

总主编 曹茂盛 蒋成禹 田永君

总主审 吴 林 马莒生 方洪渊

材料科学与工程系列教材(二)

根据 1998 年教育部颁布本科最新专业目录编写

陈 铮 周 飞 王国凡 主编
方洪渊 审

材料连接原理

哈尔滨工业大学出版社

材料科学与工程系列教材(二)

总主编 曹茂盛 蒋成禹 田永君

总主审 吴 林 马莒生 方洪渊

材料连接原理

陈 铮 周 飞 王国凡 主编
方洪渊 审

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内容提要

本书涵盖了原“焊接设备与工艺”专业的“焊接冶金学”、“钎焊与胶接”、“压力焊”和“高能密度焊”的主要内容,以连接方法为主线,以熔化焊、钎焊和扩散连接为重点,阐述各种连接方法的基本原理、连接过程及质量控制。本书深入浅出,概念清楚,并吸收了本领域的一些最新研究成果。各章后均附有小结和思考题,有助于深入的学习。

本书是高等学校材料科学与工程本科专业本科生教材,研究生教学参考书,也可供工程技术人员在实际工作中参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料连接原理/陈铮主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.8

材料科学与工程系列教材(二)

ISBN 7-5603-1647-6

I. 材... II. 陈... III. 工程材料-连接技术-高等学校-教材 IV. TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 048658 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451—6414749
印 刷 哈尔滨市龙华印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 18.5 字数 425 千字
版 次 2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1647-6/TB·17
印 数 1~3 000
定 价 20.00 元

序 言

材料科学与工程系列教材是由哈尔滨工业大学出版社组织国内部分高校专家学者共同编写的大型系列教学丛书,其中第一系列、第二系列教材已分别被列为国家新闻出版总署“九五”、“十五”重点图书出版计划。第一系列教材 9 种已于 1999 年陆续出版。编写本系列教材丛书的基本指导思想是:总结已有、通向未来、面向 21 世纪,以优化教材链为宗旨,依照为培养材料科学人才提供一个较为广泛的知识平台的原则,并根据培养目标,确定书目、编写大纲及主干内容。为确保图书品位,体现较高水平,编审委员会全体成员对国内外同类教材进行了细致的调查研究,广泛征求各参编院校第一线任课教师的意见,认真分析国家教育部新的学科专业目录和全国材料工程类专业教学指导委员会第一届全体会议的基本精神,进而制定了具体的编写大纲。在此基础上,聘请了国内一批知名的专家,对本系列教材书目和编写大纲审查认定,最后确定各册的体系结构。经过全体编审人员的共同努力,第二系列教材即将出版发行,我们热切期望这套大型系列教学丛书能够满足国内高等学校材料工程类专业教育发展的需要,并且在教学实践中得以不断充实、完善和发展。

在本书的编写过程中,注意突出了以下几方面特色:

1. 根据科学技术发展的最新动态和我国高等学校专业学科归并的现实需求,坚持面向一级学科、加强基础、拓宽专业面、更新教材内容的基本原则。
 2. 注重优化课程体系,探索教材新结构,即兼顾材料工程类学科中金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料共性与个性的结合,实现多学科知识的交叉与渗透。
 3. 反映当代科学技术的新概念、新知识、新理论、新技术、新工艺,突出反映教材内容的现代化。
 4. 注重协调材料科学与材料工程的关系,既加强材料科学基础的内容,又强调材料工程基础,以满足培养宽口径材料学人才的需要。
 5. 坚持体现教材内容深广度适中、够用的原则,增强教材的适用性和针对性。
 6. 在系列教材编写过程中,进行了国内外同类教材对比研究,吸取了国内外同类教材的精华,重点反映新教材体系结构特色,把握教材的科学性、系统性和适用性。
- 此外,本系列教材还兼顾了内容丰富、叙述深入浅出、简明扼要、重点突出等特色,能充分满足少学时教学的要求。

