

普通高等教育“十三五”重点规划教材

焊接冶金学

——基本原理

天津大学 杜则裕 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



杜则裕 1962年毕业于天津大学机械工程系焊接工艺及设备专业（五年制本科）。现为天津大学材料科学与工程学院教授、博士生导师。1987—1988年在日本大阪大学溶接工学研究所任日本文部省外国人研究员，日本溶接学会会员。长期从事焊接冶金学、焊接材料及金属材料焊接的教学与科研工作。主持及完成国家自然科学基金、国家教委博士点基金等省部级以上科研项目10余项。1978年获全国科学大会奖1项、省部级以上科技进步奖共6项。在国内外重要期刊发表论文近100篇（多篇被EI、CA 等收录）。出版专著12部，其中主编《工程焊接冶金学》《材料连接原理》《材料焊接科学基础》《焊接手册（第2卷）》等。指导博士生11人、硕士生23人、外籍高级访问学者2人。1998年获国务院政府特殊津贴。现为中国石油大学（华东）、中国石油管道焊接中心等单位客座教授。

普通高等教育“十三五”重点规划教材

焊接冶金学——基本原理



主编 杜则裕
参编 张炳范 孙俊生
主审 李志远 邹增大



机械工业出版社

本书从焊接过程中的金属加热及温度场、熔池金属的化学冶金及焊接接头的物理冶金各阶段的变化规律, 阐述焊接过程的本质。本书主要内容包括焊接热源及熔池形成, 焊接化学冶金, 焊条、焊丝及焊剂, 熔池凝固及焊缝固态相变, 焊接缺欠, 焊接热影响区, 焊接裂纹。本书注重培养学生独立思考、分析问题及解决问题的能力, 注意加强学生理论联系实际训练及试验。

本书是高等学校焊接技术与工程专业、材料成形及控制工程专业、材料加工工程专业(焊接方面)的重要专业理论课教材, 也是从事焊接研究和焊接工程的技术人员学习的主要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

焊接冶金学: 基本原理/杜则裕主编. —北京: 机械工业出版社, 2018.6

普通高等教育“十三五”重点规划教材

ISBN 978-7-111-59343-0

I. ①焊… II. ①杜… III. ①焊接冶金-高等学校-教材 IV. ①TG401

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第043478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 章承林

责任校对: 肖琳 封面设计: 路恩中

责任印制: 常天培

北京铭成印刷有限公司印刷

2018年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·456千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59343-0

定价: 49.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前 言

本书是高等学校焊接技术与工程专业、材料成形及控制工程专业、材料加工工程专业（焊接方向）的一门重要的专业理论课教材，在培养焊接专业本科生、焊接工程技术人员掌握专业理论知识过程中起着非常重要的作用，同时也是从事与材料开发和焊接技术相关的研究人员和工程技术人员的重要参考书。本书是根据由中国机械工业教育协会材料加工工程学科教学委员会焊接学科组和机械工业出版社共同组织的焊接专业（方向）教材编写工作会议所通过的教材编写大纲的要求编写的。

“焊接冶金学——基本原理”是本专业学生首先要学习的专业课程，为学生建立焊接学科的理论基础、专业名词术语的正确概念，以便为后续的专业课程学习打下坚实的基础。本课程在 20 世纪 50 年代我国焊接专业初创时期的名称是“焊接原理”。这就表明，本课程的主要任务是使学生掌握焊接的基本理论，例如焊件的加热及热量的传导及分布、焊接过程中的冶金反应，以及金属在焊接过程中的组织变化等。在高校教学实践的基础上，1961 年天津大学焊接教研室编写的《焊接冶金基础》由中国工业出版社出版，并且得到其他高校的选用。20 世纪 70 年代本课程名称为“金属材料焊接理论基础”。20 世纪 80 年代根据国家标准焊接名词术语的准确用法，本课程名称改为“金属熔焊原理”。1988 年出版的全国统编教材的课程名称确定为“焊接冶金”。随着科学技术的发展，我国进行了大规模的经济建设，尤其是改革开放以来，高等学校的教学改革也在积极开展，焊接冶金学科的教学及科研成果不断丰富和充实提高了本课程的内容及水平。1995 年机械工业出版社出版了由张文钺教授主编的《焊接冶金学（基本原理）》。近年来，焊接已经逐渐形成了独立的学科体系，在焊接传热学、焊接化学冶金学、焊接材料学、焊接金属学等诸多领域都取得了可喜的科技进步，焊接技术在国家经济建设及国防建设中做出了重要贡献。这些重要成果应当反映到高校焊接专业课教学中来。本书编者本着积极结合新标准、新工艺、新技术、新成果的理念，力求讲清楚本课程的重点及难点，使学生建立起正确的专业学术概念，为后续课程及今后的实际工作打下坚实的基础。

本书的特点是从焊接过程中的金属加热及温度场、熔池金属的化学冶金及焊接接头的物理冶金各阶段的变化规律，阐述焊接过程的本质。目的是为了启发学生独立思考、分析问题及解决问题的能力，注意加强学生理论联系实际的训练及试验。

