

普通高等教育“十一五”重点规划教材

# 焊接冶金与焊接性

哈尔滨工业大学 刘会杰 主编

# WELDING

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”重点规划教材

# 焊接冶金与焊接性

主编 刘会杰  
参编 闫久春 魏艳红 刘爱国  
主审 张志明

机械工业出版社

《焊接冶金与焊接性》是高等学校焊接专业或焊接方向的一门主要专业课教材,是为满足高等学校焊接专业或焊接方向教学改革的需要而编写的。本书分为上下两篇,上篇为焊接冶金,下篇为焊接性。上篇内容包括:焊接材料的组成及作用,焊接化学冶金,焊接接头的组织和性能,焊接缺陷及其控制;下篇内容包括:焊接性及其试验方法,低合金高强度钢的焊接,不锈钢及耐热钢的焊接,有色金属的焊接。

本书着重论述焊接冶金与焊接性的基本问题,尽量反映国内外近年来在焊接理论研究和生产应用方面的最新成果。本书体系完整,内容精练,可作为高等学校焊接专业或焊接方向的教学用书,也可供从事焊接工作的研究人员和工程技术人员参考。

本书的“电子课件”位于机械工业出版社教材服务网([www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com))上,向本书授课教师免费提供,请需要者填写书末的“信息反馈表”寄回出版社索取。

## 图书在版编目(CIP)数据

焊接冶金与焊接性/刘会杰主编. —北京:机械工业出版社, 2007. 3  
普通高等教育“十一五”重点规划教材  
ISBN 978-7-111-20921-8

I. 焊      II. 刘      III. 焊接冶金 - 高等学校 - 教材      IV. TG401

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第023599号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
策划编辑 冯春生 责任编辑·冯春生 版式设计:霍永明  
责任校对:李秋荣 封面设计:王伟光 责任印制:杨 曦  
北京机工印刷厂印刷  
2007年3月第1版第1次印刷  
184mm×260mm·16印张·385千字  
标准书号:ISBN 978-7-111-20921-8  
定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
销售服务热线电话:(010) 68326294  
购书热线电话 (010) 88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话·(010) 88379711  
封面无防伪标均为盗版

# 普通高等教育“十一五”重点规划教材 编审委员会

<b>主任：</b> 哈尔滨工业大学	吴 林
<b>副主任：</b> 哈尔滨工业大学	方洪渊
<b>委员：</b> （排名不分先后）	
华南理工大学	黄石生
山东大学	李亚江
沈阳工业大学	王宗杰
哈尔滨工业大学	刘会杰
沈阳大学	宗培言
清华大学	朱志明
北京工业大学	栗卓新
吉林大学	任振安
河南科技大学	朱锦洪
天津大学	李 桓
华中科技大学	熊建钢
太原理工大学	王文先
内蒙古工业大学	董俊慧
西北工业大学	刘金合
西南交通大学	戴 虹
江苏科技大学	邹家生
北京航空航天大学	李彦华
上海交通大学	王 敏
兰州理工大学	李鹤岐
大连交通大学	史春元
中国石油大学（华东）	王 勇
<b>秘 书：</b> 机械工业出版社	冯春生

# 序

焊接作为先进制造技术的重要组成部分在国民经济的发展和国家建设中发挥了重要的作用。焊接技术的优秀成果在航空航天、核能、船舶、电力、电子、海洋钻探、高程建筑等领域得到广泛应用。

随着科学的发展和技术的进步，焊接已经逐渐脱离了单纯工艺和技术的层面而走向科学的范畴，并且在与其他科学知识的不断碰撞和交融中，展现出来旺盛的生命力。新材料的不断产生，新能源的不断开发和新结构的不断涌现，对焊接技术提出了新的挑战。

20世纪末期，教育部对我国高等学校的学科专业进行了合并调整，“厚基础、宽口径”的人才培养模式已经成为潮流。许多高校已将原焊接专业并入材料科学与工程专业或材料成形及控制工程专业，而有一些学校则将焊接作为特色专业保留下来。多年的教学实践证明，本着“突出特色、分类指导”的原则，由于地域、行业、学校类型、办学条件、专业基础的不同，制定不同的专业人才培养模式、培养计划、课程体系、教学内容是完全必要的。在这种新的形势下，对专业人才的培养和专业教材的建设提出了新的要求，原有焊接专业的教材已经难以满足当前焊接专业（方向）人才培养的需要。而各种客观因素的影响，使得焊接专业教材的水平已跟不上当今科技的发展水平，不能满足新时期人才培养的需求。为尽快扭转这种不利局面，建立起质量优异、特点突出、适应不同类型专业人才培养需要的专业教材体系，中国机械工业教育协会材料加工工程学科教学委员会和机械工业出版社联合组织了国内多所著名高等学校的一些知名专家、学者，编写出版了这套“普通高等教育‘十一五’重点规划教材”。

本套教材涵盖了高等学校焊接专业（方向）人才培养所要求的主要专业课程内容，同时兼顾相关和相近专业学生学习的需要。教材强调专业知识与基础理论的联系，注重新技术的进展，并强调其科学内涵，将对适应新形势的焊接专业人才的培养起到促进作用。

教育部高等学校材料成形及控制工程专业  
教学指导分委员会主任

李春峰

# 前 言

《焊接冶金与焊接性》是高等学校焊接专业或焊接方向的一门主要专业课教材，在培养本科生掌握专业知识过程中起重要作用。本书可作为焊接专业本科生的教学用书，也可供从事焊接工作的研究人员和工程技术人员参考。

