较重要的试验指标, 应给予较大值。42CrMoHM 钢的强度指标包括硬度、抗拉强度、屈服强度, 塑性指标包括延伸率、断面收缩率, 韧性指标包括冲击值。为了简化综合加权评分法的运算过程, 强度指标只选用抗拉强度, 权重值设为 0.25, 塑性指标只选用延伸率, 权重值设为 0.25, 韧性指标权重值设为 0.5。

用 $Y(i, j)$ 表示各试验号的各项试验指标的数值分数, 其中 i 表示第 i 试验号。为了使综合力学性能最佳, 各试验指标的数值越大越好, $Y(i, j)$ 计算公式如式(5.1)所示,

$$Y(i, j) = (A_j - A_{j\min}) / A_{j\min} \quad (5.1)$$

其中 A_j 为试验指标数值, $A_{j\min}$ 为试验指标参考值的最小值。

由式(5.1)所得各项试验指标的分数值分别乘以其权重值, 可得到各试验指标的加权评分值。将各项试验指标的加权评分相加即为每次试验的综合加权评分值, 用 Y_i 示, 其值越高表示采用该试验号工艺参数所得 42CrMoHM 钢的综合力学性能越好, 计算公式如式(5.2)所示:

$$Y_i = \sum_{j=1}^3 Y(i, j) \cdot W_j \quad (5.2)$$

16 组试验中不合格的试验号不进行综合加权评分法分析, 直接认为 Y_i 等于 0。根据表 5.3, 8 号试验在 16 组试验中的综合加权分值最高, 即为最佳参数组合。这与先前的经验法判定结果完全一致。

综上所述, 8 号试验淬火温度 840 °C, 淬火液浓度 12%, 冷却时间 3.5 min, 回火温度 590 °C 是最佳的参数组合。

表 5.3 正交试验结果
Tab. 5.3 Result of orthogonal test

试验号	试验结果						是否合格	综合加权评分 Y_i
	硬度 HB	抗拉强度 MPa	屈服强度 MPa	延伸率 %	断面收缩率 %	冲击功 AKV/J		
1	298	950	807	13.8	49.1	77	否	0
2	259	827	718	20.5	68.5	106	是	0.676
3	246	—	—	—	—	—	否	0
4	230	—	—	—	—	—	否	0
5	252	813	708	23.8	72.6	115	否	0
6	245	—	—	—	—	—	否	0
7	303	964	831	14.1	48.2	74	否	0
8	286	923	781	21.5	69.8	102	是	0.685
9	—	—	—	—	—	—	否	0
10	262	830	723	19.8	68.2	105	是	0.654
11	273	859	751	20.4	67.9	105	是	0.673
12	325	985	882	14.6	51.3	54	否	0
13	—	—	—	—	—	—	否	0
14	322	1016	870	12.6	46.4	58	否	0
15	248	—	—	—	—	—	否	0
16	257	818	720	23.5	74.8	114	否	0