参加本系列教材编审工作的单位有:清华大学、哈尔滨工业大学、北京科技大学、北京航空航天大学、北京理工大学、哈尔滨工程大学、北京化工大学、燕山大学、哈尔滨理工大

学、华东船舶工业学院、北京钢铁研究总院等 22 所院校 100 余名专家学者,他们为本系列教材的编审付出了大量心血。在此,编审委员会对这些同志无私的奉献致以崇高的敬意。此外,编审委员会特别鸣谢中国科学院院士肖纪美教授、中国工程院院士徐滨士少将、中国工程院院士杜善义教授,感谢他们对本系列教材编审工作的指导与大力支持。

限于编审者的水平,疏漏和错误之处在所难免,欢迎同行和读者批评指正。

材料科学与工程系列教材编审委员会

2001 年 7 月

前 言

材料是现代人类物质文明的基础,它支撑着其它新技术的发展,已成为现代经济发展的支柱。随着航天技术、海洋工程、生物工程和环境保护技术的发展,传统材料的性能不断得到完善,大量新材料也不断涌现。但材料必须经过可靠的加工才能得到广泛的工程应用。材料的连接和焊接是一种重要的材料加工技术。它广泛地应用于石油化工、工程机械、电力、航空航天和海洋工程等的结构件制造以及微电子、传感器等工业领域。随着科学技术、特别是新材料的不断发展,主要针对金属材料加工的焊接技术也已发展成为面向所有材料(特别是各种新材料)进行连接加工的科学与技术。即意味着“连接”比“焊接”的内容更加广泛,在国际上,也开始用“Joining and Welding”代替单一的“Welding”,或直接使用连接(Joining)。连接和焊接技术的学科体系在日趋完善的同时,连接技术也得到了迅猛发展,特别是新型材料的连接正面临着严峻的挑战。

1998年,教育部对本科专业目录进行了调整,将原“焊接工艺与设备”、“金属材料及热处理”和“铸造”等专业合并为“材料成型与控制工程”新专业。此后,各高校相应地均对教学计划进行了调整,“焊接工艺与设备”在许多高校目前仅为一个专业方向,通常只有2~3门方向课程。因此,原先焊接专业的6~7门专业课程必须进行合并和浓缩。正是在这一背景下,我们本着拓宽专业口径、加强专业基础的指导思想,编写了本教材。“材料连接原理”涵盖了原焊接专业“焊接冶金学”、“高能密度焊”、“钎焊与胶接”和“压力焊”的内容,但作了适当的调整和补充。本书以连接方法为主线,以方法的基本原理、连接过程和冶金质量为重点加以阐述,并以培养学生的科研能力为出发点,突出基本概念,注重分析和解决问题的思路,增大信息量。因此,本教材既可适用于多学时教学,也可在学时较少时以基本概念为重点加以讲解,同时也可作为选修课的教学参考书,对热加工专业均较适用。每章之后附有本章小结和一定量的思考题,以助于对重点内容的把握。本书的绪论、第一、第三、第四和第七章由陈铮编写,第二章由周飞和邹家生编写,第五章、第八章和第九章由张元彬编写,第六章由韩逸生编写,第十章由王国凡编写,全书由陈铮统定稿,由方洪渊教授审稿。

由于作者水平所限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2001年7月22日

Jan 07/06

材料科学与工程系列教材(二)

总编审委员会

总 顾 问	萧纪美	徐滨士	杜善义
主 任 委 员	吴 林	马莒生	曹茂盛
委 员	王 彪	方洪渊	田永君
	刘勇兵	吴 峰	吴杏芳
	李大勇	荆天辅	徐文国
	徐庭栋	徐惠彬	曹传宝
	蒋成禹		

