

特別工程材料集

PARTICULAR ENGINEERING MATERIALS COLLECTION

鉄鋼系 鋁系

冶金技術研究所編

TG457
28



00010220

特种 工程材料 焊接

顾钰熹 编著



辽宁科学技术出版社

· 沈 阳 ·



C0487090

图书在版编目(CIP)数据

特种工程材料焊接/顾钰熹编著. - 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1998. 8

ISBN 7-5381-2506-X

I. 特… II. 顾… III. 工程材料, 特种-焊接工艺
IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 03581 号

辽宁科学技术出版社出版

(沈阳市和平区北一马路 108 号 邮政编码 110001)

新华书店北京发行所发行 沈阳 7212 工厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: $51\frac{1}{4}$ 字数: 1,100,000 插页 4

1998 年 8 月第 1 版 1998 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 马 骏 版式设计: 于 浪

封面设计: 邹君文 责任校对: 茹 淑

印数: 1-1000 定价: 98.00 元

前言

QIAN YAN

随着现代工业生产的飞速发展,在特种工程条件(高温、低温、介质腐蚀、大气空间、耐候、耐石油海水腐蚀、航空航天、核能工程等)下各种材料焊接结构的应用越来越多,对焊接接头质量及结构性能的要求也越来越高的情况下,一般常规工程条件下通用工程材料的焊接技术已满足不了当前高新技术发展的需要。为了适应这些特种材料焊接技术的发展,作者在广泛收集国内外近些年的焊接科技成果和生产技术,结合多年的专业教学、科研和生产经验,编著了《特种工程材料焊接》一书,补充了目前国内焊接科技书籍中的不足,为从事焊接专业教学、科研和生产的工程技术人员提供参考材料,还可以为大专院校焊接专业师生提供学习参考书。

本书由顾钰熹编著。参加编写工作的有:徐国建、郭翼清、葛景岩、王文全、王中美、何连荣、顾可民、胡传顺、马一民、顾春民等同志。在编写过程中得到中国科学院金属研究所郭义研究员提供技术资料和照片,沈阳工业大学印刷厂姜明同志复制照片给予了大力帮助。全书稿中的插图得到李波、刘树同、纪国生、蒋志意、王颖、陈凤芹等同志的帮助,在此表示衷心感谢。

本书采取以特种工程条件下所需各种材料的焊接技术为专题的编写方法,而舍去一般通用工业用钢常规焊接工艺内容,这是一种新的尝试,由于编者水平有限,收集和选用资料难免疏漏,编写上也可能有错误之处,希望广大读者批评和指正。

编 著 者

1996年11月

目 录

MULU

绪 论	(1)
第一章 耐热钢的焊接	(5)
第一节 耐热钢的种类和性能	(5)
第二节 珠光体耐热钢的焊接	(8)
第三节 马氏体耐热钢的焊接	(22)
第四节 铁素体耐热钢的焊接	(28)
第五节 奥氏体耐热不锈钢的焊接	(31)
第二章 低温钢的焊接	(48)
第一节 低温钢的种类和性能	(48)
第二节 低温钢的焊接性	(54)
第三节 低温钢的焊接工艺	(57)
第三章 耐蚀钢的焊接	(72)
第一节 概述	(72)
第二节 耐候钢的焊接	(72)
第三节 耐海水用钢的焊接	(85)
第四节 耐石油腐蚀用钢的焊接	(91)
第四章 镀层钢和渗铝钢的焊接	(116)
第一节 镀锌钢的焊接	(116)
第二节 镀铝钢的焊接	(139)
第三节 渗铝钢的焊接	(145)
第四节 螺母与低碳钢、镀锌、镀铝薄板的凸焊	(151)
第五节 镀铝钢板的点焊	(156)

第五章 钛及钛合金的焊接	(160)
第一节 钛及钛合金的种类及其特性	(160)
第二节 钛及钛合金的焊接性	(164)
第三节 钛及钛合金的焊接工艺	(173)
第六章 镍及镍基合金的焊接	(197)
第一节 镍及镍基合金种类及特性	(197)
第二节 镍及镍基合金焊接性分析	(214)
第三节 镍及镍合金焊接工艺	(226)
第七章 镁及镁合金的焊接	(249)
第一节 镁及镁合金的基本性能	(249)
第二节 镁及镁合金的焊接性	(254)
第三节 镁及镁合金的焊接工艺	(257)
第四节 镁及镁合金的氩弧焊	(263)
第五节 镁及镁合金的电阻点焊	(270)
第六节 镁及镁合金的其它焊接方法	(271)
第七节 镁及镁合金焊接缺陷及其防止	(277)
第八章 锆及锆合金的焊接	(280)
第一节 锆及锆合金种类及其性能	(280)
第二节 锆及锆合金的焊接性	(283)
第三节 锆及锆合金的焊接工艺	(285)
第九章 铍及铍合金的焊接	(297)
第一节 铍及铍合金的性能简介	(297)
第二节 铍及铍合金的焊接性	(300)
第三节 铍及铍合金的焊接工艺	(302)
第十章 钨、钼、铌、钽、钒、钎、钨及其合金的焊接	(308)
第一节 钨及钨合金的焊接	(308)
第二节 钼及钼合金的焊接	(319)
第三节 铌及铌合金的焊接	(337)
第四节 钽及钽合金的焊接	(349)
第五节 钒及钒合金的焊接	(359)
第六节 钎及钎合金的焊接	(364)

