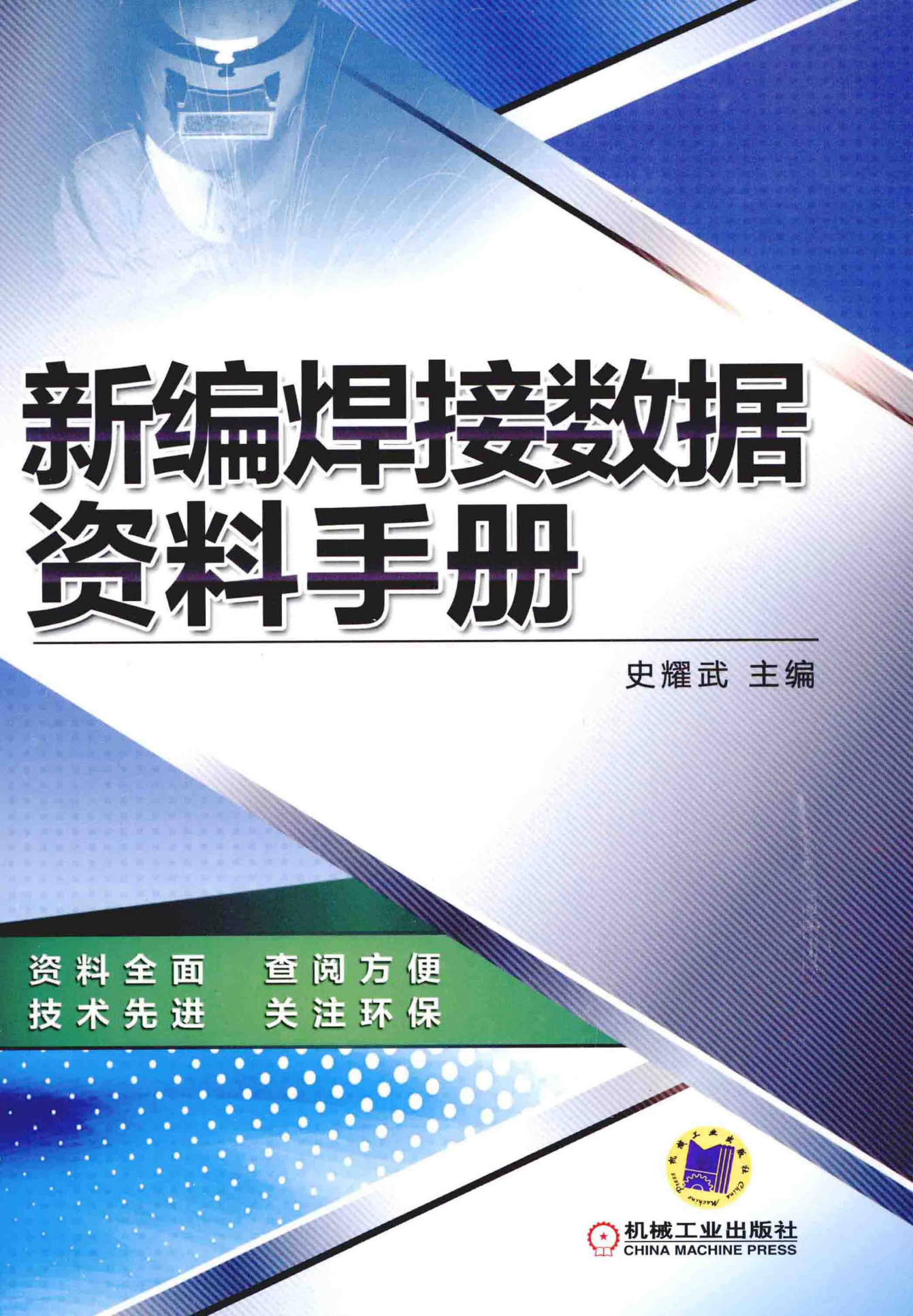


The background of the cover features a welder in protective gear, including a helmet and gloves, working on a metal structure. The welder is positioned in the upper left, with bright sparks emanating from the welding point. The overall design is dynamic, with diagonal lines and a color palette of blues, greens, and whites.