本书是为满足高等学校焊接专业或焊接方向教学改革的需要而编写的，分为上下两篇。上篇为焊接冶金，主要论述焊接材料的组成及作用，焊接化学冶金，焊接接头的组织和性能，焊接缺陷及其控制；下篇为焊接性，主要论述材料焊接性及其试验方法，低合金高强度钢、不锈钢及耐热钢、有色金属的焊接性分析及焊接工艺要点。

本书着重论述焊接冶金与焊接性的基本问题，在结构编排和内容选择上力求做到体系完整，内容精练，使学生能够系统掌握和深入地理解所学的专业知识，为合理制定焊接工艺，进而提高焊接质量奠定基础。

在结构编排上，将焊接材料列为第1章，先介绍其组成及作用，可为讲授第2章的焊接化学冶金奠定物质基础，以避免“空谈”现象；再按焊接接头的组成，论述焊缝、热影响区和熔合区的形成机理、微观组织和力学性能，并分析焊接缺陷及其控制方法；在此基础上，最后讲授各种典型材料的焊接性及焊接要点。这样的编排可使各章形成前后呼应的有机联系，全面揭示焊接冶金的基本问题，阐明典型材料的焊接性，达到理论和实际的结合与统一。

在内容选择上，对其他焊接专业课程为主的内容，只在绪论中作简单介绍，如焊接方法、焊接热循环和焊接温度场等；论述焊接接头的组织和性能时，加重了对熔合区的阐述笔墨，强调了熔合区的重要性；分析材料焊接性时，只选择能够反映焊接基本问题的典型材料，而不追求面面俱到。这样做的目的是避免重复，突出重点，节省学时，便于系统掌握和深入理解。

此外，本书在论述深度上也有所取舍，偏重于基本概念和基本规律，既不停留在表现现象上，也不追求繁琐的公式推导与计算，力求做到深入浅出，说明问题。同时，编写过程中也注意内容的更新，尽量反映国内外近年来在焊接理论研究和生产应用方面的最新成果，不断发展和完善焊接理论体系，提高焊接技术水平。

本书由哈尔滨工业大学刘会杰教授担任主编，哈尔滨工业大学张志明教授担任主审。绪论、第1章至第3章由刘会杰编写，第4章由哈尔滨工业大学刘爱国副教授编写，第5章、第7章和第8章的8.3节由哈尔滨工业大学闫久春教授编写，第6章和第8章的8.1节、8.2节由哈尔滨工业大学魏艳红教授编写。

在本书编写过程中，得到了哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室、哈尔滨工业大学材料科学与工程学院、哈尔滨工业大学教务处和哈尔滨焊接研究所等单位的大力支持，在此深表谢意。在审稿之际，许多兄弟院校和出版社的同行及专家对编写大纲和书稿提出了很多宝贵意见，特别是哈尔滨工业大学张志明教授对本书进行了全面而细致的

## VI

审核，在此诚表感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

序

前言

绪论 .....	1
思考题 .....	13

## 上篇 焊接冶金

第1章 焊接材料的组成及作用 .....	15
----------------------	----

1.1 焊条 .....	15
1.1.1 焊条的组成及作用 .....	15
1.1.2 焊条的种类及型号 .....	19
1.1.3 焊条的性能 .....	21
1.2 焊丝 .....	28
1.2.1 焊丝的种类和编号 .....	28
1.2.2 实芯焊丝 .....	30
1.2.3 药芯焊丝 .....	32
1.3 焊剂 .....	34
1.3.1 焊剂的种类和质量要求 .....	34
1.3.2 焊剂的型号和牌号 .....	37
1.3.3 焊剂的特点及应用 .....	39
思考题 .....	42

第2章 焊接化学冶金 .....	43
------------------	----

2.1 焊接化学冶金的特殊性 .....	43
2.1.1 焊接区金属的保护 .....	43
2.1.2 焊接化学冶金的反应区 .....	45
2.1.3 焊接化学冶金系统的不平衡性 .....	47
2.2 焊接区内气体与金属的作用 .....	48
2.2.1 焊接区内的气体 .....	48
2.2.2 气体与金属的作用 .....	52
2.3 焊接熔渣对金属的作用 .....	59
2.3.1 焊接熔渣及其性质 .....	59
2.3.2 焊接熔渣对金属的氧化 .....	66
2.3.3 焊缝金属的脱氧 .....	68
2.4 焊缝金属的净化与合金化 .....	70
2.4.1 氮对焊接质量的影响及控制 .....	70
2.4.2 氢对焊接质量的影响及控制 .....	72
2.4.3 氧对焊接质量的影响及控制 .....	76

2.4.4 硫的危害及控制 .....	77
2.4.5 磷的危害及控制 .....	78
2.4.6 焊缝金属的合金化 .....	79
思考题 .....	84

第3章 焊接接头的组织和性能 .....	85
----------------------	----

3.1 焊接熔池和焊缝 .....	85
3.1.1 焊接熔池的结晶特点 .....	85
3.1.2 焊接熔池的结晶形态 .....	88
3.1.3 焊缝的相变组织 .....	94
3.1.4 焊缝组织和性能的控制 .....	101
3.2 焊接热影响区 .....	105
3.2.1 焊接热影响区的组织转变特点 .....	105
3.2.2 焊接热影响区的组织特征 .....	110
3.2.3 焊接热影响区的性能 .....	114
3.3 熔合区 .....	120
3.3.1 熔合区的边界 .....	120
3.3.2 熔合区的形成机理 .....	122
3.3.3 熔合区的特征 .....	124
思考题 .....	126

