



教育部高职高专规划教材

焊接技术

◎ 叶 琦 主编



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

焊 接 技 术

叶 琦 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

焊接技术/叶琦主编. —北京:化学工业出版社,
2005.2

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-6458-6

I. 焊… II. 叶… III. 焊接-高等学校:技术学院-
教材 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 005136 号

教育部高职高专规划教材

焊 接 技 术

叶 琦 主 编

责任编辑:高 钰

文字编辑:韩庆利

责任校对:蒋 宇 边 涛

封面设计:潘 峰

*

化学工业出版社

教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

· *

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市海波装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 452 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6458-6/G · 1666

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

随着科学技术的发展,焊接技术从 20 世纪中期以来取得了突飞猛进的发展。其应用已经遍及工业、农业、军事以及人民生活等各个领域。在国民经济中发挥着越来越重要的作用,成为了一种传统的基础工艺与技术。近年来,随着新材料、新技术以及信息技术等在焊接领域的应用,使焊接由金属材料的焊接向非金属材料扩展,由自动控制向人工智能控制发展,由传统的焊接向各种极限环境下的焊接发展。今天,焊接技术已成为最具发展潜力和广阔应用前景的技术。

本书以高等职业教育的培养目标为基础,以非焊接专业学生对焊接专业的知识需要为对象,较系统介绍了焊接冶金基础、焊接应力与变形、焊接材料、焊接工艺、常用焊接方法、常用金属材料的焊接、焊接缺陷的产生及防止、典型焊接钢结构、焊接检验等。全书内容编写突出够用和简单实用的原则,适用于高等职业学校机械类非焊接专业的焊接技术课程的教学和工程技术人员、工人自学焊接的参考书。

本书的绪论、第一章、第二章、第四章、第七章和第八章由叶琦编写,第三章、第五章由邱葭菲编写,第六章和第九章由徐慧波编写,由叶琦任主编,邱葭菲任副主编。

本书在编写过程中得到了安徽理工大学职业技术学院的关心和支持,在此表示感谢。同时,对本书编写中所参阅的书籍和资料的作者(编者)们表示感谢。

由于编写时间仓促,加之编者水平所限,书中难免有不足和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 10 月

目 录

绪论	1
一、焊接技术在工程建设中的作用与地位	1
二、焊接的本质及分类	1
三、焊接技术的发展	2
四、学习建议	3
复习思考题	3
第一章 焊接冶金基础	4
第一节 焊接热过程	4
一、常用焊接热源及传热基本方式	4
二、焊接温度场	6
三、焊接热循环	9
第二节 焊接的化学冶金过程	14
一、焊缝金属的组成	14
二、焊接化学冶金特点	18
三、焊接熔渣	20
第三节 有害元素对焊缝金属的作用	22
一、氢对焊缝金属的作用	22
二、氮对焊缝金属的作用	25
三、氧对焊缝金属的作用	25
四、焊缝中硫、磷的危害及脱除	30
第四节 焊缝金属的合金化	31
一、焊缝金属合金化的目的	31
二、合金化的方式	31
三、合金元素过渡系数及影响因素	32
第五节 焊接接头的组织与性能	32
一、熔池的凝固与焊缝金属的固态相变	33
二、熔合区的组织和性能	35
三、焊接热影响区的组织和性能	35
四、焊接接头组织和性能的调整与改善	39
复习思考题	41
第二章 焊接应力与变形	42
第一节 焊接应力和变形的基本概念	42
一、焊接应力和变形	42
二、焊接应力和变形的形成	42

