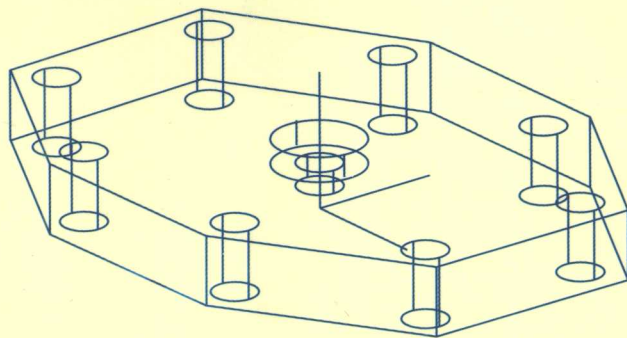


普通高等院校材料化工类“十一五”规划教材

材料成形原理

CAILIAO CHENGXING YUANLI

主编 赵洪运



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校材料化工类“十一五”规划教材

材料成形原理

主编 赵洪运
编者 张洪涛 骆宗安
周振平 李晨希

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书分三篇,共十四章。第一篇是焊接成形原理,主要内容包括熔化焊热源特点及焊接热循环、熔化焊接头成形过程及原理、熔化焊接头组织性能特点及常见缺陷、压力焊接头成形过程及工艺、钎焊接头成形过程及原理、钎焊接头缺陷成因及质量控制、焊接技术的一些新进展。第二篇是液态成形原理,主要内容包括液态成形的基本理论、液态金属的结构与性质、液态成形过程的传热、液态金属的结晶、铸件凝固组织的形成及控制、铸件中的缺陷及其控制。第三篇是塑性成形原理,主要内容包括金属塑性成形物理基础、应力与应变、变形力学方程、塑性成形问题解法。

本书可作为普通高等院校“材料成形及控制工程”专业的理论基础教材,也可供金属材料工程、热加工以及机械、船舶等工程专业的师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形原理/赵洪运主编. —北京:国防工业出版社,2009.9

普通高等院校材料化工类“十一五”规划教材
ISBN 978-7-118-06319-6

I. 材... II. 赵... III. 工程材料—成形—高等学校—教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 064320 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 24 字数 554 千字

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

《材料成形原理》是根据教育部面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革的总体要求,以及教育部“21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”教改项目的具体规划和要求,结合目前我国高等院校专业和课程设置特点,在吸收相关教材内容精华和部分前沿知识内容的基础上编写而成的。本书从培养学生宽口径、厚基础的目标出发,内容翔实、科学、系统,叙述具体,说理清晰,深浅适度,并力求做到加强基础、突出重点、注重实用。

本书把金属材料的焊接成形、液态成形和塑性成形等近代材料成形技术中的共同的物理化学现象、基本规律特点、基本原理及部分先进成形技术加以阐述,使读者对材料成形过程的基本原理与工艺方法及该领域前沿技术有较深入和系统的理解,从而为后续课程的学习和解决实际工程问题奠定基础。全书分为三篇,共 14 章。第一篇主要叙述不同工艺条件下焊接接头的成形过程及原理、焊接成形过程中的化学冶金反应、焊接接头组织性能特点等共性问题,同时对焊接领域的一些新技术和新工艺进行了简要介绍;第二篇主要论述液态金属的基本特性、液态金属成形过程及冷却结晶和铸件凝固组织性能特点及质量控制;第三篇主要讲述金属塑性成形过程中的力学原理。本书既可作为普通高等学校“材料成形及控制工程”专业本科学生的教材,也可作为金属材料工程、热加工以及机械、船舶等工程专业师生和工程技术人员的参考用书。

本书由哈尔滨工业大学(威海)赵洪运教授主编,东北大学王国栋院士主审。第一篇由哈尔滨工业大学(威海)赵洪运、张洪涛两位老师编写,冯吉才教授审核,其中第 1 章、第 3 章、第 4 章由张洪涛老师编写,第 2 章由赵洪运老师编写;第二篇由沈阳工业大学的李晨希教授负责统稿策划,并编写第 9 章和第 10 章,浙江台州学院的周振平老师编写第 5 章至第 8 章,袁晓光教授负责审稿;第三篇由东北大学骆宗安老师编写,王国栋院士审核。另外,本书在编写过程中参考了同行专家、学者的研究成果或著作,在此一并表示感谢。