新编焊接数据 资料手册

史耀武 主编

资料全面 查阅方便
技术先进 关注环保



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新编焊接数据资料手册

主编 史耀武

参编 (按章节顺序排列)

雷永平	林 健	张元彬	罗 辉	霍玉双	刘 鹏	李晓延
栗卓新	陈树君	闫志鸿	刘 嘉	黄鹏飞	于 洋	肖荣诗
吴世凯	白韶军	唐 伟	李亚江	王 娟	吴 娜	魏守征
蒋力培	朱锦洪	俞建荣	杨德宇	王中辉	黄继强	薛 龙
邹 勇	史耀武	夏志东	李 辉	赵海燕	鲁 立	张建勋
陈振华	王智慧					



机械工业出版社

本书收集了焊接与切割工程及科研中常用的资料数据,注重反映我国高端装备制造业和重大工程的需求,特别涉及汽车、建筑钢结构等支柱产业以及能源工程、轨道交通、船舶与海洋工程、长输管线、航空航天及军工装备制造业对焊接技术的需求。在保留传统焊接技术数据的同时还收集了高效电弧焊、高能束焊、搅拌摩擦焊、等离子弧切割、火焰数控切割、激光切割等先进技术的资料,以及高强韧钢、耐候钢、耐热钢、特种钢、新型不锈钢及铝、镁、钛轻金属合金的焊接性及高端绿色焊材的数据。同时反映了近年来优质高效、节能环保焊接新技术及新材料的进步。

本书主要供焊接工程技术人员、科研人员、焊接操作人员和大专院校师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

新编焊接数据资料手册/史耀武主编. —北京:机械工业出版社, 2014.3

ISBN 978-7-111-45436-6

I. ①新… II. ①史… III. ①焊接-数据-技术手册 IV. ①TG4-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第009284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:吕德齐 责任编辑:吕德齐 版式设计:霍永明

责任校对:刘志文 陈延翔 封面设计:马精明 责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·68.75印张·2插页·2359千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-45436-6

定价:218.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

策划编辑电话:(010) 88379732

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010) 88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是一部焊接工具书，以丰富的焊接数据、资料图表，反映了近十余年焊接技术的新进展。本书注重反映我国高端装备制造业和重大工程的需求，特别涉及汽车、建筑钢结构等支柱产业以及能源工程、轨道交通、船舶与海洋工程、长输管线、航空航天及军工装备制造制造业对焊接技术的需求。书中对传统焊接技术仍保留足够篇幅，同时收集了高效电弧焊、高能束焊、搅拌摩擦焊等先进焊接技术的资料、数据。为反映以低碳、洁净、细晶、强韧度为特征的新钢种推广应用，还收集了诸如高强韧钢、耐候钢、耐热钢、特种钢、新型不锈钢以及铝、镁、钛轻金属合金的焊接性及在高端绿色焊材领域的新资料。由于近年来大量新材料和新结构的采用，焊接装备机械化、自动化和信息化进展明显。俗称“钢铁裁缝”的焊接离不开切割技术，等离子弧切割、火焰数控切割已广泛应用，激光切割备受关注。同时，焊接结构制造也面临能耗高、材料利用率低和资源与环境的压力，因此本书还反映了近年来优质高效、节能环保焊接新技术及新材料的进步。

我国钢铁年产量已超过 7 亿 t，近 50% 的钢材需要焊接加工，焊接技术已渗透到制造业各个领域。尽管焊接技术水平与发达国家还有一定差距，但是我国已是焊接制造大国，在生产和科研实践的基础上形成了丰富、宝贵的数据资料，焊接数据的不断积累和及时总结，对焊接技术和知识的传承与发展有重要价值。同时，编者也注意收集国外的先进焊接数据，供国内焊接工作者参考。