第二节 焊接残余变形	46
一、焊接残余变形分类、产生原因及危害	46
二、影响焊接残余变形的因素	51
三、控制焊接残余变形的措施	54
四、焊后残余变形的矫正方法	60
第三节 焊接残余应力	63
一、应力的分类	63
二、焊接残余应力的分布及其对结构的影响	64
三、减小焊接残余应力的措施	70
四、消除焊接残余应力的措施	74
复习思考题	76
第三章 焊接材料	78
第一节 焊条	78
一、焊条的组成及作用	78
二、焊条的分类及型号	79
三、焊条的选用及管理	83
第二节 焊丝	84
一、实芯焊丝	84
二、药芯焊丝	85
第三节 焊剂	87
一、焊剂的分类	87
二、焊剂的型号和牌号	87
三、焊剂与焊丝的选配	88
第四节 焊接用气体	89
一、焊接用气体的性质	89
二、焊接用气体的应用	90
第五节 其他焊接材料	91
一、钨极	91
二、钎料和钎剂	92
三、气焊熔剂	93
复习思考题	94
第四章 焊接工艺	95
第一节 焊接接头的组成、形式及设计、选用原则和焊缝形式	95
一、焊接接头的组成、形式及设计和选用原则	95
二、焊缝形式	103
第二节 焊缝的符号及标注	103
一、常用焊接方法代号	104
二、焊缝符号	104
三、焊接接头在图纸上的表示方法	106
第三节 焊接工艺要素和规范的选择	109

一、焊前准备·····	110
二、焊接工艺规范参数·····	111
第四节 焊接工艺评定基本要求·····	115
一、意义和目的·····	115
二、钢结构焊接工艺评定的规则·····	115
三、焊接工艺评定试验·····	117
四、焊接工艺评定报告·····	118
复习思考题·····	120
第五章 常用焊接方法 ·····	122
第一节 焊条电弧焊·····	122
一、焊条电弧焊原理及特点·····	122
二、焊条电弧焊电源·····	123
三、焊接工艺参数的选择·····	128
四、常用焊接工艺措施·····	130
五、焊条电弧堆焊·····	131
第二节 气体保护电弧焊·····	132
一、气体保护电弧焊原理及分类·····	132
二、二氧化碳气体保护电弧焊·····	133
三、氩弧焊·····	138
四、富氩混合气体保护电弧焊与药芯焊丝气体保护电弧焊·····	143
第三节 气焊与气割·····	144
一、气体火焰·····	144
二、气焊·····	145
三、气割·····	148
第四节 其他焊接与切割方法·····	151
一、埋弧自动焊·····	151
二、钎焊·····	153
三、电渣焊·····	154
四、碳弧气刨·····	155
五、等离子弧切割与焊接·····	157
复习思考题·····	159
第六章 常用金属材料的焊接 ·····	160
第一节 金属的焊接性和焊接性试验·····	160
一、金属焊接性的概念·····	160
二、金属焊接性试验·····	161
三、常用焊接性试验方法·····	161
第二节 碳素钢的焊接·····	166
一、低碳钢的焊接·····	167
二、中碳钢的焊接·····	168
第三节 合金结构钢的焊接·····	169

一、合金结构钢概述·····	169
二、合金结构钢的焊接·····	170
第四节 不锈钢、耐热钢的焊接·····	178
一、不锈钢、耐热钢的类型及性能特点·····	178
二、不锈钢的焊接·····	180
第五节 异种钢的接焊·····	184
一、珠光体钢与奥氏体钢的焊接·····	184
二、不锈钢复合钢板的焊接·····	185
第六节 铝及铝合金的焊接·····	187
一、铝及铝合金的焊接特点·····	188
二、铝及铝合金的焊接工艺·····	189
第七节 铜及铜合金的焊接·····	192
一、铜及铜合金的焊接性·····	193
二、铜及铜合金的焊接工艺·····	193
复习思考题·····	195
第七章 焊接缺陷的产生及防止 ·····	197
第一节 焊接缺陷的种类及特征·····	197
一、焊接缺陷的类型·····	197
二、常见焊接缺陷的特征及危害·····	198
第二节 焊缝中的气孔与夹杂物·····	200
一、焊缝中的气孔·····	200
二、焊缝中的夹杂物·····	207
第三节 焊接结晶裂纹·····	209
一、结晶裂纹的特征·····	209
二、结晶裂纹产生的原因·····	209
三、影响结晶裂纹产生的因素·····	210
四、防止结晶裂纹的措施·····	214
第四节 焊接冷裂纹·····	216
一、焊接冷裂纹的类型·····	216
二、焊接冷裂纹产生的原因·····	217
三、防止焊接冷裂纹的措施·····	220
第五节 其他焊接缺陷·····	222
一、咬边·····	222
二、焊瘤·····	223
三、凹坑与弧坑·····	223
四、未焊透与未熔合·····	223
五、塌陷与烧穿·····	224
六、夹渣·····	225
七、焊缝尺寸与形状不符合要求·····	226
第六节 焊缝缺陷的返修·····	226