5.4 力学性能检测与组织观察

参考 8 号试验的工艺参数配比，制定了本体环锻件的第二处理工艺（调质工艺）如图 5.6 所示，

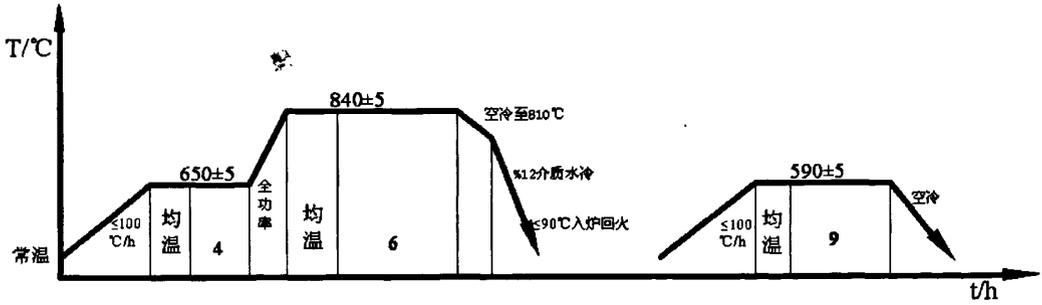


图 5.6 第二热处理工艺

Fig.5.6 The second heat treatment process

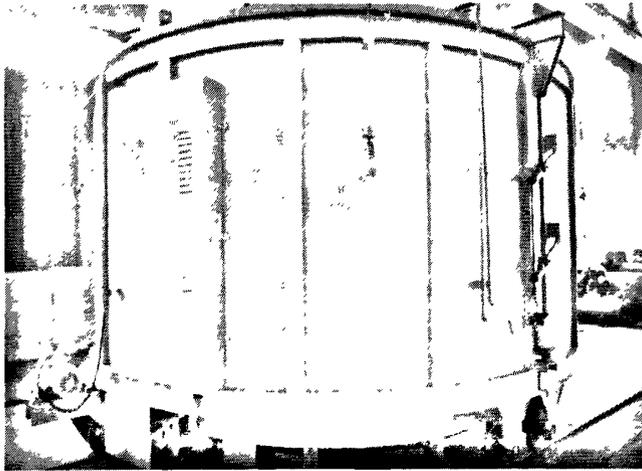


图 5.7 热处理加热炉 (Φ7 m)

Fig.5.7 Heat treatment furnace (Φ7 m)

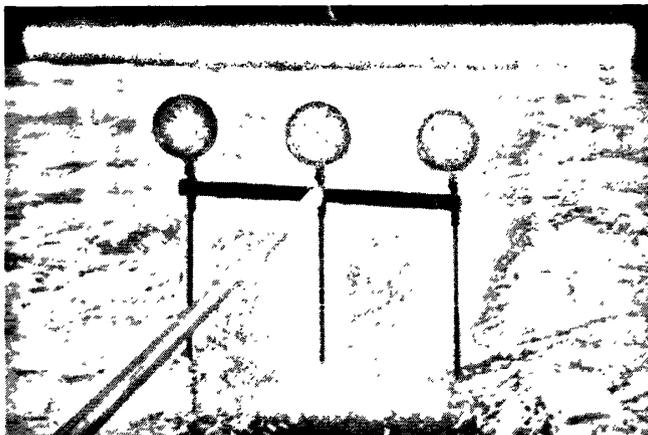


图 5.8 淬火池 (7 m×7 m×5 m) 及淬火液

Fig.5.8 Quenching pool (7 m×7 m×5 m) and quench fluid

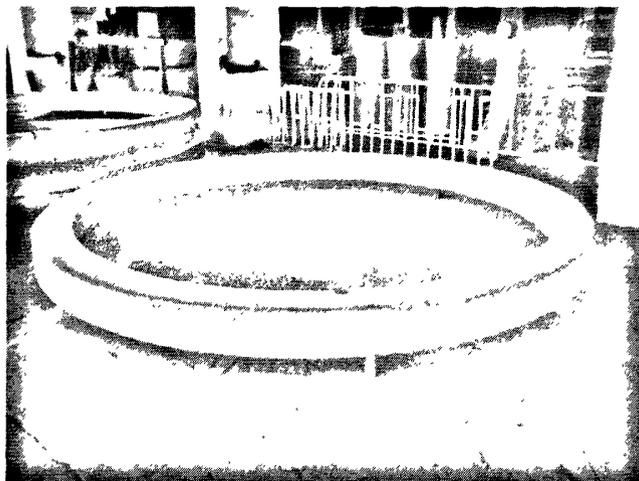


图 5.9 第二热处理后的环锻件
Fig.5.9 Ring after the second heat treatment

在第二热处理后环锻件上按照图 4.2 取样，进行力学性能检测和显微组织观察。图 5.10 和表 5.4 分别为拉伸试验曲线图和检测结果。

表 5.4 拉伸试验结果
Tab.5.4 Tensile test results

参数	最大力 (F _m) / kN	抗拉强度 (R _m) / MPa	下屈服强度 (R _{eL}) / MPa	断后伸长 率(A) / %	断面收缩率 (Z) / %	规定非比例延伸强度 (R _{p0.2}) / MPa
结果	72.0	916.1	768.8	19.6	67.5	775.0