目 录

绪论	(1)
第一章 熔化焊热源及接头形成	(6)
1.1 熔化焊热源及温度场	(6)
1.2 焊接热循环	(16)
1.3 熔化焊接头的形成	(22)
本章小结	(27)
思考题	(27)
参考文献	(28)
第二章 熔化焊接化学冶金	(29)
2.1 焊接气氛及其与金属的相互作用	(29)
2.2 焊接材料与焊接熔渣	(42)
2.3 焊接化学冶金反应	(54)
本章小结	(62)
思考题	(63)
参考文献	(64)
第三章 熔化焊接头的组织与性能	(65)
3.1 焊缝金属的组织与性能	(65)
3.2 焊接热影响的组织与性能	(79)
本章小结	(98)
思考题	(98)
参考文献	(99)
第四章 焊接冶金缺陷	(100)
4.1 气孔	(100)
4.2 焊接热裂纹	(106)
4.3 冷裂纹	(118)
4.4 其它焊接裂纹简介	(131)
本章小结	(140)
思考题	(141)

参考文献	(142)
第五章 高能密度焊方法与原理	(144)
5.1 电子束焊 (Electron Beam Welding)	(144)
5.2 激光焊 (Laser Beam Welding)	(147)
5.3 等离子弧焊 (Plasma arc Welding)	(154)
本章小结	(158)
思考题	(158)
参考文献	(159)
第六章 钎焊连接原理	(160)
6.1 钎焊连接的基本特征	(160)
6.2 液态钎料与固态母材的润湿、铺展及填缝	(161)
6.3 金属表面氧化膜的去除机制及钎剂的作用	(168)
6.4 液体钎料与固体母材的相互作用	(172)
6.5 钎缝的金相组织	(174)
6.6 钎料、钎剂及其选用	(176)
6.7 钎焊工艺及接头质量控制	(184)
本章小结	(191)
思考题	(191)
参考文献	(192)
第七章 扩散连接原理	(193)
7.1 概述	(193)
7.2 固相扩散连接	(195)
7.3 超塑性成型扩散连接	(216)
7.4 瞬间液相扩散连接	(217)
7.5 扩散连接过程的数值模拟	(222)
本章小结	(226)
思考题	(226)
参考文献	(227)
第八章 电阻焊连接原理	(228)
8.1 概述	(228)
8.2 点焊 (Spot Welding)	(229)
8.3 凸焊 (Projection Welding)	(240)

8.4 缝焊 (Seam Welding)	(242)
8.5 对焊	(245)
8.6 电阻焊连接的质量检验	(251)
本章小结	(255)
思考题	(255)
参考文献	(256)
第九章 摩擦焊连接方法与基本原理	(257)
9.1 摩擦焊基本原理	(257)
9.2 摩擦焊分类	(258)
9.3 摩擦焊接过程分析	(259)
9.4 摩擦焊规范参数	(261)
9.5 摩擦焊接头的缺陷及检测	(263)
本章小结	(264)
思考题	(265)
参考文献	(265)
第十章 胶接原理与工艺	(266)
10.1 胶接接头的形成机理	(266)
10.2 影响胶接强度的因素	(271)
10.3 胶粘剂的组成与分类	(277)
10.4 胶接工艺	(278)
本章小结	(283)
思考题	(284)
参考文献	(284)

绪 论

1. 材料的地位与发展

能源、信息和材料被认为是现代经济发展的三大支柱,其中材料更是现代人类物质文明的基础,它支撑着其它新技术的发展。没有先进的材料,就没有先进的工业、农业和其它科学技术。

根据材料的组成,可以将材料分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料(聚合物)和复合材料,它们被称为材料的四大家族。根据材料的特性和用途,材料可分为结构材料(力学性能为主要指标,用于制造承受一定载荷的设备、零部件等)和功能材料(特殊物理性能为主要指标,用于制造电子器件、光敏元件和绝缘材料等)两大类。随着航天技术、海洋工程、生物工程和环境保护技术的发展,大量新材料也不断涌现,其中具有代表性的有:

(1) 新型金属结构材料

目前,在工程结构和工程机械中,大量使用的仍然是金属材料,而且还在不断发展和更新。其中,超高强度钢、超低温钢、双相不锈钢、超耐热合金、钛合金以及高强度、高弹性模量的轻质铝合金(Al-Li 合金)等,可以说是当前先进金属材料的标志。

(2) 先进陶瓷材料

先进陶瓷是指“采用高度精选的原料,具有能精确控制的化学成分,可按照便于控制的制造技术加工,便于进行结构设计,并具有优良特性的陶瓷”,如 Si_3N_4 、 SiC 和 ZrO_2 等。从20世纪80年代开始,人们对发展高温材料的兴趣开始转向先进陶瓷。与金属和聚合物相比,它们具有熔点高,耐腐蚀耐氧化,高温强度、硬度和弹性模量高,以及热膨胀系数小等性能优点和特点。近20年来各主要工业发达国家都十分注重特种陶瓷的研究与开发。目前,先进陶瓷材料的应用亦日趋广泛和普遍,先进陶瓷已被誉为“面向21世纪的新材料”。

(3) 先进复合材料

结构材料的复合化是当代材料发展的一个重要标志,它克服了单一材料性能的局限性,通过特殊的制备工艺,将具有不同特性的材料按一定要求复合在一起往往能形成比原来材料更好的新材料。复合材料的优越性在于:可以实现性能的独特组合,性能可以在一定范围内连续变化,有时可以出现其原材料本身所不具备的物理性能。复合材料自20世纪40年代问世以来已发展了三代。航空、航天事业的发展推动了高比强、高弹性模量、高韧性和耐高温的先进复合材料的发展。第三代复合材料除了高性能树脂基复合材料外,还有金属基复合材料、陶瓷基复合材料、碳纤维增强复合材料和碳-碳复合材料。

(4) 高性能工程塑料

高性能工程塑料是指综合性能优异的耐热热塑性工程塑料。它们的物理、化学和力

学性能均优于传统的塑料,其性能特点是韧性好、强度高、抗蠕变、尺寸稳定、耐老化、低放气、介电性能好。

2. 材料科学与材料工程(材料加工)

材料科学是研究材料的组织结构与性能的关系,从而开发新材料,并合理有效地使用材料。但材料要能商品化,必须经过一定的经济合理的工艺流程才能实现,这就是材料工程。材料加工的任务就是把材料加工成形,得到可供使用的产品。因此,材料加工实质上就是材料工程。材料科学与材料加工是相辅相成、不可分割的。

材料加工可以把原来是无定型的材料加工成形状满足要求的定型器件。金属材料可以采用铸造、焊接、锻压、粉末冶金和切削加工等方法进行加工。陶瓷材料的加工可以采用铸造、锻压、挤压、压制和高温烧结以及连接。高分子聚合物材料的加工则是把软化的塑料喷射至压型中成形(与铸造很相似),也可采用拉拔和压力成型的方法,见表 0.1。

表 0.1 典型的材料加工技术

金 属	高分子聚合物
铸造、锻压、焊接连接、切削、粉末冶金	铸造、压力成型、连接
陶 瓷	复合材料
铸造、加压、烧结、连接	铸造、压力成型、连接、加压与烧结

3. 材料的连接与焊接

材料的连接和焊接是一种重要的材料加工技术。它广泛地应用于石油化工、工程机械、电力、航空航天和海洋工程等的结构件制造以及微电子、传感器等工业领域。随着科学技术,特别是新材料的不断发展,主要针对金属材料加工的焊接技术也已发展成为面向所有材料(特别是各种新材料)进行连接加工的科学与技术。即意味着“连接”比“焊接”的内容更加广泛,在国际上,也开始用“Joining and Welding”代替单一的“Welding”,或直接使用连接(Joining)。在连接和焊接技术的学科体系日趋完善的同时,连接技术也得到了迅猛发展,特别是新型材料的连接正面临着严峻的挑战。