第4章 焊接缺陷及其控制 .....	127
--------------------	-----

4.1 焊缝中的偏析和夹杂 .....	127
4.1.1 偏析的形成及控制 .....	127
4.1.2 夹杂的形成及控制 .....	128
4.2 焊缝中的气孔 .....	130
4.2.1 气孔的分类及形成机理 .....	130
4.2.2 气孔形成的影响因素 .....	131
4.2.3 气孔的防止措施 .....	133
4.3 焊接裂纹 .....	134
4.3.1 焊接裂纹的种类和特征 .....	134
4.3.2 结晶裂纹的形成与控制 .....	138
4.3.3 延迟裂纹的形成与控制 .....	142
4.3.4 其他裂纹的形成与控制 .....	146
思考题 .....	150



## 下篇 焊 接 性

<b>第5章 焊接性及其试验方法</b> .....	151
5.1 焊接性及其分析方法 .....	151
5.1.1 焊接性及其影响因素 .....	151
5.1.2 焊接性分析方法 .....	152
5.2 焊接性试验内容和方法 .....	153
5.2.1 焊接性试验内容 .....	153
5.2.2 焊接性试验方法 .....	154
5.3 常用工艺焊接性试验方法 .....	155
5.3.1 碳当量的间接估测法 .....	155
5.3.2 可调拘束裂纹试验法 .....	155
5.3.3 斜Y形坡口裂纹试验法 .....	157
5.3.4 插销试验法 .....	158
5.3.5 其他试验法 .....	159
思考题 .....	160
<b>第6章 低合金高强度钢的焊接</b> .....	161
6.1 低合金高强度钢的种类和性能 .....	161
6.1.1 热轧钢和正火钢 .....	161
6.1.2 低碳调质钢 .....	162
6.1.3 中碳调质钢 .....	163
6.2 低合金高强度钢的焊接性分析 .....	164
6.2.1 热裂纹 .....	164
6.2.2 冷裂纹 .....	166
6.2.3 再热裂纹 .....	170
6.2.4 层状撕裂 .....	171
6.2.5 脆化和软化 .....	171
6.3 低合金高强度钢的焊接工艺要点 .....	172
6.3.1 焊接方法及热输入 .....	172
6.3.2 焊接材料 .....	173
6.3.3 接头设计和辅助措施 .....	176
6.4 典型低合金高强度钢的焊接 .....	178
6.4.1 正火钢 Q345(14MnNb)的焊接 .....	178
6.4.2 低碳调质钢 HQ80C 的焊接 .....	180
6.4.3 中碳调质钢 35CrMoA 的焊接 .....	180
思考题 .....	181
<b>第7章 不锈钢及耐热钢的焊接</b> .....	182
7.1 不锈钢及耐热钢的成分及性能 .....	182
7.1.1 不锈钢及耐热钢的成分及分类 .....	182
7.1.2 不锈钢的耐蚀性能 .....	183
7.1.3 不锈钢及耐热钢的力学性能 .....	185

7.1.4 不锈钢及耐热钢的物理性能 .....	186
7.2 不锈钢及耐热钢的焊接性分析 .....	187
7.2.1 焊接接头的组织转变 .....	187
7.2.2 焊接接头的耐蚀性 .....	189
7.2.3 焊接接头的裂纹 .....	192
7.2.4 焊缝金属的脆化 .....	194
7.2.5 异种钢接头的成分不均匀性 .....	195
7.3 不锈钢及耐热钢的焊接工艺 .....	197
7.3.1 铁素体钢的焊接工艺 .....	197
7.3.2 马氏体钢的焊接工艺 .....	198
7.3.3 奥氏体钢的焊接工艺 .....	199
7.3.4 铁素体-奥氏体双相钢的焊接工艺 .....	200
7.3.5 奥氏体钢对珠光体钢的焊接工艺 .....	201
7.4 典型不锈钢及耐热钢的焊接 .....	202
7.4.1 高纯 0Cr18Mo2 铁素体钢的焊接 .....	202
7.4.2 3Cr13 马氏体不锈钢试管机压力阀套的焊接 .....	202
7.4.3 18-8Ti 奥氏体钢的焊接 .....	203
7.4.4 SAF2205 铁素体-奥氏体双相钢的焊接 .....	204
思考题 .....	204
<b>第8章 有色金属的焊接</b> .....	206
8.1 铝及铝合金的焊接 .....	206
8.1.1 铝及铝合金的种类和性能 .....	206
8.1.2 铝及铝合金的焊接性分析 .....	209
8.1.3 铝及铝合金的焊接工艺要点 .....	215
8.1.4 典型铝合金的焊接 .....	219
8.2 钛及钛合金的焊接 .....	219
8.2.1 钛及钛合金的种类和性能 .....	220
8.2.2 钛及钛合金的焊接性分析 .....	223
8.2.3 钛及钛合金的焊接工艺要点 .....	226
8.2.4 典型钛合金的焊接 .....	229
8.3 铜及铜合金的焊接 .....	231
8.3.1 铜及铜合金的种类和性能 .....	231
8.3.2 铜及铜合金的焊接性分析 .....	235
8.3.3 铜及铜合金的焊接工艺要点 .....	237
8.3.4 典型铜及铜合金的焊接 .....	240
思考题 .....	242