三个冲击试样的冲击功值分别为 96 J、99 J、97 J，因此平均值为 97.3 J

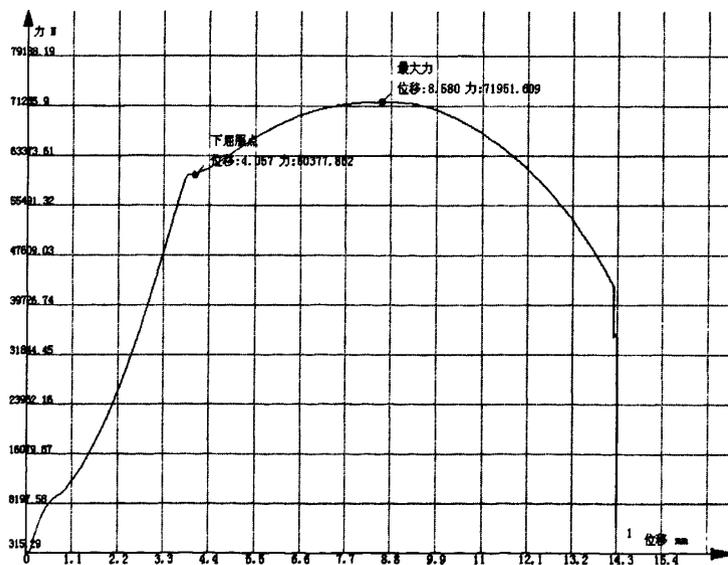


图 5.10 拉伸试验曲线图
Fig.5.10 Curve of tensile test

图 5.11 为显微组织图，晶粒度 (GB/T 6394-2002): 6.5~7 级，显微组织 (GB/T 13299-1991): 回火索氏体+少量沿晶分布的铁素体。

