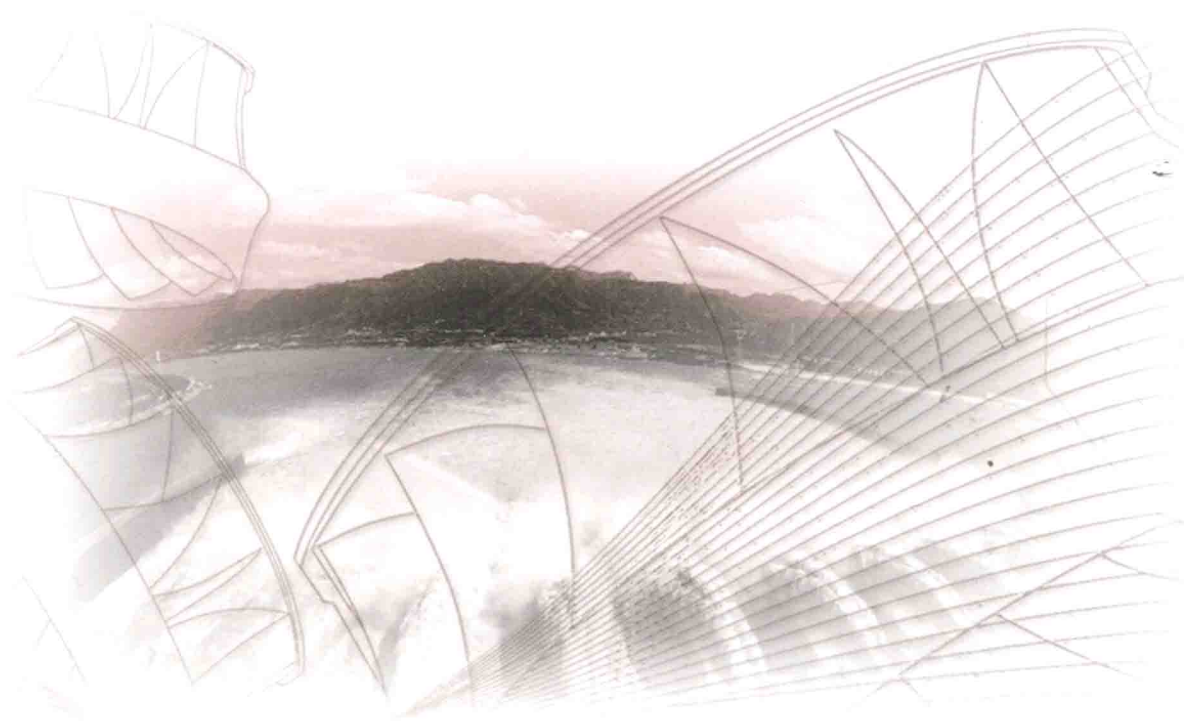


中国科协三峡科技出版资助计划

三峡水轮机 转轮材料与焊接

陆善平 王培 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国科协三峡科技出版资助计划

三峡水轮机 转轮材料与焊接

陆善平 王 培 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

三峡水轮机转轮材料与焊接/ 陆善平, 王培著. —北京: 中国科学技术出版社, 2013. 7

(中国科协三峡科技出版资助计划)

ISBN 978-7-5046-6381-8

I. ①三… II. ①陆… ②王… III. ①水轮机-转轮-材料 ②水轮机-转轮-焊接

IV. ①TK730. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 140442 号

总 策 划 沈爱民 林初学 刘兴平 孙志禹

责任编辑 夏凤金

项 目 策 划 杨书宣 赵崇海

责任校对 孟华英

出 版 人 苏 青

印刷监制 李春利

编辑组组长 吕建华 许 英 赵 晖

责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社

发 行 科学普及出版社发行部

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010-62103349

传 真 010-62103166

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm×1092mm 1/16

字 数 220 千字

印 张 13.75

版 次 2014 年 1 月第 1 版

印 次 2014 年 1 月第 1 次印刷

印 刷 北京华联印刷有限公司

书 号 978-7-5046-6381-8/TK·19

定 价 68.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

总 序

科技是人类智慧的伟大结晶，创新是文明进步的不竭动力。当今世界，科技日益深入影响经济社会发展和人们日常生活，科技创新发展水平深刻反映着一个国家的综合国力和核心竞争力。面对新形势、新要求，我们必须牢牢把握新的科技革命和产业变革机遇，大力实施科教兴国战略和人才强国战略，全面提高自主创新能力。

