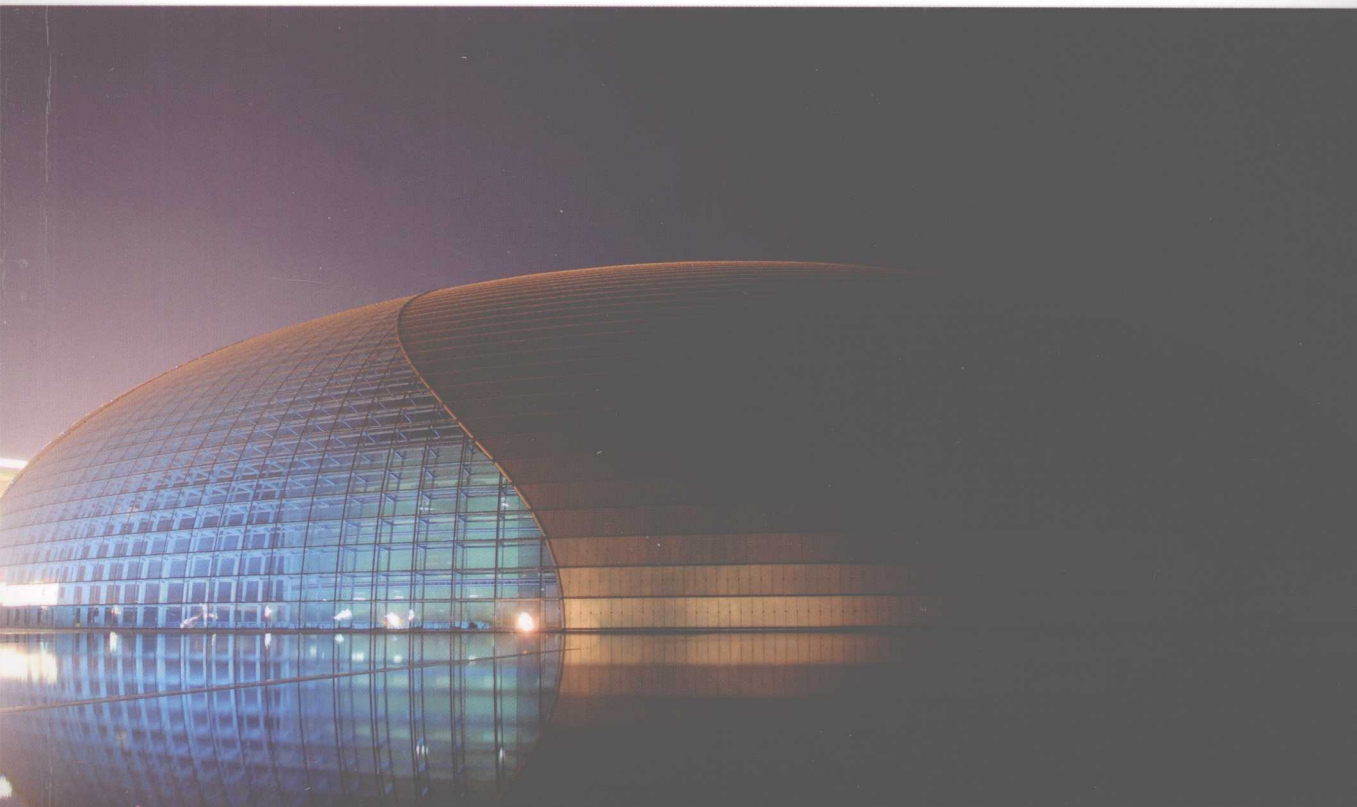




中等职业学校教材
“以就业为导向、以能力为本位”课程改革成果系列

金属熔化焊基础 与常用金属材料焊接

滕明胜 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

中等职业学校教材

内容简介

“以就业为导向、以能力为本位”课程改革成果系列

金属熔化焊基础与常用金属材料焊接

滕明胜 主编

责任编辑 滕明胜 封面设计 滕明胜 版式设计 滕明胜 责任印制 滕明胜

010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118
010-57824118	滕明胜	010-57824118	010-57824118

高等教育出版社

010-57824118

内容简介

本书是中等职业学校“以就业为导向、以能力为本位”课程改革成果系列教材之一,是根据作者多年教学和考评经验,综合教育部制定的中等职业学校“金属熔化焊原理”、“金属材料焊接性”两门课程教学大纲以及劳动和社会保障部制定的《焊工国家职业标准》要求而编写的。

本书主要内容包括金属熔化焊基础和常用金属材料焊接性两个部分。金属熔化焊基础包括焊接热过程、焊接化学冶金基础、焊接缺欠和焊接材料的基础知识;金属材料焊接性包括焊接性的概念及其试验方法、常用金属材料的焊接性和焊接工艺要点,如碳钢、低合金结构钢、不锈钢、铸铁和有色金属等。每章后面都附有思考题,便于自学。

本书可作为中等职业学校焊接专业的教材,也可作为相关行业岗位培训教材及相关人员的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

金属熔化焊基础与常用金属材料焊接/滕明胜主编.