由于编者的水平所限,书中难免有不当之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2009 年 5 月

目 录

第一篇 焊接成形原理

第 1 章 熔化焊	2
1.1 熔化焊热源及温度场	2
1.1.1 焊接热源	2
1.1.2 焊接温度场	5
1.2 焊接热循环.....	10
1.2.1 焊接热循环的意义	10
1.2.2 焊接热循环的基本参数和主要特征	10
1.2.3 焊接热循环参数的计算	12
1.2.4 多层焊接热循环	14
1.2.5 焊接热循环的影响因素	15
1.3 熔化焊接头的形成.....	16
1.3.1 焊接材料熔化与熔池形成	16
1.3.2 焊接接头的形成	18
1.3.3 熔化焊接冶金与焊接性问题	20
1.4 焊接气氛及其与金属的相互作用.....	20
1.4.1 焊接区的气体	21
1.4.2 氢与金属的作用	24
1.4.3 氮与金属的作用	28
1.4.4 氧与金属的作用	30
1.5 焊接材料与焊接熔渣.....	33
1.5.1 焊接材料	33
1.5.2 焊接熔渣	36
1.6 焊接化学冶金反应.....	42
1.6.1 焊接化学冶金反应区的特点	43
1.6.2 焊接冶金反应过程	44
1.6.3 焊缝金属化学成分的控制	49
1.7 熔化焊接头的组织与性能.....	49
1.7.1 焊缝金属的组织与性能	50
1.7.2 焊接热影响区的组织与性能	61

1.8	焊接冶金缺陷	69
1.8.1	气孔	69
1.8.2	焊接热裂纹	73
1.8.3	冷裂纹	78
1.8.4	其它焊接裂纹简介	84
第2章	压力焊	86
2.1	电阻焊	86
2.1.1	点焊	87
2.1.2	凸焊	99
2.1.3	缝焊	100
2.1.4	对焊	102
2.2	摩擦焊	109
2.2.1	摩擦焊接过程分析	111
2.2.2	摩擦焊规范参数	112
2.2.3	摩擦焊接头中的缺陷	114
2.3	扩散焊	114
2.3.1	概述	115
2.3.2	固相扩散连接	117
2.3.3	超塑性成形扩散连接	118
2.3.4	瞬间液相扩散连接	119
第3章	钎焊	121
3.1	钎焊连接的基本特征	121
3.2	液态钎料与固态母材的润湿、铺展及填缝	122
3.2.1	液体钎料与固体母材的润湿、铺展及填缝	122
3.2.2	影响钎料润湿性和填缝性的因素	124
3.2.3	钎料润湿性、填缝性的评定	126
3.3	金属表面氧化膜的去除机制及钎剂的作用	127
3.3.1	金属母材表面的氧化膜及其去除机制	127
3.3.2	钎剂的作用	129
3.4	液态钎料与固态母材的相互作用	129
3.4.1	固态母材向液态钎料的溶解	129
3.4.2	钎料组分向母材的扩散	131
3.5	钎焊接头缺陷成因及质量控制	131
3.5.1	接头不致密性缺陷	131
3.5.2	熔析和溶蚀	133
3.5.3	母材的自裂	134
第4章	焊接技术的一些新进展	135
4.1	电子束焊接	135
4.1.1	电子束焊接的基本原理	136

4.1.2	电子束焊接的焊接参数及其对焊缝成形的影响	137
4.2	激光焊接	138
4.2.1	激光及激光发生器	138
4.2.2	激光焊接机理	138
4.2.3	激光焊接工艺及参数	140
4.3	等离子弧焊接	143
4.3.1	等离子弧的形成及特征	143
4.3.2	双弧现象及其防止	144
4.3.3	等离子弧焊接种类	146
4.4	计算机在焊接技术中的应用	147
4.4.1	焊接过程模拟技术	147
4.4.2	焊接参数的模糊控制技术	147
4.4.3	柔性焊接机器人工作站集成控制系统	148