本书由天津大学博士生导师杜则裕教授担任主编，由华中科技大学博士生导师李志远教授、山东大学博士生导师邹增大教授担任主审。本书绪论、第 1 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章由杜则裕编写，第 2 章由天津大学张炳范教授编写，第 6 章、第 7 章由山东大学孙俊生教授编写。为本书编写提供帮助的还有隋永莉、刘光云、张德勤、屈朝霞、杨立军、邸新杰等。

本书在编写过程中得到了中冶钢铁研究总院、中国工程建设焊接协会、华中科技大学、

山东大学、北京航空航天大学、中国石油大学（华东）、中国石油管道科学研究院、中国石油管道学院、九江学院等单位的大力协助，特此表示感谢。本书在编写过程中，参考了大量的相关科学技术文献，在此谨向这些文献的作者及所在单位表示衷心的感谢。

本书的出版得到了机械工业出版社的大力支持与帮助，对于他们的辛勤劳动，在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中不妥之处敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
思考题	5
第1章 焊接热源及熔池形成	6
1.1 焊接热源	6
1.1.1 焊接热源的种类及特征	6
1.1.2 焊接过程的热效率	7
1.1.3 焊件加热区的热能分布	9
1.2 焊接温度场	10
1.2.1 焊接传热的基本方式	11
1.2.2 焊接温度场的特征	11
1.3 焊条熔化及熔池的形成	15
1.3.1 焊条的加热及熔化	15
1.3.2 熔池的形成	18
思考题	21
第2章 焊接化学冶金	22
2.1 焊接化学冶金过程的特点	22
2.1.1 焊接过程中对金属的保护	22
2.1.2 焊接化学冶金反应区及其反应条件	24
2.1.3 焊接工艺条件与化学冶金反应的关系	27
2.1.4 焊接化学冶金系统及其不平衡性	29
2.2 气相对金属的作用	29
2.2.1 焊接区内的气体	29
2.2.2 氮对金属的作用	33
2.2.3 氢对金属的作用	37
2.2.4 氧对金属的作用	46
2.3 熔渣及其对金属的作用	51
2.3.1 焊接熔渣	51
2.3.2 活性熔渣对焊缝金属的氧化	57
2.3.3 焊缝金属的脱氧	60
2.3.4 焊缝金属中硫和磷的控制	64
2.4 合金过渡	67
2.4.1 合金过渡的目的及方式	67
2.4.2 合金过渡过程的理论分析	68
2.4.3 合金过渡系数及其影响因素	70
思考题	72
第3章 焊条、焊丝及焊剂	74
3.1 焊条	75
3.1.1 焊条的分类	75
3.1.2 焊条型号和焊条牌号	76
3.1.3 焊条的组成	81
3.1.4 焊条的工艺性能	85
3.1.5 典型焊条的冶金性能分析	91
3.1.6 焊条设计的要点	98
3.1.7 焊条制造的工艺流程	100
3.1.8 焊条的选用要点	102
3.2 焊丝	103
3.2.1 焊丝的分类	104
3.2.2 实心焊丝	104
3.2.3 药芯焊丝	112
3.3 焊剂	125
3.3.1 焊剂的分类	125
3.3.2 焊剂型号和焊剂牌号、焊剂技术要求	126
3.3.3 焊剂的性能及用途	131
思考题	135
第4章 熔池凝固及焊缝固态相变	136
4.1 熔池凝固	136
4.1.1 熔池凝固的特点	136
4.1.2 熔池结晶的一般规律	137
4.1.3 熔池结晶的线速度	139
4.1.4 熔池结晶的形态	141
4.1.5 焊接接头的化学成分不均匀性	143
4.2 焊缝固态相变	147
4.2.1 低碳钢焊缝的固态相变	147
4.2.2 低合金钢焊缝的固态相变	148
4.3 焊缝性能的改善	156