复习思考题·····	228
第八章 典型焊接钢结构 ·····	229
第一节 钢结构的特点及类型·····	229
一、钢结构的特点·····	229
二、钢结构的类型·····	230
第二节 焊接结构设计基础·····	233
一、焊接结构采用时应注意的问题·····	233
二、焊接结构总体设计要求·····	234
三、焊接结构设计中应考虑的工艺性问题·····	235
四、合理的接头设计·····	235
第三节 压力容器的结构及生产工艺·····	237
一、压力容器的分类·····	237
二、压力容器常用焊接接头·····	238
三、圆筒形压力容器的生产工艺·····	259
四、球形压力容器的生产工艺·····	264
第四节 桁架起重机生产工艺·····	268
一、桁架起重机的种类·····	268
二、桁架起重机的焊接生产·····	268
复习思考题·····	269
第九章 焊接检验 ·····	271
第一节 非破坏性检验·····	272
一、外观检验·····	272
二、致密性检验·····	273
第二节 无损探伤检验·····	274
一、荧光检验·····	274
二、着色检验·····	275
三、磁粉检验·····	275
四、超声波检验·····	276
五、射线检验·····	276
第三节 破坏性检验·····	279
一、力学性能试验·····	279
二、化学分析及腐蚀·····	281
三、金相检验·····	281
复习思考题·····	282
主要参考文献 ·····	283

绪 论

一、焊接技术在工程建设中的作用与地位

焊接技术是 20 世纪初兴起的科学技术。随着科学技术不断进步,焊接技术近几十年来得到了迅速发展和传播。现已广泛应用于航空航天、原子能、石油化工、造船、海洋工程、电子技术、交通、电力和机械制造等工业部门。

就工程建设而言,焊接技术已经成为最重要的工艺之一。如石油化工建设中各种罐、槽、釜、塔以及大量管道的焊接。据统计在石油化工企业建设设备安装施工中有 60% 以上的工作量是焊接。由于焊接结构具有强度高、质量轻、跨度大等优点,焊接技术在建筑业也有大量的应用。如高 325m 的深圳地王大厦、201m 的大连远洋大厦都是钢制焊接结构,还有像体育场馆一类的大跨度建筑也都采用金属焊接结构的网架屋盖。在三峡工程,秦山、大亚湾核电站建设,西气东输工程等一批国家重点建设工程中焊接技术均发挥着至关重要的作用。焊接技术已经成为制造业的基础工艺。在西方发达国家年产钢的 50%~60% 需要经过焊接加工。我国 2001 年的钢产量为 1.3 亿吨,据初步统计,其中约有 4000 万吨需要焊接加工。可见无论是在国外发达国家还是国内,焊接技术及其产业都有着广阔的发展空间。

就目前来说,焊接技术也有一些不可忽视的缺点,如会产生焊接变形,存在焊接残余应力,容易产生裂纹等,其检查技术也比较复杂。由焊接缺陷引起的结构失效和破坏还时有发生。如我国重庆的綦虹桥和韩国的汉江大桥的突然断裂。因此,焊接技术是一项要求极为严格的制造技术,有自身的科学规律和方法,同时有许多标准,所有的焊接工程师和焊工上岗焊接,都需经过严格的考试和发证,而且现在正在逐步制定世界标准。

