



北京市高等教育精品教材立项项目

张彦华 编著

焊接结构原理



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



北京市高等教育精品教材立项项目

焊接结构原理

张彦华 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以焊接结构基本原理为核心编写。全书共分6章。其中:第1章介绍焊接热力过程分析方法;第2章介绍焊接接头的应力分布及强度计算;第3章介绍焊接结构的不完整性问题;第4章介绍焊接结构断裂行为、断裂力学分析方法和断裂控制基本原理;第5章介绍焊接结构疲劳强度及分析方法;第6章介绍焊接结构设计的基本方法。

本书可作为材料成型与控制工程专业高年级本科生及材料加工工程专业研究生的教材,也可供有关科学研究和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接结构原理 / 张彦华编著. — 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-5124-0225-6

I. ①焊… II. ①张… III. ①焊接结构 IV.

①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 188954 号

版权所有, 侵权必究。

焊接结构原理

张彦华 编著

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 787×960 1/16 印张: 18.25 字数: 409 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷 印数: 3 000 册

ISBN 978-7-5124-0225-6 定价: 39.00 元

前 言

焊接结构在航空、航天、兵器、舰船及核能等工程装备与结构中得到广泛应用。焊接结构具有减轻质量、提高结构的整体性等优势,现代金属结构正在不断扩大焊接结构的应用范围。

尽管焊接结构具有特定的优势,但是,焊接应力与变形、焊接接头的不均匀性、应力集中以及焊接缺陷等问题都对焊接结构力学行为产生影响。研究焊接结构行为,发展焊接结构分析方法,是现代焊接结构设计与制造、使用与维护、安全评定、新材料与新结构的应用等方面的重要基础。焊接结构的设计与制造需要以焊接结构基本原理为指导。编写焊接结构原理教材是有关学科人才培养的重要基础,同时也为工程技术人员系统认识焊接结构行为提供参考。

焊接是一个包括热力耦合、热流耦合、热冶金耦合的复杂过程,焊接热作用贯穿于整个焊接结构的制造过程中。焊接热过程具有集中、瞬时的特点,对材料的显微组织状态有很大影响,也使构件产生焊接应力变形。焊接热过程研究是焊接应力与变形分析的重要基础,涉及传热学、弹塑性力学等理论。研究的目的是掌握焊接应力与变形的规律,以便在焊接结构设计和制造中对焊接应力与变形进行控制。

构成焊接结构的可以是大型复杂的工程结构,也可以是微小型连接件。由于焊接接头是焊接结构的关键环节,因此焊接结构研究的重点是焊接接头的力学行为。根据焊接结构的设计、制造和使用要求,焊接结构研究的主要内容包括焊接应力与变形、焊接结构的强度、断裂行为和疲劳性能等问题。

本教材以焊接结构基本原理为核心编写。全书共分6章。其中:第1章介绍焊接热力过程分析方法;第2章介绍焊接接头的应力分布及强度计算;第3章介绍焊接结构的不完整性问题;第4章介绍焊接结构断裂行为、断裂力学分析方法和断裂控制基本原理;第5章介绍焊接结构疲劳强度及分析方法;第6章介绍焊接结构设计的基本方法。

本教材是作者在 20 年来从事焊接结构理论教学与学术研究的基础上完成的。在编写过程中参考了大量有关的经典著作和最新研究成果,部分参考文献已列于书末,尚有一些资料未能一一列出,敬请谅解。作者力求使本教材能够适应现代焊接结构教学的需要,但由于相关领域的知识和水平有限,书中的内容难免存在疏漏和错误,望读者予以指正。

