

中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作

Y izhonggang ji Y izhongjinshu H an jie
——X ianw ei Jiegou T ezheng Jiqi Zhuanbian Jili

异种钢及异种金属焊接
——显微结构特征及其转变机理

潘春旭 著

人民交通出版社

中华人民共和国交通部资助出版
交通类学科(专业)学术著作
异种钢及异种金属焊接
——显微结构特征及其转变机理

潘春旭 著

版式设计:刘晓方 责任校对:刘高彤 责任印制:

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010-64216602)

各地新华书店经销

印刷厂印刷

开本:850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张: 插页: 字数: 千

年 月 第1版

年 月 第 版 第 次印刷 总第 次印刷

印数:0001—3000册 定价:18.00元

ISBN 7-114- -

内 容 摘 要

本书是一部系统阐述利用电子显微镜等现代分析技术研究异种钢及异种金属复合零部件焊接接头的显微组织结构特征及其在使用过程中的转变和行为的专著;是作者在系统归纳和整理多年科研成果的基础上撰写的,属应用基础性著作。为了使读者方便阅读和理解本书,在前两节简要介绍了异种金属焊接和电子显微分析的基本内容,然后,分九章较全面地论述了奥氏体与珠光体异种钢焊接、异种钢焊接熔合区合金元素扩散的理论计算、奥氏体不锈钢的焊接、耐热钢的焊接、高铬铸铁的堆焊、铝基复合材料(MMC)-奥氏体不锈钢的摩擦焊接、铝-钛-钢的覆板爆炸焊接、铜与钢的焊接、异种钢焊接接头的腐蚀行为等内容。全书含300多幅原版图片和600余篇参考文献,对理论研究和工程应用有较高的参考价值。

本书可供从事焊接、材料、工程机械、电子显微学等学科的研究人员和设计、生产的工程技术人员阅读和参考,亦可作为高等院校相关专业研究生教材或参考书。

序

异种钢及异种金属复合零部件焊接的研究一直是国内外学术界和工业界共同关注的热点问题。该书对焊接接头显微结构特征及其转变机理的研究是一个更深层次的微观问题,是从表观到微观、从现象到机理的深化。作者多年来在包括“国家自然科学基金”在内多个项目的资助下,在与国内外多个研究机构和企业合作下,进行了大量富有成效的研究工作,取得了一批国内外专家学者给予好评的成果。该书就是作者将其具有创造性的研究成果进行总结和整理而撰写成的一本专著。该专著不仅对焊接冶金学和材料学科的发展具有重要的理论意义,特别是对异种金属焊接技术的发展有很大的指导意义,而且对机械工程领域今后大量采用异种金属焊接复合零部件,以提高机械的使用寿命这一发展趋势也同样具有重要指导意义。

该书层次分明,论述严谨,条理清楚,文笔流畅,是一本具有较高学术价值和工程应用前景的学术专著。希望它能在“科教兴国”发展战略的实施中发挥作用,在百书丛中放出异彩。

孙国正

1998年10月1日

目 录

第一章 异种金属焊接概述.....	1
第一节 引言	1
第二节 焊接性方面的问题.....	2
第三节 主要焊接方法.....	6
参考文献	13
第二章 金属电子显微分析基础与异种金属焊接接头	
试样制备	15
第一节 引言	15
第二节 透射电子显微镜(TEM)分析简介	17
第三节 扫描电子显微镜(SEM)分析简介	24
第四节 X射线成分分析简介	28
第五节 异种金属焊接接头金相样品的制备	30
第六节 异种金属焊接接头TEM薄膜样品的制备	32
第七节 异种金属焊接接头特别力学性能试样制备	33
参考文献	34
第三章 奥氏体与珠光体异种钢焊接	36
第一节 引言	36
第二节 显微组织特征及其转变机理	37
第三节 焊接接头的断口形态特征	72
参考文献	79
第四章 异种钢焊接熔合区合金元素扩散的理论计算	86
第一节 引言	86
第二节 碳原子的扩散	88
第三节 置换式原子的扩散	93