第七节	铬及铬合金的焊接	(369)
第十一章	金、银、铂、钯、铀、铍及其合金的焊接	(375)
第一节	金及金合金的焊接	(375)
第二节	银及银合金的焊接	(380)
第三节	铂、钯及其合金的焊接	(386)
第四节	铀及铀合金的焊接	(394)
第五节	铍及铍合金的焊接	(400)
第十二章	铅及铅合金的焊接	(407)
第一节	铅及铅合金的性能及其应用	(407)
第二节	铅及铅合金的焊接性	(411)
第三节	铅及铅合金的焊接工艺	(412)
第四节	铅衬里焊接工艺	(424)
第五节	搪铅焊接工艺	(427)
第十三章	塑料的焊接	(431)
第一节	塑料的种类及其应用	(431)
第二节	塑料焊接接头的形成	(434)
第三节	塑料的焊接方法	(435)
第十四章	异种金属材料的焊接	(456)
第一节	概述	(456)
第二节	异种钢的焊接	(471)
第三节	钢与铸铁的焊接	(515)
第四节	异种有色金属的焊接	(536)
第五节	钢与有色金属的焊接	(587)
第十五章	非金属材料与金属的焊接	(641)
第一节	陶瓷与金属的焊接	(641)
第二节	玻璃与金属的焊接	(730)
第三节	石墨与金属的焊接	(777)
第四节	半导体材料与金属的焊接	(786)
第五节	铁氧体材料与金属的焊接	(790)
附表 i	真空器件钎焊所采用的钎料	(793)
附表 2	各种实用烧结金属粉末法金属配方及工艺	(801)

绪论

XU LUN

焊接技术作为工程材料的一种永久性连接方法,自18世纪末期发明熔化焊和压焊以来,已经历了近百年的发展过程,直到如今它已成为工业生产中高质量、高效率的一种不可缺少的工程材料加工工艺。我国自建国后的仅几十年中,随着不同时期的工业建设进展,焊接技术也获得了飞快地发展。在常规工程条件下,一般通用性工业用钢的焊接结构,已广泛地应用于重型机械、轻工机械、冶金矿山机械、建筑、造船、桥梁、机车车辆、汽车、电力、石油化工、军工等各领域,其生产工艺基本达到了国际80年代水平。在某些焊接科研成果及生产新材料、新工艺已达到了世界先进水平。

现代的焊接技术在工业生产中已起着举足轻重的作用,为世界各国所重视。我国目前以焊接为主导生产的大型骨干企业已达700~800多厂家,而中小型企业也近200多万厂家,拥有大批培训有素的生产技术工人和焊接专业高级工程技术人员。仅就大型骨干企业来说,通过六五、七五、八五的技术改造和企业管理的全面改革开放,在从国外引进先进设备和生产工艺的影响下,使这些企业的生产水平有了很大的提高。在重型机械、冶金矿山机械、工程机械、电站锅炉压力容器、石油化工、机车车辆、汽车等行业中普遍地采用了数控切割技术、埋弧自动焊、电渣焊、CO₂气体保护焊、TIG焊、MIG焊、电阻焊和钎焊等焊接方法并具有成套的焊接工艺装备。尤其是汽车生产中已采用了CO₂气体保护焊、TIG焊、MIG焊等焊接机器人、电阻焊机器人和自动生产线,大大地提高了焊接质量和生产效率,焊接机械化、自动化水平得到了显著提高。据1988年的不完全统计,仅就这些大型骨干企业,其焊接机械化、自动化水平已达到总焊接工作量的35%~45%的水平。同时还有不少企业取得美国ASME制造许可证,为我国焊接结构产品打入世界市场奠定了一定的基础^[1,2,3,4]。

众所周知,与焊接生产技术发展相适应的焊接材料(焊条、焊丝、焊剂、熔剂和钎料等)和焊接设备的制造也将随之迅速地发展起来。目前全国焊条生产厂已近200多家,机械工业部定点生产厂就有52家,年生产能力可达66万吨~70万吨,270多种产品系列,其中有44个厂家已取得中国船舶检验局的认可;有37家通过了外国的船级社的认可;有许多焊接材料厂家向国外出口,如朝鲜、韩国、印尼、新加坡等东南亚国家。还有的焊条厂引进了现代化设备和生产线,如焊条涂压机、药芯焊丝生产设备、焊