北京:高等教育出版社,2008.5

ISBN 978-7-04-023464-0

I. 金… II. 滕… III. ①金属—熔焊—专业学校—教材②金属材料—焊接工艺—专业学校—教材
IV. TG442 TG457.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第059327号

策划编辑 陈大力 责任编辑 贺玲 封面设计 张楠 责任绘图 杜晓丹
版式设计 张岚 责任校对 金辉 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 涿州市京南印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 13
字 数 310 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008年5月第1版
印 次 2008年5月第1次印刷
定 价 18.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 23464-00

出版 说明

国务院《关于大力发展职业教育的决定》的精神推动着我国职业教育事业蓬勃发展。为提高职业教育教学质量，教育部启动了新一轮职业教育教学改革行动。高等教育出版社始终站在更新观念及职教课改的前列，打造优质教学资源，研发精品教学资源，增强服务意识，提高服务本领，支持职业教育事业的发展。

在教育部新一轮职业教育教学改革的进程中，焊接专业技能型紧缺人才的培养培训日益受到关注。高等教育出版社本着服务于职业教育事业发展，服务于职业学校教师教学，服务于职业学校学生学习的指导思想，推出了本套满足中等职业学校焊接专业教学实际需要的专业课改成果系列教材。

本系列教材是由多年从事中等职业教育焊接专业教学工作的一线骨干教师和学科带头人并邀请相关企业人员参与，通过社会调研，对劳动力市场人才进行需求分析，进行课题研究，研发专业人才培养方案，制定核心课程标准。本系列教材在新一轮教学改革成果基础上，根据教育部颁发的《焊接专业教学指导方案》，参照国家职业标准《焊工》，有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准，并在征询相关企业人员的意见后编写而成的。其主要特点为：

1. 本系列教材打破了原有的“以学科为中心”的课程体系，课程设置和教学内容与企业技术发展同步，贯彻了以就业为导向，突出职业岗位能力培养为主的职业教育思想。
2. 本系列教材在使用时有较强的可操作性。专业基础理论削枝强干，够用为度，兼顾发展；技能训练课程内容实行“项目化”，项目根据学生掌握专门技术的认知规律设置课题。
3. 本系列教材课程体系与教学内容突出职业能力培养，固化课改成果，渗透素质教育，强化职业道德，注重安全、环保意识培养。
4. 本系列教材引领教学方法和手段改革潮流，适宜在“行动导向”教学原则下采用“项目教学法”、“任务引领(驱动)教学法”、“工作过程系统化教学法”、“理实一体化教学法”。
5. 本系列教材以最新的国家标准编写，融入了新知识、新技术、新工艺和新方法。语言表述平实，通俗易懂，便于学生的自学。

伴随着教育部新一轮职业教育教学改革的不断深化，焊接专业教学资源会更加丰富，我们将陆续研发焊接专业的多媒体教学资源，全方位满足焊接专业技能型紧缺人才培养培训的教学需求。本套教材在推广使用中，将根据反馈的信息和教学需求的变化进行修订与完善。

高等教育出版社
中等职业教育出版中心
2008年3月

中等职业教育是我国教育事业的重要组成部分,中等职业学校是培养初中级人才和高素质劳动者的摇篮。当前,我国中等职业教育的特点是以学生为本,强调“公共课够用、专业课实用、实训课会用”。依据此特点,教材要尽量体现满足中职学生特点的实用性、够用性和可接受性。为此,在高等教育出版社的组织下,我们综合教育部2001年5月组织审定的中等职业学校焊接专业“金属熔化焊原理”、“金属材料焊接性”两门课程教学大纲以及劳动和社会保障部制定的《焊工国家职业标准》的要求,本着“以就业为导向、以能力为本位”的基本原则编写了本书。

本书在组织和内容上较以往教材有较大改变,更加适合当前中职学生的教学要求和学习特点。根据作者多年教学和考评经验,将劳动和社会保障部技能鉴定的应知要求和教育部课程大纲的理论要求有机结合起来,满足中职学生“双证”考核要求。通过大量焊接实例和操作经验讲解相关焊接理论,由浅入深,通俗易懂,同时兼顾中职学生可持续发展的需要。

本书共十章,第一、二章介绍金属在不同熔化焊条件下的成分、组织及性能的变化规律和影响因素;第三章介绍常见焊接缺欠的产生原因、影响因素和防止措施;第四章介绍常用焊接材料的性能和应用;第五章至第十章介绍常见金属材料的焊接性和焊接工艺要点,包括碳素结构钢、热轧正火钢、珠光体耐热钢和低温钢、奥氏体不锈钢、铸铁和有色金属等。

本书由滕明胜任主编。其中,第四章、第十章由黄渊莉编写;第五章由林静编写;其余各章由滕明胜编写。全书由清华大学李家枢教授审阅。

本书在编写过程中得到了中国航天科工集团061基地、高等教育出版社、贵州航天职业技术学院的大力支持,同时参阅和借鉴了有关教材和国内出版的相关资料,清华大学李家枢教授在百忙中提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中错漏之处在所难免,恳请广大同行和读者提出宝贵意见和建议。