参考文献	98
第五章 奥氏体不锈钢的焊接.....	101
第一节 引言.....	101
第二节 熔合区的显微组织变化规律及其形成机理.....	101
第三节 焊缝中 δ -Fe 的形态及其显微偏析	107
第四节 多层焊对焊缝组织的影响.....	113
第五节 焊缝中的显微缺陷.....	117
参考文献.....	122
第六章 耐热钢的焊接.....	126
第一节 引言.....	126
第二节 12Cr2MoWVTiB 钢(钢 102)焊接接头	126
第三节 12Cr1MoV-12Cr2MoWVTiB 钢焊接 接头.....	134
第四节 Cr-Mo-V 钢焊缝中粒状贝氏体在高温 回火中的转变.....	141
第五节 X20CrMoV121(F12)钢焊接接头	145
参考文献.....	154
第七章 高铬铸铁的堆焊.....	156
第一节 引言.....	156
第二节 硬质相形态与耐磨性.....	157
第三节 堆焊层显微组织与耐磨性.....	161
参考文献.....	163
第八章 铝基复合材料—奥氏体不锈钢的 摩擦焊接.....	165
第一节 引言.....	165
第二节 过渡区的显微组织变化特征.....	169
第三节 焊接工艺对接头组织和性能的影响.....	179
参考文献.....	181
第九章 铝-钛-钢的覆板爆炸焊接.....	184
第一节 引言.....	184

第二节	铝(A l)-钛(T i)爆炸焊接过渡区的显微组织和断口特征.....	189
第三节	钛(T i)-钢(Steel)爆炸焊接过渡区的显微组织和断口特征.....	193
	参考文献.....	197
第十章	铜与钢的焊接.....	199
第一节	引言.....	199
第二节	铜与钢的熔化焊接接头.....	203
第三节	铜与钢的扩散焊接头.....	214
	参考文献.....	220
第十一章	异种钢焊接接头的高温氧化及腐蚀特征.....	222
第一节	引言.....	222
第二节	高温氧化特征.....	222
第三节	热腐蚀特征.....	227
	参考文献.....	232

前 言

随着国民经济的迅速发展和科学技术的不断进步,新结构、新设备层出不穷,新材料、新工艺的应用日益广泛,对零部件的性能提出了更高的要求,如硬度、耐磨性、耐蚀性、低温韧性、高温持久强度、磁性、导电性、导热性、熔点等多方面的性能。在有些情况下,任何一种金属材料都不可能完全满足使用要求,或者即使某种金属比较理想,也往往由于十分稀贵,不能在工程中普遍应用。现代焊接技术的发展已经可以将不同性能的材料焊接成复合零部件,既能满足各种性能要求,又可节约各种贵重材料,降低成本。因此,采用焊接方法制造异类材料复合零部件受到人们的广泛重视,具有广阔的应用前景。

异种钢及异种金属之间的焊接研究一直是国内外学术界和工业界共同关注的热点前沿课题,已做了大量的工作,积累了丰富的理论知识和实践经验。但由于异类材料的组合极为多样,对接头的要求又各不相同,所以还有许多问题没有得到解决或还须做进一步的研究。在这种接头中,金属本身的各种性能,已不足以直接说明它在焊接时可能出现什么问题或焊接后能否满足使用要求。

异种钢及异种金属焊接接头所形成的复合零部件能否满足工程上复杂工况下的功能要求,关键是解决它们的焊接性问题,而焊接性的核心是接头熔合区或过渡区的行为和性能,随着现代新材料和新型复合结构的大量出现,研究和探讨异种钢及异种金属焊接熔合区的显微结构特征及其转变机理就显得尤为突出和重要。但是,由于受实验技术和实验条件的限制,目前,对很窄的熔合区的研究,大多数还是停留在金相光学显微镜的观察上。光学显微镜分辨本领低,并且受腐蚀剂的影响大,一些微观组织很难被显示和