本书的编写得到北京市精品教材建设项目的资助。

作 者

2010 年 9 月

目 录

绪 论	1
0.1 焊接结构的应用	1
0.2 焊接结构的特点	3
0.3 焊接结构的研究内容	4
第 1 章 焊接力学分析	6
1.1 焊接热源与热功率	6
1.1.1 焊接热源	6
1.1.2 焊接热源的热功率	7
1.2 焊接传热分析	12
1.2.1 热传导基本概念	12
1.2.2 焊接温度场的解析分析	16
1.2.3 焊接热循环	21
1.3 热变形与应力	25
1.3.1 热变形与热应力	25
1.3.2 残余应力	29
1.4 焊接应力	32
1.4.1 焊接热应力	32
1.4.2 焊接残余应力	35
1.4.3 焊接残余应力对结构工作性能的影响	43
1.4.4 焊接应力的调节和消除	46
1.5 焊接变形	49
1.5.1 纵向收缩与弯曲变形	50
1.5.2 横向收缩变形	53
1.5.3 角变形与扭曲变形	56
1.5.4 屈曲变形	60
1.5.5 焊接变形的控制与矫正	61
1.6 焊接热力过程数值模拟分析	68
1.6.1 焊接热力过程分析	68
1.6.2 焊接热力过程数值模拟方法	71

思考题	73
第2章 焊接接头与结构强度	74
2.1 焊接接头	74
2.1.1 焊接接头及特点	74
2.1.2 焊接接头及焊缝的基本形式	76
2.2 焊接接头的工作应力分布	84
2.2.1 电弧焊接头的工作应力分布	84
2.2.2 点焊接头的工作应力分布	89
2.3 焊接接头的强度非匹配	90
2.3.1 焊接接头强度非匹配的基本概念	90
2.3.2 对接接头强度非匹配力学行为	92
2.4 焊接接头强度计算	95
2.4.1 对接接头的强度计算	95
2.4.2 角焊缝的强度计算	97
2.4.3 点焊接头的强度计算	106
2.4.4 焊缝的许用应力	109
2.5 焊接管节点及强度	110
2.5.1 直接焊接管节点的构造形式	110
2.5.2 相贯焊缝的计算	113
2.5.3 直接焊接管节点的承载力	114
2.6 压力容器焊接接头与结构强度	117
2.6.1 压力容器焊接接头	117
2.6.2 压力容器焊接结构的强度	119
思考题	122
第3章 焊接结构的不完整性	124
3.1 概 述	124
3.1.1 焊接结构不完整性表征	124
3.1.2 典型焊接缺陷及特征	125
3.1.3 焊接缺陷对结构强度的影响	131
3.2 焊接裂纹分析	133
3.2.1 热裂纹	133
3.2.2 焊接冷裂纹	138

3.2.3 再热裂纹	143
3.2.4 层状撕裂	144
3.2.5 应力腐蚀开裂	144
3.3 焊接缺陷的检验与评定	148
3.3.1 焊接缺陷的检验方法	149
3.3.2 焊接缺陷评定	158
思考题	161
第4章 焊接结构断裂分析及控制	162
4.1 金属材料脆性断裂与延性断裂	162
4.1.1 脆性断裂	162
4.1.2 延性断裂	164
4.1.3 韧性—脆性转变	164
4.2 断裂力学基础	165
4.2.1 含裂纹构件的断裂行为	165
4.2.2 线弹性断裂力学	167
4.2.3 弹塑性断裂力学	174
4.2.4 剩余强度	176
4.2.5 动态裂纹扩展与止裂	178
4.3 焊接接头的断裂力学分析	182
4.3.1 含裂纹焊接接头的断裂模式	182
4.3.2 失配性对焊缝裂纹驱动力的影响	183
4.4 焊接结构的断裂控制	184
4.4.1 影响焊接结构脆性断裂的主要因素	184
4.4.2 焊接结构的断裂控制	186
4.4.3 焊接结构抗断裂性能的试验评定方法	189
4.4.4 焊接结构的合于使用评定	203
思考题	208
第5章 焊接结构疲劳强度	209
5.1 材料的疲劳强度	209
5.1.1 疲劳断裂机理	209
5.1.2 材料的疲劳性能	213
5.2 焊接接头的疲劳及影响因素	225