科技著作是科研成果和自主创新能力的重要体现形式。纵观世界科技发展历史，高水平学术论著的出版常常成为科技进步和科技创新的重要里程碑。1543 年，哥白尼的《天体运行论》在他逝世前夕出版，标志着人类在宇宙认识论上的一次革命，新的科学思想得以传遍欧洲，科学革命的序幕由此拉开。1687 年，牛顿的代表作《自然哲学的数学原理》问世，在物理学、数学、天文学和哲学等领域产生巨大影响，标志着牛顿力学三大定律和万有引力定律的诞生。1789 年，拉瓦锡出版了他的划时代名著《化学纲要》，为使化学确立为一门真正独立的学科奠定了基础，标志着化学新纪元的开端。1873 年，麦克斯韦出版的《论电和磁》标志着电磁场理论的创立，该理论将电学、磁学、光学统一起来，成为 19 世纪物理学发展的最光辉成果。

这些伟大的学术论著凝聚着科学巨匠们的伟大科学思想，标志着不同时代科学技术的革命性进展，成为支撑相应学科发展宽厚、坚实的奠基石。放眼全球，科技论著的出版数量和质量，集中体现了各国科技工作者的原始创新能力，一个国家但凡拥有强大的自主创新能力，无一例外也反映到其出版的科技论著数量、质量和影响力上。出版高水平、高质量的学术著

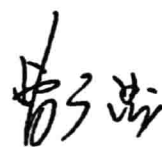
作，成为科技工作者的奋斗目标和出版工作者的不懈追求。

中国科学技术协会是中国科技工作者的群众组织，是党和政府联系科技工作者的桥梁和纽带，在组织开展学术交流、科学普及、人才举荐、决策咨询等方面，具有独特的学科智力优势和组织网络优势。中国长江三峡集团公司是中国特大型国有独资企业，是推动我国经济发展、社会进步、民生改善、科技创新和国家安全的重要力量。2011年12月，中国科学技术协会和中国长江三峡集团公司签订战略合作协议，联合设立“中国科协三峡科技出版资助计划”，资助全国从事基础研究、应用基础研究或技术开发、改造和产品研发的科技工作者出版高水平的科技学术著作，并向45岁以下青年科技工作者、中国青年科技奖获得者和全国百篇优秀博士论文获得者倾斜，重点资助科技人员出版首部学术专著。

我由衷地希望，“中国科协三峡科技出版资助计划”的实施，对更好地聚集原创科研成果，推动国家科技创新和学科发展，促进科技工作者学术成长，繁荣科技出版，打造中国科学技术出版社学术出版品牌，产生积极的、重要的作用。

是为序。

中国长江三峡集团公司董事长



2012年12月

序

我国水能资源蕴含量和经济可开发量均居世界首位，但目前开发利用率较低。举世闻名的三峡水利枢纽的成功建设，强有力地推动了我国水电行业整体技术水平的进步。在三峡电站建设初期，我国尚不能自主生产水轮发电机组中最为关键的部件之一——水轮机转轮。为摆脱大型水轮机转轮铸件依靠进口的被动局面，国务院领导专门针对三峡工程中关键大型铸锻件国产化作出重要指示。随后，在中国长江三峡集团公司的支持下，原机械工业部副部长陆燕荪带领国内“产-学-研-用”各单位通力合作，围绕三峡 700MW 级水轮机转轮铸件的国产化进行了攻关，扭转了我国大型水轮机转轮铸件毛坯长期依赖进口的局面。

2004 年，我和李殿中研究员应邀参加国内首件三峡下环试制总结会，其间注意到三峡水轮机转轮材料虽然是成熟牌号，但是却成为新应用条件下制约三峡水轮机转轮铸件成功制造的障碍之一，必须在新的使用要求下进一步研究材料的标准和制定的依据。回到中科院金属所后，组织了所里的相关人员围绕三峡水轮机转轮铸件材料和相关热加工工艺开展研究工作，并多次应邀在相关讨论会上讲述材料中的合金相、强度和塑性的关系以及我们的最新研究成果。金属所研究团队此后不断深入国内水电生产厂家，了解生产制备中的问题和性能不稳定原因，从生产实际中凝练出一些应用基础问题，认真分析研究和讨论，再将相关研究成果返回到工厂应用。经过多年的系统研究，提出了通过控制材料中的合金相的数量与分布提升材料综合性能的途径，根据三峡转轮性能要求，优化了相关材料成分控制范围，设计了合理的热处理工艺，并开发了高效 TIG 焊接与修复工艺。这些