观察,即使用高倍的扫描电子显微镜(SEM)也较难观察到熔合区细微的组织结构变化,而这些细微的变化对接头机械性能变化有很大的影响,它也是弄清楚某些失效断裂机理的钥匙。另外,在由众多新材料构成的现代高技术复合零部件中,由于对它的使用环境和可靠性等方面提出了更高更苛刻的要求,因此也要求我们必须采用更先进的分析测试手段,从更微观的层次和角度对异种钢及异种金属焊接接头焊接性的本质进行更加深入的研究。

观察焊接区,特别是熔合区显微组织变化特征及其转变机理的最有效和最直观的方法是利用较光学显微镜和扫描电镜具有更高放大倍数和分辨率的透射电子显微镜(TEM)。但到目前为止,还较少看到有关这方面的报道。许多学者甚至认为不可能制备出可供TEM观察的熔合区薄膜样品,这主要是由于异种钢及异种金属之间物理、化学性能、组织、成分、强度等相差很大的缘故。

作者在长期的研究中,在“国家自然科学基金”、“湖北省自然科学基金”、“武汉市青年科技晨光计划”、“交通部教育司和科技司博士基金”、“武汉交通科技大学青年基金”的资助下,分别与武汉锅炉厂、冶金部北京钢铁研究总院、瑞典桑德维肯钢铁公司研究与发展中心(R/D Center, Sandvik Steel AB, Sweden)、加拿大多伦多大学冶金与材料科学系(Department of Metallurgy and Materials Science, University of Toronto, Canada)、新西兰焊接中心(New Zealand Welding Center, New Zealand)等国内外企业、大学和研究机构进行了大量的合作研究。主要工作是综合应用扫描电子显微(SEM)技术、透射电子显微(TEM)技术、金相观察、机械性能测试、理论计算等手段,对由不同焊接材料和焊接方法焊接而成的典型的异种钢及异种金属焊接接头的显微组织结构及其转变机理进行了深入的探讨和研究。

鉴于到目前为止,国内外还没有有关异种钢及异种金属焊接接头显微组织特征及其转变机理方面的专著发表,为此作者将多年的研究成果整理成书,希望能对从事焊接和材料研究的科技人员有所借鉴,对优化焊接工艺、提高复合零部件焊接接头的使用寿命

命等提供理论和实践的参考。

本书的完成也是课题组共同劳动的成果,课题组成员杨世柏高级工程师、张志慧高级工程师、廖红卫讲师、陈冰泉副教授、陈俐讲师、李爱农博士等全部或部分参加了多项课题的实验和研究。杨世柏高级工程师还在本书文字修改和某些技术细节的审定方面做了大量工作。

承蒙孙国正教授在百忙中审阅全书并写了序言,在此表示衷心的感谢。孙国正教授曾作为作者的博士生导师,给了作者大量的指导、教诲和启迪。

在本书的撰写过程中,清华大学任家烈教授和冶金部北京钢铁研究总院尹士科教授级高级工程师给了作者极大的鼓励和支持,提出了许多宝贵的修改意见和建议,在此谨致谢意。

本书做为作者研究工作的总结,许多内容已发表在国内外的学术刊物和会议论文集中,有些内容是首次提出。由于作者的水平有限,其中的一些观点和结论可能有不妥之处,希望广大读者批评指正。另外,本书所涉及的研究领域中的许多问题仍然是目前的研究热点,作者仍在做进一步的深入研究和探讨。

作 者

1998年8月于武汉

第一章 异种金属焊接概述

第一节 引言

异种金属焊接能够充分利用各种材料的优异性能,如强度、比强度、耐腐蚀性、耐磨性、导电性、导热性等,因而在工程机械、交通运输、石油化工、电站锅炉、航天航空和机械电子等行业的机械设备和构件中得到广泛应用。例如:在港口机械中,基于结构轻型化的需要,常常将大型金属构件或者在某些重要部位选用合金钢材料;另外,为了提高工件的耐磨性或耐蚀性,提高使用寿命,也常常在普通结构钢上堆焊一层不锈钢或高合金耐磨材料,链斗卸船机的链斗就是在斗口焊上耐磨的合金钢斗刃,……,这样就形成各种类型的异种钢焊接结构。在船舶工程结构中,异种金属焊接构件更是大量存在,如船舶的尾轴架毂上的轴架冷却板即是用1Cr18Ni9Ti不锈钢与ZG25-1铸钢和Q235钢焊接而成;运送化学物资的特种船舶中的储物仓与船体之间大多数也是不锈钢与普通结构钢的连接;还有许多船舶的上层建筑常采用铝基合金以减轻船体重量和降低船体的重心,其与船体之间也构成异种金属焊接构件。在电站锅炉中,不同的受热温度部分常选用不同的耐热合金钢,因而出现大量的异种钢焊接接头。在石油化工设备中由于耐腐蚀和焊接工艺等方面的要求,也遇到大量的异种钢焊接问题。

