



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

金属焊接

JINSHU HANJIE

◎ 主编 雷 毅

◎ 主审 程绪贤



中国石化大学出版社

金属

JinShu HanJie

焊接

主编 雷 毅

参编 赵卫民 韩 涛

韩 彬 王炳英

主审 程绪贤

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属焊接/雷毅主编. —东营:中国石油大学出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-5636-3629-7

I. ①金… II. ①雷… III. ①金属材料—焊接—高等学校—教材 IV. ①TG457.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 220654 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 金属焊接

主 编: 雷 毅

责任编辑: 袁超红(电话 0532—86981532)

装帧设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 山东省东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 18.25 字数: 461 千字

版 次: 2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

内 容 简 介

本书根据中国石油大学(华东)“十一五”课程教材规划和新教学大纲的基本要求编写,主要介绍金属焊接的基础知识和基础理论。全书体系突出理论联系实际,注重思路和能力培养;书中内容取材广泛,力求反映国内外最新成就和发展趋势。

书中内容共分七章,主要包括绪论、焊接电弧与弧焊电源、常用电弧焊方法、焊接应力与变形、焊接冶金原理、常见金属材料焊接和焊接质量检验。每章均配有适量的思考题与习题。

本书可作为高等学校过程装备与控制工程、油气储运工程、建筑环境与设备工程、热能与动力工程和材料科学与工程等专业的教学用书,也可供从事与焊接制造技术相关的工程技术人员和高等院校相关专业的师生参考。

前言

Preface

作为机械设备制造与维修中的一种基本工艺方法,金属焊接广泛应用于各工业部门。随着科学技术的发展,金属焊接已经从一种传统的热加工工艺发展到了集结构、材料、力学、电子等多门学科理论为一体的综合工程技术。本教材根据中国石油大学(华东)“十一五”课程教材规划和新教学大纲的基本要求编写,主要介绍金属焊接的基础知识和基础理论。全书体系突出理论联系实际,注重思路和能力培养。书中内容涵盖金属焊接学科的各个重要领域,取材广泛,力求反映国内外最新成就和发展趋势。

全书共7章。●第1章为绪论,主要介绍金属焊接的基本概念、焊接方法分类和焊接技术的应用及发展等方面的相关知识。●第2章为焊接电弧与弧焊电源,主要介绍焊接电弧、对弧焊电源的要求、弧焊变压器、直流弧焊发电机、硅弧焊整流器、电子弧焊电源、弧焊电源的使用及维修等方面的相关知识。●第3章为常用电弧焊方法,主要介绍焊条电弧焊、埋弧自动焊、钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、焊接方法的选用及应用举例等方面的相关知识。●第4章为焊接应力与变形,主要介绍焊接应力与变形的产生、焊接残余应力、焊接残余变形等方面的相关知识。●第5章为焊接冶金原理,主要介绍焊接化学冶金、熔池金属的结晶、焊接接头的固态相变、焊接裂纹等方面的相关知识。●第6章为常见金属材料焊接,主要介绍金属焊接性及其试验评价方法、碳钢的焊接、合金结构钢的焊接、耐热钢以及不锈钢的焊接、异种钢的焊接等方面的相关知识。●第7章为焊接质量检验,主要介绍焊接质量检验的基本概念、焊接缺欠、焊接质量检验过程、无损检测技术等方面的相关知识。

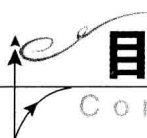
全书由雷毅担任主编,并负责第1章、第2章、第7章的编写和全书统稿工作。韩涛编写第3章,王炳英编写第4章,赵卫民编写第5章,韩彬编写第6章。全书由焊接界前辈程绪贤副教授担任主审并仔细审阅了书稿,提出了许多宝贵的指导意见;张德勤教授对本书进行了全面审阅,并提出了许多建议;中国石油大学(华

东)教务处和中国石油大学出版社对本书的出版工作给予了大力支持,在此一并表示深切的谢意。同时,对教材中所引用参考文献的作者表示感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在不足和错误之处,敬请读者批评指正,以便本书在构架、内容和细节等方面进一步完善。