剂(烧结)生产新技术,进一步提高了产品质量和生产能力,同时也扩大了特种焊条的研制和应用。近些年来,北京钢铁研究院、哈尔滨焊接研究所已研制出镍基合金特种焊条,作者为沈阳地区某中外合资的特种焊接材料公司研制和生产了镍基合金特种焊条(如 ENiCrFe-1-15, ENiCrFe-3-15 和 Inconel182 等)、不锈钢耐热焊条(如 E1-13-15, E1-16-25Mo6N-15, E00-19-10-16, E0018-12Mo2-16 等)和抗磨粒磨损堆焊条(如 Fe-Cr-Mo-B 等)等多种焊条,为出口进入国际市场创造了条件,同时也补充了国内的不足^[5, 6, 10, 11]。

我国的焊接设备制造的发展也很快,日前全国已有近 1000 多厂家,生产出各种焊机,在 1990 年获国家规划定点生产厂家就有 37 个厂家,总的产品有 40 多个系列,486 个规格产品,而且已研制成功了焊接机器人。生产实践表明,焊接机器人的应用,是焊接过程高度自动化的重要标志。我国在这个领域的研究工作起步较晚,现有焊接机器人仅 500 多台,基本上是引进的,多用于汽车工业,应用范围小。目前美国焊接机器人生产与应用是处于世界领先地位,而日本也是拥有量较多的国家,现有 135 个厂家从事机械手和机器人的生产。1989 年时,共生产焊接机器人 13977 台,其中点焊机器人 4853 台,弧焊机器人 9123 台;德国 1988 年时,拥有焊接机器人 6950 台,其中弧焊机器人 3250 台,电阻焊机器人 3700 台。还有瑞典、法国等其它工业发达国家也都拥有较多的焊接机器人。从上述数据不难看出,我国尽管暂时拥有机器人数量不多,但也说明了我国将会不断地增加质量更高的焊接机器人数量,迅速地提高焊接生产的机械化和自动化水平^[7, 8, 9, 12]。

随着整体工业生产不断地发展,在不同工程领域的焊接结构所需各种材料可焊性和焊接生产工艺的研究和应用也是同步发展的。在一般常规工程材料焊接中,不仅解决了碳素结构钢、低合金高强度结构钢、不锈钢、铸铁、铝合金、铜合金等材料的焊接技术问题,而且制定出一套较为成熟地焊接、生产工艺规程。对一些特种工程条件(如高温、低温,酸、碱腐蚀,大气腐蚀,石油化工,海洋工程,航空航天、核能工程等)下所应用的各种材料焊接技术也获得了相应的发展。尤其是异种金属的焊接和非金属与金属的焊接技术,近年来也得到了进一步扩大应用^[3, 5]。

综上所述,我国焊接科技和生产技术水平,虽然有如上述的进展,但要整体生产水平来看与现代工业发达国家相比,还存在着较大的差距。尤其在特种工程条件下所需材料的焊接技术,相比之下差距就更大。

首先是我国的焊接结构应用不广,数量不多。在焊接结构向大型化、重型化、高参数、高精度方向发展的趋势下与国外工业发达国家相比,就更显得落后。以焊接结构用钢占钢总产量的比例为标准时,工业发达国家焊接结构用钢量占其钢总产量的 50%~60%,而我国近些年来焊接结构的应用有了大幅度的增长,但产量不高,仅占钢产量的 30%。所以,今后应当扩大焊接结构应用范围,提高焊接结构的产量。

其次是焊接生产机械化和自动化水平低。国外很重视并已达到较高的水平。按熔化焊来计算时,目前日本为 67%,德国为 80%,美国为 56%,原苏联为 40%,而我国还不到 20%。其主要原因是我国焊接生产主要还靠手工电弧焊,自动化水平高的气体保

护焊和埋弧自动焊应用少;从手工电弧焊机占总焊机数的比例来看,我国占84.3%,而美国占65%,日本占62% (1987年的统计);从焊接材料产量的比例来看,也能说明问题,日本1990年时,焊条的产量只占焊接材料总产量的25%;英国占38.6%,德国和法国分别各占28.4%和35.7%,我国焊条产量占91.7% (1991年)。从焊接生产工艺装备水平来看,我国近些年来,生产了成套的焊接工艺装备和焊接生产线,也有的厂家从国外引进了自动化水平较高的焊接辅助装置,对提高焊接质量和生产效率有了很大的提高。但仍有很多生产厂家没有采用工艺装备,有的工厂虽也制造了一些工艺装置和机具,但不配套,不够完善、自动化水平低,直接影响到焊接质量和自动化程度的提高。