研究成果在国内多家生产厂家中得到了广泛应用，凡是严格按此工艺进行生产的单位都取得了良好效果，甚至宁夏共享集团生产的 300 余片叶片无一废品，有力地推动了三峡水轮机转轮铸件的国产化，2008 年受陆燕荪副部长和三峡三期工程重大装备制造检查组的委托，牵头起草了《三峡 700MW 级水轮机转轮铸件技术规范》。

本书的两位作者是中科院金属所的两青年科技人员，作为我们团队的骨干研究人员参与了三峡水轮机转轮铸件材料与新型焊接工艺研究，在此过程中不仅有效解决了疑难的工程问题，也在相关材料和焊接工艺的应用基础研究方面取得了一些学术成果。三峡水轮机转轮铸件的国产化进程是重大装备国产化的一个成功范例，许多成果希望与大家共享。此时，正值中国科学技术出版社苏青社长发给我邮件，要我推荐 45 岁以下青年写书，可申请中国科协三峡科技出版资助计划支持，因此我与李殿中商量，建议陆善平和王培把金属所在三峡 700MW 级水轮机转轮铸件用 ZG04Cr13Ni4Mo 低碳马氏体不锈钢材料及焊接方面的研究工作系统总结成书。初稿完成后，邀请我们为此书作序，希望此书的出版能对我国重大装备制造中的材料、工艺及性能的关系问题研究有所借鉴。

李依依 李殿中

2012 年 9 月 5 日于沈阳

前 言

水电是目前最成熟的可再生能源发电技术，在世界范围内得到广泛应用，我国水能资源丰富，但开发利用率较低，目前正在逐步开发过程中。水轮发电机组是水电站最核心的装备之一，而水轮机转轮又是水轮发电机组中技术含量最高的装备之一，其性能要求严格、制造工艺复杂。三峡 700MW 级水轮机转轮直径达 10 米，总重 450 吨左右，是世界目前在运行的尺寸和功率最大的水轮机转轮，随着功率的增大，其对材料性能的要求和加工制造难度也达到了前所未有的高度。为摆脱我国大型水轮机转轮铸件依靠进口的被动局面，国务院领导专门针对三峡工程中关键大型铸锻件国产化做出重要指示。在中国长江三峡集团公司业主的大力支持下，中国科学院金属研究所和相关生产企业紧密合作，从实际生产中提炼问题，围绕三峡水轮机转轮马氏体不锈钢材料和焊接开展了系统的研究，提出通过定量控制材料中的合金相提升材料整体性能、开发了高效 TIG 焊接工艺，同时积极推进相关研究成果在国内主要水电生产厂家应用。经过艰苦努力，彻底扭转了我国大型水轮机转轮铸件毛坯长期依赖国外进口的局面，实现了三峡地下电站水轮机转轮铸钢件中的 85% 由国内制造供货，突破了受制于人的瓶颈，并牵头起草撰写了《三峡 700MW 级水轮机转轮马氏体不锈钢铸件技术规范》。回顾三峡大型水轮机转轮铸件国产化进程，我们更加深刻地理解了李依依院士在参加我国首件三峡下环试制总结会时说“三峡水轮机转轮铸件国产化困难的关键因素之一是我国对相关材料的研究不够”的含义。事实上，除三峡水轮机转轮外，在我国重点工程中关键部件的材料

研究仍有很多不足之处，使得我国在相关产品首件制造和稳定生产方面存在困难。三峡水轮机转轮铸件与之前的中小型水轮机转轮铸件材质相同，均为 Cr13Ni4 低碳马氏体不锈钢，但却提出了比原来中小型水轮机转轮铸件更高的强度和塑韧性要求，需要科技工作者在新的使用要求下，利用新的研究手段重新对传统材料进行研究，更新对其微观组织和力学性能间的认识，精确地控制其关键合金相，实现在不增加成本的前提下提升传统材料的性能；同时，三峡水轮机转轮铸件尺寸和重量巨大，对热加工过程是个挑战，需要开发新型的加工工艺提高转轮的质量和加工效率。

本书着重介绍中国科学院金属研究所在三峡水轮机转轮铸件材料成分优化、显微组织和性能控制方面的研究工作，这些研究作为我国三峡水轮机转轮铸件高水平、稳定生产制造奠定了坚实的基础。同时对三峡水轮机转轮的焊接工艺，尤其是新型高效率 TIG 焊接方法的理论基础进行了介绍，希望能对我国相关领域生产制造水平的提升有所帮助。