编 者

2011 年 05 月于青岛



目 录

Contents

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 金属焊接的基本概念	1
1.1.1 焊接过程的物理实质	1
1.1.2 焊接结构分类	2
1.1.3 焊接结构的主要特点	3
§ 1.2 焊接方法分类	4
1.2.1 熔化焊接	4
1.2.2 压力焊接	8
1.2.3 钎 焊	9
§ 1.3 焊接技术的应用及发展	11
1.3.1 焊接技术的应用	11
1.3.2 焊接技术的展望	13
§ 1.4 本课程的目的和要求	16
1.4.1 课程特点	16
1.4.2 课程目的	16
1.4.3 课程要求	16
思考题与习题	17
第 2 章 焊接电弧与弧焊电源	18
§ 2.1 焊接电弧	18
2.1.1 焊接电弧的物理本质和引燃	18
2.1.2 焊接电弧的结构和静特性	20
2.1.3 交流电弧	22
2.1.4 焊接电弧的分类	23
§ 2.2 对弧焊电源的要求	25
2.2.1 对弧焊电源外特性的要求	25
2.2.2 对弧焊电源调节特性的要求	27
2.2.3 对弧焊电源动特性的要求	27

§ 2.3	弧焊变压器	29
2.3.1	串联电抗器式弧焊变压器	29
2.3.2	增强漏磁式弧焊变压器	30
§ 2.4	直流弧焊发电机	35
2.4.1	弧焊发电机的基本原理	35
2.4.2	差复激式弧焊发电机	36
2.4.3	裂极式弧焊发电机	37
§ 2.5	硅弧焊整流器	39
2.5.1	硅弧焊整流器的组成	39
2.5.2	磁放大器式弧焊整流器	39
2.5.3	动圈式硅弧焊整流器	42
§ 2.6	电子弧焊电源	43
2.6.1	晶闸管式弧焊电源	44
2.6.2	晶体管式弧焊电源	46
2.6.3	脉冲弧焊电源	48
2.6.4	新型弧焊电源	49
§ 2.7	弧焊电源的使用及维修	52
2.7.1	弧焊电源的选择与使用	52
2.7.2	常用弧焊电源的故障与检修	54
思考题与习题		58

第3章 常用电弧焊方法 60

§ 3.1	焊条电弧焊	60
3.1.1	焊条电弧焊的基本原理及特点	60
3.1.2	焊条	61
3.1.3	焊条电弧焊设备	66
3.1.4	焊条电弧焊的焊接工艺	66
§ 3.2	埋弧自动焊	69
3.2.1	埋弧自动焊的基本原理及特点	69
3.2.2	埋弧自动焊焊接材料	71
3.2.3	埋弧自动焊设备的组成	74
3.2.4	埋弧自动焊工艺	74
3.2.5	埋弧自动焊的发展	78
§ 3.3	钨极氩弧焊	80
3.3.1	钨极氩弧焊的基本原理及特点	80
3.3.2	钨极氩弧焊的电流种类和极性	81
3.3.3	钨极氩弧焊设备及焊接材料	84
3.3.4	钨极氩弧焊工艺	86
3.3.5	钨极氩弧焊的进展	88
§ 3.4	熔化极气体保护焊	90