实际上,可以组成异种金属构件的材料是多种多样的,几乎包括了大部分可焊的金属和合金。异种金属焊接复合零部件的分类方法也同样是多种多样的。

1. 按组合材料分类

- (1)异种钢之间的焊接复合零部件；
- (2)钢与铸铁之间的焊接复合零部件；
- (3)异种有色金属之间的焊接复合零部件；
- (4)有色金属与钢之间的焊接复合零部件。

2. 按不同用途分类

(1)用于耐热、耐腐蚀的异种金属焊接复合零部件；如：Cr-Mo、Cr-Mo-V 类钢，各种不锈钢、镍基合金、铝基合金、铜合金、钛等材料之间的焊接。这类构件主要用于电站锅炉、化工设备、冶金、原子能设备、发动机、机械、汽轮机、海洋设备及医疗器械等。

(2)用于减轻设备重量的异种金属焊接复合零部件；如：Ti、Al 等及其合金，主要用于航天、火箭、工程机械等设备。

(3)用于耐磨的异种金属焊接复合零部件；如：高碳钢、各种合金钢、超合金、碳化钨、高 Cr 铸铁等硬合金，主要用于工程机械、发动机、刀具、炼钢机械等。

第二节 焊接性方面的问题

随着现代科学技术的飞速发展，新材料、新结构不断出现，不同材料之间的焊接组合不断增多，对焊接构件的要求也不断提高，再加上焊接过程的非平衡性和非稳定性，焊接性的研究更为复杂和多样。

一、基本特点及焊接性^[1~12]

异种金属之间的焊接主要是指化学成分、显微组织、物理、化学和机械性能相差较大的两种金属之间的连接。从金属构件的连接形式上看可以分成四种主要情况。

(1)两种不同金属之间焊接，中间不加填充金属。两种金属之间可通过各种方法实现冶金结合，并在中间形成一个过渡层，或称熔合区。焊接方法主要有：氩弧焊(重熔)、闪光焊、摩擦焊、扩散焊、爆炸焊等。

(2)两种不同金属之间的焊接,中间填充第三种金属,这样在接头中就形成两个熔合区。

(3)两种金属之间焊接,中间填充与某一侧母材成分相同的金属,接头中形成一个异类金属熔合区和一个同类金属熔合区。

(4)相同金属之间焊接,中间填充另一种金属,或在某一种金属上堆焊不同的金属,接头中形成一个熔合区。

第一种形式可以通过熔化焊接或固态焊接的方法完成,后三种形式主要是熔化焊接。

从接头的形式可以看出,在接头中总存在一个异类金属熔合区,其化学成分、显微组织及许多性能与母材金属和熔敷金属明显不同。它实际上是影响整个机械构件使用性能的主要部分。

金属材料在焊接时要经受加热、熔化、化学反应、结晶、冷却、固态相变等一系列复杂的过程,这些过程又都是在温度、化学成分及应力极不平衡的条件下发生的,有时可能在焊接区造成缺陷或者使金属的性能下降而不能满足使用要求,因而,金属本身的物理性能、化学性能和力学性能都已不足以直接说明它在焊接时可能出现什么问题或焊接后能否满足使用要求。

金属的焊接性就是金属是否能适应焊接加工而形成完整的、具备一定使用性能的焊接接头的特性。也就是说,金属焊接性的概念有两方面的内容:一是金属在焊接加工中是否容易形成缺陷;二是焊成的接头在一定的使用条件下运行能力的可靠程度。这也说明,焊接性不仅包括结合性能,而且包括结合后的使用性能。