二、焊接的本质及分类

两个或两个以上零件的连接,有螺钉连接、铆接、胶接以及焊接等。在所有连接方法中,焊接是应用最广的、最重要的金属材料的永久连接方法。焊接是指通过加热或加压,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。焊接不仅可以使金属材料永久地连接起来,也可以使某些非金属材料达到永久连接的目的,如玻璃焊接、塑料焊接和陶瓷焊接等,但在工业生产中应用最广泛的是金属焊接。

焊接与其他的连接方法不同,通过焊接连接材料不仅在宏观上建立了永久性联系,而且在微观上建立了组织之间的内在联系。因此,就必须使分离金属的原子间产生足够大的结合力,才能建立组织之间的内在联系,形成牢固接头。这对液体来说是很容易的,而对固体来说则比较困难,需要外部给予很大的能量,以使金属接触表面达到原子间的距离。为此,金属焊接时必须采用加热、加压或两者并用的方法。

按照焊接过程中金属所处的状态不同,可以把焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊三类。

熔焊是在焊接过程中将焊件接头加热至熔化状态不加压完成焊接的方法。在加热的条件下,增强金属的原子动能,促进原子间的相互扩散,当被焊金属加热至熔化状态形成液态熔

池时，原子之间可以充分扩散和紧密接触，因此冷却凝固后，即可形成牢固的焊接接头。常见的气焊、电弧焊、埋弧焊、电渣焊、气体保护焊等都属于熔焊的方法。

压焊是在焊接过程中，必须对焊件施加压力（加热或不加热），以完成焊接的方法。这类焊接有两种形式：一是将被焊金属接触部分加热至塑性状态或局部熔化状态，然后施加一定的压力，以使金属原子间相互结合形成牢固的焊接接头，如锻焊、接触焊、摩擦焊和气压焊就是这种类型的压焊方法；二是不进行加热，仅在被焊金属的接触面上施加足够的压力，借助于压力所引起的塑性变形，以使原子间相互接近而获得牢固的挤压接头，这种压焊的方法有冷压焊、爆炸焊等。

钎焊是采用比母材熔点低的第三种金属材料——钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点，低于母材熔点的温度，利用液态钎料表面张力润湿母材，这个润湿的金属和要被结合的面产生化学反应，实现去除氧化膜、氧化皮等，同时利用毛细管的填缝作用，也就是利用表面张力的吸附作用，填充接头间隙并与母材相互扩散，形成一个接头，就是钎焊的接头。常见的钎焊方法有烙铁钎焊、火焰钎焊等。