计算机控制系统在焊接生产工艺中的应用,在国外已比较普遍,除用于焊接过程规范参数控制外,还可用于整条生产线、焊机的群控。它还可以根据材料厚度自动选择并预置焊接规范,对焊接过程实现自适应控制、最佳控制以及智能控制等。日本日立公司生产的微处理控制的 CO_2 气体保护焊机,具有电流、电压、弧坑处理、焊丝直径选择等16种规范储存和再现功能。美、意、法等国家生产了许多由计算机控制的焊机和焊接生产线,而且建立起焊接专家系统,如焊接工艺规范制定专家系统;焊接方法、焊接材料、焊接设备选择专家系统等。我国,研究计算机在焊接中实现控制的工作起步较晚。经六五、七五、八五期间的研制,取得了很好进展,但还有许多没有达到生产实用的水平,这与国外相比,相差甚远,也是今后提高焊接技术水平和实现焊接机械化、自动化的关键课题之一^[2-5, 12]。

再就是我国目前在特种工程条件(如高温、低温、石油化工、海洋工程、核能工程、航空航天和酸碱腐蚀等)下所用特种工程材料(如耐高温、耐低温、耐大气腐蚀、耐石油海水腐蚀等材料和难熔、稀有、活性、工程陶瓷、石墨、玻璃以及核能工程材料等)的焊接领域,无论是焊接基础和焊接工艺水平以及实际应用范围均满足不了目前工业生产发展的需要。更值得提出的是,能得以充分发挥焊接结构使用性能、节省材料、降低成本的异种材料的焊接应用和焊接工艺水平,近些年来虽然也有很大的进展,但就总体来看,仍落后于美、日、德等国家,同时,国内有关这方面的焊接参考科技书和专业期刊均局限于一般常规工业用钢的焊接,而且具有很大的重复性。对于一些现代新材料和一些特种工程材料焊接内容则很少见到,尤其是异种材料的焊接内容则更少。在80年代虽然也出版了一部工程陶瓷与金属焊接的参考书,但满足不了当前焊接高新技术发展的需要。尽管也有些刊物和有的科技书内,报道出某种新材料焊接科研成果和生产技术,但往往也都是较为零散,不系统,具有一定的局限性,不易查阅,起不到应有的参考作用。

鉴于上述焊接生产技术发展的现状,为了进一步促进我国焊接技术的全面发展和扩大特种工程材料焊接的应用范围,以适应于目前工业生产向高科技发展的需要,不再重复一般工业用钢焊接工艺内容。将一些新型材料和特种工程材料焊接工艺编著成册,以弥补国内焊接科技书中的不足,为从事焊接科学研究、专业教学和生产的工程技术人员提供参考,还可作为大专院校焊接专业师生参考书。

本书共分为 15 章,大体上可分为四个部分:一是特种钢的焊接(一~四章),如耐热钢、低温用钢、耐候钢、耐石油海水腐蚀钢、渗铝钢、镀铝及镀锌钢等;二是有色、稀有、活性、难熔、贵重等金属及其合金的焊接(五~十二章),如钛、镁、锆、钽、铍、镍、铅、钨、钼、铌、钒、铬、锌、金、银、铂、钯、铪等及其合金;三是塑料的焊接(十三章);四是异种材料的焊接(十四~十五章),主要有异种钢、异种有色金属、钢与有色金属、非金属材料与金属材料的焊接,如陶瓷、玻璃、石墨、半导体和铁氧体等与金属材料的焊接。

参 考 文 献

- [1]张文钺:《2000 年焊接技术的展望》,
《中国机械工程学会三十五周年年会论文集》,1986。
- [2]庄丽君、陈丙森:《中国焊接界正在走向世界》
《中国机械工程》,第 6 期,1991。
- [3]宋天虎:《焊接技术的发展与未来》,
《中国机械工程》,第 3 期,1994。
- [4]关桥:《焊接学会 30 年》,
《焊接学会 30 周年纪念文集》,1992。
- [5]宋天虎:《我国焊接生产技术水平现状及今后的发展》,
《中国焊接》焊接学会 30 周年纪念文集,1992。
- [6]果卓新、张文钺:《21 世纪焊接材料研究和发展的趋势》,
《中国机械工程》,第 1 期,1993。
- [7]李建国等:《我国焊接设备生产的现状与发展方向》,
《中国机械工程》,第 4 期,1990。
- [8]松绳朗:《溶接研究の国際潮流》,《溶接技術》,1990。
- [9]中尾嘉邦:《大学における溶接研究、教育の現状と展望》,
《溶接技術》,1990。
- [10]溶接学会編集委員会:《日本における溶接の展望》,
《溶接学会誌》,第 5 期,1989。
- [11]李春范:《我国焊接材料发展现状》《焊接》第 1 期,1997。
- [12]林尚扬:《我国机械制造业中焊接机器人的应用现状及发展趋势》,《第八次全国焊接会议论文集》第 1 册,机械工业出版社 1997。

第一节 耐热钢的种类和性能

动力和能源工程中广泛地使用各种耐热钢。例如锅炉、汽轮机、炼油设备、核容器以及石油化工等设备。这些设备中的许多零部件是处于高温、高压和强腐蚀介质中长期工作的条件下。