4.3.1 焊缝金属的强化与韧化	156	6.4.3 焊接模拟试验方法的局限性	233
4.3.2 改善焊缝性能的工艺措施	157	思考题	234
思考题	158	第7章 焊接裂纹	235
第5章 焊接缺欠	160	7.1 焊接裂纹的危害及分类	235
5.1 焊接缺欠与焊接缺陷	160	7.1.1 焊接裂纹的危害	235
5.1.1 焊接缺欠与焊接缺陷的定义	160	7.1.2 焊接裂纹的分类	236
5.1.2 焊接产品的质量标准	161	7.2 焊接热裂纹	238
5.1.3 焊接缺欠对焊接接头质量的 影响	162	7.2.1 焊接热裂纹的一般条件	238
5.2 焊接缺欠的分类	164	7.2.2 结晶裂纹的主要特征	239
5.2.1 焊接缺欠的分类方法	164	7.2.3 结晶裂纹的形成机理	240
5.2.2 熔焊接头的缺欠分类	164	7.2.4 影响结晶裂纹的因素及防止 措施	242
5.3 焊接缺欠的评级与处理	167	7.3 焊接冷裂纹	247
5.3.1 焊接缺欠的形成原因	167	7.3.1 冷裂纹的危害、特征与分类	247
5.3.2 焊接缺欠的评级	168	7.3.2 冷裂纹的形成机理	249
5.3.3 超标缺欠的返修	168	7.3.3 防止冷裂纹的措施	256
5.4 焊缝中的气孔	170	7.4 再热裂纹	261
5.4.1 气孔的类型及分布特征	170	7.4.1 再热裂纹的主要特征	262
5.4.2 焊缝中气孔形成的机理	172	7.4.2 再热裂纹的形成机理	264
5.4.3 形成气孔的影响因素及防止 措施	175	7.4.3 影响再热裂纹的因素及防止 措施	264
5.5 焊缝中的夹杂	178	7.5 层状撕裂	268
思考题	179	7.5.1 层状撕裂的特征、分类及危害	268
第6章 焊接热影响区	180	7.5.2 层状撕裂的形成机理	269
6.1 焊接热循环	181	7.5.3 影响层状撕裂的因素及防止措施	270
6.1.1 焊接热循环的主要参数	181	7.6 应力腐蚀裂纹	271
6.1.2 焊接热循环主要参数的测试与 计算	183	7.6.1 应力腐蚀裂纹的危害	271
6.1.3 多层焊热循环	193	7.6.2 应力腐蚀裂纹的特征及其产生 条件	272
6.2 焊接热循环条件下的金属组织转变 特点	195	7.6.3 应力腐蚀的形成机理	273
6.2.1 焊接加热过程中的组织转变	196	7.6.4 防止应力腐蚀裂纹的措施	274
6.2.2 焊接冷却过程中的组织转变	203	7.7 焊接裂纹诊断的一般方法	278
6.2.3 焊接条件下的连续冷却转变图 及其应用	205	7.7.1 裂纹产生条件的初步调查	278
6.3 焊接热影响区的组织和性能	209	7.7.2 裂纹的宏观分析	279
6.3.1 焊接热影响区的组织分布	209	7.7.3 裂纹的微观分析	280
6.3.2 焊接热影响区的性能	215	思考题	280
6.4 焊接热、力模拟技术	230	附录	282
6.4.1 焊接模拟技术的发展过程及其 现状	230	附录 A 焊条牌号的编制方法	282
6.4.2 焊接热模拟试验机的原理及 应用	232	附录 B 焊条药皮材料技术条件	284
		附录 C 国内外焊条对照表	287
		附录 D 国内外堆焊焊条对照表	289
		参考文献	292

绪 论

近年来，随着我国经济建设的快速发展，焊接科学技术取得了重大的进步。举世瞩目的载人航天、奥运工程、西气东输、高速列车、航空母舰及海洋工程等重大的焊接科学应用项目取得了辉煌的业绩，从而为焊接科学理论与工程技术的发展奠定了坚实的基础，并且创造了可持续发展的优良条件。

我国的钢铁年产量已经超过 7 亿 t，按照工业发达国家的数据，将近 50% 的钢材需要经过焊接加工。虽然我国已经是制造业的焊接大国，但是应该清醒地认识到我国焊接技术水平与工业发达国家还有一定的差距。随着科学技术的不断进步，新材料、新能源、新工艺的不断出现，焊接科学与技术必将为我国现代化的经济建设及国防建设事业做出重大的贡献。

按照教学计划的安排，“焊接冶金学——基本原理”是焊接专业学生最早接触到的一门专业课。本绪论的主要内容就是要介绍：①什么是焊接？讲清楚焊接过程的物理本质；②本课程是干什么的？讲清楚焊接冶金学的研究领域；③学习本课程有什么用？讲清楚学习本课程的目的及学习内容。使学生充分了解这三个问题，对于今后的专业课学习是非常有益的。

1. 焊接过程的物理本质

什么是焊接？焊接（Welding）的定义是：通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使工件达到结合的一种方法（GB/T 3375—1994《焊接术语》）。

焊接与其他连接方式不同，即不仅在宏观上形成了永久性的连接，而且在微观上也建立了金属组织之间的内在联系。

由金属学的理论可知，金属是依靠金属键结合的。两个原子之间的结合力取决于它们之间引力与斥力共同作用的结果。对于大多数金属来说，当原子间的距离 $r_A \approx 0.3 \sim 0.5 \text{ nm}$ 时，结合力最大。当原子间的距离大于或小于 r_A 时，原子之间的结合力就明显减小。

实现焊接过程，从理论上分析就是使两个被连接的金属表面接近到相距为 r_A 时，就可以在接触表面上进行原子扩散、再结晶等物理化学过程，并且形成金属键的连接，达到焊接的目的。然而，使两个金属表面接近到相距为 r_A 并非是轻而易举的。即使经过精加工的金属表面实际上也有微观的凹凸不平，并且金属表面还常常有氧化膜、油污、水等杂质的吸附层。这些都在阻碍金属表面的紧密接触。为了克服这些阻碍金属表面紧密接触的因素，在焊接工艺上需要采取以下两种措施：

(1) 对母材施加压力 其目的是破坏母材接触表面上的氧化膜，使连接处产生局部塑性变形，增加有效接触面积，实现母材之间的紧密接触。

(2) 对母材加热 其目的是使连接处达到塑性或熔化状态，使母材接触面的氧化膜迅速破坏，降低金属变形的阻力。加热也增加了金属原子的振动能量，从而促进扩散、再结晶等物理化学过程的发展。