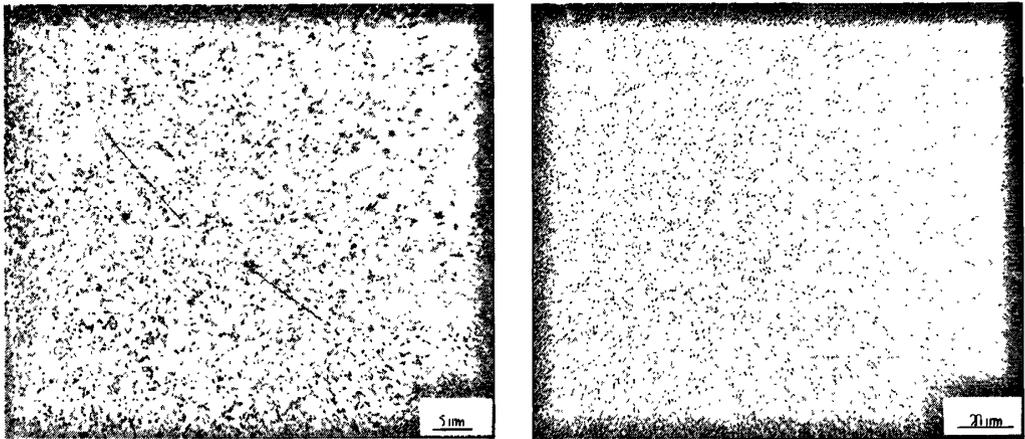


图 5.11 显微组织

Fig.5.11 Metallographic structure

图 5.12 为末端淬透性试验数据曲线 (GB/T 225-1988)，

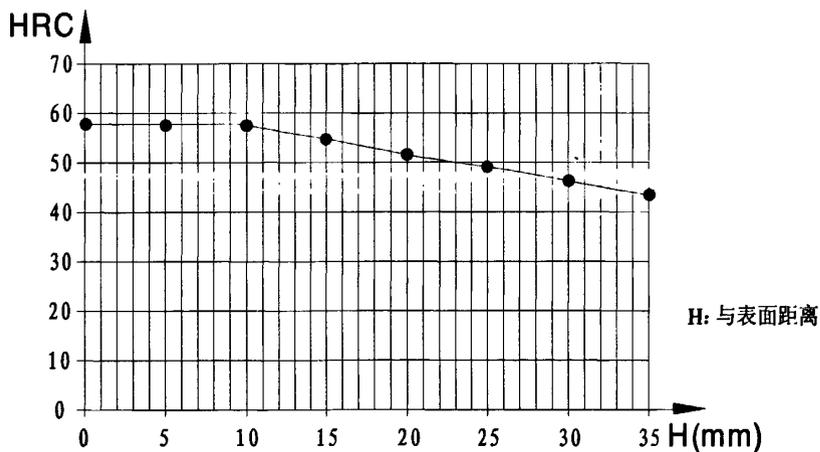


图 5.12 末端淬透性试验曲线

Fig.5.12 Curve of end hardenability test

正交试验可以使每次试验都具有较强的代表性，较常规试验方法减少了试验次数，提高了效率，采用经验法和综合加权评分法可以在较少的试验次数下得到较理想的工艺参数组合；要达到 42CrMoHM 钢最佳的室温综合力学性能，其小试样的热处理工艺参数配合为淬火温度 840 °C、淬火液浓度 12%、冷却时间 3.5 min、回火温度 590 °C，其中淬火温度和回火温度是最主要的两个因素；根据小试样的最佳工艺参数配比推算出本体的调质工艺。实践证明：42CrMoHM 大型风电用环锻件经过该调质工艺处理后，各项力学性能均符合或欧标要求，特别是冲击性能增加约 35%，且显微组织为回火索氏体+

少量沿晶分布的铁素体，晶粒度可到7级，非金属夹杂物等级也较高。

第六章 结论与展望

大型环锻件是大锻件中十分关键的一个分支,用途极为广泛,是现代化工业尤其核电工业、风电工业、石油化工工业、大型火电站等行业必不可少的零部件。风电用大型环锻件作为 WM 级风力发电机组重要的传动和承载零部件,需要在较大风能变换的环境及+40~-40℃环境温度下,承载风电机运转负荷,其性能要求直接关系风电设备的安全运行和使用寿命。本文针对大型环锻件锻造和热处理技术国内外现状及数值仿真模拟在环锻件生产中的运用进行了研究。另外,以风电回转支撑为例研究了大型环锻件的热加工工艺及所用材料的化学分配比。经实际生产证明,环锻件的各项指标均达到或超过了欧标要求,可完全顶替进口的风电用环锻件,深得国内风电企业的信赖。因此,本文的意义不仅在于为国内企业生产同类产品提供了技术参考,而且为 MW 级风力发电机组关键零部件的国产化起到了积极的推动作用。

6.1 结论

(1) 研究了环锻件轧制塑性成形金属流动规律,分析了影响环锻件咬入条件、锻造条件、刚度条件的因素。在商用有限元软件 Deform-3D 中分别建立了环锻件轧制模型和简化的平板轧制模型,确定了芯辊进给速度、直径等对轧制效果的影响,从而优化了轧制工艺参数。

(2) 本文在原有欧标材料 42CrMo4V 钢的基础上进行化学成分设计,增加了合金元素 Mn、Cr、Mo 含量,降低了 P、S 含量,得到企业内控的高淬透性、高综合力学性能材料 42CrMoHM 钢。经试验证明,该材料的各项性能指标均达到或超过欧标要求,其中冲击性能增加约 35%。

(3) 在分析了夹杂性裂纹形成机理的基础上,借助有限元模型网格变化情况,提出了“WHF 法拔长+预锻粗 40%+走扁方成形”的制坯工艺,经实际生产验证,该方法可有效控制夹杂物形态,避免锻粗过程中夹杂性裂纹的产生,提高了产品的探伤合格率。