本书由北京工业大学史耀武主编并统稿。第 1 章由北京工业大学雷永平负责并编写 1.3 至 1.5 节，林健编写 1.1 节和 1.2 节及 1.6~1.8 节。第 2 章由山东建筑大学张元彬、罗辉、霍玉双、刘鹏编写。第 3 章由北京工业大学李晓延编写。第 4 章由北京工业大学栗卓新编写。第 5 章由北京工业大学陈树君负责并编写 5.4 和 5.5 节，闫志鸿编写 5.1 和 5.9 节，刘嘉编写 5.2 节，黄鹏飞编写 5.3 节，于洋参加编写 5.4 节，肖荣诗、吴世凯编写 5.6 节，白韶军编写 5.7 节，美国南卡罗来纳大学唐伟编写 5.8 节。第 6 章由山东大学李亚江、王娟、吴娜、魏守征编写。第 7 章由北京石油化工学院蒋力培负责，俞建荣、杨德宇编写 7.3 节，王中辉编写 7.4 节，黄继强编写 7.5 和 7.7 节，薛龙、邹勇编写 7.6 节，河南科技大学朱锦洪编写 7.1 和 7.2 节。第 8 章由史耀武、夏志东编写。第 9 章由北京工业大学李辉编写。第 10 章由清华大学赵海燕、鲁立编写。第 11 章由西安交通大学张建勋负责并编写 11.3 和 11.4 节，南昌航空大学陈振华编写 11.1 和 11.2 节，北京工业大学王智慧编写 11.5 节。附录由史耀武编写。

本书主要供工程技术人员、管理人员、焊接操作人员和大专院校师生使用。由于编写水平有限，书中难免存在缺欠，恳切读者提出批评和建议。

编 者

目 录

前言

第1章 焊接成形	1
1.1 焊接方法与分类	1
1.2 焊接方法与热源特征	9
1.2.1 常用焊接方法的热源特性	9
1.2.2 常用焊接方法的热源	10
1.3 焊接热循环	11
1.3.1 焊接热循环及其特征	11
1.3.2 焊接热循环特征参数	12
1.3.3 多层焊的焊接热循环	12
1.4 焊接热作用的特点与温度场描述	15
1.4.1 焊接热作用特点	15
1.4.2 焊接温度场	15
1.4.3 热传播的基本定律	15
1.5 焊接温度场的计算	16
1.5.1 影响焊接温度场的因素	16
1.5.2 焊接温度场的解析求解	17
1.5.3 焊接温度场的数值求解	20
1.6 熔池形状与焊缝成形	43
1.6.1 熔池形状	43
1.6.2 焊缝形状	43
1.6.3 钢结构焊缝外形尺寸要求	44
1.7 焊接方法和工艺条件对焊缝成形的影响	47
1.7.1 焊条电弧焊	47
1.7.2 埋弧焊	48
1.7.3 熔化极气体保护焊	51
1.7.4 活性化钨极氩弧焊	52
1.7.5 等离子弧焊	55
1.7.6 电子束焊	55
1.7.7 激光焊	55
1.8 焊接成形工艺缺陷	63
1.8.1 产生焊接成形工艺缺陷的主要因素	63
1.8.2 焊接成形工艺缺陷质量分级的限值	63
1.8.3 压焊接头各类焊接工艺缺欠	67
参考文献	70
第2章 材料焊接性	72
2.1 焊接热影响区的显微组织	72