每种金属实现焊接所必需的温度与压力之间存在着一定的关系，焊接纯铁时所必需的温度和压力的关系如图 0-1 所示。由该图可知，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 线以上才能实现焊接，这就是图中 1 区的情况。当金属的加热温度为 $T_1 < T < T_2$ 时，压力应该在 BC 线以上，即图中 2 区的电阻焊情况。当金属的加热温度 $T \geq T_M$ 时（ T_M 是金属的熔化温度），实现焊接所需的压力为零，这就是图中的 3 区，说明实现熔焊时是不需要任何压力的。

根据母材是否被加热而熔化或是否被加压，通常将焊接方法分为熔焊（fusion welding）、压焊（pressure welding）及钎焊〔硬钎焊（brazing）和软钎焊（soldering）〕三类。其中每一类又按照不同的加热方式、工艺特点等特征再细分为若干小类。

(1) 熔焊 熔焊是指待焊处的母材金属熔化以形成焊缝的焊接方法。熔焊包括焊条电弧焊、埋弧焊、电渣焊、 CO_2 气体保护焊、等离子弧焊等。

(2) 压焊 压焊是指焊接过程中，必须对焊件施加压力（加热或不加热），以完成焊接的方法。压焊包括固态焊、热压焊、锻焊、气压焊及冷压焊等。

(3) 钎焊 钎焊是指采用比母材熔点低的金属材料作为钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点，但低于母材熔化温度，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接焊件的方法。根据使用钎料的不同，钎焊可分为硬钎焊和软钎焊两类。

钎焊方法可根据热源或加热方法来分类。常用的钎焊方法有炉中钎焊、火焰钎焊、浸渍钎焊、感应钎焊、电阻钎焊等。

总之，尽管焊接方法有很多种，但是在实质上都是使母材和焊缝金属形成共同的晶粒，如图 0-2a 所示。钎焊接头虽然在钎料熔点以下的温度时也能形成不可拆卸的接头，但是在一般情况下由于母材不熔化，只是填充的钎料熔化，所以在连接处不易形成共同的晶粒，而

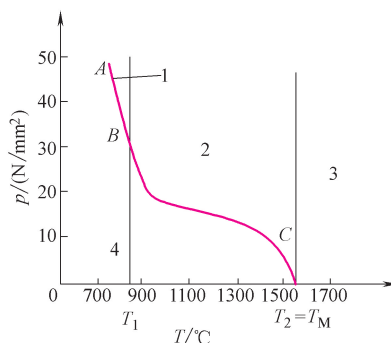


图 0-1 焊接纯铁时所必需的温度和压力

1—高压焊接区 2—电阻焊区
3—熔焊区 4—不能实现焊接区

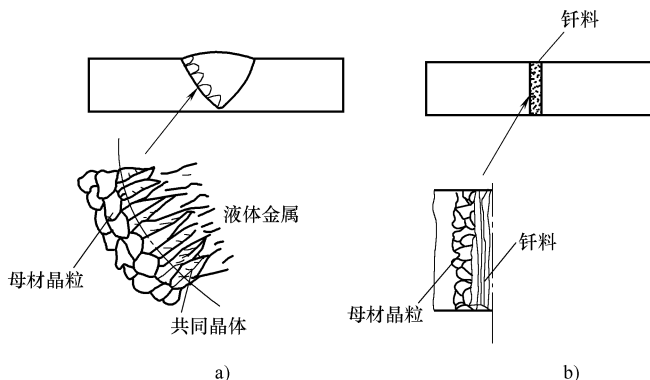


图 0-2 焊接与钎焊的本质区别

a) 焊接 b) 钎焊

只是在钎料与母材之间形成粘合。如图 0-2b 所示。因此，焊接与钎焊在微观上是有原则区别的。但是，近年来研制的共同钎料，也能使钎焊形成共同晶粒。这只是钎焊范畴中的特例。

2. 焊接冶金学的研究领域

随着科学技术的不断进步，生产中的各种装备日益向高温、高压、大容量、大型化的方向发展，所以生产实践中不断提出具有特殊性能材料焊接的新课题。例如高强度钢、超高强度钢、不锈钢、耐蚀钢、铝合金、钛合金、耐热合金、各种活性金属、难熔金属、异种金属、金属与非金属的焊接以及今后的功能材料、记忆合金的焊接等。科学技术与生产实际对焊接不断地提出更高的要求，就促使人们去研究焊接冶金的有关课题，并且不断地解决，促使焊接学科不断地向前发展。

焊接冶金学的研究领域十分广泛。它包括焊接经历的各个过程。对于金属材料的熔焊，焊接一般要经历加热、熔化、冶金反应、凝固结晶、固态相变、形成达到质量要求的焊接接头等过程。上述这些过程之间的相互联系和所处的温度、时间条件等如图 0-3 所示。为便于分析，可归纳为如下三个相互联系的过程：