编者

2008年5月于遵义

目 CONTENTS 录

绪论	1	思考题	103
第一章 熔化焊的加热特点及 焊接接头	4	第七章 低合金结构钢的焊接	104
第一节 焊接热源和焊接热效率	4	第一节 低合金结构钢概述	104
第二节 焊接热循环	6	第二节 低合金高强度结构钢 的焊接	107
第三节 焊接接头的组织和性能	9	第三节 珠光体耐热钢的焊接	113
思考题	19	第四节 低温钢的焊接	120
第二章 焊接冶金基础	20	第五节 低合金结构钢焊接实例	124
第一节 焊接冶金的一般特点	20	思考题	125
第二节 焊接熔渣和焊接区内 的气体	24	第八章 奥氏体不锈钢的焊接	127
第三节 焊缝金属的脱氧、脱硫、 脱磷及合金化	34	第一节 不锈钢概述	127
思考题	39	第二节 奥氏体不锈钢的焊接	130
第三章 常见的焊接缺欠	40	第三节 奥氏体不锈钢焊接实例	142
第一节 常见的形状和尺寸不良 缺欠、未熔合及未焊透	40	思考题	144
第二节 孔穴和固体夹杂	44	第九章 铸铁件的焊补	145
第三节 焊接裂纹	48	第一节 铸铁概述	145
第四节 常见焊接缺陷的返修	53	第二节 铸铁件的焊补	148
思考题	55	第三节 铸铁件焊补实例	158
第四章 常用焊接材料	56	思考题	159
第一节 焊条	56	第十章 有色金属的焊接	160
第二节 焊丝	67	第一节 铝及铝合金的焊接	160
第三节 焊剂与气焊熔剂	73	第二节 铜及铜合金的焊接	170
思考题	80	第三节 钛及钛合金的焊接	179
第五章 金属焊接性及试验方法	81	第四节 有色金属焊接实例	185
第一节 金属焊接性概述	81	思考题	187
第二节 金属焊接性的试验方法	83	附录	189
思考题	92	附录一 常用碳钢焊条型号 的划分	189
第六章 碳素结构钢的焊接	93	附录二 低合金钢焊条型号、牌号 对应关系及主要用途	190
第一节 碳素结构钢概述	93	附录三 不锈钢钢焊条	192
第二节 碳素结构钢的焊接	95	附录四 钢焊丝和镍基合金焊丝的 牌号及化学成分	194
第三节 碳素结构钢焊接实例	100	参考文献	199

绪 论

一、焊接在现代制造技术中的作用及其发展趋势

据史书记载，早在春秋战国时代，我们的祖先就已用黄泥为助熔剂，采用加热锻接的方法制造兵器。在 19 世纪末 20 世纪初，焊接被广泛地应用于工业生产中。1885 年发现电弧，1930 年发明药皮焊条电弧焊，在此基础上又先后发明了埋弧焊、气体保护焊等电弧焊的焊接方法。电阻焊在 1886 年发明，后来逐步完善为电阻点焊、缝焊和对焊。随着电弧焊和电阻焊的发展，焊接逐步取代了铆接和部分螺栓连接，成为制造技术中主要的连接方法。目前，焊接方法已有电弧焊、电阻焊、钎焊、电子束焊、激光焊等 20 余种及近百种派生的方法，随着科学技术的发展和进步，焊接技术也在不断地发展。

现代制造技术概括起来大体可分为两种：成形和改性。成形是指把工件按照设计要求加工成相应的形状，同时保证尺寸精度的过程。例如，车、铣、刨、磨、钻等机械冷加工和铸造、锻压等机械热加工都属于成形工序。改性是指利用各种方法，改进工件的性能和延长工件使用寿命的过程。例如，轴承经热处理后的使用寿命可从几百小时提高到几千小时；金属经过电镀化学处理后，可以防锈。

经成形和改性处理后的工件，需要连接起来才能使用。连接的方法分为可拆卸连接（如螺钉连接、铆接、胶接等）和永久性连接（如焊接等）。所有的连接方法中，焊接是应用最广泛、最重要的连接方法。在现代制造技术中，焊接具有其他连接方法所无法比拟的优点。

1. 焊接具有永久性

焊接通过使被连接的材料达到原子间的结合，可实现永久性的连接。而螺钉连接、铆接、黏结等连接方法，都不能达到材料的原子间结合，是可拆卸的非永久性连接。

2. 焊接具有非常高的可靠性

螺钉连接、铆接、黏结等连接，由于不能实现被连接件与母材等性能的要求，其接头的动载性能差；而焊接接头中的焊缝可以与母材达到等强度、等刚度、等塑性和等韧性，因此通过焊接所获得的焊接接头的动载性能好。通过焊接，运动载体（如汽车、飞机、火箭等）可以在很长的使用寿命期限内安全工作。

3. 焊接具有良好的适应性

焊接可在各种环境下操作。焊接不仅可在厂房内操作，也可在野外操作；不仅可在深水下进行，也可在太空进行。因此，焊接是目前所有连接方法中适应性最广的。图 0-1 所示是水下焊接示例。

4. 焊接具有广泛的应用性

焊接具有很高的生产效率和较低的加工成本，应用范围十分广泛。焊接发展到现在，已经完全适应了工业化大批量生产的需要，广泛地应用于航天、航空、冶金、建筑、造船、微电



图 0-1 水下焊接

子、电力、海洋工程、核动力工程等领域。例如，2004 年我国的钢用量是 3.1 亿吨（包括国产和进口），据统计其中有 1.6 亿吨是用于焊接结构的生产，也就是说，用焊接方法加工的钢用量约占整体钢用量的 52%，而欧美发达国家则占到 60%。