5.2.1	焊接接头的疲劳	225
5.2.2	影响焊接接头疲劳断裂的主要因素	227
5.3	焊接接头的疲劳分析方法	234
5.3.1	焊接接头疲劳强度分析方法	234
5.3.2	疲劳裂纹扩展参数	246
5.3.3	疲劳裂纹扩展的概率分析	248
5.3.4	腐蚀疲劳	249
5.4	焊接结构的抗疲劳设计与工艺措施	251
5.4.1	焊接结构的抗疲劳设计	251
5.4.2	焊接结构的抗疲劳工艺措施	253
	思考题	258
第 6 章	焊接结构设计方法	259
6.1	焊接结构的基本要求	259
6.2	载 荷	260
6.2.1	载荷分类	260
6.2.2	载荷组合	261
6.3	焊接结构的失效形式	261
6.3.1	断裂失效	261
6.3.2	表面损伤	262
6.3.3	过量变形	263
6.3.4	材质变化失效	263
6.4	焊接结构承载能力的设计计算方法	264
6.4.1	常规设计方法	264
6.4.2	概率极限状态设计法	265
6.4.3	分析设计	268
6.5	焊接结构的构造设计	274
6.5.1	截面设计	274
6.5.2	可达性设计	274
6.5.3	焊接应力和变形控制设计	276
6.5.4	抗震性设计	278
	思考题	280
	参考文献	281

绪 论

焊接是实现材料精确、可靠、低成本、高效连接的关键技术,是产品设计与工艺创新的手段。研究焊接结构行为及分析方法是现代焊接结构设计与制造、使用与维护及安全评定等方面的重要基础,有利于促进新材料与新结构的应用。

0.1 焊接结构的应用

焊接结构在航空、航天、交通、能源、化工和建筑等工程装备与结构中得到广泛应用。现代飞机结构正在不断扩大焊接结构的应用范围。钛合金构件的氩弧焊、电子束与激光焊、等离子电弧焊等先进工艺具有减轻质量、提高结构的整体性等优势。新型战斗机的承力框、带筋壁板采用焊接结构可降低加工制造成本。在高性能发动机制造中,大力发展摩擦焊、扩散焊、电子束焊接技术,积极采用整体结构以减少零件数量并减轻结构质量,提高航空发动机的推重比。如美国海军、普惠公司、GEAE 公司、英国的罗罗公司均在研究开发用线性摩擦焊来制造整体叶盘,风扇叶片则采用了超塑成型—扩散连接方法制造,从而大大减轻了轮盘的质量。

航天器的发展要求不断采用新材料、新结构和先进的制造技术。焊接是运载火箭与导弹、卫星、航天飞机和空间站等航天结构的主要制造工艺。如长征三号运载火箭推进剂贮箱的焊缝总长近 600 m,螺旋管式喷管焊缝总长达 820 余米。马丁公司和马歇尔飞行中心研究使用变极性等离子弧焊(VPPA)焊接厚度为 3~26 mm、焊缝长度为 900 m 的 2195 铝锂合金外贮箱,比用气体保护钨极电弧焊(GTA)焊接的质量高,且成本降低。近年来,搅拌摩擦焊受到航天工业的关注。英国焊接研究所(TWI)应用搅拌摩擦焊为波音公司制造了铝合金航天飞机燃料贮箱(见图 0-1)。洛克希德-马丁公司、波音-麦道公司、罗克韦尔集团、爱迪生焊接研究所等多家航空航天公司和研究机构开展了搅拌摩擦焊的研究与应用评估和开发计划。麦道公司的金属与先进连接技术部进行了数年的将搅拌摩擦焊用于焊接各种铝合金的研究工作,并已于 1996 年将该工艺用于制造德尔塔火箭推进剂的贮箱。

在现代造船业中,焊接是一项很关键的工艺,它不仅对船舶的建造质量有很大的影响,而且对提高生产率、降低成本、缩短造船周期都起着很大的作用。焊接工时在整个船体建造中占 30%~40%。船体结构由板材和型材利用焊接方法连接而成。由于焊接是对船体结构的局部加热过程,加热范围小,温度梯度大,致使结构产生复杂的热应力和变形,冷却后就会出现残余应力和变形。热应力和残余应力容易导致构件在焊接过程中或焊后出现开裂;而变形使构件的后续装配工作发生困难,同时也影响外表的美观,降低连接构件的承载能力。因此,焊接应力与变形直接影响到船舶结构的连接质量和使用安全,又影响到船体建造工作的顺利进行,必