(1) 焊接热过程 在熔焊条件下，母材受到焊接热源的作用，将发生局部受热、局部熔化及传热过程。因此，在母材中必然进行热量的传递和分布，这就是焊接热过程。

焊接热过程贯穿全部焊接过程的始终，而且焊接冶金是在热过程中发生和发展的。

焊接温度场与焊接应力和应变的分布、冶金反应、结晶及相变等都有着密切的关系。同时，焊接热过程也是影响焊接质量和焊接生产率的重要因素。因此，世界各国都对焊接热过程的研究十分重视。目前，它已经发展成为焊接领域中的一个独立分支，即“焊接传热学”。

(2) 焊接化学冶金过程 熔焊时，在熔化金属、熔渣及气相之间进行着一系列的化学冶金反应，例如金属的氧化、还原、脱硫、脱磷、合金元素过渡、脱氢等反应。这些冶金反应直接影响焊缝金属的化学成分、组织和性能，因此控制化学冶金过程是提高焊接质量的重要方法之一。有关研制新型焊接材料用来提高焊缝强韧性的课题是当前化学冶金方面的研究重点。所采取的措施是通过焊接材料向焊缝金属中过渡 Mo、V、Ti、RE 等微量元素；或通过净化焊缝，适当降低焊缝中的含碳量，最大限度地排除 S、P、O、N、H 等杂质，从而使焊缝金属韧化。

(3) 焊接时金属的凝固结晶及相变过程 随着焊接过程的进行，热源向前移动而离开已经局部熔化的金属。这时液态金属由于热源的离开而温度逐渐降低，便开始了凝固结晶过程，金属原子由近程有序排列转变为远程有序排列，即由液态转变为固态。对于具有同素异构转变的金属，随着温度的下降将发生固态相变。由于焊接条件下是快速连续冷却，受局部

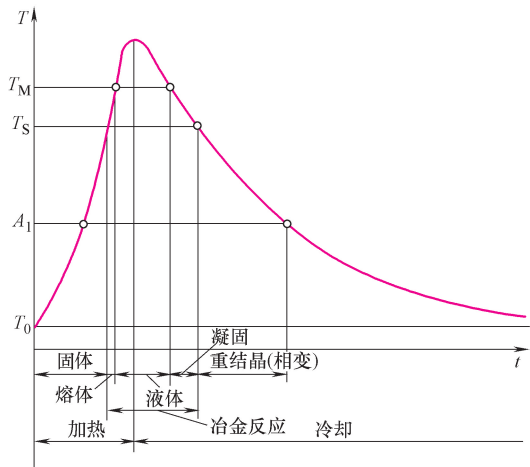


图 0-3 熔焊经历的过程

T_M —金属的熔化温度（液相线） T_S —金属的凝固温度（固相线） A_1 —钢的 A_1 相变点 T_0 —初始温度

拘束应力的作用，所以焊缝金属的凝固结晶和相变都具有各自的特点。并且在这些过程中会产生偏析、夹杂、气孔、脆化、裂纹等缺欠。因此，调整和控制焊缝金属的凝固和相变过程是保证焊接质量的技术关键。

熔焊时，熔合区和靠近焊缝两侧的母材在焊接过程中也受到了热源的作用。图 0-4 表示了焊接接头的组成，其中，母材是被焊接的材料；焊缝是焊件焊接后所形成的结合部分；熔合区是焊接接头中，焊缝与热影响区相互过渡的区域；而热影响区是焊接过程中母材因受热的影响（但未熔化）而发生金相组织和力学性能变化的区域。显然，热影响区中各点的最高温度都不超过母材的熔点。但是，各点所经受的热循环不同，所以各点所发生的组织转变也不同，并且在某些情况下还会导致性能变脆或软化，甚至产生缺欠。所以，焊接时除了应该保证焊缝金属的性能以外，还必须要保证热影响区的性能。实际上，在焊接某些材料，如高强度钢、铝合金、钛合金等时，热影响区存在的问题比焊缝更难解决。因此，世界各国都非常重视这方面的研究工作。

总之，焊接冶金学所涉及的研究内容相当广泛。目前的发展趋势正在从宏观到微观，从定性到定量，从理论研究到工程实践，进行着全面、深入、系统地研究，为不断地提高焊接质量而努力。

3. 学习焊接冶金学的目的及任务

焊接冶金学是焊接专业的主要基础理论课之一。其目的在于使读者掌握金属材料熔焊的基本理论，培养读者分析金属焊接性的基本能力，学会焊接试验研究的基本方法，并且结合工程实例的介绍与讨论，为读者在生产实际中正确地选择焊接材料及焊接工艺方法，制订合理的焊接工艺方案及工艺措施打下必要的基础。

焊接冶金学的主要任务是研究金属材料在熔焊条件下，有关焊接传热学、化学冶金和物理冶金学的普遍规律，并且在此基础上讨论具体焊接条件下金属材料的焊接性，为在生产实践中分析问题、解决问题、制订合理的焊接工艺方案，提高焊接质量打下理论基础。因此，焊接冶金学在专业课教学中占有重要的地位。焊接冶金学的内容可分为以下两大部分：