<b>参考文献</b> .....	243
-------------------	-----

# 绪 论

焊接技术是材料工程领域的主要加工工艺之一，已广泛应用在航空、航天、能源、交通、化工、武器、医药、机械、电子以及各种金属结构等工业部门。随着科学技术的不断发展和各种新材料的不断出现，焊接技术在我国科学事业、经济建设和国防建设上将起到越来越重要的作用。

为使学生掌握焊接技术，全面了解焊接冶金与焊接性的知识体系，同时又避免与其他焊接专业课程内容的重复，本绪论只从焊接基本概念出发，简要介绍与之相关的焊接方法的种类及特点、焊接热循环和温度场、焊接接头及其形成过程，最后提出本课程的教学目的、内容和要求。

## 1. 焊接的本质和途径

什么是焊接？如何实现焊接？了解这些内容对于正确认识焊接过程的本质，开发焊接方法和提高焊接质量都具有重要的理论意义和实际意义。

(1) 焊接的概念及内涵 按照国际焊接学会的定义，焊接是指通过加热或加压或二者并用，使被焊材料达到原子间的结合，从而形成永久性连接的工艺。其中，被焊的材料一般被称为母材或工件。

据此描述可知，焊接这个概念至少包括三个方面的含义：一是焊接的途径，即加热或加压或二者并用；二是焊接的本质，即微观上达到原子间的结合；三是焊接的结果，即宏观上形成永久性的连接。

(2) 实现焊接的途径 从焊接的本质来看，被焊材料必须达到原子间的结合，这是由原子间的相互作用力与其距离的关系决定的。由图 0-1 可以看出，当原子间的距离为  $r_A$  时，原子间的结合力最大；当原子间的距离大于或小于  $r_A$  时，原子间的结合力都明显降低。

因此，只要被焊材料的表面距离接近  $r_A$  时，就能在接触面上进行扩散、再结晶甚至发生化学反应，从而实现原子间的结合，达到焊接的目的。然而，实际的材料表面在微观上总是凹凸不平的，而且在表面上还存在氧化膜以及油污和水分的吸附层，从而妨碍材料表面的紧密接触。

为实现焊接，就必须消除妨碍材料表面紧密接触的各种因素。于是，采取了加压或加热的方式。加压可以破坏接触表面的氧化膜，增加有效接触面积，有利于紧密接触；加热可使材料软化或熔化，从而降低材料的变形抗力，破坏接触表面的氧化膜，促进扩散、再结晶、化学反应和结

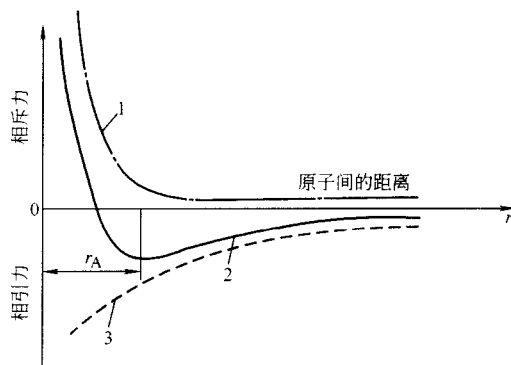


图 0-1 原子间的作用力与距离的关系

1—斥力 2—合力 3—引力

晶过程的进行。

应当指出，无论是加压方式，还是加热方式，都是使被焊材料之间在微观上达到原子间的结合，在宏观上形成永久性的连接接头。

## 2. 焊接接头及其形成过程

什么是焊接接头？它由哪些部分组成？其形成过程如何？这些都是研究焊接技术必然遇到的问题。掌握这些内容，对于深入分析焊接过程与微观组织及宏观性能之间的内在联系是非常重要的。

(1) 焊接接头的组成 从本质上讲，焊接接头是指被焊材料经焊接之后发生组织和性能变化的区域。它由焊缝、熔合区和热影响区组成，如图 0-2 所示。

1) 焊缝。焊缝是焊接接头最重要的组成部分。对于熔焊而言，焊缝一般是由熔化的被焊材料和填加材料经凝固后所形成的。如果焊接过程中未采用任何填加材料，焊缝将完全由经历过熔化和凝固的母材所形成。无论是否采用填加材料，焊缝的组织性能都不同于母材。

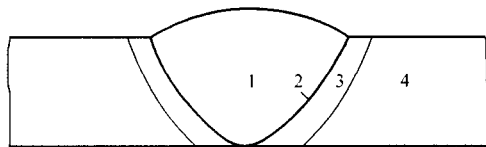


图 0-2 焊接接头的组成  
1—焊缝 2—熔合区 3—热影响区  
4—未受影响的母材区

2) 热影响区。热影响区也是焊接接头的重要组成部分，它由受到焊接热影响而未发生熔化的母材所形成。所谓的热影响，并不仅仅是指温度超过了母材初始温度，而是指温度超过一定值之后给母材带来的微观组织和性能的变化。因此，并不是超过了初始温度的所有母材部分都是热影响区，而只有超过了使母材组织和性能发生变化的温度，并且未发生熔化的母材部分才是热影响区。

3) 熔合区。熔合区是介于焊缝与热影响区之间的相当窄小的过渡区。从宏观角度来看，熔合区是焊缝与热影响区的分界线，因此又将其称为熔合线。但从微观角度来讲，熔合区是由部分熔化的母材和部分未熔化的母材所组成的区域，因此有人将该区称为部分熔化区或半熔化区。