第二篇 液态成形原理

第5章	概述	149
5.1	液态成形与凝固学	149
5.2	凝固过程的研究对象	150
5.3	凝固理论的研究进展	150
第6章	液态金属的结构与性质	152
6.1	液态金属的结构	152
6.1.1	液态金属的实验结果及其分析	152
6.1.2	实际金属的液态结构	154
6.1.3	液态金属结构理论	156
6.2	液态金属的物理性质	157
6.2.1	熔点和熔化潜热	157
6.2.2	沸点和蒸发热	157
6.2.3	比热容	157
6.2.4	导热性	157
6.2.5	液态金属的热膨胀与凝固体收缩率	157
6.2.6	扩散系数	158
6.2.7	黏度	158
6.2.8	表面张力	160
6.3	液态金属的充型能力	166
6.3.1	金属液流动性与充型能力	166
6.3.2	充型能力的影响因素及提高措施	166
6.4	半固态合金的流变性及半固态成形	168

6.4.1	半固态合金的流变性	168
6.4.2	半固态成形简介	172
第7章	液态成形过程的传热	173
7.1	液态成形过程的传热特点与方式	173
7.1.1	铸型的热阻起决定作用	173
7.1.2	金属—铸型界面热阻起决定作用	173
7.1.3	金属凝固层热阻起决定作用	174
7.2	铸件凝固温度场	176
7.2.1	铸件温度场的研究方法	176
7.2.2	影响铸件温度场的因素	178
7.3	铸件凝固时间的确定	179
7.3.1	理论计算法	180
7.3.2	经验计算法	180
7.4	铸件的凝固方式及其对铸件质量的影响	181
7.4.1	凝固动态曲线	181
7.4.2	凝固区域及其结构	181
7.4.3	铸件的凝固方式及其影响因素	182
7.4.4	凝固方式对铸件质量的影响	184
7.4.5	铸铁和球墨铸铁的凝固方式	185
第8章	液态金属的结晶	187
8.1	结晶的热力学条件	187
8.2	晶核的形成	189
8.2.1	均质形核	189
8.2.2	非均质形核	192
8.3	晶体生长	195
8.3.1	固—液界面结构	196
8.3.2	固—液界面类型的决定因素	196
8.3.3	晶体的生长方式与生长速度	198
8.4	纯金属的结晶	200
8.4.1	在正温度梯度下生长的晶体形态	200
8.4.2	在负温度梯度下生长的晶体形态	201
8.5	单相合金的结晶	202
8.5.1	结晶过程的溶质再分配	202
8.5.2	结晶过程中的成分过冷	206
8.6	共晶合金的结晶	212
8.6.1	共晶合金的分类及组织	212
8.6.2	共晶合金的平衡凝固	213
8.6.3	共晶合金的非平衡凝固	219
8.6.4	共晶组织与力学性能的关系	221

8.7	液态金属的流动及其对结晶过程的影响	221
8.7.1	液态金属流动的分类	221
8.7.2	液态流动对结晶过程的影响	223
第9章	铸件凝固组织的形成及控制	225
9.1	铸件宏观凝固组织的特征及形成机理	225
9.1.1	铸件宏观凝固组织的特征	225
9.1.2	铸件宏观凝固组织的形成机理	226
9.2	铸件宏观凝固组织的控制	229
9.2.1	宏观凝固组织对铸件性能的影响	229
9.2.2	获得等轴晶与晶粒细化的途径	229
第10章	铸件中的缺陷及其控制	244
10.1	化学成分的不均匀性	244
10.1.1	微观偏析	244
10.1.2	宏观偏析	246
10.2	铸件中的气孔和非金属夹杂物	251
10.2.1	气孔的种类	251
10.2.2	气孔的形成机理	252
10.2.3	影响气孔形成的因素及防止措施	254
10.2.4	非金属夹杂物	256
10.3	缩孔与缩松	260
10.3.1	收缩的基本概念	261
10.3.2	缩孔与缩松的形成机理	262
10.3.3	影响缩孔与缩松的因素及防止措施	265
10.4	热裂、应力、变形和冷裂	268
10.4.1	铸件的热裂	268
10.4.2	铸造应力	272
10.4.3	铸件的变形和冷裂	278