(1) 连接和焊接的物理本质

材料的连接和焊接,可定义为“待连接和焊接的材料(同种或异种)在热或压力(或两者并用)的作用下(需要时间),使用或不使用填充材料,使材料之间达到原子间的冶金结合形成永久性连接接头的加工技术”。具有工程意义的热源包括电弧热、化学热、电阻热、摩擦热、电子束、激光等。

迄今为止,在工程上已获得广泛应用的连接方法很多,尽管实现连接的方法和手段不同,但它们所达到的效果是相同的,即实现原子间的冶金结合。

众所周知,固体材质是由各类键结合在一起的。就金属而言,是依靠金属键结合在一起的。由图0-1可以看到,两个原子间的结合力的大小是引力与斥力共同作用的结果。

当原子间的距离为 r_A 时,结合力最大。对于大多数金属, $r_A \approx 0.3 \sim 0.5\text{nm}$,当原子

间的距离大于或小于 r_A 时,结合力都显著降低。

因此,为了实现材料原子之间的连接,从理论来讲,就是当两个被连接的固体材料表面接近到相距 r_A 时,就可以在接触表面上进行扩散、再结晶等物理化学过程,从而形成键合,达到冶金连接的目的。然而,这只是理论上的条件,事实上即使是经过精细加工的表面,在微观上显然也是凹凸不平的,更何况在材料表面上还常常带有氧化膜、油污和水分等吸附层。这样,就会阻碍材料表面的紧密接触。

为了克服阻碍材料表面紧密接触的各种因素,在连接工艺上主要采取以下两种措施:

①对被连接的材质施加压力,目的是破坏接触表面的氧化膜,使结合处增加有效的接触面积,从而达到紧密接触。

②对被连接材料加热(局部或整体),对金属来讲,使结合处达到塑性或熔化状态,此时接触面的氧化膜迅速破坏,降低金属变形的阻力,加热也会增加原子的振动能,促进扩散、再结晶、化学反应和结晶过程的进行。

至于粘接,是靠粘结剂与母材之间的粘合作用,一般来讲这种作用包括机械作用、扩散作用、吸附作用和化学作用。

(2) 连接和焊接方法的分类

每种金属实现焊接所必须的温度与压力之间存在一定的关系,对于纯铁来讲,如图 0-2 所示,由图可见,金属加热的温度越低,实现焊接所需的压力就越大。当金属的加热温度 $T < T_1$ 时,压力必须在 AB 线的右上方(I区)才能实现焊接;当金属的加热温度 T 在 $T_1 \sim T_2$ 之间时,压力应在 BC 线以上(II区);当 $T > T_2 = T_M$ (T_M 是金属的熔化温度)时,则实现焊接所需的压力为零(III区),此即熔焊的情况。

由于连接时热和压力可有多种来源,因而也就出现了多种连接方法,如图 0-3 所示。与图 0-21 相比,图 0-3 中还示出了常用连接方法所需要的时间范围。从冶金角度看,可将连接方法分为:液相连接、固相连接和液-固相连接。

将材料加热至熔化,利用液相的相容而实现原子间结合,即为液相连接。熔化焊属最典型的液相连接。液相物质是由被连接母材和填充的同质或异质材料(也可不加入)共同构成的,填充材料就是焊条或焊丝。虽然电阻焊时也有液相生成,但由于连接时需施加一