3.4.1	熔化极气体保护焊的基本原理及特点	90
3.4.2	熔滴过渡	90
3.4.3	熔化极氩弧焊	93
3.4.4	CO ₂ 气体保护焊	98
§ 3.5	焊接方法的选用及应用举例	106
3.5.1	焊接方法的选用	106
3.5.2	应用举例	108
思考题与习题		110
第 4 章 焊接应力与变形		112
§ 4.1	焊接应力与变形的产生	112
4.1.1	应力和变形的基本概念	112
4.1.2	平板中心加热时的纵向应力与变形	113
4.1.3	平板对接焊时的纵向应力与变形	114
4.1.4	平板对接焊时的横向应力与变形	115
§ 4.2	焊接残余应力	117
4.2.1	焊接残余应力的分类	117
4.2.2	焊接残余应力的分布	117
4.2.3	焊接残余应力对焊接结构的影响	121
4.2.4	减小和消除焊接残余应力的措施	121
§ 4.3	焊接残余变形	125
4.3.1	焊接残余变形的类型及其影响规律	125
4.3.2	控制焊接变形的措施	128
4.3.3	矫正焊接残余变形的的方法	129
思考题与习题		130
第 5 章 焊接冶金原理		132
§ 5.1	焊接化学冶金	132
5.1.1	焊接化学冶金的特殊性	132
5.1.2	焊接熔渣	134
5.1.3	氮、氢、氧对焊接质量的影响和控制	137
5.1.4	硫、磷对焊缝金属的作用和控制	147
5.1.5	焊缝金属的合金化	149
§ 5.2	熔池金属的结晶	151
5.2.1	熔池金属的结晶现象	151
5.2.2	熔池结晶的形态	153
5.2.3	焊缝中的偏析	156
5.2.4	改善焊缝一次组织的措施	158
§ 5.3	焊接接头的固态相变	158
5.3.1	焊接热过程	158

5.3.2	焊缝金属的固态相变	164
5.3.3	焊接热影响区金属的组织和性能	166
§ 5.4	焊接裂纹	169
5.4.1	焊接热裂纹	170
5.4.2	焊接冷裂纹	175
5.4.3	再热裂纹、层状撕裂和应力腐蚀开裂	181
思考题与习题		188
第6章 常见金属材料焊接		189
§ 6.1	金属焊接性及其试验评价方法	189
6.1.1	金属焊接性的概念及评定方法	189
6.1.2	钢焊接性分析	191
6.1.3	常用焊接性试验方法	192
§ 6.2	碳钢的焊接	196
6.2.1	低碳钢的焊接	196
6.2.2	中、高碳钢的焊接	199
6.2.3	碳钢焊接实例	201
§ 6.3	合金结构钢的焊接	201
6.3.1	合金结构钢的类型及性能	201
6.3.2	热轧及正火钢的焊接	202
6.3.3	低碳调质钢的焊接	205
6.3.4	中碳调质钢的焊接	207
6.3.5	低温用钢的焊接	208
6.3.6	低合金耐腐蚀用钢的焊接	210
6.3.7	管线钢的焊接	211
6.3.8	合金结构钢焊接实例	214
§ 6.4	耐热钢、不锈钢的焊接	217
6.4.1	耐热钢、不锈钢概述	217
6.4.2	珠光体耐热钢的焊接	220
6.4.3	奥氏体钢的焊接	221
6.4.4	铁素体钢的焊接	224
6.4.5	马氏体钢的焊接	225
6.4.6	耐热钢、不锈钢焊接实例	226
§ 6.5	异种钢的焊接	230
6.5.1	低合金钢与奥氏体不锈钢的焊接	230
6.5.2	复合钢板的焊接	232
6.5.3	渗铝钢的焊接	234
6.5.4	异种钢焊接实例	236
思考题与习题		237

第7章 焊接质量检验	239
§ 7.1 焊接质量检验的基本概念	239
7.1.1 焊接检验的意义	239
7.1.2 焊接检验的依据	240
7.1.3 焊接检验方法分类	240
§ 7.2 焊接缺欠	251
7.2.1 焊接缺欠的基本类型及缺欠分级	251
7.2.2 焊接缺欠对质量的影响	253
7.2.3 焊接缺欠的影响因素	254
§ 7.3 焊接质量检验过程	257
7.3.1 焊前检验	257
7.3.2 焊接过程检验	259
7.3.3 焊后检验	260
7.3.4 安装调试质量检验	260
7.3.5 产品服役质量检验	261
§ 7.4 无损检测技术简介	261
7.4.1 射线检测	262
7.4.2 超声波检测	264
7.4.3 磁力检测	268
7.4.4 涡流探伤	271
7.4.5 渗透探伤	273
思考题与习题	277
参考文献	278