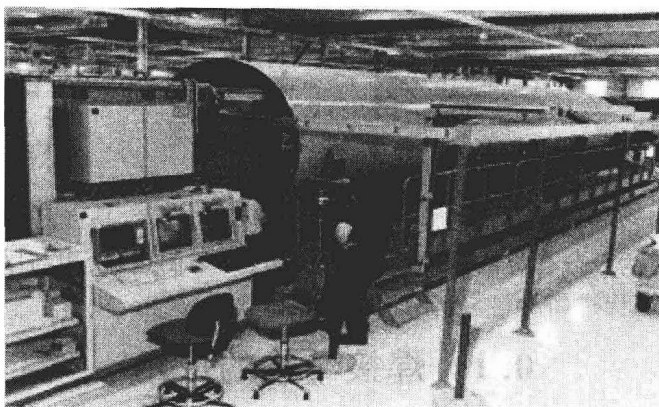


图 0-1 航天飞机燃料贮箱筒体焊接

须予以重视。

随着石油天然气工业的发展,长距离、大口径、高压管道已成为石油天然气输送的重要手段,管线用钢 X56~X70 系列高强度钢已广泛用于管道建设中, X80、X100 钢级管线也处于开发应用阶段。在焊接工艺方面,20 世纪 70—90 年代管线的焊接主要以纤维素下向管道焊条手工焊和半自动 CO_2 焊为主。由于这些方法为手工操作,因此效率低,且焊接质量也受到焊工技能水平的制约。近年来,药芯焊丝的自保护半自动焊、表面张力过渡(STT)型 CO_2 气体保护焊、管道全位置自动焊以及闪光焊、激光焊都得到发展和应用,大大提高了焊接效率和质量。2004 年完成的从我国新疆轮南至上海的西气东输管道全长约 4 000 km,采用 X70 钢,直径为 1 016 mm,管子对接焊缝 35 万条,对接焊缝总长 1 100 多千米。管道焊接质量是长输管道系统安全运行的关键之一,管道焊接过程中不可避免地存在各种各样的焊接缺陷、焊接残余应力、焊接区材料组织性能劣化、外力损伤和接头细节引起的应力应变集中等,加之管道输送压力和所用钢级的提高及其运行条件的变化,防止焊接接头的断裂破坏对确保长输管道系统的安全可靠具有重要意义。

为了开采海上油气资源,需要建造海上平台(见图 0-2)。海上平台是大型焊接结构,工作环境恶劣,对安全性有极高的要求。这些应用于极端环境中的焊接结构,要求采用先进的焊接技术来焊接。焊缝的质量和性能是此类工程结构的关键。深海油气的开采,特别需要发展海上平台焊接结构完整性评估技术以及安全标准,降低维修要求,并提高焊接结构的成本效益。

核电设备中要求最高的是核反应堆压力容器。核反应堆压力容器一般由高强度低合金钢锻件焊接而成,锻件厚度通常在 200 mm 以上,长期在高温高压下工作,并承受中子和 γ 射线辐照。核反应堆压力容器内表面均堆焊超低碳不锈钢,压力壳顶盖组合件和筒体的环缝均采用自动埋弧焊。由于壳壁较厚,多层焊时产生的残余应力大,需经多次消除应力热处理,因此



图 0-2 海上采油平台

要求核反应堆压力容器采用高强度低合金钢,必须具有良好的焊接性,以避免裂纹的产生,并保证焊缝和热影响区有较好的塑性和低温冲击韧度。对辐照区的焊缝,则要求具有足够的塑性、韧性储备,以确保核反应堆压力容器长期安全、可靠地运行。

0.2 焊接结构的特点

焊接结构要满足特定的使用要求,是材料选择和焊接工艺制定的重要依据。焊接结构制造工程技术人员必须了解焊接结构的基本特点。

1. 焊接结构的优点

焊接结构与铆接结构比较,具有以下优点:

① 与铆接接头相比,焊接接头的承载能力强。例如,一般优质焊接接头可以与母材等强度,而铆接接头由于构造上的原因,很难与母材等强度。

② 焊接结构的水密性和气密性都好,而铆接结构在使用中难以保证可靠的水密性和气密性。焊接结构是理想的具有水密性和气密性要求的结构,广泛用于压力容器、船舶和贮罐等结构。