从理论上讲,只要在熔化状态下能够互相形成溶液或共晶的任意两种金属都可以经过熔化焊接形成接头。同种金属之间当然可以形成优质的焊接接头,但是异种金属之间的焊接要复杂得多。

(1)如果两种金属之间能够形成固溶体,则其熔化焊接性较好,如碳钢或低合金钢与奥氏体不锈钢或Ni基合金之间的焊接等。但是由于两种金属之间在组织类型、化学成分、机械性能等方面具有较大的差异,仍会带来焊接残余应力集中、碳扩散等一系列问题。

(2)如果两种金属之间能形成机械混合物或复杂组织,则认为其熔化焊接性尚可。

(3)如果两种金属之间形成金属间化合物,则其熔化焊接性不好,不能直接进行熔化焊接,需要采用如固态焊接法等特殊的焊接方法,或是中间采用过渡层才能形成性能良好的接头,如铝与钢、铝与钛、钛与钢之间的焊接。

异种金属之间焊接的困难主要表现在,对于大多数异种金属组合来说,两种材料之间的熔点、密度、导热性、热膨胀性、晶体学特征、机械性能等相差较大。焊接性与它们在液态和固态时的互溶性及形成金属间化合物(即脆性相)的性能等有密切关系。通常在液态下不能互溶的金属(即“冶金学上的不相容性”)、熔化时分离的液层,冷却结晶后彼此之间很容易分离开裂,所以不能采用熔化焊接方法。而互溶性很小或有限的两种金属焊接时,能否防止裂纹的产生主要取决于结晶条件、相变和受力状态。另外这类金属焊接时会形成金属间化合物和使过饱和的固溶体的剩余成分析出,从而降低接头的性能。

二、优越性及存在的主要问题

异种钢及异种金属焊接有时是不可避免的和必须的,但有时也是从经济和便利等方面考虑而采用的。大致总结一下,异种钢焊接有以下的必要性和优越性^[2~5, 13~20]。

(1)不同运行温度、腐蚀和氧化环境采用不同的材料,导致异种金属焊接。

(2)在化工行业中为了提高压力容器的使用寿命,在普通的低合金耐热钢容器内侧,熔敷一层能耐强腐蚀和高温的高合金钢,导致异种钢焊接。

(3)为了提高表面强度和耐磨性,在普通钢材表面堆焊一层高强耐磨合金,导致异种金属焊接。这种需求在矿山机械、施工机械、港口机械等重要机械中相当普遍。

(4)为了免除焊后热处理工艺。如在化工炼油设备管道施工安

装中,用与 Cr-Mo 类母材相同的耐热钢作填充金属,焊后必须要进行热处理,否则将产生冷裂纹,而在生产施工中,进行焊后热处理有时是很困难,甚至是不可能的。选择高合金的奥氏体不锈钢作填充金属则可免除焊后热处理工艺。

(5)补焊。对于许多低合金钢、碳钢和铸铁来说,用同种材料补焊,通常要产生开裂,同上述原因一样,如用高合金的奥氏体钢焊条补焊则出现裂纹的可能性要小得多。

(6)为了减轻机械承载结构的重量,往往在局部受力较大部位采用高合金钢,导致异种金属焊接。

异种钢及异种金属焊接虽然能带来便利和经济效益,但是由异种金属的可焊性分析可知,异种金属因化学成分、物理和化学性能的明显不同,当将它们焊接在一起时,必定产生一个性能和组织与焊缝金属、母材不同的熔合区,因而,大多数异种金属焊接时,经常会遇到如下问题^[2, 13, 14, 20~22] :

(1)两种金属之间不能形成合金;

(2)焊接过程中金相组织的变化或产生新的组织而使接头的性能变差;

(3)熔合区及热影响区的机械性能降低,特别是塑性;

(4)由于两种金属之间的热膨胀系数不同而引起热应力集中,并且这种热应力不能被消除;

(5)因塑性变形差和应力增加往往容易引起裂纹;