(4) 研究了环锻件轧制过程中,毛坯整形、联合主轧、整圆三个阶段的变形规律,提出了最佳的轧制曲线。验证了合理的轧制工艺参数对最终成品质量的重要性。

(5) 对风电用环锻件产生粗晶的原因进行了分析,提出了“两次高温正火+回火”的消除粗晶热处理工艺;通过正交试验找出风电环锻件用 42CrMoHM 钢的第二热处理

工艺, 结果表明: 该材料试样经淬火温度 840 ℃、淬火液浓度 12%、冷却时间 3.5 min、回火温度 590 ℃的调质处理后, 抗拉强度 923 MPa、屈服强度 781 MPa、延伸率 21.5%、断面收缩率 69.8%、冲击功 102 J、硬度 286 HB、晶粒度 7 级, 均达到或超过欧标要求。

6.2 展望

由于时间和本人水平所限, 对于问题的研究于深度和广度上均有待提高, 以下问题的处理需要进一步探讨, 敬请各位专家、老师和同行批评指正。

(1) 提高模拟仿真精度。对 Deform-3D 的 Ring-rolling 模块进行二次开发, 在本文的环锻件轧制模型中加入导向辊, 并且设置其工艺参数, 使模拟结果更加精确, 同时更好地指导实际生产。

(2) 全过程、多尺度模拟。对环锻件整个热加工过程进行模拟, 即宏观上模拟环锻件的制坯和辗环过程, 微观上模拟环锻件淬火时的奥氏体转变、晶粒长大, 马氏体转变等过程。

(3) 锻后余热利用。轧制结束后, 锻后热处理入炉前, 严格控制冷却速度, 利用锻造余热完成一次组织转变, 细化晶粒, 提高锻后热处理质量, 从而减少锻后热处理后的粗晶现象。

(4) 多目标优化。对多目标值的正交试验进行更科学、更精确的数学分析, 例如采用灰色关联处理等, 找出影响试验结果的最主要因素以及热处理参数的最佳配比。

(5) 先进检测分析。采用如电镜或透镜分析等先进的检测方法, 对 42CrMoHM 钢的微观组织机理深入研究, 对热处理工艺参数进行进一步的优化, 寻找更加合理的热处理工艺制度, 充分发挥该材料的潜能, 使其各项力学性能达到更优值。

参 考 文 献

- [1] 姚泽坤.锻造工艺学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998:77-79.
- [2] 郭会光,曲宗实.我国大锻件制造业的发展[J]. 北京:大型铸锻件,2003,(1):42-45.
- [3] 刘建生,陈惠琴,罗上银.环筒件锻造成形工艺的研究[J]. 锻压机械,1998,(1):27-29.
- [4] 吕炎主编.锻造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1995:10-14.
- [5] 中国机械工程学会锻压学会编.锻压手册第一卷[M]. 北京:机械工业出版社,2002:111-124.
- [6] 吕炎等.锻压成形理论与工艺[M]. 北京:机械工业出版社,1991:320-359.
- [7] 中国机械工程学会锻压学会编.锻压手册第一卷[M]. 北京:机械工业出版社,2002:111-124.
- [8] 张志文主编.锻造工艺学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1983:62-122.
- [9] 李尚健主编.锻造工艺及模具设计资料[M]. 北京:机械工业出版社,1985:41-72.
- [10] 黄春峰.大型环形锻件的马架扩孔[J]. 航空工艺技术,1994,(5):35-36.
- [11] K.Davey, M.J.Ward. A practical method for finite element ring rolling simulation using the ALE flow formulation. International Journal of Mechanical Sciences [J], 2002, 44:165-190.
- [12] 王泽武.环件虚拟轧制技术及过程优化研究[D]. 武汉:华中科技大学博士论文.2007.
- [13] Chilton JM, Roberts MJ. Factors influencing the performance of forged hardened steel rolls. Iron Steel Eng [J], 1981:77-82.
- [14] Liu Zhubai, Wang Liandong. Developments of the Forging Technology Theories and Techniques of Heavy Forging. The Korea Institute of Meta and Materials.13th International Forgemasters Meeting,Pusan,Korea,1997:277-286.
- [15] Tyurin, V.A.Ovechkin. World Achievements in Forgings Production for Power and Petroleum-chemical Mechanical Engineering[J]. Tyazh Mashinostr, 2001,(1):34-37.
- [16] Takashi Fukuda, Norio Morisada. Recent Trends and Developments in the Heavy, Open-die Forging Industry in Japan. German Iron and Steel Institute.14th International Forgemasters Meeting, Wiesbaden,Germany,2000:1-8.
- [17] 王凤喜.大锻件生产行业与锻造技术发展[J]. 锻压机械,2002,(4):3-6.
- [18] K.D.Haverkamp. Production Properties of a 200t Generator Shaft Made from a 435 Ingot [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1986,13(5):53-60.
- [19] Michio Kiguchi, Kazuhito Tani. Forging Design and Manufacturing Process of Integral Type Closure Head for Reactor Vessel. German Iron and Steel Institute.14th International Forgemasters Meeting, Wiesbaden, Germany, 2000:65-72.
- [20] 郭会光,曲宗实.我国大锻件制造业的发展[J]. 大型铸锻件,2003,(1):42-45.
- [21] 王凤喜.大锻件的生产与发展[J]. 锻压机械,1999,(5):5-9.