耐热钢是指钢在高温条件下既具有热稳定性，又具有热强性的钢材。热稳定性是指钢材在高温条件下能保持化学稳定性（耐腐蚀、不氧化）。热强性是指钢材在高温条件下具有足够的强度。钢材的耐热性能主要是通过合金元素来保证的。最常用的合金化元素有铬、钼、钨、钒、钛、铌、钽、硅和稀土元素。钢中加入的合金元素的种类和数量不同，钢的组织状态和耐热性能就不一样。

根据小截面试样正火后的金相组织，耐热钢可分为珠光体耐热钢、奥氏体耐热钢、铁素体耐热钢和马氏体耐热钢。

一、珠光体耐热钢（包括贝氏体耐热钢）^[1, 2, 3]

这类钢的合金元素总含量一般不超过5%~7%，正火后得到珠光体组织，在500℃~600℃时具有良好的热强性，冷加工、热加工和焊接性能也良好，价格比较便宜。因此这种钢被广泛地应用，其中使用最多的是铬钼钢和铬钼钒钢。这类钢的含Cr量一般为0.5%~9%，含Mo量一般为0.5%~1%。随着Cr和Mo含量的增加，这类钢的高温强度、抗氧化性能和抗硫化物腐蚀性能也随之提高。另外，这类钢中加入少量的合金元素V、W、Ti、Nb等，可进一步提高热强性。常用珠光体耐热钢及其化学成分如表1-1所示。表中两种含钨钢已不是纯珠光体钢，这种钢正火处理后的组织结构为贝氏体，回火后的组织结构为铁素体和碳化物。表1-2是常用珠光体耐热钢的常温机械性能。

表 1-1 常用珠光体耐热钢及其化学成分(%)

钢 号	C	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	其 它
12CrMo	≤0.15	0.4~0.7	0.2~0.4	0.4~0.7	0.4~0.55	—	—	—
15CrMo	0.12~ 0.18	0.4~0.7	0.17~ 0.37	0.8~1.1	0.4~0.55	—	—	—
10Cr2Mo1	≤0.15	0.4~0.6	0.15~ 0.50	2.0~2.5	0.9~1.1	—	—	—
12Cr5Mo	≤0.15	≤0.6	≤0.5	4.0~6.0	0.5~0.6	—	—	—
12Cr9Mo1	≤0.15	0.3~0.6	0.5~1.0	8.0~10.0	0.9~1.1	—	—	—
12Cr1MoV	0.08~ 0.15	0.4~0.7	0.17~ 0.37	0.9~1.2	0.25~ 0.35	0.15~ 0.30	—	—
15Cr1Mo1V	0.08~ 0.15	0.4~0.7	0.17~ 0.37	0.9~1.2	1.0~1.2	0.15~ 0.25	—	—
17CrMo1V	0.12~ 0.20	0.6~1.0	0.3~0.5	0.3~ 0.45	0.7~0.9	0.3~0.4	—	—
20Cr3MoWV	0.17~ 0.24	0.3~0.6	0.2~0.4	2.6~3.0	0.35~ 0.50	0.7~0.9	0.3~0.6	—
12Cr2MoWVB	0.08~ 0.15	0.45~ 0.65	0.45~ 0.75	1.6~2.1	0.5~ 0.65	0.28~ 0.42	0.3~ 0.55	Ti0.08~0.18 B≤0.008
12Cr3MoVS1B	0.09~ 0.15	0.5~0.8	0.6~0.9	2.5~3.0	1.0~1.2	0.25~ 0.35	—	Ti0.22~0.38 B0.005~0.011

表 1-2 常用珠光体耐热钢的常温机械性能

钢 号	热 处 理 状 态	σ_b (N/mm ²)	σ_s (N/mm ²)	δ_5 (%)	α_k (J/cm ²)
12CrMo	900℃~930℃正火 680℃~730℃回火(缓冷到300℃空冷)	≥410	≥265	≥24	≥135
15CrMo	900℃正火 650℃回火	≥440	≥294	≥22	≥118
10Cr2Mo1	940℃~960℃正火 730℃~750℃回火	440~590	≥265	≥20	≥78.5
12Cr5Mo	900℃正火 540℃~570℃回火	≥980	—	≥10	—
12Cr9Mo1	900℃~1000℃空冷或油冷淬火 730℃~780℃空冷回火	590~735	≥392	≥20	≥78.5
12Cr1MoV	1000℃~1020℃正火 740℃回火	≥470	≥255	≥21	≥59
15Cr1Mo1V	1020℃~1050℃正火 730℃~760℃回火	540~685	≥345	≥18	≥49
17CrMo1V	980℃~1000℃正火或油淬 710℃~730℃回火	≥735	≥640	≥16	≥59
20Cr3MoWV	1040℃~1060℃油淬或正火 650℃~720℃回火	≥785	≥640	≥13	49~68.5
12Cr2MoWVB	1000℃~1035℃正火 760℃~780℃回火	≥540	≥342	≥18	—
12Cr3MoVS1B	1040℃~1090℃正火 720℃~770℃回火	≥625	≥440	≥18	—