(1) 焊接冶金学——基本原理 这部分内容为本书第 1 章~第 7 章，是金属熔焊的理论基础，主要讨论在焊接条件下焊接热源、焊接温度场、焊条熔化及熔池的形成；焊接化学冶金过程的特点、气相对金属的作用、熔渣及其对金属的作用、合金过渡；焊条、焊丝、焊剂；熔池凝固、焊缝固态相变、焊缝性能的改善；焊接缺欠与焊接缺陷、焊接缺欠的分类、焊接缺欠的评级与处理、焊缝中的气孔、焊缝中的杂质；焊接热循环、焊接热循环条件下的金属组织转变特点、焊接热影响区的组织和性能、焊接热/力模型模拟技术简介；焊接裂纹的危害及分类、焊接热裂纹、焊接冷裂纹、再热裂纹、层状撕裂、应力腐蚀裂纹、焊接裂纹诊断的一般方法等。

(2) 焊接冶金学——材料焊接性 这部分内容主要对典型材料的焊接性进行分析以及选择正确的焊接工艺方案，讨论的主要内容有材料焊接性及其试验评定、合金结构钢的焊接、不锈钢及耐热钢的焊接、有色金属（铝、铜、钛及其合金）的焊接、铸铁的焊接、先进材料的焊接以及异种材料的焊接等。

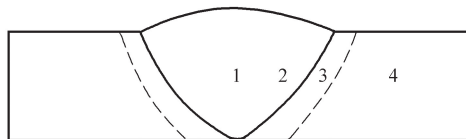


图 0-4 焊接接头示意图

1—焊缝 2—熔合区 3—热影响区 4—母材

焊接冶金学是在“物理化学”“金属学及热处理”以及“焊接技术导论”等课程的基础上，结合焊接过程的特点分析、讨论各种材料焊接时的基本规律。本书在讨论具体材料的焊接时，重点放在分析材料的焊接性特点、如何制订焊接工艺方案，并结合典型工程实例，这对于深入学习及掌握材料焊接的基本规律，培养读者分析实际问题、解决生产问题的能力是相当有益的。由于焊接冶金学所涉及的理论问题和实际问题相当广泛，所以在学时时必须综合运用本专业各门学科的知识，结合生产实践经验及典型工程实例的分析讨论，认真思考，不断总结。

对于焊接冶金及材料焊接性方面某些未被认识的规律，还需要焊接工作者在今后的科学实践及生产实践中不断地探索，勤于思考，并加以认真总结。

思 考 题

1. 什么是焊接？焊接与钎焊的区别是什么？
2. 焊接冶金的研究领域包括哪些方面？
3. 学习焊接冶金学的目的是什么？
4. 结合图 0-3，说明熔焊经历的全部过程。

焊接热源及熔池形成

在现代科学技术条件下，实现焊接过程所采用的能源主要是电能与机械能，以及化学能、光能、超声波能等。对于熔焊，主要是采用电弧热、电阻热，以及等离子弧、电子束、激光束等高能量密度的焊接能源。

本章主要讨论焊接热源、焊接温度场、焊条熔化及熔池的形成等。这些方面对于焊接化学冶金、熔池凝固、焊接热影响区的组织与性能，以及焊接应力与变形、焊接缺欠的产生及防止都有着重要的影响。

1.1 焊接热源

熔焊的发展过程反映出所使用的焊接热源的发展变化过程。从19世纪80年代开发电弧以来，焊接热源得到了不断的更新与完善。例如，19世纪末的碳弧电焊、金属极电弧焊；20世纪初的气焊及薄皮焊条电弧焊；20世纪20年代的焊条电弧焊及氢原子焊、氦气保护焊；20世纪40年代的电阻焊和埋弧焊；20世纪50年代出现了电渣焊和气体保护焊；20世纪60年代的电子束焊、等离子弧焊；20世纪70年代开发了激光焊；20世纪80年代开始探索新的焊接热源，如太阳能、微波和离子束等。为了满足国家建设的需求，在科学技术发展中总是不断地研制出新的材料，设计出新型的工程结构，并且提出更为严格的技术要求，因此就需要不断地开发与探索新的焊接热源和新的焊接工艺方法。

1.1.1 焊接热源的种类及特征

焊接生产实践中，满足焊接条件的热源有以下几种：

(1) 电弧热 利用气体介质在放电过程中所产生的热能作为焊接热源。这是目前应用最为广泛的焊接热源。例如，焊条电弧焊、自动埋弧焊、钨极惰性气体保护电弧焊（TIG）、熔化极惰性气体保护电弧焊（MIG）、CO₂气体保护焊等。

(2) 化学热 利用氧、乙炔等可燃性气体或铝、镁热剂燃烧所产生的热量作为焊接热源。例如，氧乙炔焊、热剂焊等。

(3) 电阻热 利用电流通过导体时产生的电阻热作为焊接热源。例如，电阻焊和电渣焊。采用这种热源的焊接工艺，都具有高度的机械化和自动化水平，生产率高，但耗电量较大。

(4) 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。其实质属于电阻加热的另一种形式。例如，管材高频焊。

(5) 摩擦热 利用由机械摩擦而产生的热能作为焊接热源。例如，摩擦焊。

(6) 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。等离子弧焊就是利用等离子弧作为焊接热源的熔焊方法。