第1章 绪 论

人类文明的发展和社会的进步与金属材料应用的关系十分密切。继石器时代之后出现的铜器时代、铁器时代,金属材料的应用均成为其时代的显著标志。在现代工业中,金属材料(包括金属和以金属为基的合金)是最重要、应用最广泛的工程结构材料,目前种类繁多的金属材料已成为人类社会发展的物质基础。作为材料成型重要手段之一的焊接技术是现代工业生产中不可缺少的重要金属加工工艺,广泛应用于机械、冶金、建筑、船舶、石油化工、汽车、电力、电子、锅炉和压力容器、航空航天和军工等产业部门,并正朝着自动化、柔性化和智能化方向发展。

金属焊接俗称“钢铁裁缝”。石油化工机械中各种化工容器、反应塔、加热炉和换热器的制造与安装等都需要进行大量的焊接工作。油气储运设备中的各种储油罐、油气管道、油槽车和油轮等都是以焊接为主要加工手段的制造工程。在钻采机械方面,焊接可用于架体、泵体、钻杆、抽油杆和钻头等各种金属结构的制造及安装修理。海洋钻探及采油平台、海洋钻井船的制造等也都离不开焊接技术。

本章主要介绍金属焊接基本概念、焊接方法分类和焊接技术应用及发展。

§ 1.1 金属焊接的基本概念

1.1.1 焊接过程的物理实质

金属焊接是指通过适当的手段,使两个分离的金属物体(同种金属或异种金属)产生原子(分子)间结合而连成一体的连接方法。焊接接头不同于铆钉连接、螺栓连接等依靠外力且可拆卸的机械连接方式接头,它是靠加热熔化焊材和母材,通过各种冶金反应得到一定化学成分的焊缝金属,结晶凝固后形成的。只有两种金属通过原子或分子的结合或扩散形成金属键,才能达到焊接的目的。

为完成焊接,应使两个被焊件表面接近到金属晶格距离($0.3\sim 0.5\text{ nm}$),以便在接触表面进行扩散、再结晶等物理化学过程而形成金属键。由于金属表面(即使经精密加工)凹凸不平,以及表面常带有氧化膜、水分和油污等吸附层,这都将妨碍两块金属表面的紧密接触。焊接的物理实质就是利用局部加热、加压或二者并用的手段,克服表面不平度并消去氧化膜,使母材和焊缝金属形成共同的晶粒,达到永久性的牢固连接。

焊接是一种重要的金属加工工艺,各种焊接方法、焊接材料、焊接工艺和焊接设备等及其

基础理论的总称叫做焊接技术。焊接解决的问题主要有两个：一是怎样才能焊上；二是怎样才能焊好。

● 所谓焊上，就是顺利地将两种分离的金属连接在一起，并使它们的结合部分能达到原子间的相互联系。

● 所谓焊好，应包括以下三方面：

(1) 焊接接头的各项力学性能达到要求的指标，即能够承受使用过程中所要受到的各种外力，不致发生过大的变形(特别是塑性变形)，更不能出现开裂现象。

(2) 焊接变形要小，即经过加工或不经加工要能达到设计规定的尺寸及形状位置公差要求，能顺利地与其他相关零部件或设备相连接，并保持良好的受力状态。

(3) 焊缝及焊接构件要能够使用足够长的时间，即具有好的耐久性，并且安全可靠。在焊接件设计使用寿命期间，不会因产生附加塑性变形或开裂而失去使用价值。

这里需要特别强调指出的是裂纹和焊接变形问题。首先，裂纹是任何焊缝或构件都不允许存在的最严重的焊接缺陷。焊接时、焊后或使用过程中出现裂纹都是不允许的。因此，如何避免裂纹的产生是焊接要解决的最重要的问题。其次是焊接变形问题，焊接性较好的材料焊接时一般出现裂纹的可能性不大，这时对于大型或复杂的焊接构件来讲，如何防止或减小焊接变形，将焊接变形控制在所允许的范围内就成为焊接要解决的关键问题。由此可见，怎样既保证焊接接头质量又控制焊接变形，是焊接时要解决的主要问题。