焊接技术的发展是在 20 世纪金属材料被广泛应用和工业化大批量生产的条件下迅猛发展起来的。现在几乎所有的金属材料都可以用于焊接，并且焊接性能越来越好。随着科技的发展，焊接已由单一的加工方法发展为具有广泛科学基础和良好发展前景的现代制造技术。可以说，现代焊接技术是衡量一个国家科学技术先进程度的重要标志之一。

21 世纪焊接技术主要有以下发展趋势：

1) 焊接的对象不仅是同种材料，还包括异种材料。目前，焊接的主要对象是金属材料，但随着材料科学的发展，21 世纪已是材料多元化的时代。虽然传统的金属材料依然占据主角，但非金属材料如陶瓷、高强塑料、复合材料等将会快速发展，因此非金属材料间的焊接、金属与非金属间的焊接必然会产生新的焊接方法。

2) 随着科技的发展，对焊接技术的要求也越来越高。现代工业要求高参数、大容量的设备越来越多，如各种耐高温、耐高压、超低温的容器、深水潜艇、太空装备等，所采用的金属材料是各种高强钢、不锈钢、耐热钢以及某些特种材料（如钛合金、镍基合金、复合材料和陶瓷等），这些设备及材料对焊接技术提出了更新、更高的要求。

3) 传统的焊接是一个高耗能、高耗材、工作环境差和自动化程度低的技术，因此采用新能源、信息化和自动化技术改造传统的焊接技术将是一个必然的发展趋势，在为实现我国 21 世纪新型工业化、和谐社会和建设节约型社会的目标中显得十分重要。

4) 现代焊接技术的发展将逐步向极限环境扩展，如水下焊接和空间焊接。同时，焊接不仅仅在工业领域内运用，也将扩展到其他领域，如激光焊接技术在医学领域已经成功地把患者

脱落的视网膜和眼球焊接起来，恢复了患者的视力。

目前，我国的焊接技术和装备与发达国家(如美国、日本等)相比还有很大的差距。很多焊接产品还属于高能耗、低附加值产品，处于产业链的低端。一些高端产品的关键技术和主要设备还依赖于进口，如高端焊接设备、特殊性能焊接材料和重要焊接结构的新型焊接技术。21世纪是中华民族再次崛起的关键时期，缩小我国和发达国家焊接水平的差距、赶上并超过发达国家，是我国每一个焊接工作者特别是年轻焊接工作者的责任。

二、学习本课程的目的、方法及要求

焊接是在多门基础学科(如物理、化学、金属材料学、力学、电学等)基础上发展起来的一门应用型技术。因此焊接是多学科的融合，总体上是由焊接材料学、焊接方法学和焊接结构学三大部分组成。

本课程的学习内容共两个部分：金属熔焊基础和常用金属材料焊接。

(1) 金属熔焊基础

这部分是本书前四章的内容。主要介绍在熔焊条件下焊接热源、焊接温度场、熔池的形成和焊缝组织的形成及性能、焊接区内气体与金属间的相互作用、焊接熔渣以及焊接接头的组织和性能、焊接缺陷的产生原因及防止方法等，还介绍了熔焊常用的焊接材料，如焊条、焊丝、焊剂、气焊熔剂等。

(2) 常用金属材料焊接

这部分是本书后六章的内容。主要介绍金属材料焊接性及试验方法，并以此为基础讨论了碳钢、低合金结构钢、奥氏体不锈钢、铸铁、有色金属的焊接性。

学习本课程的目的：通过学习金属材料在熔焊的条件下有关焊接冶金学的基础知识和普遍规律，分析各种常见金属在熔焊条件下的焊接性，为制定合理的焊接工艺、提高焊接质量提供理论依据。

本课程以“金属材料及热处理”、“焊接概论”等课程为基础，是中职、中专焊接专业的主干课之一。要学好本课程，应在完成上述课程的基础上，通过一定的专业生产实训，把积累的必要基础知识与本课程的知识点相结合，才能学以致用、融会贯通。同时，学习时要特别注意理论联系实际，将自己在实训中遇到的焊接问题通过理论学习得到解决，培养分析和解决实际问题的能力。

思考题

0-1 焊接在现代制造技术中的作用和优点是什么?

0-2 21世纪焊接技术的主要发展趋势有哪些?

0-3 学习本课程的重点是什么?如何学好本课程?

第一章

熔化焊的加热特点及焊接接头

熔化焊(简称熔焊)是指将待焊处的母材金属熔化后,形成焊缝的焊接方法。熔焊时,被焊金属和填充金属在焊接热源作用下发生局部的熔化,冷却后形成牢固的焊接接头。而焊接热源的特性、焊接热循环等因素与焊接冶金反应、熔池结晶、焊接接头的组织和性能、应力和应变等有着密切的关系,是影响焊接质量和效率的重要因素。因此,为能主动控制焊接质量,首先必须掌握熔焊的加热特点和焊接接头的知识。