第三篇 塑性成形原理

第11章	金属塑性成形的物理基础	281
11.1	弹性变形和塑性变形的概念	281
11.2	金属的塑性变形	282
11.2.1	单晶体的塑性变形	282
11.2.2	多晶体的塑性变形	282
11.2.3	位错运动	282
11.3	金属的加工硬化、回复和再结晶	283
11.3.1	加工硬化	283

11.3.2	回复	283
11.3.3	再结晶	283
11.3.4	二次再结晶	284
11.4	金属加工时变形的分类	284
11.5	金属加工时的附加应力和残余应力	285
第 12 章	应力与应变	286
12.1	应力	286
12.1.1	应力状态的基本概念	286
12.1.2	点应力状态	288
12.2	主应力	290
12.2.1	主应力、应力张量不变量	290
12.2.2	应力椭球面	292
12.3	主剪应力	292
12.4	应力张量的分解	294
12.4.1	八面体面和八面体应力	294
12.4.2	应力张量的分解	295
12.4.3	主应力图与主偏差应力图	297
12.5	应变	298
12.5.1	应变状态的基本概念	298
12.5.2	几何方程	299
12.5.3	一点附近的应变分析	302
12.6	主应变、应变张量不变量	304
12.7	应变张量分解	305
12.8	主应变图	306
12.9	应变速率	307
12.10	应变表示法	308
12.10.1	工程相对变形表示法	308
12.10.2	对数变形表示法	308
第 13 章	变形力学方程	311
13.1	力平衡方程	311
13.1.1	直角坐标系的力平衡方程	311
13.1.2	用极坐标表示的力平衡方程	314
13.1.3	圆柱面坐标系的平衡方程	315
13.2	屈服准则	316
13.2.1	屈服准则的含义	316
13.2.2	屈雷斯卡(Tresca)屈服准则(最大剪应力理论)	317
13.2.3	密赛斯(Mises)屈服准则(变形能定值理论)	318
13.2.4	屈服准则的几何解释	319
13.2.5	屈服准则的实验验证	321

13.3	应力与应变的关系方程	322
13.3.1	弹性变形时的应力和应变关系	322
13.3.2	塑性应变时的应力和应变的关系	323
13.4	等效应力和等效应变	327
13.4.1	等效应力	327
13.4.2	等效应变	328
13.4.3	等效应力与等效应变的关系	330
13.4.4	$\sigma_e - \epsilon_e$ 曲线——变形抗力曲线	330
13.5	平面变形和轴对称问题的变形力学方程	332
13.5.1	平面变形问题	333
13.5.2	轴对称问题	335
第14章	塑性成形问题的解法	337
14.1	工程法	337
14.1.1	工程法简化条件	337
14.1.2	圆柱体镦粗	338
14.1.3	平砧压缩矩形件	341
14.2	滑移线理论及其应用	346
14.2.1	滑移线场的基本概念	346
14.2.2	汉基(Hencky)应力方程	349
14.2.3	滑移线场的几何性质	350
14.2.4	H·盖林格尔(Geiringer)速度方程与速端图	353
14.2.5	滑移线场求解的一般步骤及应力边界条件	357
14.2.6	滑移线理论的应用实例——平冲头压入半无限体	361
14.3	极限分析原理及应用	364
14.3.1	极限分析的基本概念	364
14.3.2	虚功原理	365
14.3.3	最大塑性功原理	366
14.3.4	上界定理	367
14.3.5	上界法在成形中的应用	368
	参考文献	373

第一篇 焊接成形原理

焊接是通过加热或加压,或两者并用,借助于填充材料或不用填充材料,使工件的材质达到原子间的结合而形成永久性连接的工艺过程。焊接种类很多,按焊接过程一般分为三大类:

(1) 熔化焊,把焊接局部连接处加热至熔化状态形成熔池,待其冷却结晶后形成焊缝,将两部分材料焊接成一个整体的一类焊接方法。

(2) 压力焊,在焊接过程中需要对焊件施加压力(加热或不加热)的一类焊接方法。

(3) 钎焊,利用熔点比母材低的填充金属(钎料)熔化后,填入接头间隙并与固态母材通过扩散实现连接的一类焊接方法。

主要焊接方法分类如图 0-1 所示。

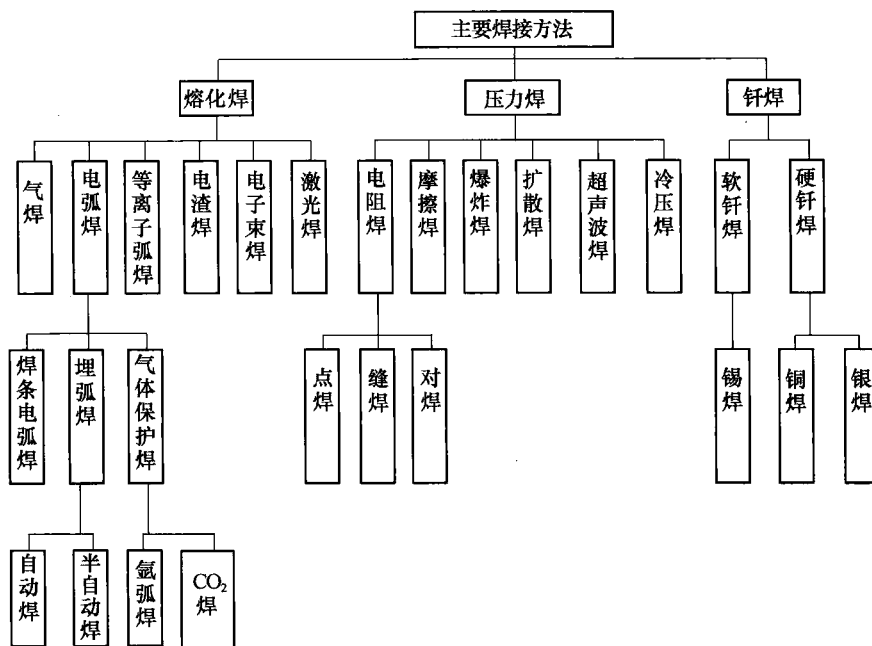


图 0-1 主要焊接方法分类

第 1 章 熔化焊

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形成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。例如,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、高电密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征

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	2×10 ⁴	3473
金属极电弧	10 ⁻⁷	10 ⁵	6000
钨极氩弧(TIG)	10 ⁻⁷	1.5×10 ⁵	8000
埋弧焊	10 ⁻⁷	2×10 ⁵	6400
电渣焊	10 ⁻⁶	10 ⁵	2300
熔化极氩弧焊和 CO ₂ 气体保护焊	10 ⁻⁸	10 ⁵ ~10 ⁶	—
等离子弧	10 ⁻⁹	1.5×10 ⁶	18000~24000
电子束	10 ⁻¹¹	10 ⁸ ~10 ¹⁰	—
激光束	10 ⁻¹²	10 ⁸ ~10 ¹⁰	—

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发和飞溅等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 ——电弧功率,即电弧在单位时间内所放出的能量(W);

U ——电弧的电压(V);

I ——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 ——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 所列。

表 1-2 不同焊接方法的电弧热效率 η

焊接方法	碳弧焊	厚皮焊条手工电弧焊	自动埋弧焊	电渣焊	电子束及激光束焊	钨极氩弧焊		熔化氩弧焊	
						交流	直流	钢	铝
η	0.5~0.65	0.77~0.87	0.77~0.90	0.83	> 0.90	0.68~0.85	0.78~0.85	0.66~0.69	0.70~0.85

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,即热量分配的合理性。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,形成热影响区的能量越小越好。