全书共分六章，其中第一章介绍了大型水轮机转轮用材料的发展历程、Cr13Ni4 钢的典型特征和大型水轮机转轮制造工艺，由陆善平、王培撰写；第二章介绍了三峡水轮机转轮用 Cr13Ni4 钢中的高温铁素体的作用机制和成分优化，由王培撰写；第三章介绍了决定 Cr13Ni4 钢强度和塑韧性匹配的逆变奥氏体的产生和作用机制，由王培撰写；第四章介绍了三峡水轮机转轮铸件的热处理工艺，由王培、陆善平撰写；第五章介绍了水轮机转轮马氏体不锈钢焊接工艺，由陆善平、董文超、李冬杰撰写；第六章介绍了水轮机转轮马氏体不锈钢焊接接头组织与性能，由陆善平撰写；附录由陆善平、王培整理。本书可以作为大型水轮机转轮生产企业技术人员的参考书籍和材料科学与工程方向研究生、本科生的参考书。

时间仓促，书中难免存在不当之处，恳请各位同行和读者批评指正。

陆善平 王 培
2012 年 8 月于沈阳

目 录

总序	曹广晶
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 大型水轮机转轮用材料	4
1.3 Cr13Ni4-6 型低碳马氏体不锈钢研究进展	4
1.4 大型水轮机转轮铸件的铸造工艺	8
1.5 大型水轮机转轮铸件的热处理工艺	10
1.6 大型水轮机转轮铸件的焊接	11
第 2 章 Cr13Ni4 不锈钢成分优化及高温铁素体控制	14
2.1 Cr13Ni4 马氏体不锈钢的显微组织	14
2.2 Cr13Ni4 钢中的高温铁素体	15
2.3 高温铁素体相对材料力学性能的影响	20
2.4 低碳马氏体钢中高温铁素体相的作用机理	26
2.5 高温铁素体相的控制	30
第 3 章 Cr13Ni4 不锈钢中逆变奥氏体形成与稳定性	36
3.1 引言	36
3.2 逆变奥氏体的表征与定量	40
3.3 低加热速率下逆变奥氏体形成及稳定性	45
3.4 高加热速率下马氏体-奥氏体相变机理	50
3.5 逆变奥氏体在塑性变形中的 TRIP 效应及其对材料性能的影响	55

第 4 章 Cr13Ni4 不锈钢热处理工艺与力学性能	78
4.1 引言	78
4.2 消应力热处理	79
4.3 正火处理	80
4.4 一次回火处理	83
4.5 二次回火处理	87
第 5 章 水轮机转轮马氏体不锈钢焊接工艺	96
5.1 引言	96
5.2 三峡转轮焊接方法与焊接工艺	97
5.3 高效率 TIG 焊接工艺	103
5.4 双层气流保护 TIG 焊接工艺	122
第 6 章 水轮机转轮马氏体不锈钢焊接接头组织与力学性能	141
6.1 引言	141
6.2 马氏体不锈钢 MAG 焊焊接接头组织与性能	142
6.3 马氏体不锈钢双层气流保护 TIG 焊焊接接头组织与性能	150
6.4 焊后回火处理对焊接接头组织与性能的影响	154
参考文献	162
附录	177
附 1 Cr13Ni4 钢热物性参数	177
附 2 Cr13Ni4 马氏体不锈钢金相图谱	180
附 3 Cr13Ni4 钢焊接接头金相图谱	186
附 4 大型混流式水轮机转轮马氏体不锈钢铸件技术条件	196
索引	209

第1章 绪 论

1.1 引言

能源是经济社会发展的物质基础，随着经济和社会的不断发展，我国对能源的需求持续增长。2005 年我国一次能源生产总量达 20.6 亿吨标准煤，消费总量 22.5 亿吨标准煤，分别占全球的 13.7% 和 14.8%，是世界第二大能源生产和消费国。其中煤炭消费占我国一次能源消费的 69%，比世界平均水平高 42 个百分点^[1]。以 2009 年各类型能源在我国发电装机容量和发电量中所占比例数据为例，以煤、石油和天然气等为燃料的火电机组装机容量和发电量分别占到我国总装机容量和发电量的 74.5% 和 81.8%，可以看出，目前以化石燃料为基础的火电仍占据我国电力的主要地位^[2]。然而以煤等化石燃料为主的能源消费结构给我国带来了许多环境和社会问题，经济社会可持续发展受到严峻挑战。因此，2007 年颁布的《可再生能源中长期发展规划》指出要“充分利用水电、沼气、太阳能和地热能等技术成熟、经济性好的可再生能源，加快推进风力发电、生物质发电、太阳能发电的产业化发展，逐步提高优质清洁可再生能源在能源结构中的比例，力争到 2020 年使可再生能源消费量达到能源消费总量的 15%”^[1]。