第一节 焊接热源和焊接热效率

一、焊接热源的种类和特性

焊接热源随着人类科技的进步而在不断地发展。19世纪末发明了碳弧焊,在此基础上,20世纪初发明了焊条电弧焊和氧—乙炔气焊,20世纪40年代发明埋弧焊和电阻焊,50年代发明CO₂气体保护焊和电渣焊,60年代发明电子束焊和等离子弧焊与切割,70年代把激光应用于焊接与切割,目前正在探索和开发的焊接热源有太阳能、微波等。所以可以说,焊接热源的发展决定了熔焊的发展。

21世纪,焊接技术的发展趋势向着高效率、高质量、低能耗、低成本的方向发展。因此,为适应焊接技术的发展趋势,理想的焊接热源应该是:能量密度高度集中,焊接过程的实现快速,同时要能得到优质的焊缝和最小的热影响区。

目前,生产上已得到使用的焊接热源的种类见表1-1所示。

表1-1 焊接热源的种类

热源种类	特点	焊接方法
电弧	利用电弧把外界提供的能量转化为熔焊所需的热量 (是目前应用最广泛的一种焊接热源)	焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊
化学热	利用可燃气体(如乙炔、液化石油气等)和助燃气体(如氧气)或铝、镁发热剂作为焊接热源	气焊、铝热焊

续表

热源种类	特点	焊接方法
电阻热	利用电流通过导体时所产生的电阻热作为焊接热源。采用电阻热作为热源的焊接方法，机械化和自动化程度高，但需要强大的电力	电渣焊、电阻焊
等离子弧	利用把普通电弧经过相应的压缩作用后，变为高温、高电离度、高能量密度的等离子弧作为焊接热源	等离子弧焊接
摩擦热	利用机械摩擦产生的热能	摩擦焊
电子束	利用高压高速的电子在真空中猛烈轰击金属局部表面，使高速运动电子的动能转化为热能	电子束焊
激光束	利用受到激辐射后，放射出的增强光(激光)经过聚焦产生的能量高度集中的激光束作为焊接热源	激光焊

各种焊接热源由于产生的机理不同而有不同的特性。各种焊接热源的常见特性有最小加热面积、最大功率密度、正常焊接规范下的温度等，见表 1-2 所示。

表 1-2 焊接热源的主要特性

热 源	最小加热面积/cm ²	最大功率密度/(W/cm ²)	正常焊接规范下的温度
乙炔火焰	10 ⁻²	2 × 10 ³	3 200 °C
金属极电弧	10 ⁻³	10 ⁴	6 000 K
钨极氩弧焊电弧(TIG 焊)	10 ⁻³	1.5 × 10 ⁴	8 000 K
埋弧焊电弧	10 ⁻³	2 × 10 ⁴	6 400 K
电渣热	10 ⁻³	10 ⁴	2 000 °C
熔化极氩弧焊和二氧化碳气体保护焊的电弧	10 ⁻⁴	10 ⁴ ~ 10 ⁵	—
等离子弧	10 ⁻⁵	1.5 × 10 ⁵	18 000 ~ 24 000 K
电子束	10 ⁻⁷	10 ⁷ ~ 10 ⁹	—
激光	10 ⁻⁸		

由表 1-2 可以看出，每种焊接热源都有其自身的特点，在生产上有不同的应用。目前在生产上应用的焊接热源主要是电弧，其次是电阻热、等离子弧和电子束。激光虽然是理想的焊接热源，但使焊接成本高，所以目前应用相对较少。除电渣热源外，其他焊接热源的共同特点是加热速度快，能在很短的时间内完成焊接过程。

二、焊接热效率

(一) 焊接传热的基本形式

熔焊的加热是局部加热，焊件金属上离焊接热源最近的部位温度最高，离焊接热源越远的部位温度越低，所以在焊件金属中存在较大的温度差。温度差会使焊件内部及焊件与周围介质间发生热传递和热交换。由传热学可知，热传递有传导、对流、辐射三种基本形式。

熔焊过程中，三种传热方式同时存在，在不同的阶段有不同的主要传热方式。研究结果表明：在熔焊条件下，当焊接热源传热给焊件时，热传递以辐射和对流为主；当焊件和焊条（或焊丝）获得热量后，热传递则以传导为主。

(二) 焊接热效率

熔焊时，焊接热源提供的热量其实并不能全部用于加热焊件和填充金属，有一部分热量会以对流、辐射等形式损失于周围介质中或以飞溅等形式损失掉。也就是说，真正用于熔焊的热量只占焊接热源提供的热量的一部分。如果由焊接热源提供的热量为 Q_0 ，真正用于熔焊的热量为 Q ，那么焊接热效率 η 可以定义为

$$\eta = Q/Q_0 \quad (1-1)$$

焊接热效率主要决定于焊接方法。但对于同一种焊接方法，当电流种类和大小、焊接速度等参数改变时，焊接热效率也会发生改变。如果不需精确考虑，可以认为焊接热效率只与焊接方法有关。各种焊接方法的焊接热效率见表 1-3 所示。

表 1-3 各种焊接方法的焊接热效率

焊接方法	碳弧焊	焊条电弧焊	埋弧焊	钨极氩弧焊		熔化极氩弧焊		电渣焊	电子束焊	激光焊
				交流	直流	铝	钢			
焊接热效率	0.5 ~ 0.65	0.77 ~ 0.89	0.77 ~ 0.99	0.68 ~ 0.85	0.78 ~ 0.85	0.7 ~ 0.85	0.66 ~ 0.69	0.8	0.9	0.9