金属焊接方法的分类如图 0-1 所示。

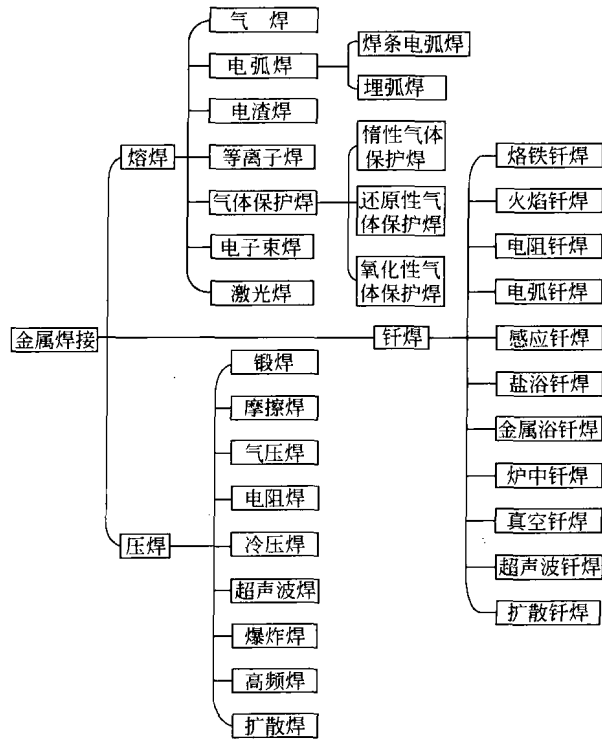


图 0-1 金属焊接方法的分类

三、焊接技术的发展

近代焊接技术，是从 1882 年出现碳弧焊开始，直到 20 世纪 30 年代，在生产上还只是采用气焊和手工电弧焊等简单的焊接方法。由于焊接具有节省金属，生产率高，产品质量好和能大大改善劳动条件等优点，所以在 20 世纪中期得到了迅速的发展。20 世纪 40 年代初期出现了优质电焊条，使长期以来人们所怀疑的焊接技术得到了一次飞跃。20 世纪 40 年代

后期, 由于埋弧焊和电阻焊的应用, 使焊接过程的机械化和自动化成为现实。20 世纪 50 年代的电渣焊、各种气体保护焊、超声波焊, 20 世纪 60 年代的等离子焊、电子束焊、激光焊等先进焊接方法的不断涌现, 使焊接技术达到了一个新的水平。近年来对能量束焊、太阳能焊、冷压焊等新的焊接方法也开始研究, 尤其是在焊接工艺自动控制方面有了很大发展, 采用电子计算机控制可以获得较好的焊接质量和较高的生产率。采用工业电视监视焊接过程, 便于遥控, 有助于实现焊接自动化。在焊接生产中采用了工业机器人, 使焊接工艺自动化达到了一个更新的阶段, 使人不能达到的那些地方能够用机器人进行焊接, 既安全又可靠, 特别是在原子能工业中更有其发展前景。

现代焊接技术自诞生以来一直受到诸学科最新发展的直接影响与引导。众所周知, 受材料、信息学科新技术的影响, 不仅导致了数十种焊接新工艺的问世, 而且也使得焊接工艺操作正经历着手工到自动化、智能化的过渡, 这已成为公认的发展趋势。

当今, 焊接作为一种传统技术又面临着 21 世纪的挑战。一方面, 材料作为 21 世纪的支柱已显示出几个方面的变化趋势, 即从黑色金属向有色金属变化; 从金属材料向非金属材料变化, 从结构材料向功能材料变化, 从多维材料向低维材料变化; 从单一材料向复合材料变化, 新材料连接必然要对焊接技术提出更高的要求。另一方面, 先进制造技术的蓬勃发展, 对焊接技术的发展提出了越来越高的要求。突出“高”、“新”以此来迎接 21 世纪新技术的挑战。

四、学习建议

本书较系统地介绍了焊接技术中的熔焊基本原理、焊接材料、焊接方法、焊接检验、焊接结构基础、常用金属材料的焊接以及有关的焊接工艺知识。内容量大, 涉及面广。同时, 焊接技术又具有很强的实践性。学习时要注意综合应用已经学过的有关知识外, 调整和总结自己的学习方法, 注意理论与实践的联系, 在理解和掌握基本原理的基础上, 培养分析和解决问题的能力; 要善于总结焊接技术的基本规律, 提高对焊接技术的认识, 尽可能多地参加与焊接有关的各类实践活动。有条件的情况下应参加焊接专业的职业技能培训, 取得相关的证书。

复习思考题

1. 什么是焊接?
2. 金属的焊接是如何分类的?
3. 谈谈你对焊接技术应用的认识。

第一章 焊接冶金基础

金属熔焊的一般过程为：加热—熔化—冶金反应—结晶—固态相变—形成接头。可见熔焊时所经历的过程是很复杂的。

熔焊时，在熔化金属、熔渣、气相之间进行一系列化学冶金反应，如金属的氧化、还原、脱硫等，这些冶金反应将直接影响焊缝金属的化学成分、组织和性能，因此控制冶金过程是提高焊接质量的重要措施之一。而且，由于焊接时是快速连续冷却，就使焊缝金属的结晶和相变具有各自的特点，并且在这些过程中有可能产生偏析、夹杂、气孔及裂缝等缺陷。因此，控制和调整焊缝金属的结晶和相变过程是保证焊接质量的又一关键。