水电作为目前最成熟的可再生能源发电技术在世界范围内得到广泛应用，满足了目前全世界 20% 以上的电力需求，超过 55 个国家一半以上的电力由水电提供^[3]。我国是世界上水能资源最丰富的国家，根据 2003 年全国水力资源复查成果显示，我国水能资源技术可开发装机容量为 5.4 亿 kW，年发电量 2.47 万亿 kW·h；经济可开发装机容量为 4 亿 kW，年发电量 1.75 万亿 kW·h^[1,3]。虽然我国水电资源丰富，但目前开发程度仅为 31%，远低于发达国家的平均水平。因此，大力发展水电是我国能源政策的重要内容，水电发展具有广阔的前景和巨大的发展潜力。根据国家《可再生能源中长期发展规划》，2020 年全国水电装机容量将达到 3 亿 kW，平均每年新增 1200 万 kW^[1,3]。

我国水能资源的 60% 集中在西部的长江、金沙江、澜沧江、怒江和黄河上的分布特点^[1]在给水电集中开发和规模外送创造良好条件的同时，也促成了我国水电站的发电机组以大（巨）型机组为主的局面，其中在宜昌的长江三峡水电站装备的 700MW 级水电机组是典型代表。

在水电站中，通过水轮发电机组的运转，水库中的水能转变成水轮机的动能，再转变成发电机发出的电能，因此水轮发电机组是水电站最核心的装备之一。图 1.1 为混流式水轮发电机组的示意图，通常水轮发电机组由水轮机、发电机、励磁设备、调

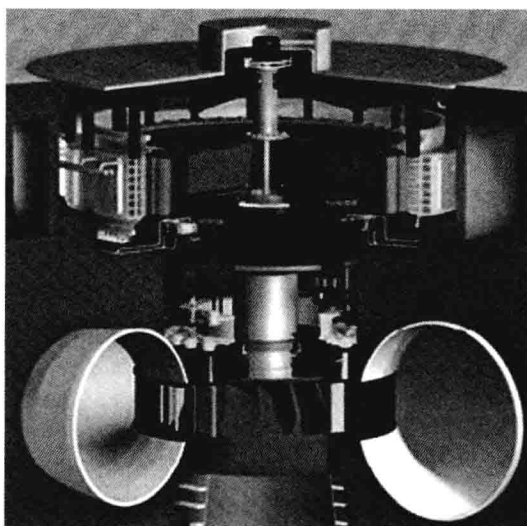


图 1.1 混流式水轮发电机组示意图

速器、永磁机等组成，这其中又以水轮机和发电机为核心部件。从设计和制造角度讲，发电机推力轴承和水轮机转轮是设计和制造难度最大的部件^[4]。以我国三峡电站的 700MW 级混流式巨型水轮机组为例，其转轮由一个上冠、一个下环和 13 ~ 15 个“X”型叶片组焊而成（如图 1.2 所示）。转轮直径达到 10m 以上，重达 450t 左右。水轮机转轮在运行过程中需要承受 61 ~ 113m 高水头的有压水流的冲击和泥沙的冲蚀，并以 75r/min 的转速带动发电机转子运转发电^[4]。如此苛刻

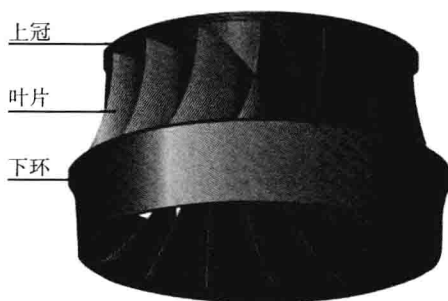


图 1.2 混流式水轮机转轮示意图

的运行条件使得设计方对水轮机转轮性能的要求非常严格。相对于原有的中小型水轮机转轮，三峡水轮机转轮同时提高了转轮铸件材料的强度和塑韧性指标要求。巨大的尺寸和极高的性能要求使得巨型水轮机组的稳定生产制造碰到了极大的难度。由于国内在此类大型铸件生产和相关材料研制上基础较为薄弱，三峡地上左右岸 26 台机组转轮（左岸 14 台机组，右岸 12 台机组）中无一套完整的国产铸件，基本依赖进口。与大型水轮机转轮铸件难以国产化困境相对的是，随着溪洛渡、向家坝、乌东德、白鹤滩等电站的开工建设，我国规划在 2020 年前将投产单机容量在 700 ~ 800MW 的混流机组约 150 台^[5]，需要大量的水轮机转轮铸件。为摆脱我国水电发展受制于人的局面，必须对巨型水轮机转轮的材料和制造工艺进行系统研究，实现水轮机转轮铸件的国产化。