二、马氏体耐热钢

若钢中加入的合金元素能使等温转变曲线向右移动,使钢在奥氏体状态下空冷到室

温时, 避免 550℃ 左右的珠光体转变, 而在马氏体转变温度 (M_s) 以下转变成马氏体。这种类型的耐热钢称为马氏体耐热钢。如 Cr13 系列马氏体耐热钢 (1Cr13、2Cr13 等) 和 Cr12 的多元合金马氏体耐热钢等。这类钢在 650℃ 左右时具有较好的抗氧化性, 600℃ 以下具有一定的热强性, 而且具有较大的淬硬倾向, 焊接性能较差。

在火电热力设备中应用的还有一种马氏体 + 铁素体类耐热钢, 如 Cr12WMoV 和 Cr11MoV 等, 它们正火后的组织为马氏体 + 铁素体。这类钢中由于加入了部分强化合金元素, 因此, 热强性比 1Cr13 耐热钢高, 而且还具有较好的组织稳定性、小的线胀系数和减震性, 对回火脆性不敏感, 工艺性能也比较好。Cr11MoV 钢可以用于 540℃ 以下工作的汽轮机高温叶片围带和长叶片, 也可以用于高温高压汽轮机的转子。X20CrMoWV121 (F11) 和 X20CrMoV121 (F12) 钢 (原西德钢种) 也属于马氏体 + 铁素体类耐热钢, 它的性能与上述两种耐热钢相近, 也可以作为汽轮机的叶片和转子以及锅炉设备中的蒸汽导管。常用马氏体耐热钢及其化学成分如表 1—3 所示。部分马氏体耐热钢的常温机械性能如表 1—4 所示。

表 1—3 常用马氏体耐热钢及其化学成分 (%)

钢 号	C	Cr	Ni	Mo	Nb	V	其 它
1Cr13	0.08 ~ 0.15	12.0 ~ 14.0	—	—	—	—	—
2Cr13	0.16 ~ 0.24	12.0 ~ 14.0	—	—	—	—	—
1Cr11MoV	0.11 ~ 0.18	10.0 ~ 11.5	≤ 0.60	0.50 ~ 0.70	—	0.25 ~ 0.40	—
1Cr12WMoV (F11)	0.12 ~ 0.18	11.0 ~ 13.0	0.40 ~ 0.80	0.50 ~ 0.70	—	0.15 ~ 0.30	W: 0.70 ~ 1.10
1Cr14Ni3W2VB	0.10 ~ 0.16	13.0 ~ 15.0	2.80 ~ 3.40	W: 1.60 ~ 2.20	Ti: ≤ 0.05	0.18 ~ 0.28	B: ≤ 0.004
2Cr12WMoNbVB	0.15 ~ 0.22	11.0 ~ 13.0	—	0.40 ~ 0.60	0.20 ~ 0.40	0.15 ~ 0.30	W: 0.40 ~ 0.70 B: ≤ 0.003

表 1—4 部分马氏体耐热钢的常温机械性能

钢 号	热处理状态	σ_b	σ_s	σ_{-1}	ψ	a_k	HB
		(N/mm ²)		(%)		(J/cm ²)	
1Cr13	1000℃ ~ 1050℃ 油或水淬 700℃ ~ 790℃ 回火	≥ 588	≥ 412	≥ 20	≥ 60	≥ 88	170 ~ 207
2Cr13	1000℃ ~ 1050℃ 油或水淬 600℃ ~ 770℃ 回火	≥ 647	≥ 441	≥ 16	≥ 55	≥ 78	—
X20CrMoV121 (F12)	调质状态	686 ~ 833	490	15 ~ 17	—	49 ~ 78	—

三、铁素体耐热钢

铁素体耐热钢为了提高其耐腐蚀性和耐热性, 加入了相当数量的铬、硅和铝等铁素体元素, 使钢从高温冷却下来获得单相铁素体组织。如 1Cr13Si3、1Cr18Si2 和 1Cr25Si2 等均属铁素体耐热钢。由于这类钢中加入了较多的铁素体元素, 故具有很好的高温下不起氧化皮性能, 但其焊接性较差, 并具有一定的脆化倾向。部分铁素体耐热钢的化学成

表 1—5 部分铁素体耐热钢的化学成分(%)

钢 号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	S	P
1Cr13Si3	≤0.12	2.3~2.8	≤0.70	12.5~14.5	≤0.60	—	≤0.030	≤0.035
1Cr13SiAl	0.10~0.20	1.0~1.5	≤0.70	12.0~14.0	—	1.0~1.8	≤0.030	≤0.035
1Cr18Si2	≤0.12	1.9~2.4	≤1.0	17.0~19.0	≤0.60	—	≤0.030	≤0.035
1Cr25Si2	≤0.10	1.6~2.1	≤1.0	24.0~26.0	≤0.60	—	≤0.030	≤0.035