③ 节省材料,减轻结构质量。焊接结构不需要铆接结构中的铆钉和盖板,可减少材料消耗和零件数量,有利于实现结构的轻量化和整体化。

④ 焊接结构的厚度不受限制。在板厚大于 50 mm 时,铆接很难进行,而焊接结构在厚度上基本没有限制。在重型和超重型结构的大厚件连接时,只能采用焊接。

⑤ 焊接结构设计简单,生产效率高。在焊接结构设计中,一般选用简单的对接和角焊缝连接,就可以制造出各种结构。焊接生产效率高,制造周期短,成本低,经济效益好。

2. 焊接结构存在的问题

(1) 焊接应力与变形

由于焊接过程是局部加热,不可避免地产生内应力和变形。若加热时产生较大拉伸应力,会导致焊接裂纹或开裂。焊后的残余应力对结构的强度、刚度、稳定性以及尺寸精度都有较大的影响。

(2) 焊接接头性能的不均匀性

焊接接头是一个组织性能不均匀体。焊缝、热影响区与母材之间的强度和韧性存在不同程度的非匹配性。这种非匹配性对整个结构的强度和断裂行为产生显著的影响,是焊接结构在使用评定中需要考虑的重要因素。

(3) 应力集中

焊接结构的应力集中包括接头区焊趾、焊根及焊接缺陷引起的应力集中和结构截面突变造成的结构应力集中。若在结构截面突变处有焊接接头,则其应力集中更为严重。应力集中对结构的脆性断裂和疲劳强度有很大影响,应采取合理的结构设计和工艺,控制焊接结构的应力集中。

(4) 整体性强使结构刚性大

焊接结构的整体性使结构具有良好的水密性和气密性,同时也带来了问题,整体性使结构的刚性增大,提高了对应力集中的敏感性。由于整体性强,一旦有裂纹产生并扩展,裂纹就难以被止住。而在铆接结构中,如果有裂纹产生并扩展,则裂纹扩展到板材边缘和铆钉孔处即终止,铆接接头起到限制裂纹继续扩展的作用。

(5) 焊接缺陷

焊接过程的快速加热和冷却使得局部材料在极不平衡的条件下发生熔化、凝固及固态相变,在焊接区常常会产生裂纹、气孔、未焊透和夹渣等焊接缺陷。焊接缺陷往往是结构破坏的根源,因此,在焊接生产中对焊接缺陷进行检测和判别是保证焊接质量的重要手段。在焊接结构使用过程中,监测缺陷行为并进行评价,对于保证焊接结构的完整性具有重要意义。

0.3 焊接结构的研究内容

1. 焊接热力效应

焊接通常是在材料连接区(焊接区)处于局部塑性或熔化状态下进行的,为使材料达到形成焊接的条件,需要高度集中的热输入。因此,在材料的焊接过程中要利用焊接热源对焊接区进行加热,使其熔化(熔化焊)或进入塑性状态(固相焊接),随后在冷却过程中形成焊缝和焊接接头。这种加热和冷却贯穿于材料焊接过程的始终,称为焊接热过程。

焊接热过程具有集中、瞬时的特点,对材料的显微组织状态有很大影响,也使构件产生焊接应力变形。这种热作用称为焊接热效应。

焊接过程中,对焊件进行不均匀的加热和冷却,焊件内部将产生不协调应变,从而引起焊

接应力与变形。焊接加热时,焊接区受到周围母材的约束作用无法自由热膨胀,只能随焊件同步变形,因此焊接区因膨胀受阻而产生压应力,当压应力超过材料屈服极限后发生不可逆的压缩塑性变形。冷却过程中,焊接区在约束下收缩,最终在构件内部形成残余应力,同时伴随焊接变形的产生。

2. 焊接接头的不完整性

焊接接头的不完整性包括力学和材质两方面。力学方面的不完整性有焊接缺陷、接头形状的不规则性、残余应力和焊接变形等。材质方面的不完整性(或称焊接接头的不均匀性)主要是指由于焊接热循环引起的组织变化、热塑性应变循环产生的材质变化、焊后热处理和矫正变形引起的材质变化等。

焊接结构件中由于焊接接头处几何上的不连续性以及焊接过程的复杂性,容易在焊接接头处产生缺陷(如未焊透、未熔化、夹杂和气孔等)。当焊接结构件承受外载荷作用时,接头缺陷处将会产生应力集中,从而形成断裂源。焊接结构的破坏大部分是由焊接缺陷引起的。