第一节 焊接热过程

加热是金属熔焊的必要条件。通过对焊件进行局部加热，使焊接区的金属熔化，冷却后形成牢固的接头。此焊接热过程必将引起焊接区金属的成分、组织与性能发生变化，其结果将直接决定焊接质量。决定上述变化的主要因素是焊接区的热量传递和温度变化情况。因此，为了保证焊接质量，必须了解焊接区热过程的基本规律。

焊接热过程具有两个特点。其一是对焊件的加热是局部的，焊接热源集中作用在焊件接口部位，整个焊件的加热是不均匀的。其二是焊接热过程是瞬时的，焊接热源始终以一定速度运动，因此，焊件上某一点当热源靠近时，温度升高；当热源远离时，温度下降。

一、常用焊接热源及传热基本方式

(一) 常用焊接热源

熔焊时，要对焊件进行局部加热。由于金属具有良好的导热性，加热时热量必然会向金属内部流动。为保证焊接区金属能够迅速达到熔化状态，并防止加热区过宽，要求焊接热源具备温度高且热量集中的特点，即热源温度应明显高于被焊金属的熔点且加热范围小。生产中常用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强烈而持续放电过程产生的热能为焊接热源。电弧热是目前应用最广的焊接热源，如焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊等。

(2) 化学热 利用可燃气体（如乙炔、液化石油气等）的火焰放出的热量或热剂（如铝粉、氧化铁粉）之间在一定温度下进行化学反应产生的热量作为焊接热源，如气焊、热剂焊等。

(3) 电阻热 利用电流通过导体产生的电阻热作为热源，如电阻焊、电渣焊等。

(4) 摩擦热 利用机械摩擦产生的热量作为热源，如摩擦焊。

(5) 电子束 利用高压高速的电子束轰击金属表面产生的热量作为热源，如电子束焊。

(6) 等离子束 利用高电离、高能量密度的高温等离子束作为焊接热源，如等离子

弧焊。

(7) 激光束 利用经过聚焦的高能量的激光束作为焊接热源，如激光束焊。

(8) 高频感应 对有磁性的金属，利用高频感应产生的二次感应电流作为热源，如高频感应焊。

(二) 焊接过程的热效率

焊接时，热源所产生的热量并不能全部得到利用，其中有一部分损失于周围介质和飞溅中。焊件和母材所吸收的热量称为热源的有效功率。现以电弧焊为例，电弧吸收的功率为 P_0 ，则

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

式中 P_0 ——电弧功率，即电弧在单位时间内所析出的能量；

U ——电弧电压；

I ——焊接电流。

有效功率为 P ，则

$$P = \eta' UI \quad (1-2)$$

式中 P ——有效功率；

η' ——焊接加热过程中的热效率，或称功率有效系数。

显然，电弧的有效功率 P 是电弧输出功率 P_0 的一部分， η' 为两者的比值，即

$$P = \eta' P_0 \quad (1-3)$$

η' 值的大小与焊接方法、焊接工艺参数、焊接材料和母材等因素有关，一般根据实验测定，不同焊接方法的 η' 值见表 1-1。以焊条电弧焊和埋弧焊为例，从表 1-1 和表 1-2 可以看出，埋弧焊的热效率高于焊条电弧焊，这是由于埋弧焊过程中飞溅与散失到周围介质中的热量均小于焊条电弧焊所致，因而热量利用更加充分。

表 1-1 不同焊接方法的 η' 值

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	
				交流	直流	钢	铝
η'	0.5~0.65	0.74~0.87	0.77~0.90	0.5~0.65	0.78~0.85	0.66~0.69	0.70~0.85

表 1-2 焊条电弧焊和埋弧焊时热量分配情况和 η' 值

焊接方法	有效热功率			飞溅损失	损失于周围介质的热量 ^①
	基本金属吸收热量	随熔滴过渡热量	η'		
焊条电弧焊	50%	25%	75%	5%	20%
埋弧焊	54%	27%	81%	1%	18%