与中小型水轮机转轮可整体铸造成型不同，混流式大型水轮机转轮通常将上冠、下环和叶片分别铸造、热处理、加工后组焊到一起。这是因为随着水轮机功率的增大，水轮机转轮的直径已超过 10m，总重达 400t 以上，以目前的铸造装备能力很难实现大型转轮整体铸造；另外，新材料和焊接新技术的应用以及完善的无损检测手段也推动了焊接转轮的应用。目前一台典型的铸焊结构的大型混流式水轮机转轮的生产工序包含了冶炼、铸造、热处理、机加工、组焊和焊后热处理等多个工序，图 1.3 为其生产流程示意图。转轮最终能否成功制造一方面取决于热加工工艺能否保证精确成型，另一方面取决于转轮性能能否达到设计和使用要求，其中转轮最终的性能主要受材料和制造工艺的影响，因此，水轮机转轮材料及焊接研究是铸焊式大型水轮机转轮能否制造成功的基础。

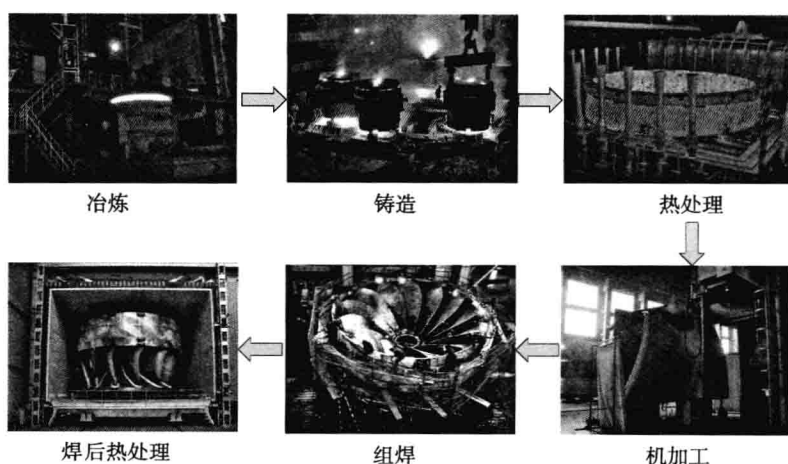


图 1.3 大型混流式水轮机转轮生产流程图

1.2 大型水轮机转轮用材料

众所周知,零件(部件)的服役环境和性能要求决定了材料的选择。大型水轮机转轮在服役过程中,受高速水流冲击和水中泥沙的冲蚀和磨损以及自身高速转动带来的非平衡振动,对材料的综合机械性能、抗气蚀性以及抗磨损性能要求较高。除使用性能外,由于大型水轮机转轮制造过程复杂,材料的热加工性能也是水轮机转轮选材时必须考虑的因素。通常情况下,要求水轮机转轮材料具有良好的铸造性能以保证铸件铸造成型,同时还要求其具有良好的焊接性能,以保证最终的组焊工序和水轮机使役过程中的焊补工作顺利实施。

根据上述要求,水轮机转轮铸件材料的选择大致经历了从最初的灰铸铁到普碳钢、低合金钢再到高合金钢的发展过程。早期转轮材料曾用铸铁,20世纪30年代起逐渐选用碳钢、合金钢,自20世纪60年代以来开始选用不锈钢^[6-9]。例如我国的盐窝峡电站的转轮即由ZG30碳钢整体铸造而成,然而由于碳钢的抗磨损、抗气蚀性能不佳,往往需要在转轮最易受到磨损的叶片等部位堆焊耐磨的不锈钢材料以提高转轮的性能。随后ZG20SiMn等低碳钢被苏联广泛应用于大中型水轮机转轮铸件上,我国的很多电站如刘家峡电站等水轮机转轮也使用了这种材料。但在水轮机严峻的运行条件下,从强度、韧性、抗腐蚀性、抗气蚀性和抗泥沙磨损方面考虑,水轮机转轮铸件逐渐采用马氏体或奥氏体不锈钢制造。在世界范围内0Cr17Ni4Mo, 0Cr12Ni3Cu, 1Cr18Ni3Mn3Cu2, 1Cr18Ni9Ti, 1Cr13, 2Cr13等钢种都曾被选为水轮机转轮铸件材料,但最终从材料的使用性能和经济性上考虑,Cr13型的马氏体不锈钢逐渐在水轮机转轮制造中得到广泛应用。由于水轮机转轮制造过程中需要大量的焊接工作,所以传统的1Cr13马氏体不锈钢由于碳当量较高,焊接性较差而不太适用,但在其基础上通过加Ni替代碳和添加少量Mo来改善钢的抗回火脆性而发展出的低碳Cr13-Ni(Mo)系列钢种得到广泛应用。其中典型的钢种有0Cr13Ni4、0Cr13Ni5、0Cr13Ni6和1Cr13Ni1,由于1Cr13Ni1焊接性较差,在铸焊转轮中较少应用。而Cr13Ni4-6型马氏体不锈钢具有良好的铸造和焊接性、优良的力学性能和优异的服役性能,逐渐取代了低合金钢,成为目前制造大型水轮机转轮的首选材料。