- [22] 程瑞敏.大型环件成形过程的数值模拟[S]. 秦皇岛:燕山大学硕士毕业论文.2009.
- [23] 蔡墟.我国自由锻液压机和大型锻件生产的发展历程(上)[J]. 锻造与冲压,2006,(11):84-86.
- [24] 康大韬,叶国斌.大型锻件材料及热处理[M]. 北京:龙门书局,1998:1-85.
- [25] Kobayashi.S, Lee.C.H. Deformation Mechanics and Workability in Upsetting Solid Circular Cylinders[J].Proc.of the North American Metal Working Research Conf. Hamilton, 1973:185-204.
- [26] Dong.K.Kim. Optimal Process Design of Large Forgings with the Flat Die [J]. the 13th IFM Pusan, 1997:175-181.
- [27] 刘助柏,倪利勇,张勇军等.大型轴类锻件的特殊锻造法[J]. 中国机械工程,2006,17(8):877-879
- [28] 刘助柏,王连东.液压机上镦粗与拔长新理论及新工艺的研究[J]. 大型铸锻,1999,85(3):48-54.
- [29] 梁晨,刘助柏.LZ 锻造的砧宽比、料宽比的临界值研究[J]. 锻压技术,2004,(3):14-16.
- [30] 王雷刚.大型汽轮机转子锻造工艺模拟和智能 CAPP 研究[D]. 秦皇岛:燕山大学博士学位论文.2001.
- [31] D.Y.Yang, C.S.Lee, H.S.Cho et al. Development of a new computer-aided manufacturing system for the hot ring rolling process. In: Processing 3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes, Kyoto, Japan, 1984:229-238.
- [32] DY Yang, KH Kim. Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plane Strain Ring Rolling[J]. Int J Mech Sci.1988,30(8):571-580.
- [33] Xu S G, Lian J C, Hawkyard J B. Simulation of Ring Rolling Using A Rigid Plastic Finite Element Model[J]. International Journal of Mechanical Sciences 1991,33(5):393-401.
- [34] 解春雷.环件轧制过程刚粘塑性动力显式算法有限元模拟[D]. 武汉:华中理工大学博士学位论文.1997.
- [35] 郭正华,解春雷,李尚健.环件轧制动态过程刚塑性有限元反向模拟. 全国锻压学术年会论文,1999:126-130.
- [36] 兰箭,左治江,韩星会等.内台阶锥形环件辗扩锻件设计方法研究[J]. 塑性工程报,2006,13(2):51-56.
- [37] 王泽武.环件虚拟轧制技术及过程优化研究[D]. 武汉:华中科技大学博士论文.2007.
- [38] 赵美荣.环件辗制工艺有限元模拟与优化[S]. 太原:太原理工大学硕士论文.2005.
- [39] 华林,黄兴高,朱春东.环件轧制理论和技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001:23-25.
- [40] 华林,潘利波,兰箭等.大型环件的径轴向轧制工艺模拟和研究[J]. 中国机械工程,2006,17(19):2020-2023.
- [41] 华林,黄兴高,朱春东.环件轧制理论和技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001:6-7.
- [42] 钱东升.基于有限元模拟的环件轧制锻透及残余应力研究[D]. 武汉:武汉理工大学博士论文.2006.
- [43] 袁银良.外台阶截面环件轧制成形规律研究[D]. 武汉:武汉理工大学博士论文,2006.