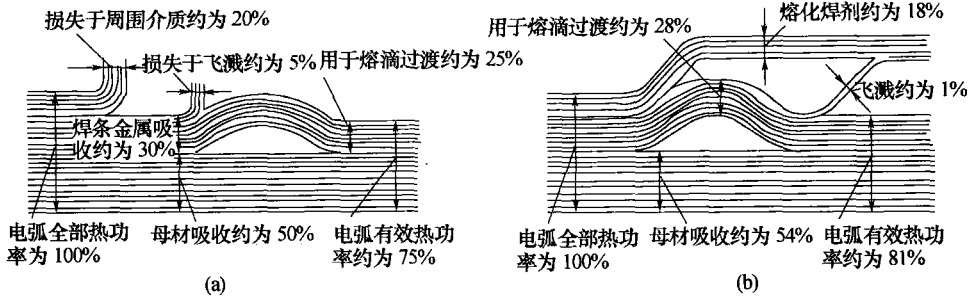


图 1-1 电弧焊的热量分配

(a) 厚焊条手工电弧焊 ($I=150A\sim 250A, U=35V$); (b) 自动埋弧焊 ($I=1000A, U=36V, v=36m/h$)。

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,热量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,电渣焊时速度慢,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,焊接接头的力学性能下降。

3) 电子束和激光焊接的热效率

电子束和激光这两种热源的共同特点是能量极其集中,在进行焊接时,能量的损失较少,其热效率可达 90% 以上。

3. 焊件加热区的热能分布

热源的热量传给焊件时所通过的焊件表面上的区域称为加热区或加热斑点,如果讨论的热源是电弧热,其加热区可分为活性斑点区和加热斑点区(图 1-2)。

1) 活性斑点区

带电质点(电子和离子)集中轰击直径为 d_A 的斑点面积。该部位的电能转化为热能,电流密度 j 的变化如图 1-2 中的虚线所示。

2) 加热斑点区

在直径为 d_H 的区域内,金属受热是通过电弧的辐射与周围介质的对流进行的。由图 1-2 可以看出,加热斑点区的热能分布是不均匀的,中心多而边缘少。在电流密度不变的条件下,电弧电压越高,则中心与边缘的热能

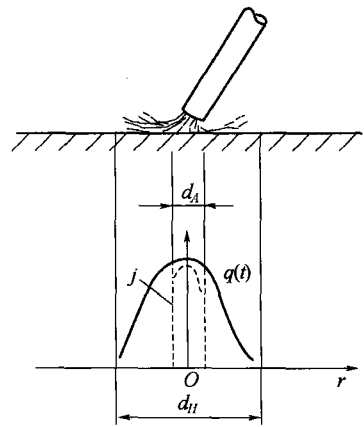


图 1-2 电弧作用下的加热斑点

相差越小。若电压不变时,电流密度越大,则中心与边缘的热能相差也越大。

单位时间通过单位面积传递给焊件的热能称为热流密度 $q(r)$ 。研究表明,加热斑点上的热流密度分布,可近似地用高斯分布来描述。距斑点中心 O 为 r 的任意点 A 的热流密度为

$$q(r) = q_m e^{-Kr^2} \quad (1-3)$$

式中 $q(r)$ —— A 点的热流密度 [$J/(cm^2 \cdot s)$];
 q_m ——加热斑点中心的最大热流密度 [$J/(cm^2 \cdot s)$];
 K ——能量集中系数 (cm^{-2});
 r —— A 点距加热斑点中心的距离 (cm)。

由式(1-3)可知,只要知道 q_m 和 K 值就可以求出任意点的热流密度。高斯曲线下所覆盖的全部热能为

$$q_e = \int Fq(r) dF = \int_0^\infty q_m e^{-Kr^2} 2\pi r dr = \frac{\pi}{K} q_m \quad (1-4)$$

$$\text{故} \quad q_m = \frac{K}{\pi} q_e \quad (1-5)$$

式中 q_e ——电弧的有效功率, $q_e = \eta UI$ 。

K 值说明热流集中的程度主要取决于焊接方法、焊接工艺参数和被焊金属材料的热物理性能等。不同焊接方法的能量集中系数 K 值见表 1-3。从今后的发展趋势来看,应采用 K 值较大的焊接方法,如电子束和激光焊接等。