1.1.2 焊接结构分类

焊接结构是指常见的最适宜于用焊接方法制造的金属结构。目前，世界主要工业国家每年生产的焊接结构约占钢材总量的45%。由于焊接结构的种类繁多，其分类方法也不尽相同。例如，按半成品的制造方法可分为板焊结构、冲焊结构等；按照结构的用途可分为车辆结构、船体结构、飞机结构等；根据焊件的材料厚度可分为薄壁结构、中壁结构和厚壁结构；根据焊件的材料种类可分为钢制结构、铝制结构、钛制结构，等等。

现在国内外对焊接结构通用的分类方法是根据焊接物体或结构的工作特性来分类，并将焊接结构分成下列几类：

(1) 梁及梁系结构。梁及梁系焊接结构的工作特点是组成梁系结构的元件受横向弯曲，当由多根梁通过刚性连接组成梁系结构(或称框架结构)时，各梁的受力情况将变得较为复杂。

(2) 柱类结构。柱类焊接结构的特点是承受压应力或在受压的同时承受纵向弯曲应力。结构的断面形状多为工字形、箱形或管式圆形断面。柱类焊接结构也常用各种型钢组合成所谓“虚腹虚壁式”组合截面。这些形式都可增大惯性矩，提高结构的稳定性，同时还可节约材料。

(3) 格架结构。格架结构由一系列受拉或受压杆件组合而成，各杆件以节点形式互相连接组成各类形状的结构，如桁架、网络刚架和骨架等。

(4) 壳体结构。壳体结构承受较大的内部压力，因而要求焊接接头具有良好的气密性，如容器、储器和管道等多用钢板焊制而成。

(5) 骨架结构。骨架焊接结构的外形如同人体骨架，多用于起重运输机械，通常承受动载荷，故而要求它具有最小的质量和较大的刚度。船体骨架、客车棚架及汽车车厢和驾驶室等均

属此类结构。骨架和格架结构的原材料多为各种型钢,有时将两类结构统称为格架或桁架结构。

(6) 机器和仪器的焊接零件。这类结构最适宜于在交变载荷或多次重复性载荷下工作。对这类结构,要求其具有精确的尺寸,这样才能保证加工出的主要部件或仪表零件的质量。属于这类结构的有机座、机身、机床横梁及齿轮、飞轮和仪表枢轴等。这类结构采用钢板焊接或铸焊、锻焊联合工艺,可以解决铸锻设备能力不足的问题,同时还可大大缩短制造周期。

随着焊接技术的不断完善,一些高强度和高韧性钢铁在现代焊接结构中获得了广泛的应用。现代焊接结构在向大型化和高参数方向发展的同时,也出现了一些新的焊接结构。

1.1.3 焊接结构的主要特点

与机械连接(如铆接或螺栓连接)相比,焊接结构具有以下主要优点:

(1) 接头的强度较高。应用现代的焊接技术,不仅可以制造出与母材等强度的焊接接头,而且还可以制造出强度高于母材强度的接头。而铆接或螺栓连接接头的强度依赖于螺栓(或铆钉)的强度、直径及其间距,通常还由于母材承载截面的削弱,很难实现接头强度与母材的强度相等。一般来说,铆接或螺栓连接接头的强度大约可达到母材的80%。

(2) 焊接结构的应用场合比较广泛。采用焊接的方法可以制造任意几何形状的结构;在结构的焊接中,对被焊接材料的厚度并无特别限制,厚薄相差很大的材料也能通过焊接形成永久连接;采用焊接的方法可以制造任意外形的结构,并能实现现场安装。焊接结构应用的另外的一个重要方面是可以实现异种材料的连接,如异种金属的连接、金属与非金属的连接等。

(3) 适合于制备有密闭性要求的结构。对铆接结构来说,很难保证其服役过程中完全的水密性要求,但焊接结构很容易满足这一要求,如潜艇的舱体和储罐等通常采用焊接的方法进行制造。

(4) 接头形式简单。一般来说,焊接结构中的接头形式要比铆接结构的接头形式简单得多。在焊接结构中,被连接件可采用对接、角接、搭接等简单的接头形式焊接而成。对铆接结构来说,则要采用比较复杂的接头形式。