(7) 电子束 利用加速和聚焦的电子束轰击置于真空或非真空中的焊件所产生的热能作为热源。例如, 电子束焊。

(8) 激光束 通过受激辐射而使放射增强的光称为激光, 利用经过聚焦产生能量高度集中的激光束作为焊接热源。例如, 激光焊接。

总之, 每种热源都有各自的特点, 在生产中都有不同程度的应用。各种热源的主要特性见表 1-1。各种热源的物理本质及相应的焊接工艺, 将在有关课程中进行讨论。

表 1-1 各种热源的主要特性

热 源	最小加热面积/cm ²	最大功率密度/(W/cm ²)	温度/K
乙炔火焰	10 ⁻²	2×10 ³	3.5×10 ³
金属极电弧焊	10 ⁻³	10 ⁴	6×10 ³
钨极氩弧焊(TIG)	10 ⁻³	1.5×10 ⁴	8×10 ³
自动埋弧焊	10 ⁻³	2×10 ⁴	6.4×10 ³
电渣焊	10 ⁻²	10 ⁴	2.3×10 ³
熔化极氩弧焊(MIG)、CO ₂ 气体保护焊	10 ⁻⁴	10 ⁴ ~10 ⁵	9×10 ³
等离子弧	10 ⁻⁵	1.5×10 ⁵	(1.8~2.4)×10 ⁴
电子束	10 ⁻⁷	10 ⁷ ~10 ⁹	(1.9~2.5)×10 ⁴
激光	10 ⁻⁸	10 ⁷ ~10 ⁹	—

1.1.2 焊接过程的热效率

1. 热效率的定义

由热源提供的热量, 在焊接过程中并不是全部被利用了, 而是有一部分热量损失于周围介质和飞溅等。所以, 真正用于焊接的热量只是热源提供热量的一部分。

设由热源提供的热量为 Q_0 , 用于加热焊件的有效热量为 Q , 那么热效率的定义为

$$\eta = \frac{Q}{Q_0} \quad (1-1)$$

式中 η ——热效率或加热功率的有效系数。

在一定条件下, η 是常数, 它主要取决于热源的性质、焊接工艺方法、焊接材料的种类、母材的种类及焊件的形状、尺寸等因素。

2. 各种焊接方法的焊接热效率

(1) 电弧焊的热效率 如果认为电弧在电路中是无感的, 则全部电能转化为热能, 电弧功率为

$$P_0 = UI \quad (1-2)$$

式中 P_0 ——电弧功率, 即电弧在单位时间内所析出的能量 (W);

U ——电弧电压 (V);

I ——焊接电流 (A)。

由于能量不是全部用于加热焊件, 因此真正用于加热焊件的有效功率 P 为

$$P = \eta UI \quad (1-3)$$

电弧焊的热效率 η 受许多因素的影响。不同焊接方法的热效率见表 1-2。此外, 焊接电

流的种类及大小、焊接速度、使用的焊接材料等都对热效率有影响。电弧焊时的热量分配如图 1-1 所示。

表 1-2 不同焊接方法的热效率 η

焊接方法	碳弧焊	焊条电弧焊	自动埋弧焊	电渣焊	TIG	MIG		电子束焊、激光焊
						钢	铝	
η	0.5~0.65	0.77~0.87	0.77~0.90	0.83	0.68~0.85	0.66~0.69	0.70~0.85	>0.9

必须指出，此处的焊接热效率 η 只是考虑焊件吸收了多少热能。实际上，焊件所吸收的热能又可分为两部分：一部分用于熔化金属而形成焊缝；另一部分由于热传导而流失于母材形成热影响区。然而，焊接热效率 η 并不能反映出这两部分之间的比例。严格地说，用于熔化金属形成焊缝的热能才是真正热效率。所以， η 值并不能反映热能利用的合理性。

(2) 电渣焊的热效率 由于电渣焊的渣池处于厚大焊件的中间，因此热能向外散失较少，热能主要损失于强制焊缝成形的冷却滑块。实践证明，焊件越厚，滑块带走热量的比例越小。因此，电渣焊时焊件板厚越大，热效率越高。

90mm 厚钢板电渣焊时的热能分配如图 1-2 所示，它的热效率可达 80% 以上。

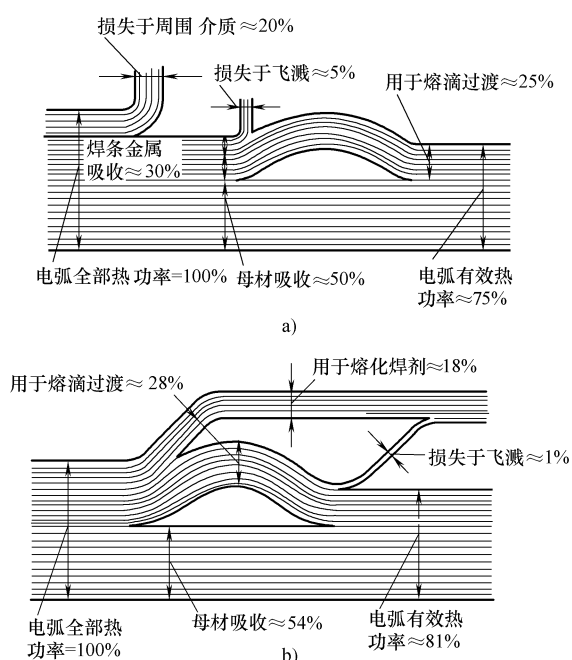


图 1-1 电弧焊的热量分配

- a) 焊条电弧焊 ($I=150\sim 250\text{A}$, $U=35\text{V}$)
 b) 自动埋弧焊 ($I=1000\text{A}$, $U=36\text{V}$, $v=36\text{m/h}$)