熔合区的化学成分、微观组织和力学性能极不均匀，是焊接接头容易出现问题的部位。因此，本书在第 3 章中对“熔合区”进行了详细讨论和分析。

(2) 焊接接头的形成过程 根据以上描述已知，焊接接头由焊缝、熔合区和热影响区组成，其组织和性能在焊接前后发生了变化。因此，可以说焊接接头的形成过程就是焊缝、熔合区和热影响区的形成过程。由于它们所经历的焊接热作用不同，因而它们的形成所经历的过程也有所不同，如图 0-3 所示。

从本质上看，焊接接头的形成过程主要涉及焊接热过程、固-液状态演变过程、焊接化学冶金过程和固态相变过程。

1) 焊接热过程。无论焊缝、熔合区，还是热影响区，都是在焊接热源作用下形成的。焊接热过程是焊接中所涉及的所有其他过程产生和发展的前提。按母材受热进程来看，焊接热过程包括加热过程和冷却过程。

2) 固-液状态演变过程。固-液状态演变过程主要发生在焊缝部位。在焊接热源的作用下，焊缝部位的固态母材发生熔化，形成液态熔池；而后，随着焊接热源的远离，液态熔池凝固结晶，形成固态焊缝。因此，焊缝部位的母材经历了由固态到液态、再由液态到

固态的状态演变过程。

3) 焊接化学冶金过程。焊接化学冶金过程主要发生在与焊缝相对应的焊接区中,是金属、熔渣和气相在较高温度下发生的冶金反应过程。在焊缝形成过程中,主要涉及氧化、还原、渗氢、除氢、脱硫、脱磷以及合金化等。由于这些冶金反应直接影响焊缝的成分、组织和性能,因而有必要深入研究焊接化学冶金过程,为提高焊接质量提供理论依据。

4) 固态相变过程。对于有同素异构转变的材料而言,焊接过程中会发生固态相变。相变过程既可发生在热影响区,也可出现在焊缝。由于焊缝成分是由被焊材料和填加材料共同

组成,因而焊缝相变过程与热影响区有所不同。而且,在热影响区中,各点所经受的焊接热作用不同,因而所发生的组织转变也不同。

应当指出,以上所述的各个过程并不是孤立进行的,而是相互联系的,甚至共同发生和发展的。在整个接头形成过程中,还会由于各种原因使接头产生偏析、夹杂、气孔、热裂纹、冷裂纹以及脆化等焊接缺陷。因此,控制焊接接头的形成过程是保证焊接质量的关键。

### 3. 焊接方法的种类和特点

在上述对焊接概念的描述中提到,焊接必须采用加压或加热的方式。因此,产生了压焊和熔焊两大类焊接方法。

压焊是必须对被焊材料施加压力(加热或不加热)以完成焊接的方法;而熔焊是不施加压力,只通过加热使母材局部熔化来实现焊接的方法。由于本书讨论的是熔焊中的焊接冶金与焊接性问题,因此这里只介绍熔焊方法的种类及其特点。

(1) 熔焊方法的种类 从焊接热源的本质上来看,熔焊方法可分为气焊、电弧焊、高能束流焊及电渣焊等类别,并可进一步细分为多种焊接方法。

1) 气焊。气焊是利用可燃气体燃烧所释放出的化学热来实现焊接的方法。常用的燃气是乙炔,故称为氧乙炔焊。

2) 电弧焊。电弧焊是以气体介质放电所产生的电弧作为热源的焊接方法。可细分为焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊、钨极惰性气体保护焊及等离子弧焊等。

3) 高能束流焊。高能束流焊是以电子束或激光束与被焊材料局部表面相互作用而产生的热能作为热源的焊接方法,因此分为电子束焊和激光束焊。

4) 电渣焊。电渣焊是以熔渣作为导电介质,利用电流通过熔渣产生的电阻热作为热源

的焊接方法。

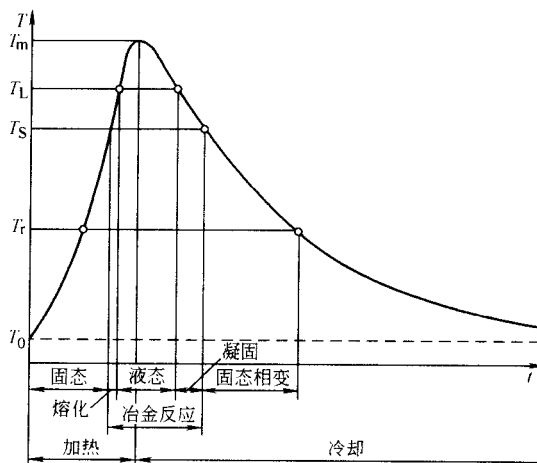


图 0-3 焊接接头形成过程描述图

$T$ —温度  $t$ —时间  $T_0$ —初始温度

$T_r$ —相变温度  $T_s$ —固相线温度

$T_L$ —液相线温度  $T_m$ —峰值温度

有的特性就是具有很高的能量密度，能实现快速焊接。但就不同的焊接方法而言，它们所具有的能量密度明显不同，其中气焊较低，电弧焊较高，高能束流焊最高。

表 0-1 各种焊接方法的热源特性

焊接方法		最小加热面积 /cm <sup>2</sup>	最大能量密度 /(W/cm <sup>2</sup> )	正常焊接时的温度 /K
气焊	氧乙炔焊	10 <sup>-2</sup>	2 × 10 <sup>3</sup>	3400
电渣焊		10 <sup>-2</sup>	10 <sup>4</sup>	2300
电弧焊	焊条电弧焊	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>4</sup>	6000
	埋弧焊	10 <sup>-3</sup>	2 × 10 <sup>4</sup>	6400
	钨极氩弧焊	10 <sup>-3</sup>	1.5 × 10 <sup>4</sup>	8000
	熔化极气体保护焊	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>5</sup>	—
	等离子弧焊	10 <sup>-5</sup>	1.5 × 10 <sup>5</sup>	18000 ~ 24000
高能束流焊	电子束焊	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	—
	激光束焊	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	—