- [44] 胡忠.塑性有限元模拟技术的最新进展[J]. 塑性工程学报,1994,1(3):3-13.
- [45] S.Kobayashi. Metal Forming and the Finite Element Method. Oxford: Oxford University Press, 1989:37-48.
- [46] 吕丽萍主编.有限元法及其在锻压工程中的应用[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1988:8-13.
- [47] DY Yang, KH Kim. Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plane Strain Ring Rolling[J], Int J Mech Sci.1988,30(8):571-580.
- [48] M.R.Forouzan, M.Salimi, M.S.Gadala. Guide roll simulation in FE analysis of ring. Rolling Journal of Materials Processing Technology, 2003:213-223.
- [49] G.J.Li and S.Kobayashi, Analysis of Spread in Rolling by the Rigid-Plastic. Finite Element Method.1984:71-88.
- [50] S.Kobayashi, S.L.Oh, T.Altan. Metal Forming and the Finite Element Method. Oxford University Press, 1989:68-69.
- [51] 段新建.大锻件基本工序的数值模拟和参数优化[D]. 秦皇岛:燕山大学硕士学位论文.1999.
- [52] 曾志朋.DEFORM软件的二次开发与大型锻件锻造工艺优化[S]. 北京:北京机电研究所硕士学位论文.2002.
- [53] 谢水生,王祖唐.金属塑性成形工步的有限元数值模拟[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:8-13.
- [54] 华林,潘利波,兰箭等.大型环件的径轴向轧制工艺模拟和研究[J]. 中国机械工程, 2006,17(19):2020-2023.
- [55] 姜海峰.环件轧制过程的数值模拟研究[S]. 武汉:华中科技大学硕士学位论文.2006.
- [56] 程晓农,戴起勋.奥氏体钢设计与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2005:25-37.
- [57] 刘助柏,倪利勇,刘国辉.大锻件形变新理论新工艺[M]. 北京:机械工业出版社,2009:154-159.
- [58] 杨勇,张华,魏志坚等.CARWIN 软件在3 m环轧机上的应用[J]. 现代机械,2008(增刊):101-103
- [59] HU A L, ZHAO Z Z. The Extremism Parameters in Ring Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 69(1- 3):273- 276.
- [60] 华林,潘利波,兰箭等.大型环件的径轴向轧制工艺模拟和研究[J].中国机械工程, 2006,17(19):2020-2023.
- [61] 雷雪.低压转子加热过程模拟及工艺优化[D]. 上海:上海交通大学博士论文,2009.
- [62] 康大韬,叶国斌.大型锻件材料及热处理[M]. 北京:龙门书局,1998:1-85.
- [63] 隧道夫斯基等.钢加热时相和组织的转变[A]. 杨惠华译,北京:冶金工业出版社,1958:29~60.
- [64] 吴有纬.试验设计与数据处理[M]. 苏州:苏州大学出版社,2002:10-23.
- [65] 薄鑫涛,郭海洋,袁风松.实用热处理手册[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2009:256-287.

致 谢

论文已经完成,从开题报告到硕士论文完稿,自己付出了较多时间和精力。但是我不能忘记的是,读研期间许多人的关心和支持,在这里对他们一并表达谢意,他们的帮助和教导是我一生宝贵的财富。

感谢我的导师王雷刚教授和师母黄瑶副教授。王教授和黄教授求实创新的治学态度、严谨细致的工作作风、勤勉向上的工作热情、锐意进取的探索精神、渊博的知识和丰富的实践经验,是指导我做好工作、完成学业的精神与力量所在,而且他们也非常关心我的就业情况,经常给我提出高贵的意见。让我尤为感激的是,两位老师给了我进入江苏大学与张家港海陆环形锻件有限公司共同创建的江苏省首批企业研究生工作站学习和工作的机会,这个平台使我更好地开展自己的课题,真正做到理论与实际相结合,同时,也使我在未进入工作岗位之前,就养成了严谨细致、精益求精、认真负责的工作态度,以及学会了如何更好地与领导、同事相处。总而言之,这个机会将使我终身受益。在此,谨向两位老师致以崇高的敬意和诚挚的谢意!