1.3 Cr13Ni4-6型低碳马氏体不锈钢研究进展

Cr13Ni4型低碳马氏体不锈钢于1959年底由瑞士GF(George Fischer)公司最先发明,从最初实验室发明至工业成功应用大致经历了以下几个阶段^[10]:

1959年,GF公司在实验室偶然发现 $w(\text{Cr}) = 13\%$, $w(\text{Ni}) = 4\%$ 钢具有强度和韧性的良好配合;

1960 ~ 1961 年, 优化材料成分, 测试力学性能并在工业上试用;

1962 年, 制造出第一台强度级别为 950MPa 的压缩机叶轮;

1964 年, 制造出第一台强度级别为 800MPa 的冲击式水轮机的转轮。

与此同时, 瑞典最先取得了这种钢的专利权, 并公布了该钢种的化学成分范围 (wt. %) 为 Cr=11.0 ~ 14.0, Ni=4.0 ~ 8.0, C=0.03 ~ 0.25, Mn=0.25 ~ 2.00, Si=0.10 ~ 0.70, 余量为铁^[11]。

该钢种与传统的 Cr13 马氏体不锈钢相比, 由于碳当量降低, 可焊性得到改善, 大大降低了焊前预热温度和焊后热处理的要求; 与传统的奥氏体不锈钢相比, 其强度性能明显改善, 以此替代奥氏体不锈钢可以显著降低部件的尺寸和重量。由于具有优良的强度、塑韧性、焊接性及抗腐蚀性能, 该钢种一经发明便得到了广泛的应用, 在铸造界享有“铸造者梦寐以求的成功之举”的说法^[10, 12-15]。被广泛应用到水轮机转轮、阀体、泵壳、叶轮、电站压力管道、海洋石油和天然气平台以及石化工业上^[16]。

国外学者从 20 世纪 60 年代开始对该钢种展开持续研究, 不断优化材料成分和显微组织, 并在各国逐渐形成了标准牌号, 主要工业发达国家和我国规定该钢种的标准如表 1.1 所示。在三峡水轮机转轮铸件成功制造后, 根据相关单位研究结果, 在 GB 6967 标准中添加了 ZG04Cr13Ni4Mo 材料牌号, 并按照三峡要求明确了其性能指标。由表 1.1 可以看出, 各国对该钢种的化学成分范围限定基本相同, 相对于宽泛的初始专利成分范围, 为提高焊接性, 各标准限定碳含量在较低的水平; 同时添加了不超过 1.0% 的 Mo。考虑到各国牌号间的差别及三峡水轮机转轮使用材料的特殊性能要求有别于各国标准, 本书中将该钢种称为“Cr13Ni4 低碳马氏体不锈钢”。

表 1.1 各国 Cr13Ni4 系列马氏体不锈钢的标准牌号及成分列表 (wt. %)

国家	牌号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
美国 ^[17]	CA6NM	≤0.06	≤1.0	≤1.0	≤0.03	≤0.04	11.5 ~ 14.0	3.5 ~ 4.5	0.4 ~ 1.0
日本 ^[18]	SCS6	≤0.06	≤1.0	≤1.0	≤0.03	≤0.04	11.5 ~ 14.0	3.5 ~ 4.5	0.4 ~ 1.0
英国 ^[19]	425C12	≤0.06	≤1.0	≤1.0	≤0.03	≤0.04	11.5 ~ 14.0	3.5 ~ 4.5	0.4 ~ 1.0
德国 ^[20]	GX3CrNi13-4	≤0.05	≤1.0	≤1.0	≤0.015	≤0.035	12.0 ~ 13.5	3.5 ~ 5.0	≤0.7
	GX4CrNi13-4	≤0.06	≤1.0	≤1.0	≤0.025	≤0.035	12.0 ~ 13.5	3.5 ~ 5.0	≤0.7
韩国 ^[21]	SCS6	≤0.06	≤1.0	≤1.0	≤0.03	≤0.04	11.5 ~ 14.0	3.5 ~ 4.5	0.4 ~ 1.0
中国 ^[22]	ZG06Cr13Ni4Mo	≤0.06	≤1.0	≤1.0	≤0.03	≤0.035	11.5 ~ 13.5	3.5 ~ 5.0	0.4 ~ 1.0