正是由于能量密度不同，造成对母材的热输入明显不同，因而所产生的影响也不同。由图 0-4 可以看出，从气焊到电弧焊，再到高能束流焊，能量密度明显提高，对母材的热输入明显降低，因而焊接质量提高，同时焊接效率和熔深也提高。

(2) 熔焊方法的特点 不同的焊接方法由于具有不同的热源特性，因而具有不同的焊接特点。对这些特点进行简要分析和介绍，目的是为研究各种材料焊接性时选择焊接方法提供依据。至于各种焊接方法本身的系统构成和工作原理等内容，会在其他焊接专业课程中详细阐述。

1) 气焊。气焊的优点是设备简单、便宜，一般适用于焊接不重要的构件，也适用于修补。但其能量密度低，易造成过大的热影响区和严重的变形，焊速也低，而且由于保护性不好也不适于焊接活性材料。

2) 焊条电弧焊。与气焊相类似，焊条电弧焊的优点是设备较为简单、便携，适用于难以实现自动化焊接的构件，也常用于工件修补和野外作业。然而，由于形成的保护气体惰性不足而不适于焊接活性材料，而且由于受焊条长度和药皮过热及脱落的限制，降低了焊接生产率。

3) 埋弧焊。在埋弧焊中，由于焊剂或熔渣的保护作用，消除了飞溅，焊缝洁净，熔敷效率高，可焊厚度远大于气体保护焊。这种方法一般仅限于平焊，其高的热输入也会增大焊接变形。

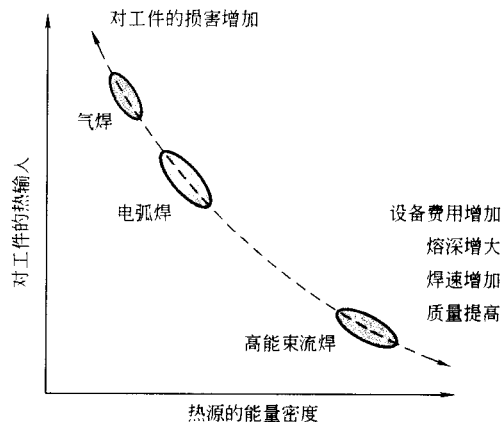


图 0-4 不同焊接方法对工件的热输入及其影响

4) 熔化极气体保护焊。当采用惰性气体保护时, 熔化极气体保护焊可用于焊接活性材料。与钨极气体保护焊相比, 熔化极气体保护焊具有相当高的熔敷率, 因而可采用较高的焊速焊接较厚的工件。其缺点是受焊枪尺寸的限制, 难于到达狭小的区域或角落。

5) 钨极气体保护焊。钨极气体保护焊因其热输入低而适合于薄板的焊接, 而且可实现不填丝的自熔焊接以及单面焊双面成形。作为一种很洁净的焊接方法, 可用于焊接活性材料。但这种方法的缺点是熔敷效率低, 过大的焊接电流也易造成焊缝夹钨。

6) 等离子弧焊。与钨极气体保护焊相比, 等离子弧焊的显著特点是电弧挺直, 对弧长变化不敏感, 降低了对焊工操作技术的要求, 而且由于等离子弧能量密度高可实现穿孔型焊接, 故焊接速度快, 可焊厚度也大。然而, 这种焊接方法所用焊具的结构非常复杂, 电控系统也复杂, 因此设备费用高, 尤其是变极性等离子弧焊设备。

7) 电子束焊。电子束焊方法因其能量密度很高而能实现全熔透的穿孔型焊接, 可焊厚度很大, 焊接速度很快, 焊接热影响区很窄, 焊接变形很小。它可以焊接多种类型的材料, 包括活性材料、耐热材料、异种材料以及尺寸不同的材料。这种焊接方法的缺点是设备造价很高, 同时需要真空环境和 X 射线防护设施, 对工件的装配和对中也有非常高的要求。

8) 激光束焊。与电子束焊相比, 激光束焊也能实现高速焊接, 形成深而窄的全熔透焊缝, 焊接热影响区和焊接变形都很小, 但它不需要真空环境和 X 射线防护设施。激光束焊的主要问题是金属表面对激光具有很强的反射作用, 降低了激光的利用率, 而且焊接设备造价高, 需要对工件进行精确地装配和对中。

9) 电渣焊。电渣焊具有非常高的熔敷率, 无论工件多厚, 均单道焊完, 而且没有角变形。其缺点是只适用于垂直位置焊接, 而且热输入很高, 易造成焊缝及热影响区晶粒的严重粗化, 使接头韧性显著降低。

表 0-2 给出了与一些典型材料种类和厚度相对应的推荐焊接方法, 以供参考选用。由表可以看出, 熔化极气体保护焊和电子束焊适用于各种材料和各种厚度, 钨极气体保护焊最适合于薄板的焊接, 而电渣焊只适用于厚板的焊接。