(5) 大型结构制造周期短、成本较低。对大型结构来说,通常的制造方法是工厂模块制造,现场部件组装。焊接是这一制造方式最理想的工艺方法。

虽然焊接结构具有上述优点,但在实际应用中,焊接结构中还存在许多问题需要考虑和解决,如:

(1) 焊接结构的止裂性较差。对焊接结构来说,一旦出现裂纹扩展,很难实现止裂。但对铆接结构来说,一个被连接件中的裂纹扩展通常不会扩展到与之连接的另外的一个构件中。

(2) 容易产生焊接缺欠。由于焊接工艺的特殊性,焊接结构中容易出现气孔、裂纹、夹杂物等焊接缺欠。这些缺欠对结构的性能往往产生严重的不利影响。

(3) 焊接结构制造中材料的敏感性。一些材料很容易实现无缺欠焊接,而另一些材料的焊接中往往出现焊接缺欠,如高强钢焊接中容易出现裂纹、铝合金焊接时容易出现气孔。

(4) 焊接应力和变形。由于焊接是一种局部的热过程,焊接过程中材料经历了复杂的热

应力演变,焊后焊缝区的收缩将引起结构的各种变形和残余应力,这对结构的工作性能会产生一定的影响。一方面,焊接区的拉应力可能导致裂纹的产生,残余压应力和残余变形对结构的尺寸稳定性等存在不利影响;另一方面,过大的焊接变形会增加矫正和机械加工的工作量,增加结构制造的成本。

§ 1.2 焊接方法分类

焊接技术的诞生与发展经历了数千年的历史。根据金属焊接的物理化学过程,基本焊接方法通常分为熔化焊接、压力焊接和钎焊三大类,如图 1.2-1 所示。

近代焊接技术是从 1882 年出现碳弧焊开始的。由于焊接具有节省金属、生产率高、产品质量好和大大改善劳动条件等优点,所以在近半个世纪内得到了极为迅速的发展。20 世纪 40 年代初期出现了优质电焊条,使长期以来由于产品质量的问题让人们怀疑的焊接技术得到了一次历史性飞跃。20 世纪 40 年代后期,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 年代出现的电渣焊、各种气体保护焊、超声波焊,20 世纪 60 年代的等离子弧焊、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,也使焊接技术进入了一个新的发展阶段。

目前,基本焊接方法已发展到 20 多种。同时,金属热切割、表面堆焊、热喷涂、碳弧气刨等也属于焊接技术领域。因此,当从不同角度考虑时,对焊接方法的分类也不尽相同。图 1.2-2 是美国焊接学会对焊接方法的分类。

1.2.1 熔化焊接

在焊接过程中,将焊件接头加热至熔化状态,不加压力而完成焊接的方法称为熔化焊接,简称熔焊。在熔焊时,通过热源将待焊两工件接口处迅速加热熔化,形成熔池。熔池随热源向前移动,冷却后形成连续焊缝而将两工件连为一体。由于熔化焊是通过局部加热使连接处达熔化状态,然后冷却结晶形成共同晶粒,因此它最有利于实现原子结合,是目前金属焊接的最主要方法。

为了实现熔化焊接,必须有一个能量集中且温度足够高的热源。按照热源形式的不同,熔化焊接方法可再分为:电弧焊——以气体导电时产生的电弧热为热源;电渣焊——以液态熔渣导电时产生的电阻热为热源;电子束焊——以高速运动的电子束流为热源;激光焊——以激光束为热源;气焊——以可燃气体的燃烧火焰为热源;铝热焊——以铝热剂的反应热为热源;等等。

另外,为防止熔化金属与空气接触而恶化焊缝的成分与性能,熔化焊接过程一般都必须采取有效隔离空气的保护措施。按照真空、气相和渣相等保护形式的不同,熔化焊接方法又可分为:埋弧焊——熔渣保护;气体保护焊(MIG 焊、CO₂ 焊接)——气体保护;焊条电弧焊——渣-气联合保护;等等。