虽然 Cr13Ni4 钢种的最初发明专利指出该钢种具有良好的焊接性、抗腐蚀性和强韧

性,但在该钢种出现后的最初几年里由于冶炼设备落后,这些优势并未完全体现出来,研究者也未对其进行深入研究,只是从应用的角度将其与传统的 CA15 马氏体不锈钢进行了对比实验^[12-14, 23],发现该钢种与 CA15 钢相比加工性能和韧塑性显著改善。进入 20 世纪 70 年代中后期,氩氧脱碳 (Argon Oxygen Decarburization, AOD) 技术的出现,使准确控制钢种合金元素含量、降低钢液中的夹杂物成为可能,促进了对该钢种中各合金元素物理冶金作用的研究。人们发现,将该钢种中的碳含量降至 0.03% 以下,硫降至 0.004% 以下,同时尽量降低其中的氮、氢、氧等气体元素含量可以改善该材料的冲击韧性和大截面均匀性能;另外最为重要的是,发现当 Mo 含量超过 0.5% 时可有效消除该材料的回火脆性^[10]。同时由于 Mo 具有提高不锈钢材料抗点蚀的功能,因此相对于初始专利,各国标准中都增加了对 Mo 添加量的限定。

在 Cr13Ni4 钢中化学元素基本确定后,以日本的 Iwabuchi Yoshitaka 为代表的国外学者结合当时该钢种的实际应用环境对 Cr13-Ni 系列的不锈钢合金的设计思想、主要元素作用、微观组织结构及性能、热处理制度进行了广泛的研究^[15, 24-38]。

在材料合金元素的作用方面, Gysel 指出在铸造组织中 Cr13Ni4 有时会含有高温铁素体相,该相的出现可能会影响材料的韧性,而通过调整材料中的 Ni、Cr 含量可以消除高温铁素体^[10]; Iwabuchi Yoshitaka 在 1982 年指出, Cr13Ni4 钢用于厚大断面铸件时,由于冷速过慢可能会在原奥氏体晶界或高温铁素体与基体界面处出现 $M_{23}C_6$ 碳化物,从而显著降低材料的冲击性能,而通过降低 Si 和 C,增加 Mo 可以减少碳化物的析出^[15];同时众多研究者指出当材料中的 Ni 含量超过 3.5% 时,在一定温度区间内回火处理后材料中会产生弥散分布的奥氏体,改善材料韧性,且奥氏体的含量随着 Ni 含量的增加而增加^[15, 23, 26-28, 30, 32]。

Cr13Ni4 材料微观组织控制和热处理工艺设计是重点研究内容,但由于使用要求不同,所以并未有统一的热处理工艺出现。通常为提高了该材料的韧性,该钢种在淬火(由于该钢种淬透性良好,在大型铸件空冷条件下仍能得到 100% 马氏体组织,因此又称此过程为正火处理)加回火状态下使用。该钢种淬透性很好,在成分合理的情况下正火后不含残余奥氏体,而经过合适的两相区回火处理后,会有一部分奥氏体(通常称之为逆变奥氏体)存留至室温。已有的研究工作主要集中在热处理制度和材料性能对应关系上,而对于逆变奥氏体出现和稳定的原因及其形貌特征鲜有细致的研究^[34-36]。同时对于逆变奥氏体的作用机制存在不同观点,多数学者认为,作为软化相,奥氏体的出现能明显改善材料的韧性^[16, 26, 28, 30, 32, 33, 35],然而也有学者指出,由于逆变奥氏体中碳含量较高容易形成碳化物从而导致材料出现沿晶断裂,从而恶化材料的韧性^[15, 29, 31]。

Bilmes 等研究者在 2000 年左右开展了 Cr13Ni4 材料的焊接工艺和焊后热处理工艺的系列研究。其研究结果表明, Cr13Ni4 母材具有良好的焊接性,焊前仅需进行较低温