#### 4. 焊接温度场和焊接热循环

正如在焊接方法及其特点中所论述的那样, 熔焊过程都是在焊接热源的作用下完成的。当采用焊接热源对工件局部进行加热时, 工件上的不同部位将会产生很大温差, 于是在工件内部和工件与周围介质之间都会形成热流, 焊接传热问题也就由此而生。焊接传热所涉及的主要是工件上的温度分布及温度随时间的变化, 即焊接温度场和焊接热循环。通过对二者进行分析和研究, 进而加以调整和控制, 对于提高焊接质量是非常有意义的。

##### (1) 焊接温度场

1) 焊接温度场的概念及表征。焊接过程中, 工件上各点的温度都在随时间而有规律地变化。我们将某瞬时温度在工件上各点的分布, 称为焊接温度场。

焊接温度场可用空间坐标和时间的函数来描述, 即

$$T = f(x, y, z, t) \quad (0-1)$$

式中  $T$ ——工件上某点某瞬时的温度;

$x$ 、 $y$ 、 $z$ ——工件上某点的空间坐标;

$t$ ——时间。

表 0-2 与典型材料种类和厚度相对应的推荐焊接方法

材料		焊接方法								
种类	厚度 /mm	气焊	电渣焊	焊条电弧焊	埋弧焊	熔化极气体保护焊	钨极气体保护焊	等离子弧焊	电子束焊	激光束焊
碳钢	≤3	●		●	●	●	●		●	●
	3~6	●		●	●	●	●		●	●
	6~19	●		●	●	●			●	●
	≥19	●	●	●	●	●			●	
低合金钢	≤3	●		●	●	●	●		●	●
	3~6			●	●	●	●		●	●
	6~19			●	●	●			●	●
	≥19		●	●	●	●			●	
不锈钢	≤3	●		●	●	●	●	●	●	●
	3~6			●	●	●	●	●	●	●
	6~19			●	●	●		●	●	●
	≥19		●	●	●	●			●	
铝合金	≤3	●				●	●	●	●	●
	3~6					●	●		●	●
	6~19					●	●		●	
	≥19					●			●	
镍合金	≤3	●		●		●	●	●	●	●
	3~6			●	●	●	●	●	●	●
	6~19			●	●	●		●	●	●
	≥19		●	●		●			●	

焊接温度场可用等温线或等温面的分布来表征，如图 0-5 所示。等温线或等温面就是某瞬时工件上温度相同的各点连接在一起所形成的线或面。值得注意的是，各个等温线或等温面彼此之间存在温差，因而不能相交。

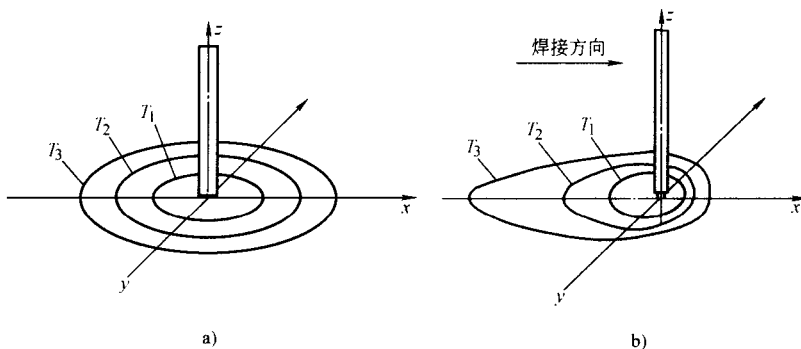


图 0-5 两种恒定功率热源的准稳定温度场

a) 固定热源 b) 移动热源

## 2) 焊接温度场的类型

① 按温度变化情况划分的温度场。按温度变化情况，可将焊接温度场分为稳定温度场、非稳定温度场和准稳定温度场。工件上各点温度不随时间而变化的温度场为稳定温度场；工件上各点温度随时间而变化的温度场为非稳定温度场；工件上各点温度虽然开始一段时间内发生变化，但经过一段时间之后，各点温度不再变化，等温线或等温面形状和尺寸不变，从而形成暂时稳定的温度场，这样的温度场为准稳定温度场。

一般情况下，工件上各点的温度总是随时间而变化的，因此焊接温度场应是非稳定温度场。但恒定功率的热源作用在工件的固定位置时，经过一段时间后，工件上就会形成等温线或等温面形状和尺寸不变的准稳定温度场，如图 0-5a 所示。

同样，恒定功率的热源沿工件等速移动时，经过一段时间之后，工件上也会形成与热源等速移动的、具有等温线或等温面形状和尺寸不变的准稳定温度场，如图 0-5b 所示。此时工件上各点温度虽然随时间而变化，但对于以移动的热源中心为参考点的各点而言，它们的温度并不发生变化。也就是说，热源周围的温度分布变为恒定。当采用坐标原点与热源中心重合的移动坐标系时，工件上各点的温度只取决于它们的空间坐标，而与热源的移动距离无关。

② 按焊接传热类型划分的温度场。按焊接传热类型，可将焊接温度场分为三维温度场、二维温度场和一维温度场，如图 0-6 所示。具体属于哪种类型，主要取决于工件的尺寸和热源的性质。

对于厚大工件进行堆焊，可以将热源看作是点热源，热的传播沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向，属于三维空间传热，这时所形成的温度场为三维温度场，如图 0-6a 所示。

对于薄板穿透焊接，可以将热源看作是沿板厚均温的线热源，热的传播沿  $x$ 、 $y$  两个方向，属于二维平面传热，这时所形成的温度场为二维温度场，如图 0-6b 所示。