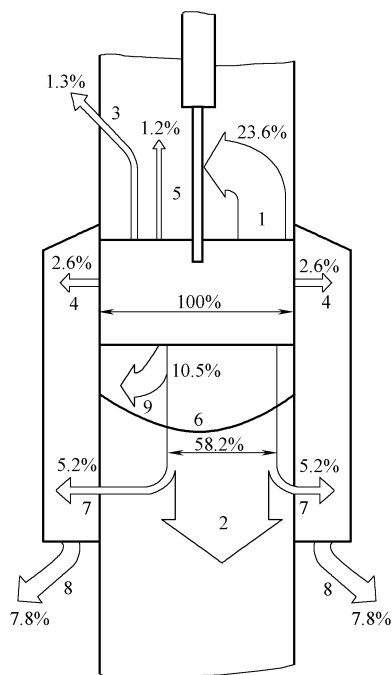


图 1-2 电渣焊时的热能分配
(钢板厚 $\delta=90\text{mm}$)

- 1—用于熔化焊丝的热能 2—向母材传导的热能
 3—辐射于焊件边缘的热能 4—渣池损失于滑块的热能
 5—辐射于周围介质而损失的热能 6—用于熔化母材的热能
 7—渣池损失于滑块的热能 8—冷却水带走的热能 9—用于熔池过热的热能

(3) 电子束焊和激光焊的热效率 由于它们采用的是高能量密度的热源, 因此能量损失较少, 热效率可达 90% 以上。

1.1.3 焊件加热区的热能分布

热源的热能传给焊件时所通过的焊件表面上的区域就称为加热区。如果所讨论的热源是对称的, 则加热区是圆形的。如果进一步分析, 电弧焊的加热区又可分为活性斑点区及加热斑点区 (见图 1-3)。

1. 活性斑点区

这是带电质点 (电子和离子) 集中轰击的部位, 在这个部位电能转变为热能。该斑点的直径为 d_A 。电流密度 j 的变化如图 1-3 中的虚线所示。

2. 加热斑点区

在这个区内金属受热是通过电弧的辐射和与周围介质的对流进行的。加热斑点的直径为 d_H , 热流密度 $q(r)$ 的变化如图 1-3 所示。加热斑点区的热能是不均匀的, 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相差越小。在电弧电压不变时, 电流密度越大, 则中心与边缘的热能相差越大。

单位时间通过单位面积传递给焊件的热能称为热流密度, 以 $q(r)$ 表示。研究工作证明, 加热斑点上的热流密度分布可以近似地用高斯曲线来描述, 如图 1-4 所示。距斑点中心 O 为 r 的任意点 A , 它的热流密度为

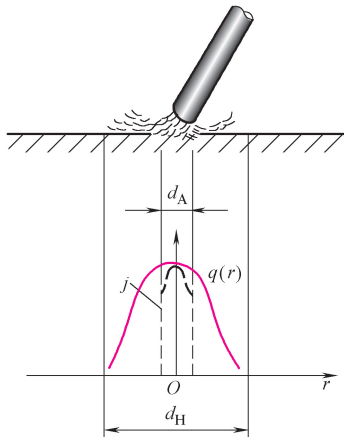


图 1-3 电弧作用下的加热斑点

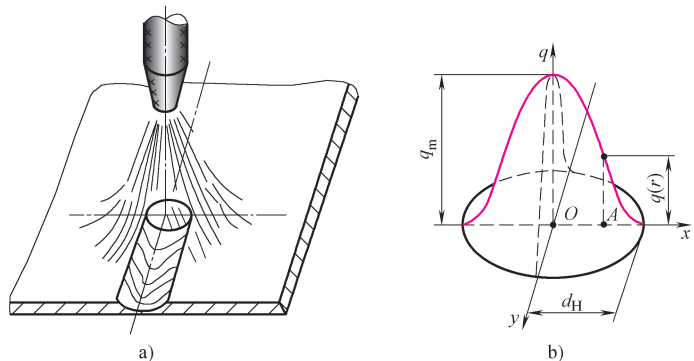


图 1-4 加热斑点上热流密度的分布

a) 热源加热焊件 b) 热流密度的分布

$$q(r) = q_m e^{-Kr^2} \quad (1-4)$$

式中 $q(r)$ —— A 点的热流密度 [$\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$];

q_m ——加热斑点中心的最大热流密度 [$\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$];

K ——能量集中系数 (cm^{-2});

r —— A 点距加热斑点中心的距离 (cm)。

显然, 当已知 q_m 和 K 值时, 就可由式 (1-4) 求出任意点的热流密度。

高斯曲线下面所覆盖的全部热能为