由表 1-3 可以看出，电子束焊和激光焊的热效率较高，这是由其本身的热源特性决定的。埋弧焊的热效率最高可以达到 0.99，是因为电弧是在焊剂层下燃烧。

第二节 焊接热循环

一、焊接热循环的概念

当焊接热源沿焊接方向移动时，焊件上各点的温度随时间的变化而发生改变。每个点（见图 1-1 所示的 1、2、3、4 点）的变化规律都是被加热后，温度从室温开始上升，达到最高温度后，再冷却到室温。焊件上各点的温度变化过程相当于各点经历了一次热循环。因此，焊接热循环的定义是：在焊接热源的作用下，焊件上某点的温度随时间变化的过程。各点温度和时间变化关系可用焊接热循环曲线直观地表示出来，见图 1-1 所示。

通过分析图 1-1 的焊接热循环曲线可以看出, 焊件上距离焊接热源不同的点, 经历的焊接热循环不一样。距离焊缝越近(也就是离热源越近)的点, 达到的最高加热温度越高。该温度可能超过焊件的熔点温度, 而使焊件熔化; 可能低于焊件的熔点温度而高于焊件的固态相变温度, 而使焊件发生固态组织转变; 也可能低于焊件的固态相变温度, 而使焊件不发生组织改变。焊件上距离焊缝不同的点, 在热循环中加热和冷却的速度也不同, 距离焊缝越近的点, 加热和冷却的速度越快。

不同的焊接热循环得到的组织不同, 致使整个焊接接头性能不均匀。因此, 研究焊接热循环可以了解焊接接头的组织、力学性能、应力和应变等情况, 对提高焊接质量十分重要。

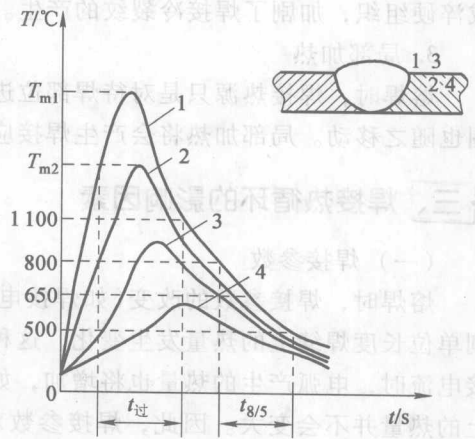


图 1-1 焊接热循环曲线及其特征

二、焊接热循环主要参数和主要特点

(一) 焊接热循环的主要参数

1. 最高加热温度(T_m)

最高加热温度是指焊件上某点在加热时达到的最高温度。当最高加热温度较高时, 晶粒会严重长大, 降低接头的韧性。

2. 在相变温度以上停留的时间($t_{\text{过}}$)

见图 1-1 所示, 在相变温度以上停留的时间越长, 越有利于奥氏体在晶粒内均匀分布。但温度太高(如 1 100 °C 以上)时, 即使停留时间不长, 也会产生晶粒严重长大的现象。

3. 冷却速度 $t_{8/5}$

冷却速度是决定焊接接头组织的重要参数。一般认为, 起关键作用的是从 800 °C 冷却到 500 °C 的冷却速度。因此, 常用从 800 °C 冷却到 500 °C 的时间 $t_{8/5}$ 表示冷却速度; 有时也用冷却到 650 °C 时的冷却速度来表示。过快的冷却速度会增加接头淬硬的倾向。

除上述三个主要参数外, 焊接热循环的参数还有加热速度等。

(二) 焊接热循环的主要特点

由焊接热循环的概念可知, 焊接热循环描述的是熔焊过程中焊接热源对焊件的热作用效果。距离焊缝不同的点有不同的热作用效果, 使整个焊接接头产生不同的组织和不同的性能, 同时也会产生复杂的应力和应变, 给焊接结构的安全和稳定带来了许多复杂的问题。其主要特点如下。

1. 加热速度快且温度高

熔焊过程是一个不均匀加热和冷却的过程, 对于焊缝及临近的母材金属可以看成是经历了一次特殊的热处理。紧邻熔池区域的最高温度比一般热处理的温度都高, 所以容易发生过热, 使该区域在结晶时发生晶粒严重粗化的情况。

2. 急速冷却

焊接热源一旦离开熔池，熔池就会急速冷却，使焊接接头相当于经历了一次淬火处理而形成淬硬组织，加剧了焊接冷裂纹的产生。

3. 局部加热

熔焊时，焊接热源只是对待焊部位进行了局部的集中加热，并且随热源的移动，加热的范围也随之移动。局部加热将会产生焊接应力和应变。

三、焊接热循环的影响因素

(一) 焊接参数

熔焊时，焊接参数的改变(如焊接电流、焊接速度、电弧电压等)实质上是使焊接热源输入到单位长度焊缝上的热量发生变化，这种变化并不是由一个参数单独决定的。例如，当增加焊接电流时，电弧产生的热量也将增加，如果同时提高焊接速度，那么真正作用到单位长度焊缝上的热量并不会变大。因此，焊接参数对焊接热循环的影响要用一个综合焊接电流、焊接速度、电弧电压的参数来表示，即热输入 q 。