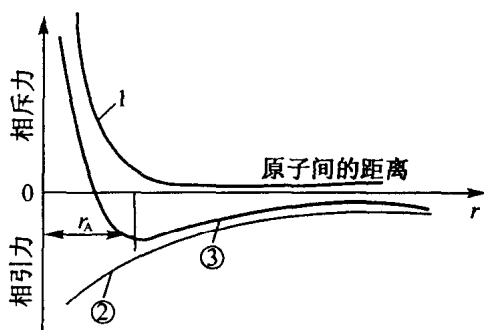


图 0-1 原子之间的作用力与距离的关系
1—斥力;2—引力;3—合力

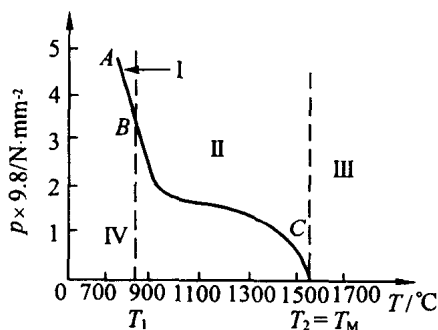


图 0-2 纯铁焊接时所需的温度及压力
I—高压焊接区;II—电阻焊区;
III—熔焊区;IV—不能实现焊接区

定的压力才能实现连接,故通常将其纳入压力焊范畴。近年来,随着结构材料和产品性能的提高,相应地也对焊接提出了更高的要求,高能束(激光、电子束和等离子)焊接的前景非常广阔,因此,本书将高能密度焊单列一章,着重介绍激光、电子束和等离子焊接方法的特点、焊接工艺参数和焊接过程。

压焊方法属于典型的固相连接。因为固相连接时,通常连接温度均低于母材金属(或金属中间层)的熔点,因而必须利用压力才能使待连接表面在固态下达到紧密接触,并通过调节温

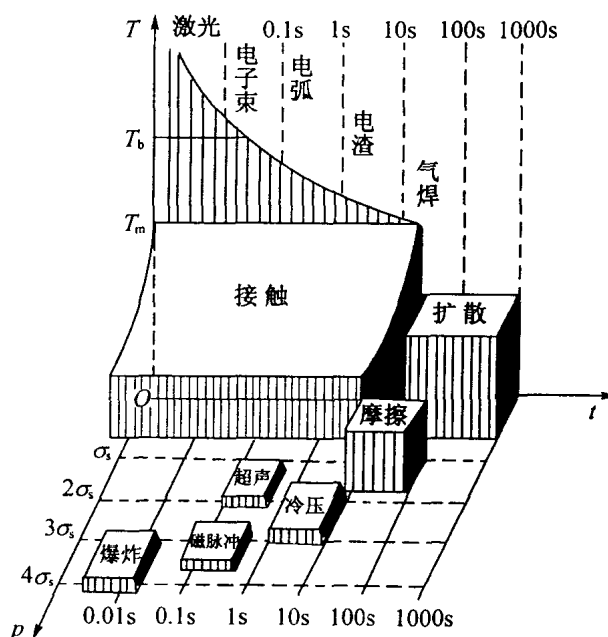


图 0-3 不同焊接方法作用温度、压力及过程持续时间的对比

度、压力和时间使扩散充分进行,从而实现原子间结合。在预定的温度(利用电阻加热、摩擦加热、感应加热、辐射加热和超声振荡等)下待连接表面达到紧密接触时,金属内的原子获得能量,增大活动能力,可跨越待连接界面进行扩散,从而形成固相接合。固相扩散连接、电阻点焊、摩擦焊、超声波焊等均属固相连接。电阻焊在汽车工业中应用广泛,但近年来,已有逐步被激光焊接代替的趋势;相反,随着新型材料的不断出现,扩散连接的应用领域正在迅速扩大。

液-固相连接,与固相连接的不同之处在于待焊表面并不直接接触,而是通过两者毛细间隙中的中间液相相联系。这样,在待连接的同质或异质固态母材与中间液相之间必存在两个固-液界面,由于液-固相间能更充分进行扩散,可实现很好的原子结合。钎焊和液相扩散连接即属此类方法。形成中间液相的填充材料称为钎料。显然,钎料的熔点必须低于母材的熔点。

为能在有限的时间内掌握材料实现冶金连接的各种方法的基本原理,本书以连接方法为主线,以熔化焊(液相连接)、钎焊(液-固连接)和固相扩散连接(固相连接)的基础理论为重点来进行叙述。