3. 焊接结构的强度问题

焊接接头是由焊缝、熔合区、热影响区(HAZ)和母材组成的不均匀体,其整体强度与母材金属和焊缝金属之间的力学组配有关。焊接接头性能不仅与焊缝金属及母材金属的屈服强度和抗拉强度有关,而且与母材金属及焊缝金属的应变硬化性能有关。焊接接头的强度是焊接结构承受外载作用的基本保证。焊接接头的强度与接头的几何形状及焊缝与母材的强度组配有关。焊缝及母材的强度组配对焊接接头强度有重要影响,是焊接接头强度设计必须考虑的主要因素之一。

焊接结构的强度是要保证焊接结构在承受外载和环境作用下能满足整体性要求。焊接结构的强度要求包括接头的强度、结构的刚度与稳定性、抗断裂性和耐久性等。焊接接头的性能不均匀性、焊接应力与变形、接头细节应力集中和焊接缺陷等因素对焊接结构的强度都有不同程度的影响,焊接结构强度分析应充分考虑这些因素的影响。

第 1 章 焊接力学分析

焊接过程中需要对焊接区域进行加热,使其达到或超过材料的熔点(熔化焊),或接近熔点的温度(固相焊接),随后在冷却过程中形成焊缝和焊接接头。焊接力学分析是研究焊接热过程耦合产生的焊接应力与变形行为。

1.1 焊接热源与热功率

焊接通常是在材料连接区(焊接区)处于局部塑性或熔化状态下进行的,为使材料达到形成焊接的条件,需要高度集中的热输入。因此,在材料的焊接过程中要利用焊接热源对焊接区进行加热。热源是将电能、化学能或机械能转变为热能的装置,发展高效、洁净、低耗的热源是现代焊接技术的重要方向。

1.1.1 焊接热源

1. 焊接对热源的主要要求

现代焊接生产对于焊接热源的主要要求如下:

- ① 具有高能量密度,并能产生足够高的温度。高能量密度和高温可以使焊接加热区域尽可能小,热量集中,减小热影响区,可实现高速焊接过程,提高生产率。
- ② 热源性能稳定,易于调节和控制。热源性能稳定是保证焊接质量的基本条件。同时,为了适应各种产品的焊接要求,焊接热源必须具有较宽的功率调节范围,以及对于焊接工艺参数的有效控制。
- ③ 具有较高的热效率,降低能源消耗。焊接能源消耗在焊接生产总成本中所占的比例是比较高的。因此,尽可能提高焊接热效率对节约能源消耗有着重要的技术经济意义。

2. 常用焊接热源

目前,焊接技术中广泛应用的热源主要有以下形式:

(1) 电弧

利用在气体介质中放电产生的电弧热为热源,如焊条电弧焊、埋弧焊、 CO_2 气体保护焊、惰性气体保护焊(TIG、MIG)等。电弧所产生的热量通过传导、辐射和(或)对流传递到工件上。

(2) 电阻热

利用电流通过导体产生的电阻热作为焊接热源。如电阻焊(点焊和缝焊)及电渣焊。前者利用焊件金属本身电阻产生的电阻热,后者则利用液态熔渣的电阻产生的电阻热来进行焊接。

(3) 电磁感应

感应加热利用涡流原理和变压器原理来实现。将导电的工件置于一个感应线圈的感应场内,线圈通以高频电流(5 kHz~5 MHz),靠物体内部感应出的涡流使物体直接产生热量,这就是涡流原理。变压器原理是让工件本身起一个二级线圈的作用,工件感应出低电压、大电流,这也是一种间接供热的方式。如果采用二级线圈为加热元件,那么就变成导电加热的方式了。

(4) 等离子束

将电弧放电或高频放电形成的等离子体通过一水冷喷嘴引出形成等离子体束电弧,由于喷嘴中电弧受到电磁压缩作用和热压缩作用,使等离子束具有较高的能量密度和极高的温度(1 800~2 400 K),是一种高能量密度焊接热源。

(5) 激光束

利用经聚焦后具有高能量密度的激光束作为焊接热源。用于焊接的主要是CO₂激光和YAG激光。当激光束到达材料上时,一部分能量被反射掉了,其余部分在工件上转换为热量。生成的热量能使大多数金属熔化并气化。由于激光束可聚集在10~100 μm这样极小的范围,所以激光束的能量密度很高($10^4 \sim 10^6$ W/mm²)。