表 1—6 部分铁素体耐热钢的常温机械性能

钢 号	热处理状态	σ_b σ_s		δ_5 ψ		HB	备 注
		(N/mm ²)		(%)			
1Cr13Si3	700℃~800℃空冷	≥ 588	≥ 392	≥ 15	—	—	GB1221-75
1Cr18Si2	700℃~800℃空冷回火	≥ 539	≥ 343	≥ 15	≥ 35	140~190	GB1221-75
1Cr25Si2	700℃~800℃空冷回火	≥ 490	≥ 343	≥ 15	≥ 50	—	GB1221-75

分如表 1—5 所示, 部分铁素体耐热钢的常温机械性能如表 1—6 所示。

四、奥氏体耐热不锈钢

奥氏体钢中加入较多的奥氏体化元素, 可使等温转变曲线向右移动, 并且还能使马氏体转变温度(M_s 点)降至室温以下, 这种钢空冷到室温时, 可以获得单相奥氏体组织。奥氏体钢具有优良的热强性和耐蚀性, 故又称其为奥氏体耐热不锈钢。这类钢主要用于 550℃以上的锅炉过热器管及主蒸汽管道和 650℃以下工作的汽轮导管及阀体等。这类钢如果在 540℃~870℃下长期工作, 则会从奥氏体组织中析出 σ 相, 分布于晶界而使这类钢的脆性倾向增大。1Cr18Ni9 钢在敏化温度区间(450℃~850℃)加热时, 有时还会因碳化铬沿晶界析出, 导致这种钢在腐蚀介质中产生晶间腐蚀。不过这种钢加入钛和铌以及经稳定化处理, 可以避免和消除晶间腐蚀的产生。

奥氏体耐热不锈钢中合金元素含量比较高, 所以又把这类钢称为高合金奥氏体钢。另外这类钢中一般情况下都含有大量的铬和镍合金元素。因此, 这类钢的成本较高。近些年来, 我国的科学工作者根据本国的资源情况, 研制出了一系列的铬锰型和铬锰铌型奥氏体耐热不锈钢, 使这类钢的成本大幅度地降低。如 Mn17Cr7MoVNbZr、Mn18Cr18MoVB 和 Cr18Mn11Si2 等钢种。它们已成功地用于超高参数锅炉过热器管、燃气机叶片、锅炉过热器吊架及其它高温零部件, 并且在有些设备中部分地代替了铬镍奥氏体不锈钢。这类钢的综合性能良好, 它在高温和低温下都具有优良的塑性, 焊接性也优于铁素体钢和马氏体钢, 因此, 这类钢在生产中得到广泛地应用。我国常用奥氏体耐热不锈钢化学成分如表 1—7 所示, 常用奥氏体耐热不锈钢常温机械性能如表 1—8 所示。

第二节 珠光体耐热钢的焊接^[2,3,4]

珠光体耐热钢常用的焊接方法有手工电弧焊、埋弧自动焊、钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)、熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)、CO₂ 气体保护焊、电子束焊、电渣焊和钎焊等。在薄板和小直径管子对焊时, 也采用氧—乙炔焰气焊方法, 但由于这种焊接

表 1—7 常用奥氏体耐热不锈钢化学成分(%)

钢 号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	B	S	P
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.0	≤2.0	17.0 ~19.0	8.0 ~11.0			5(C-0.02) ~0.80			≤0.030	≤0.035
1Cr18Ni12Ti	≤0.12	≤1.0	1.0 ~2.0	17.0 ~19.0	11.0 ~13.0			5(C-0.02 ~0.80)			≤0.030	≤0.035
4Cr12Ni8 Mo8MnV Nb	0.34 ~0.40	0.30 ~0.80	7.5 ~9.5	11.5 ~13.5	7.0 ~9.0	1.10 ~1.40	1.25 ~1.55	≤0.12	Nb:0.25 ~0.50		≤0.030	≤0.035
0Cr15Ni25 Ti2MoVB	≤0.08	0.40 ~1.00	1.0 ~2.0	13.5 ~16.0	24.0 ~27.0	1.00 ~1.50	0.10 ~0.50	1.75 ~2.30	0.001~ 0.010	≤0.40	≤0.030	≤0.035
1Cr15 Ni36W3Ti	≤0.12	≤0.80	1.0 ~2.0	14.0 ~16.0	34.0 ~38.0			1.0 ~1.4	W:2.80 ~3.20		≤0.030	≤0.035
1Cr25Ni20Si2	≤0.20	1.50 ~2.50	≤1.5	24.0 ~27.0	18.0 ~21.0						≤0.030	≤0.035