表 1-3 不同焊接方法 K 值

焊接方法	手工电弧焊	自动埋弧焊	TIG 焊	气焊
K/cm^{-2}	1.2~1.4	6.0	3.0~7.0	0.17~0.39

1.1.2 焊接温度场

1. 焊接时的热作用特点

为了实现优良连接,必须有一定的热量作用在焊接部位的局部区域,通过待焊部位材料的熔化和随后的冷却凝固来形成焊缝。这样,焊接传热过程有两个明显的特征,即热作用的集中性和瞬时性。

1) 热作用的集中性

焊接热源集中作用在焊件连接部位,这样,焊件上存在较大的温度梯度,形成不均匀的温度场,易引起不均匀分布的应力或应变场,以及不均匀的组织 and 性能变化等问题。

2) 热作用的瞬时性

焊接热源在工作时始终以一定的速度运动,因而对焊件上受到热作用的任意一点来说瞬时得到的能量是有限的。当焊件上某点接近焊接热源时,该点的温度迅速升高;随着焊接热源的离开,该点的温度急剧下降。

可见,焊件上受到热影响的任一点可能达到的峰值温度必然是有限的。同整体均匀加热的一般热处理过程相比,焊接传热过程要复杂得多。焊接热作用的集中性所引起的

不均匀组织、性能变化及焊接变形和焊接热作用的瞬时性所引起的焊接化学冶金变化的不平衡性等,都将对焊接接头的质量产生影响。

2. 焊接传热的基本方式

熔焊时,由于焊件局部受热,焊件本身出现很大的温度差。因此,在焊件内部以及焊件与周围介质之间必然发生热的流动。根据传热学的理论,热能传递的基本方式是传导、对流和辐射。

1) 热传导

热传导是由于温度不同,在导体内存在温度梯度,引起自由电子移动的结果。温度梯度越大,自由电子的移动越激烈。因此,好的导体也是好的导热体。

2) 热对流

热对流是利用不同温度的质点密度差异引起质点相对位移而进行热能转移的现象。

3) 热辐射

热辐射是指物体受热后,内部原子振动而出现的一种电磁波来传递能量的现象。一切物体只要其温度高于热力学零度,其表面就会发生热辐射。所以,在传热体和吸热体之间的热射交换是彼此往复的。由于物体表面辐射的能量与物体的热力学温度的四次方成正比,因此,热能也是高温物体向低温物体转移的。

焊接时,上述三种传热方式都存在,但焊接方法不同使其主次有别。除了电阻焊和摩擦焊外,大多数焊接方法的热源主要是以热辐射和对流的形式来传递能量的,母材和焊条获得热能之后则以传导为主向金属内部传递热能。由于焊接传热学主要研究焊件上温度分布和随时间变化的规律性,因此,焊接温度场的研究是以热传导为主,适当考虑对流和辐射的作用。

3. 焊接温度场的概念

在热源的作用下,焊件上各点的温度都在随时间的变化而变化,因此,某瞬时焊件上各点温度的分布称为温度场。温度场以某一时刻在某一空间内所有点的温度值来描述,在直角坐标系内为

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1-6)$$

式中 T ——焊件上某点某瞬间的温度;

x, y, z ——焊件上某点的空间坐标;

t ——时间。

温度场的分布可用等温线或等温面来描述(图 1-3)。焊件上瞬时温度相同的点连成的线或面称为等温线或等温面。各个等温线或等温面之间不能相交。因为每条线或面之间存在温度差,其大小可用温度梯度表示。温度梯度是矢量,其正值为温度增加,负值为温度减小。温度梯度反映了温度场中任意点温度沿法线方向的增加率。

当焊件上温度场各点温度不随时间变化时,称之为稳定温度场;而焊件上各点的温度随时间变化的温度场,称之为非稳定温度场。当恒定功率的热源作用在一定尺寸的焊件上并做匀速直线运动时,经过一段时间后,焊件传热达到饱和状态,温度场会达到暂时稳定状态,并可以随着热源以同样速度移动,这样的温度场称为准稳定温度场。如果采用移动坐标系,坐标的原点始终与热源中心重合,则各点的温度只取决于系统的空间坐标,与热源移动的速度和距离无关。这样就把非稳定温度场转变为稳定温度场,这种温度场称