① 包括焊条药皮或焊剂熔化所消耗的热量。

应该说明的是， η' 值虽然代表了热源能量的利用率，但并不意味着其包含的热量全部得到了“有效”的应用，因为母材所吸收的热量并不全用于金属熔化，其中传导于母材内部的那一部分使得近缝区母材的温度升高，以致组织发生变化而形成热影响区。

焊接时，由焊接能源输入给单位长度焊缝上的热能称为热输入（焊接线能量），以符号 E 表示，计算公式为

$$E = \frac{P}{v} = \eta \frac{UI}{v} \quad (1-4)$$

式中 E ——焊接线能量, J/cm;

v ——焊接速度, cm/s。

若焊接速度单位为 cm/s, 有效热功率的单位为 J/s, 则线能量的单位为 J/cm。焊接线能量是焊接过程中的一个重要工艺参数。

(三) 焊接传热的基本方式

自然界中, 热量的传递主要有三种基本方式, 即热传导、对流和辐射。

热传导指物体内部或直接接触的物体间的传热。固体金属内部传热惟一方式是热传导。金属内部主要依靠自由电子的运动来传递热量即进行热传导。

热对流指物体内部各部分发生相对位移而产生的热量传递。热对流只发生于流体内部。

热辐射指物体表面直接向外界发射电磁波来传递热量。热辐射过程中能量的转化形式是: 热能→辐射能→热能。由于物体的辐射能力与其热力学温度四次方成正比, 因此, 温度越高, 辐射能力越强。

焊接过程中, 热源能量的传递也不外以上三种方式, 对于电弧焊来讲, 热量从热源传递到焊件主要是通过热辐射和热对流方式, 而在母材和焊丝内部, 则以热传导方式。

二、焊接温度场

(一) 焊接温度场的表示及特点

焊接时, 焊件上各点的温度不同, 并随时间而变化。焊接过程中某一瞬间焊接接头上各点的温度分布状态称为焊接温度场。焊接温度场可用列表法、公式法或图像法表示, 其中最常用最直观的方法是图像法, 即用等温线或等温面来表示。所谓等温线或等温面, 就是温度场中温度相等各点的连线或连面。因为在给定温度场中, 任何一点不可能同时有两个温度, 因此不同温度的等温线(面)绝对不会相交, 这是等温线(面)的重要性质。

绘制等温线(面)时, 通常以热源所处位置作为坐标原点 O , 以热源移动方向为 X 轴, 焊件宽度方向为 Y 轴, 焊件厚度方向为 Z 轴, 如图 1-1 (a) 所示。如工件上等温线(面)确定, 即温度场确定, 则可以知道工件上各点的温度分布。例如, 已知焊接过程中某瞬时 XOY 面等温线表示的温度场 [图 1-1 (b)], 则可知道该瞬时 XOY 面任一点的温度情况。同样也可画出 X 轴上和 Y 轴上各点的温度分布曲线, 如图 1-1 (c)、图 1-1 (d) 所示。

由图 1-1 可知, 沿热源移动方向温度场分布不对称。热源前面温度场等温线密集, 温度下降快; 热源后面等温线稀疏, 温度下降较慢, 如图 1-1 (b)、图 1-1 (c) 所示。这是因为热源前面是未经加热的冷金属, 温差大, 故等温线密集; 而热源后面的是刚焊完的焊缝, 尚处于高温, 温差小, 故等温线稀疏。热源运动对两侧温度分布的影响相同, 如图 1-1 (d) 所示。因此, 整个温度场对 Y 轴形成不对称, 而对 X 轴的分布仍保持对称。

(二) 影响温度场的因素

1. 热源的性质及焊接工艺参数

热源的性质不同, 温度场的分布也不同。热源的能源越集中, 则加热面积越小, 温度场中等温线(面)的分布越密集。同样的焊接热源, 焊接工艺参数不同, 温度场的分布也不同。在焊接工艺参数中, 热源功率和焊接速度的影响最大。当热源功率一定时, 焊接速度 v 增加, 等温线的范围变小, 即温度场的宽度和长度都变小, 但宽度减小的更大些, 所以温度