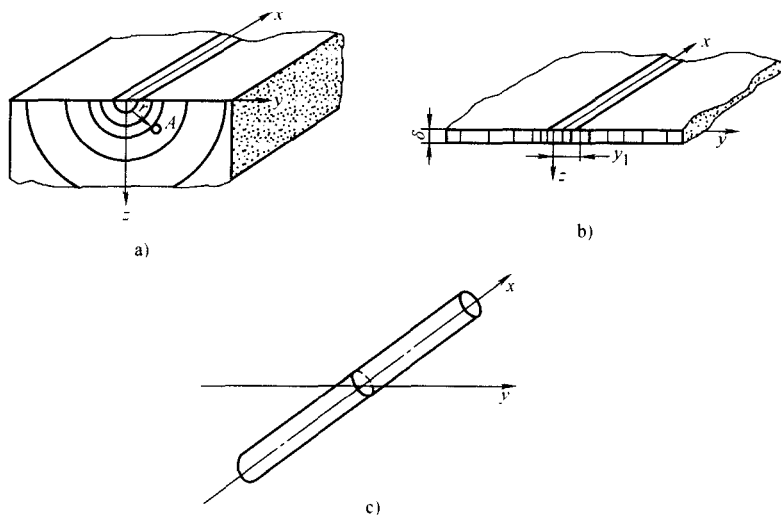


图 0-6 按传热类型划分的焊接温度场

a) 三维 b) 二维 c) 一维



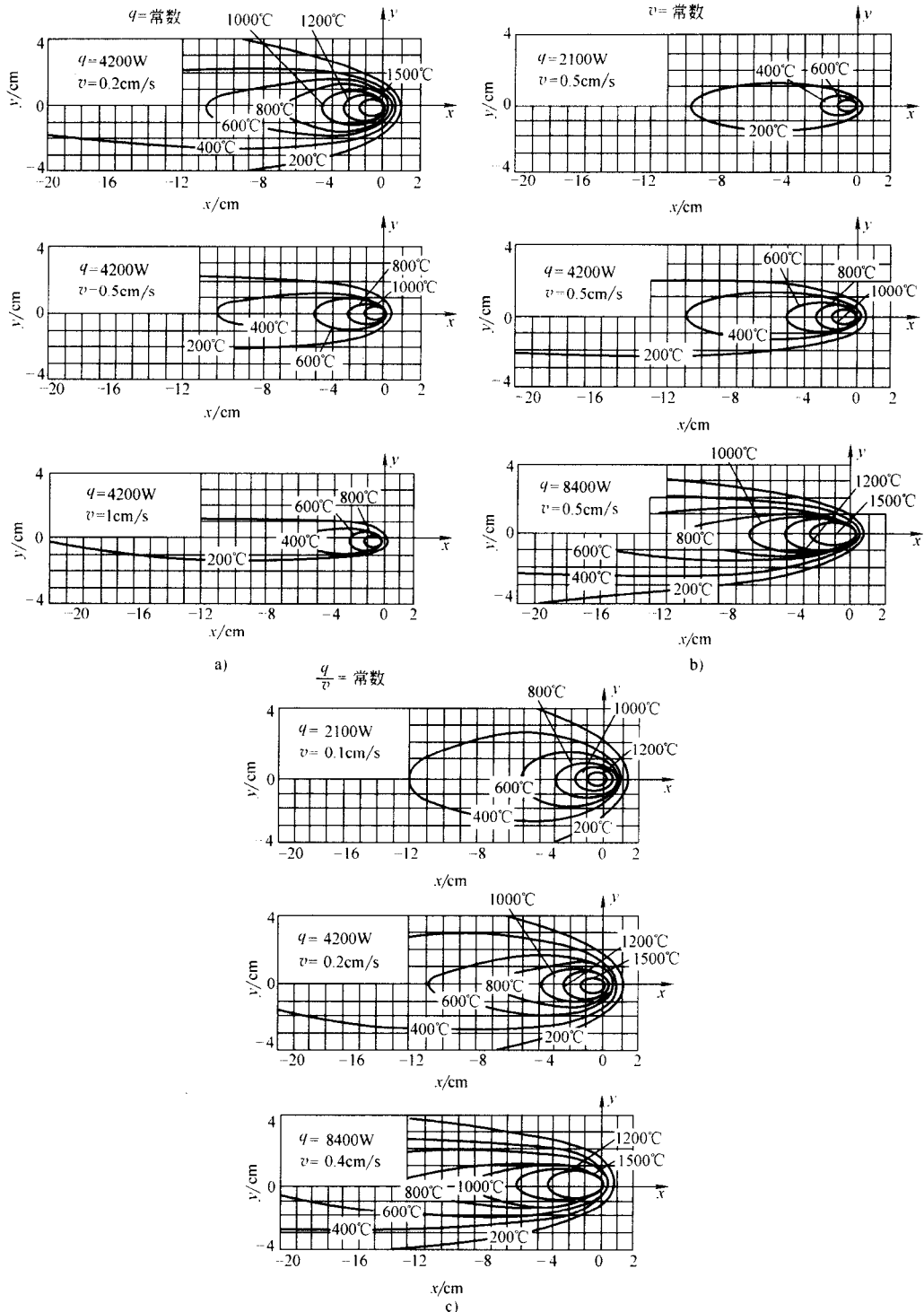


图 0-7 焊接参数对温度场特征的影响

a) 焊速  $v$  的影响 b) 功率  $q$  的影响 c)  $q$  与  $v$  等比例变化的影响[ $\lambda = 0.42 \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $c_p = 4.83 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $a = 0.08 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $\delta = 10 \text{ mm}$ ]