此外,根据电极形式的不同,熔化焊接方法还可分为熔化极焊接和非熔化极焊接。

常用熔化焊接方法的基本原理和主要特点见表 1.2-1。

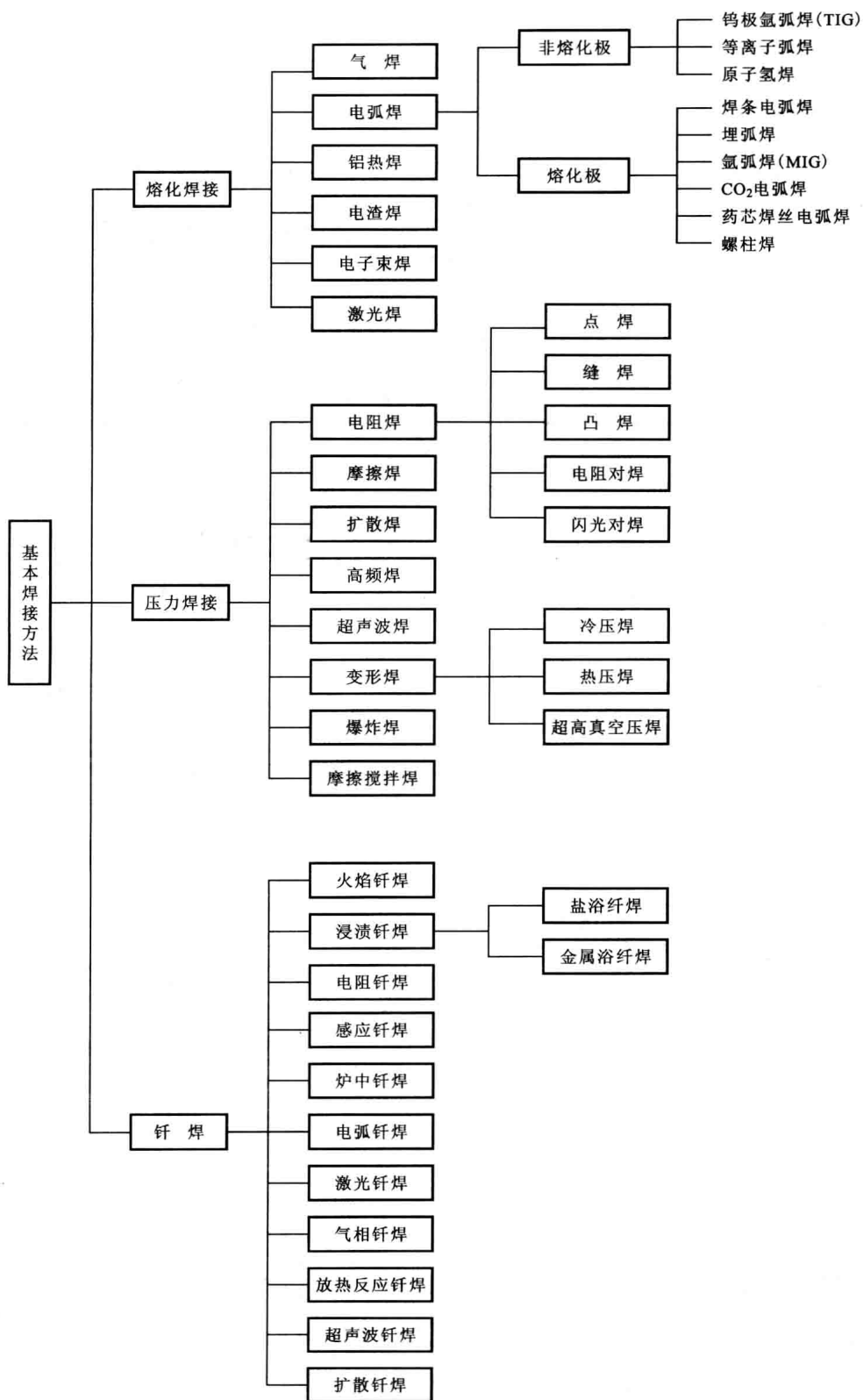