热输入 q 是指熔焊时由焊接热源输入到单位长度焊缝上的热量，又称为线能量。其计算公式为

$$q = IU/v$$

式中： I ——焊接电流，A；

U ——电弧电压，V；

v ——焊接速度，cm/s；

q ——热输入，J/cm。

热输入对焊接热循环的影响很大。由表 1-4 可知，热输入增加，焊件在高温停留时间就变长，焊后冷却速度就变慢；热输入减小，高温停留时间就变短，焊后冷却速度就变快。

表 1-4 热输入和预热温度对焊接热循环的影响

热输入/(J/cm)	预热温度/℃	在相变温度以上停留的时间/s	650℃时的冷却速度/(℃/s)
20 000	27	5	14
20 000	260	5	4.4
38 400	27	16.5	4.4
38 400	260	17	1.4

生产中，为保证获得优良的焊接接头，应根据不同的母材成分和焊件尺寸(主要是焊件厚度)，在保证焊缝成形良好的前提下，选择合适的热输入进行焊接。例如，为装配和固定焊接接头进行定位焊，由于焊缝短、截面积小、冷却速度快，焊缝容易开裂，特别是一些淬硬倾向较大的钢种更容易开裂，此时应选择较大的热输入进行焊接，以防止焊件开裂。对于强度等级较高的低合金钢、低温钢，焊接时如果选择较大的热输入，则会导致焊接接头的塑性和韧性下降，特别是奥氏体不锈钢焊接时，还要考虑焊接接头的耐蚀性，一定要采用小电流、快速焊，使热输入保持在最小值。

（二）预热温度和层间温度

由表 1-4 可以看出，热输入相同时，增加焊前预热温度并不会使在相变温度以上的停留时间增加，却可使焊后冷却速度降低。也就是说，焊前预热不会加剧晶粒粗化，却可避免焊后急速冷却带来的淬硬现象。所以，焊前预热是防止裂纹产生的比较有效的工艺措施。

层间温度指多层多道焊时，在施焊后续焊道之前，与后续焊道相邻的焊道应保持的温度。控制层间温度的作用与控制预热温度的作用一样。进行多层焊时，要求层间温度应等于或略高于预热温度，如果层间温度低于预热温度就应重新进行预热。

（三）焊接方法

熔焊时，由于不同的焊接方法有不同的焊接热源特性，因此，焊件经历的焊接热循环也不相同。例如，气焊加热速度和冷却速度慢，焊件在高温停留时间长；钨极氩弧焊的加热速度和冷却速度快，焊件在高温停留时间短。另外，不同的焊接方法有不同的焊接参数，热输入的大小也不一样，见表 1-5。

表 1-5 不同焊接方法的热输入

焊接方法	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/s)	热输入/(J/cm)
焊条电弧焊	180	24	0.25	17 280
埋弧自动焊	700	38	0.66	40 300
手工钨极氩弧焊	160	11	0.25	7 040

（四）其他因素

例如，导热系数大的焊件，熔焊时接头的冷却速度快，高温停留时间短；T 形接头的冷却速度比对接接头的冷却速度要快得多。

第三节 焊接接头的组织和性能

一、焊接接头的构成

焊接接头是指把两个或两个以上的零件用焊接方法连接而得到的接头。焊接接头在焊接结构中起到两个方面的作用：一是连接，即把原来分离的零件连接成一个整体；二是传递载荷，即传递结构所承受的载荷。如图 1-2 所示，焊接接头由焊缝、熔合区、热影响区构成。

1. 焊缝

焊缝是指焊件经过焊接后所形成的结合部位。熔焊时，焊缝是由局部熔化的母材金属（当有填充金属时，还有熔化的填充金属）冷却凝固后形成的。

2. 熔合区

熔合区是指焊缝与焊接热影响区交界的过渡区。



图 1-2 焊接接头示意图

熔合区的温度处于液相线和固相线之间, 该区金属在高温下处于固液两相交错共存的状态, 因此又称为半熔化区。

3. 焊接热影响区(HAZ)

焊接热影响区是指焊接过程中, 焊缝两侧的母材因受热的影响(但未熔化)而发生金相组织和力学性能变化的区域。

二、焊接接头的组织和性能

焊接接头是整个焊接结构的关键部位, 其组织和性能直接影响整个焊接结构的制造质量和使用安全性。

(一) 焊缝的组织 and 性能

焊缝是由熔池金属凝固形成的。与其他液态金属凝固一样, 熔池金属凝固也要经历两个过程: 首先是从液体凝固成晶体的过程, 称为熔池一次结晶; 而后随温度的下降, 凝固的晶体在固态下从高温冷却到室温的过程, 称为焊缝二次结晶。

1. 熔池一次结晶

(1) 特点

1) 熔池体积小, 冷却速度快 电弧焊时, 熔池体积最大只有 30 cm^3 左右, 质量一般为 $0.6 \sim 16 \text{ g}$, 多在 5 g 以下。这样, 体积小同时又被冷金属包围的熔池, 其冷却速度必然很大, 平均可达 $4 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C/s}$, 是钢锭冷却速度的 $10\,000$ 倍左右。如此大的冷却速度, 会使含碳量高、含合金元素较多的钢种在焊接接头中容易出现淬硬组织, 甚至在焊道上产生裂纹。