感谢张家港海陆环形锻件有限公司吴君三董事长、周云鹤副总、雷正印高级工程师以及各位同事,给予我工作上及生活上的帮助,使我顺利完成在企业研究生工作站期间的各项任务。

感谢研究生课程的各位任课教师,正是他们的严格要求和督促,才使天性不勤奋的我能如期完成研究生阶段的学业。诸位老师严以治学,宽以待人的精神修养是我为人学习的榜样。

感谢我的家人亲友,特别是我的女友马红,他们在精神、生活等方面所提供的鼓励和支持使我能够从诸多日常生活事务中摆脱出来而安心于读书和写作。本文的完成,也算是给他们一个微不足道的报答。

感谢江苏大学材料学院 204A 的各位同门,正是在这样一个氛围良好的集体中,大家彼此宽容,相互鼓励与帮助,才能使我们共同进步。

硕士论文的完成不能成为我止步不前的理由,以后还有更长的路要走,有更多的事情要做,还需要我付出更多的认真和努力。对他人的感谢,也是对自己的鞭策和承诺,但愿今后在工作、生活处于困境中时,仍然能得到亲爱的老师和朋友的帮助,我将永远记住帮助过我的人,并将这种互助友爱的精神一直传递下去。

在学期间发表的学术论文及其他科研成果

- [1] 张毅峰, 王雷刚, 吴君三, 胡振奇. 大直径风塔法兰异型环锻件双件合轧工艺模拟与试验[J]. 热加工工艺, 2010, 39(19):90-93.
- [2] 张毅峰, 王雷刚, 吴君三, 周云鹤, 胡振奇. 大型齿轮毛坯锻造及热处理工艺改进[J]. 锻压技术, 2010, 35(6):6-10.
- [3] 张毅峰, 王雷刚, 吴君三, 雷正印. 大型管板锻件夹杂性裂纹分析及锻造工艺改进[J]. 大型铸锻件, 2010, 5:8-11.
- [4] 张毅峰, 王雷刚, 吴君三, 胡振奇. 高温汽轮机环锻件用 2Cr11MoVNbN 钢的热处理工艺优化[J]. 机械工程材料, 2010,36(4):47-50.
- [5] 潘秋红, 张毅峰, 王雷刚, 黄瑶, 董则防. 冷轧生产工艺对 1100 铝合金板塑性应变比与杯形件制耳率的影响[J]. 机械工程材料, 2009, 33(9):47-50.
- [6]. WANG Lei-gang, ZHANG Yi-feng, WU Jun-san, HU Zhen-qi Simulation and test on rolling pairs of large-diameter wind-tower flange special sectional rings 第二届国际锻压会议(英文版), 2010:69-73.
- [7]. 张毅峰, 王雷刚, 马红, 吴君三 大型非矩形截面环件毛坯尺寸的优化设计 大型铸锻件 (已投)
- [8]. WANG Lei-gang, ZHANG Yi-feng, Ma Hong, WU Jun-san Optimization Design of Large-diameter Non-rectangular Sectional Ring Blank for Ring Rolling. In:ADME 2011 Advanced Design Technology, Guangzhou, China,2011 (已录用)
- [9]. 发明专利: 汽车轮胎模具的导环异形环锻件工装 吴君三, 王雷刚, 胡振奇, 张毅峰 申请号: 200910264723.1
- [10]. 发明专利: 汽车轮毂异形环锻件工装 吴君三, 王雷刚, 胡振奇, 张毅峰 申请号: 200910264724.6
- [11]. 发明专利: 风塔法兰异型环锻件的制造方法 吴君三, 王雷刚, 胡振奇, 张毅峰 申请号: 201010146184.4
- [12]. 发明专利: 风电回转支承环锻件用材料及所述环锻件的制造工艺 吴君三, 王雷刚, 胡振奇, 张毅峰 申请号: 201010146193.3