(6) 电子束

在真空中高电压场作用下,高速运动的电子经过聚焦形成高能密度电子束,当它猛烈轰击金属表面时,电子的动能转化为热能,利用这种热源的焊接方法称为电子束焊,它也是一种高能焊接方法。电子束的能量密度可达 10^7 W/mm²,它可用磁性透镜聚焦,使之达到足够的高密度去熔化工件并使材料气化。

(7) 化学热

利用可燃气体的燃烧反应热或铝、镁热剂的化学反应热来进行焊接。如应用氧-乙炔焰(或氢氧焰、液化气焰)为热源的气焊、切割、铝热剂焊和镁热剂焊等。这些能量转换过程是燃烧或其他放热的化学反应。

(8) 摩擦热

摩擦生热是机械能转换为热能的不可逆过程。在摩擦过程中,机械能可以高效地转换为热能,因此科学地利用摩擦进行材料加工受到关注。目前,以摩擦焊接为代表的摩擦加工技术正在发展成为一项低能耗、高效、洁净的热制造工艺。

1.1.2 焊接热源的热功率

焊接热源的主要参数是在焊接区的热流量或热功率。焊接热源的种类不同,性能不同,其在焊接过程中的热流量也不同。这里仅以应用最广且具有代表性的电弧焊热源——焊接电弧加热为主进行讨论。

1. 焊接电弧的热效率

焊接时电弧将电能转换为热能,其总功率或热流量 Φ 为

$$\Phi_0 = IU \quad (1-1)$$

加热工件和焊丝的有效功率 Φ 为

$$\Phi = \eta IU \quad (1-2)$$

式中: η ——电弧热效率系数;

I ——焊接电流, A;

U ——电弧电压, V;

Φ_0, Φ ——焊接电弧总功率和有效功率, W。

制定焊接工艺中,常用单位长度焊缝的热输入 q_w (也称为焊接线能量)作为焊接规范(焊接电流、电弧电压、焊接速度)的一个综合指标,可由下式表示:

$$q_w = \frac{\eta IU}{v} \quad (1-3)$$

式中: q_w ——焊接热输入或线能量, J/mm;

v ——焊接速度, mm/s。

焊接热输入对焊缝成型、热影响区组织和焊接生产率等都有较大影响。

2. 焊接电弧的能量密度

焊接电弧的加热通常仅作用于焊件上的一个很小面积上。受到电弧直接作用的小面积加热区域叫做加热斑点,电弧通过加热区将热能传递给焊件(见图 1-1)。在加热区中,热能的分布一般也不是均匀的。加热区的大小及其上的热能分布,主要取决于电弧的集中程度及焊接规范参数等因素。将单位有效面积上的热功率称为能量密度,单位为 W/cm^2 。能量密度大时,可更为有效地将热源有效功率用于熔化金属并减小热影响区。电弧的能量密度可达到 $10^2 \sim 10^4 W/cm^2$,而气焊火焰的能量密度为 $1 \sim 10 W/cm^2$ 。典型焊接热源的能量密度分布如图 1-2 所示。

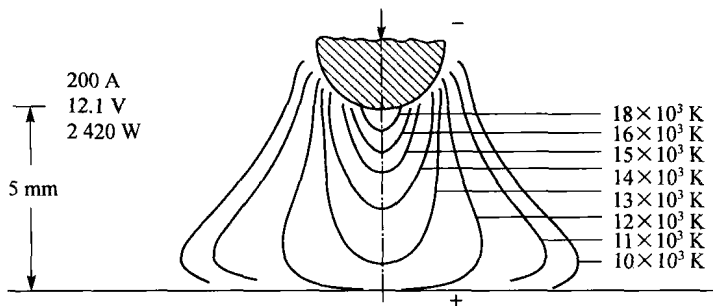


图 1-1 电弧温度分布

加热斑点中电弧直接作用的阴极斑点或阳极斑点称为活性斑点,是带电粒子直接轰击的地区。在活性斑点区内具有很高的能量密度。活性斑点区周围地区则主要是通过电弧弧柱的