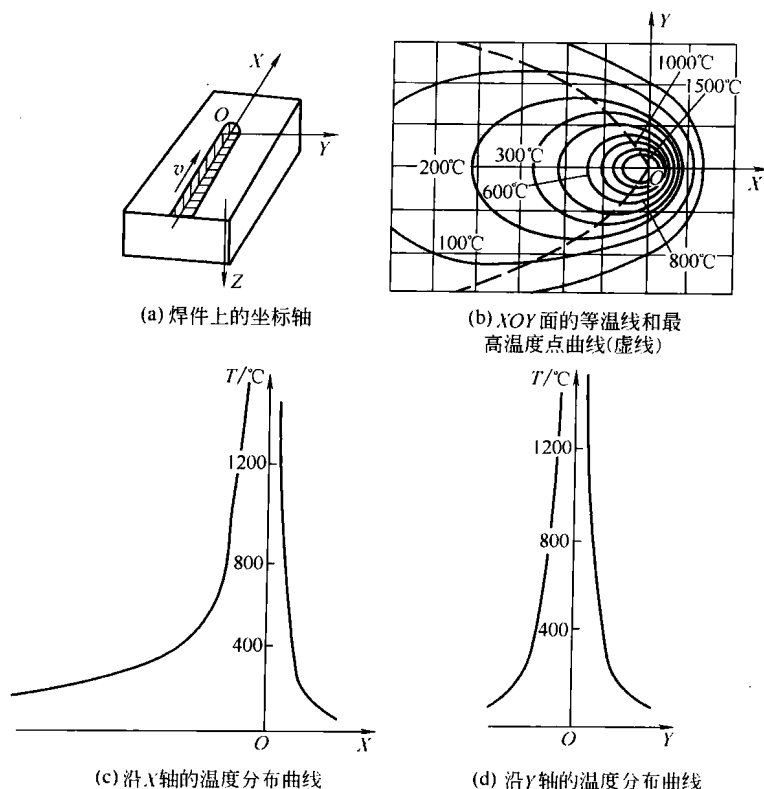


图 1-1 焊接温度场示例

场的形状变得细长。当焊接速度一定时，随热源功率的增加，温度场的范围随之增大。当 $\frac{P}{v}$ 一定时，等比例改变 P 和 v ，则等温线有所拉长，温度场的范围也随之拉长。焊接工艺参数对温度场分布的影响见图 1-2。

2. 被焊金属的热物理性质

被焊金属的热导率、比热容、传热系数等对焊接温度场的影响较大，见图 1-3。在线能量与工件尺寸一定时，热导率小的不锈钢 600°C 以上高温区（图 1-3 中的阴影部分）比低碳钢大，而热导率高的铝、纯铜的高温区要小得多。这是因为热导率大时，热量很快向金属内部流失，热作用的范围大，但高温区域却缩小了。因此，焊接不同的材料，应选用合适的焊接热源及工艺参数。

3. 焊件的几何尺寸及状态

焊件的几何尺寸影响导热面积和导热方向。焊件的尺寸不同，可形成点状热源、线状热源和面状热源三种，如图 1-4 所示。当工件尺寸厚大时，如图 1-4 (a) 所示，热量可沿 X 、 Y 、 Z 三个方向传递，属于三向导热，热源相对于工件尺寸可看作点状热源。当工件为尺寸较大的薄板时，如图 1-4 (b) 所示，可认为工件在厚度方向不存在温差，热量沿 X 、 Y 方向传递，是二向导热，可将热源看作线状热源。如果工件是细长的杆件，只在 X 方向存在温差，是属于单向导热，热源可看作面状热源，如图 1-4 (c) 所示。焊件的状态（如预热、环境温度）不同，等温线的疏密也不一样。预热温度和环境温度越高，等温线分布越稀疏。