2) 熔池金属处于过热状态 电弧焊时, 对低碳钢和低合金钢来讲, 熔池的平均温度大约为 $(1\,770 \pm 100)^\circ\text{C}$, 已高于金属的熔点温度, 因此, 熔池液态金属处于过热状态。在过热状态下, 熔池金属中的合金元素烧损比较严重, 并且使熔池结晶时非自发晶核的质点大大减少, 使得焊缝中柱状晶得到很大发展。

3) 熔池在运动状态下结晶 熔焊时, 熔池随焊接热源作等速移动。在熔池中, 金属熔化过程和凝固过程同时进行。如图 1-3 所示, 新熔化的母材金属、焊芯金属以及药皮不断地进入熔池头部(abc 段), 凝固的金属和熔渣不断地从熔池尾部(adc 段)形成固态焊缝和熔渣。在焊接规范恒定的情况下, 这种更替过程可以达到稳定状态, 从而得到成分均匀的焊缝。因此, 熔池金属是在运动状态下结晶的。同时, 在熔焊过程中, 电弧吹力、焊条的摆动以及熔池内部气体的外逸等都会产生搅拌作用, 有利于排除熔池中的气体和夹杂。

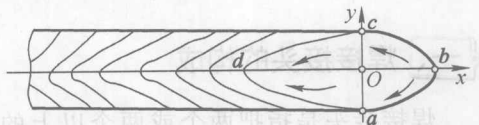


图 1-3 熔池运动状态下的结晶

总之, 熔池一次结晶与钢锭结晶一样, 都是晶核生成和晶核长大的过程。但在熔焊条件下, 熔池结晶与钢锭结晶的特点却是不一样的, 如图 1-4 所示, 熔池一次结晶是从熔合线未完全熔化的晶粒开始, 沿垂直熔合线的方向向熔池中心长大。

(2) 组织特征

熔池一次结晶通常是从熔合线上还未熔化的晶粒开始的, 最后形成柱状晶, 一般情况下没

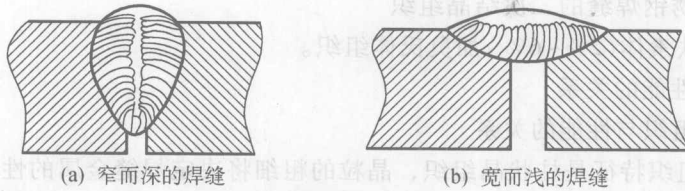


图 1-4 熔池一次结晶示意图

有等轴晶，只在焊缝断面的中心区域有少量的等轴晶。因此，柱状晶是熔池一次结晶的组织特征。

(3) 改善措施

熔池一次结晶由于冷却速度快，结晶组织是粗大的柱状晶，会降低焊缝金属的力学性能。为提高焊缝金属的力学性能，常采用变质处理的办法来细化晶粒，即把粗大的柱状晶变为细小的柱状晶。

变质处理是通过焊接材料(如焊条、焊丝、焊剂)向熔池中加入某些可细化晶粒的合金元素，如 V、Mo、Ti、Nb、Al、B 和 RE 等，以细化晶粒，得到细晶组织，从而既可提高焊缝金属的强度和塑性，又可保证焊缝金属的抗裂性。例如，E5015MoV 焊条就是在 E5015 焊条的基础上，通过向药皮中加入少量的钼铁和钒铁，使所得焊缝具有更高的抗裂性。

2. 焊缝二次结晶

熔池一次结晶完成后，完全凝固为固态。对钢铁材料来讲，此时的显微组织一般是奥氏体，在冷却到室温的过程中，奥氏体又会发生组织转变。至于奥氏体发生何种转变，得到什么组织，是要根据焊缝金属的化学成分和冷却条件而定的。这里仅对不同钢铁材料的焊缝二次结晶组织作简要分析。

(1) 低碳钢焊缝的二次结晶组织

低碳钢焊缝中的含碳量较低，二次结晶后的结晶组织一般为粗大的柱状铁素体加上少量的珠光体。若在高温停留时间过长，还会出现魏氏体组织。多层多道焊时，由于后道焊对前道焊有热处理作用，部分柱状晶消失后形成细小的等轴晶，此时的结晶组织为细小的铁素体加少量的珠光体。

相同化学成分的焊缝金属，不同的冷却速度会使焊缝二次结晶组织明显不同。冷却速度越大，焊缝中的珠光体越多，晶粒越细小。珠光体含量的增加，虽使冷却时不出现淬火组织，但会增加焊缝的硬度。

(2) 低合金高强钢焊缝的二次结晶组织

1) 合金元素含量较少的低合金高强钢，其焊缝金属二次结晶组织与低碳钢的焊缝金属组织接近。在一般冷却条件下，为铁素体加少量珠光体；冷却速度加快时，会出现少量的粒状贝氏体，如 16Mn 钢单面焊双面成形焊缝。

2) 合金元素含量较多的低合金高强钢，其焊缝二次结晶组织为低碳马氏体或贝氏体；高温回火后为回火索氏体。

(3) 铬钼耐热钢焊缝的二次结晶组织

当珠光体耐热钢中的合金元素含量较少，且处于焊前预热、焊后缓冷的条件下，焊缝组织为珠光体和一部分淬硬组织；高温回火后为珠光体组织。