4. 材料连接原理的任务与内容

材料连接原理是“材料成型与控制工程专业”和“金属材料工程专业”的主要基础理论课程之一,概括了原“焊接专业”的焊接冶金学和钎焊、压力焊、高能密度焊的主要基本原理。学习该课程的目的就是为将来研究和解决具体实际的材料连接问题打下坚实的基础。学习的主要内容:金属材料在熔化焊时的热过程;有关化学冶金和物理冶金方面的普遍性规律;高能密度焊接方法和特点;钎焊和扩散连接的基本原理与影响连接过程的因素、连接质量的控制;在这个基础上来分析各种条件下材料的连接行为,为制定合理的连

接工艺、探索提高连接质量的新途径、开发新的连接技术提供理论依据。此外,还要掌握电阻焊、摩擦焊和胶接的基本原理,为实际应用打下基础。因此,本课程在专业教学中占有重要的地位。

参考文献

- 1 曾汉民. 高技术新材料要览. 北京:中国科学技术出版社,1993
- 2 任家烈等. 近代材料加工原理. 北京:清华大学出版社,1999
- 3 陈伯蠡. 焊接冶金原理. 北京:清华大学出版社,1991
- 4 张文钺. 焊接冶金学. 北京:机械工业出版社,1995
- 5 J F Lancaster. Metallurgy of Welding. London: George Allen & Unwin, 1980
- 6 K 依斯特林格著. 焊接物理冶金导论. 唐慕尧等译. 北京:机械工业出版社, 1989
- 7 张文钺主编. 焊接物理冶金. 天津:天津大学出版社, 1991
- 8 J F Lancaster. The Physics of Welding. New York: Pergamon Press, 1984
- 9 赵喜华. 压力焊. 北京:机械工业出版社, 1997
- 10 李志远,张九海等. 先进连接方法. 北京:机械工业出版社, 2000

第一章 熔化焊热源及接头形成

焊接是材料加工工程中的一种重要工艺。随着新材料的不断涌现,材料的焊接技术已成为一门独立的学科。目前,焊接过程所采用的能源主要是热能和机械能。对于熔化焊来说,主要采用热能。

本章主要讨论熔化焊热源的种类、特征、熔化焊温度场及接头的形成过程。这些对于焊接化学冶金、接头形成以及接头应力和缺陷的产生与防止都有着重要的影响。

1.1 熔化焊热源及温度场

1.1.1 焊接热源

熔化焊工艺的发展过程反映了焊接热源的发展过程。从 19 世纪末的碳弧焊到 20 世纪末的微波焊的发展来看,新热源的出现,促进了新的焊接技术的产生。在科学技术不断进步,生产规模日益发展的过程中,新材料和新结构的出现,往往需要相应的焊接热源和焊接工艺,来满足工程建设的要求。从目前的发展趋势来看,焊接逐步向高质量、高效率、降低劳动强度和能量消耗的方向发展。若从这种趋势出发,对焊接热源的要求应是:能量密度高度集中,快速实现焊接过程,并保证得到高质量的焊缝和最小的焊接热影响区。

1. 焊接热源的种类及特征

根据焊接生产的基本要求,满足焊接条件的焊接热源有以下几种。

(1)电弧热:利用气体介质在两电极之间产生的强烈而持久的放电过程所产生的热能来作为焊接热源,这种焊接称为电弧焊。如手工电弧焊、埋弧焊、气体保护焊(TIG、MIG 和 MAG)等多种焊接方法。因此,电弧热是现代焊接中应用最广泛的热源。