(6)室温下,焊接区的机械性能(拉伸、冲击、弯曲等)一般优于被焊母材的性能,但高温下或高温长期运行后,接头区的性能劣于母材;

(7)在奥氏体钢焊缝与珠光体钢母材之间存在一个马氏体组织熔合区,该区韧性较低,是一个高硬度脆性层,是导致构件失效破坏的薄弱区,它会降低焊接结构的使用可靠性;

(8)焊后热处理或高温运行过程中,在焊接边界两侧各产生一个富碳区和贫碳区,改变了熔合区的性能,是裂纹起源于焊接边界的主要原因之一;

(9)失效与时间、温度和交变应力条件有关。

正是由于这些特点,几十年来异种钢及异种金属焊接一方面越来越受到人们的重视,在工程中广泛应用;另一方面人们也在不断地进行深入的试验和研究,探讨这种焊接工艺的理论,获得实践方面的新认识,努力减少或消除这种焊接所存在的问题,提高异种钢焊接接头的使用可靠性。

第三节 主要焊接方法

焊接异种金属的方法很多,各种方法都有其各自的特点,在焊接过程中会产生不同的物理化学变化,选择焊接方法的目的之一就是要使其适应这种变化,以获得优质接头。按基体金属的熔化受压情况,一般分为熔化焊、固相压力焊、熔焊-钎焊及液相过渡焊等,这里主要介绍在本书中所用到的几种焊接方法,即熔化焊中的手工电弧焊、埋弧自动焊和钨极氩弧焊,固相焊中的摩擦焊、爆炸焊和扩散焊。

一、熔化焊接

1. 电弧焊

电弧焊(arc welding, AW)是利用焊条与工件之间产生的电弧将焊条和工件局部加热到熔化状态,焊条端部熔化后的熔滴和熔化的母材融合在一起形成熔池。随着电弧向前移动,熔池逐步冷却结晶形成焊缝金属,如图 1.1 所示。

电弧焊一般分为手工电弧焊和自动电弧焊。手工电弧焊使用的设备简单,方法简便灵活,适应性强,应用极为广泛,有单层焊、双面焊和多层焊接头,是熔化焊中最常用和常见的焊接方法。

2. 埋弧焊

埋弧焊(submerged arc welding, SAW)也是利用电弧作为热源的焊接方法,但其电弧是在一层颗粒状的可熔化焊剂的覆盖下燃烧,电弧光不外露,所用的金属电极是不间断送进的裸焊丝。电

图 1.1 电弧焊过程示意图

1-焊缝;2-熔池;3-保护气体;4-电弧;5-熔滴;6-焊条;
7-焊钳;8-电焊机;9-焊接电缆;10-工件

弧热将焊丝端部及电弧附近的母材和焊剂熔化。熔化的金属形成熔池,冷却后成为焊缝,熔融的焊剂成为熔渣,凝固后成渣覆盖于焊缝表面。熔池受熔渣和焊接蒸气的保护,不与空气接触,如图 1.2 所示。另外,在焊接过程中,熔渣还与熔化金属发生冶金反应,从而影响焊缝金属的化学成分。

埋弧焊的特点是热效率高、熔深大、机械化操作程度高。焊接质量稳定,在许多机械行业中均有广泛的应用,是当今焊接生产中最普遍使用的焊接方法之一。

图 1.2 埋弧焊过程示意图

1-焊剂;2-焊丝;3-电弧;4-熔池;5-熔渣;
6-焊缝;7-工件;8-渣壳

3. 钨极气体保护焊

钨极气体保护焊 (gas

shielded arc welding, GSAW)

是在惰性气体保护下,利用钨电极与工件之间产生的电弧热熔化母材和填充焊丝的一种焊接方法。焊接时保护气体从焊枪喷嘴中连续喷出,在电弧周围形成气体保护层隔绝空气,以防止其对钨极、熔池及邻近热影响区的有害影响,从而可获得优质接头,见图 1.3。保护气体主要有氩气、氦气或氩氦混合气体等。用氩气作保护气体的钨极氩弧焊(TIG)应用最为普遍。