图 1.2-1 金属焊接方法分类

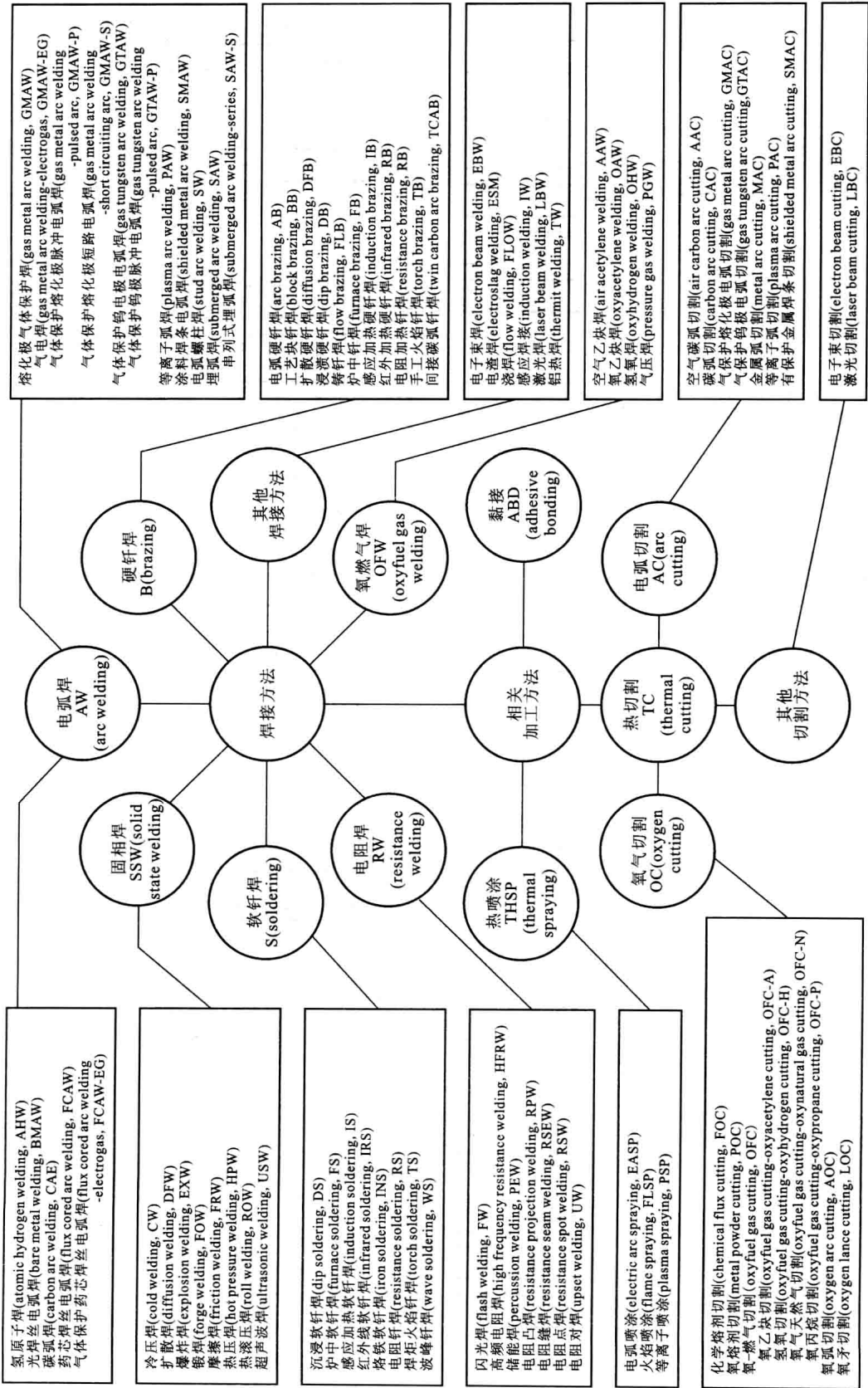


图 1.2-2 美国焊接学会使用的焊接方法分类