(2)等离子弧:利用等离子焊炬,将阴极和阳极之间的自由电弧压缩成高温、高电离度及高能量密度的电弧。利用等离子弧作为焊接热源的熔焊方法称为等离子弧焊。

(3)电子束:利用真空中被电场加速的集束电子轰击被焊工件表面所产生的热能作为焊接热源。由于热能高度集中和在真空中焊接,故焊接质量很高,如电子束焊。

(4)激光束:通过受激辐射而使放射增强的光(激光),经聚焦产生能量高度集中的激光束作为焊接热源,如激光焊。

(5)化学热:利用可燃性气体的燃烧热和铝、镁热剂的反应热来作为焊接热源,如气焊、热剂焊。

以上是熔化焊的主要热源形式。此外,还有其它热源可用于压力焊和钎焊等。

(6)电阻热:利用电流通过导体时产生的电阻热作为焊接电源(如电阻焊)。采用这种热源的焊接工艺具有高度的机械化和自动化水平,但需要强大的电力供应。

(7)高频热源:利用高频感应产生的二次电流作为热源,对具有磁性的金属材料进行局部集中加热,其实质是电阻加热的另一种形式。这种加热方式的能量高度集中,故可实

现很高的焊接速度,如管材的高频焊。

(8)摩擦热:利用机械摩擦所产生的热量进行焊接,如摩擦焊。

每种焊接热源都具有不同的特性,如最小加热面积、最大功率密度和正常焊接规范条件下的温度等。这些特性不同,所得到的焊缝质量也不相同。理想的焊接热源应具有加热面积小、功率密度高和加热温度高等特点。表 1.1 列出了各种焊接热源的主要特性,从表中可见,等离子弧、电子束和激光束都是比较满意的焊接热源。

表 1.1 各种焊接热源的主要特性

热 源	最小加热面积/ m^2	最大功率密度/ (kW/cm^2)	温 度/ K
乙炔火焰	10^{-6}	2×104	3 473
金属极电弧	10^{-7}	105	6 000
钨极氩弧(TIG)	10^{-7}	1.5×105	8 000
埋弧焊	10^{-7}	2×105	6 400
电渣焊	10^{-6}	105	2 300
熔化极氩弧和 CO_2 气体保护焊	10^{-8}	105~106	—
等离子弧	10^{-9}	1.5×106	18 000~24 000
电子束	10^{-11}	108~1 010	—
激光束	10^{-12}	108~1 010	—

2. 焊接热效率

焊接时,焊接热源所产生的热量因向周围介质散热和飞溅等原因而不能被工件全部吸收。所以,真正用于焊接的热量只是热源提供热量的一部分。

(1) 电弧焊的热效率 如果电弧是无感的,此时电能全部转化为热能,则电弧的功率为

$$q = UI \quad (1-1)$$

式中, q 为电弧功率,即电弧在单位时间内所放出的能量(W); U 为电弧的电压(V); I 为焊接电流(A)。若能量不全部用于加热焊件,则加热焊件获得的有效热功率为

$$q_e = \eta UI \quad (1-2)$$

式中, η 为加热过程中的功率有效系数或称热效率。在一定条件下 η 是常数,主要取决于焊接方法、焊接规范、焊接材料和保护方式等。不同焊接方法的电弧热效率如表 1.2 所示。需要指出的是焊接热效率 η 仅仅反映焊件所吸收的热量大小,而不能反映热量在焊缝和热影响区上的分配,即热能分配的合理性。电弧焊的热量分配如图 1-1 所示。焊件所吸收的热量可分为两部分:一部分用于熔化金属而形成焊缝;另一部分使母材近缝区的温度升高以致发生组织变化从而形成组织和性能都有别于母材的热影响区。实际上,用于熔化金属形成焊缝的热量才是真正热效率。若从保证焊接质量的角度看,形成热影响区的热量越小越好。

(2) 电渣焊的热效率 电渣焊时,由于渣池处于厚大焊件的中间,热能主要损失于强制焊缝成形的冷却滑块,所以热量向外散失较少。实践表明,焊件越厚,滑块带走热量的比例越小,这说明焊件的厚度越大,电渣焊的热效率越高。例如,90mm 厚钢板电渣焊时,其热效率可达到 80% 以上。另外,电渣焊时的速度越慢,在金属熔化的同时,大量的热量向焊缝周围的母材传导,易使焊接热影响区过宽,晶粒粗大,焊接接头的机械性能下降。