表 1—8 常用奥氏体耐热不锈钢常温机械性能

钢 号	热处理状态	σ_b	σ_s	δ_5	ψ	α_1 (1/cm ²)	HB
		(N/mm ²)		(%)			
1Cr18Ni9Ti	1000℃~1100℃油或水冷	≥539	≥196	≥40	≥55	—	—
	1130℃~1160℃水冷, 800℃时效 10h	642	304	55.0	75.5	245	—
1Cr18Ni12Ti	1100℃~1150℃水冷	≥539	≥196	≥40	≥55	—	—
	1050℃~1100℃水冷	586	225	65.7	73.5	299	—
	1050℃~1100℃水冷	644	315	64.1	73.5	314	—
4Cr12Ni8MoVNb	1140℃保温 80min 水冷, 650℃~670℃保温 14~16h, 温度再升至 700℃~800℃, 保温 14h~20h, 空冷	≥833	≥588	≥15.0	≥2.0	34	—
0Cr15Ni25Ti2MoVB	980℃~1000℃保温 1h~2h 油淬, 700℃~720℃时效 12h~16h, 空冷	≥931	—	≥20	≥40	107	—
1Cr15Ni36W3Ti	1150℃水冷, 780℃~790℃和 730℃~740℃两次时效	≥735	≥392	≥15	≥35	≥59	≥207

方法不能充分保证耐热钢的接头质量,因此在大批量生产的情况下,这种焊接方法已很少用。另外,对于小棒材和小直径薄壁管也可采用电阻焊。无论采用哪种焊接方法,焊后必须满足其焊接接头的设计要求。

一、珠光体耐热钢焊接时容易产生的问题

1. 焊接接头产生冷裂纹

珠光体耐热钢焊接过程中最常见的焊接缺陷之一就是在热影响区的粗晶区产生冷裂

纹。

在实际生产中,为了防止冷裂纹的出现,一般都采用焊前预热、控制层间温度、焊后去氢处理、改善组织状态以及减小和消除应力等处理方法。另外,正确选择坡口形式,合理地安排焊接顺序以及尽量减小焊接接头应力集中程度,降低焊接接头残余应力值等,这都是很有成效的工艺措施。

2. 焊缝中产生热裂纹

热裂纹可根据产生的机理和温度区间的不同可分为结晶裂纹、多边化裂纹和液化裂纹。它们在凝固温度区间或凝固温度以下,由于拉伸应力的作用,在焊缝金属中以及靠近熔合区的热影响区,沿着晶界或二次边界产生的开裂称热裂纹。在实际生产中应用的珠光体耐热钢,很少在热影响区产生热裂纹,而多数在焊缝中产生,特别是弧坑处。

热裂纹的产生与珠光体耐热钢的凝固温度区间的大小有直接关系。凝固温度区间越大,产生热裂纹的倾向就越大;反之,产生热裂纹的倾向就越小。合金元素硫、碳、硼、磷等,特别是硫和磷,能与铁形成低熔点共晶物 $\text{FeS}-\text{Fe}$ (980°C) 和 $\text{Fe}_3\text{P}-\text{Fe}$ (1050°C) 等;另外硫和磷还能与镍形成低熔点共晶物 $\text{NiS}-\text{Ni}$ (650°C) 和 $\text{Ni}_3\text{P}-\text{Ni}$ (880°C)。这些低熔点共晶物的凝固温度都很低,使得金属的凝固温度区间进一步加大,偏析程度也进一步增大,因此产生热裂纹的可能性也进一步增加。这种热裂纹的产生部位一般都在柱状晶的交界处。因为柱状晶交界处往往是焊缝液相金属的最后凝固位置,也是杂质和低熔点共晶物的富集部位。柱状晶会合处产生热裂纹,如图 1-1 所示。

焊缝成形系数 φ ($\varphi = b/h$) 对热裂纹的产生也有一定的影响,一般情况下,随焊缝成形系数 φ 的增加则产生热裂纹的倾向减小,如图 1-2 所示。对焊缝成形系数 φ 影响比较显著的参数是焊接电流,在其它条件不变的情况下,则焊缝成形系数 φ 随焊接电流的增大而变小,因此产生热裂纹的倾向就增加。

另外,焊接线能量对热裂纹的产生也有较大的影响,如图 1-3 所示是焊接线能量的大小对 $1\frac{1}{4}\text{Cr}-1/2\text{Mo}$ 钢和 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢热裂纹率的影响。从图中可以看出,



图 1-1 柱状晶会合处产生热裂纹

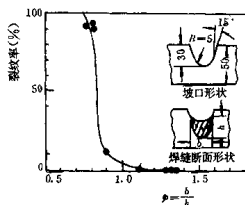


图 1-2 焊缝断面形状对 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢焊缝金属热裂纹率的影响^[2] 裂纹率 = $\frac{\text{裂纹长度}}{\text{焊缝长度}}$

图 1-2 焊缝断面形状对 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢焊缝金属热