2.1.1 焊接热影响区的组织分布	72
2.1.2 焊接冷却时间及计算	73
2.1.3 焊接热影响区性能评价	76
2.1.4 焊接热影响区热模拟	78
2.2 典型材料焊缝组织	80
2.2.1 低碳钢焊缝组织	80
2.2.2 低合金结构钢焊缝组织	81
2.2.3 不锈钢焊缝组织	83
2.3 焊接裂纹	88
2.3.1 热裂纹	90
2.3.2 冷裂纹	92
2.3.3 再热裂纹	97
2.3.4 层状撕裂	97
2.3.5 应力腐蚀裂纹	99
2.4 焊接性评价方法	99
2.4.1 焊接性概述	99
2.4.2 焊接性试验内容	99
2.4.3 焊接性试验方法分类	100
2.4.4 选择或设计焊接性试验方法的原则	100
2.4.5 常用工艺焊接性试验方法	100
2.4.6 焊接热（应力、应变）模拟试验方法	119
2.4.7 使用焊接性的试验方法	121
参考文献	123
第3章 焊接接头设计	124
3.1 焊接接头的构成与基本形式	124
3.1.1 焊接接头的构成及其组织与力学性能	124
3.1.2 焊接接头的基本形式	125
3.2 焊缝及坡口的设计与表达	126
3.2.1 焊缝的工程标注	126
3.2.2 焊接接头坡口设计	133
3.3 焊接接头的静载强度设计	161
3.3.1 焊接接头静载强度设计原则	161
3.3.2 熔焊接头的静载强度设计	161
3.3.3 点焊和缝焊接头的静载强度设计	164
3.4 焊接接头疲劳设计	166
3.4.1 焊接构件应力确定方法	166
3.4.2 疲劳分析方法	169

3.4.3 疲劳分析方法的选择	170	5.4.3 电阻焊的电极材料	311
3.4.4 焊接接头疲劳设计	171	5.4.4 点焊	311
3.4.5 焊接构件疲劳试验	186	5.4.5 缝焊	327
参考文献	192	5.4.6 凸焊	330
第4章 焊接材料	193	5.4.7 电阻对焊	333
4.1 焊条	193	5.4.8 闪光对焊	333
4.1.1 焊条分类	193	5.5 非熔化极气体保护焊	335
4.1.2 焊条的组成	193	5.5.1 钨极惰性气体保护焊	335
4.1.3 焊条的型号与性能	196	5.5.2 等离子弧焊	352
4.1.4 焊条的选用和用量计算	219	5.6 激光焊	367
4.1.5 焊条检验	220	5.6.1 激光焊概述	367
4.1.6 焊条的保管和使用	222	5.6.2 激光焊系统	367
4.2 焊丝	223	5.6.3 金属材料对激光的吸收	369
4.2.1 焊丝的分类、型号和牌号	223	5.6.4 金属材料的激光焊	371
4.2.2 焊丝的检验和保管	229	5.6.5 激光焊焊接参数的选择	373
4.2.3 焊丝的选用	244	5.6.6 几种金属材料的激光焊工艺	376
4.3 焊剂	245	5.7 电子束焊	380
4.3.1 焊剂的分类及质量要求	245	5.7.1 电子束焊分类	380
4.3.2 焊剂的牌号和型号	249	5.7.2 电子束焊的准备	381
4.3.3 焊剂的主要成分、性能及应用 特点	251	5.7.3 电子束焊接参数的选择	383
参考文献	260	5.7.4 常用材料电子束焊的焊接性	386
第5章 焊接工艺技术	262	5.7.5 电子束焊的焊缝缺陷	390
5.1 焊条电弧焊	262	5.7.6 电子束焊的应用	391
5.1.1 焊接位置	262	5.8 摩擦焊	391
5.1.2 焊接参数	262	5.8.1 旋转摩擦焊	391
5.1.3 热输入	262	5.8.2 搅拌摩擦焊	403
5.1.4 焊接操作技术	262	5.8.3 线性摩擦焊	423
5.2 埋弧焊	265	5.9 其他焊接方法	430
5.2.1 埋弧焊分类	265	5.9.1 螺柱焊	430
5.2.2 埋弧焊焊接条件	265	5.9.2 水下焊接	432
5.2.3 焊接参数选择	270	参考文献	439
5.2.4 高效埋弧焊	273	第6章 各种材料的焊接	442
5.3 熔化极气体保护焊	278	6.1 碳素结构钢的焊接	442
5.3.1 概述	278	6.2 低合金高强度钢的焊接	447
5.3.2 CO ₂ 气体保护焊	279	6.2.1 低合金结构钢的成分和性能	447
5.3.3 MAG/MIG 焊	282	6.2.2 低合金高强度钢的焊接性	452
5.3.4 STT 焊接工艺	296	6.2.3 低合金高强度钢焊接工艺及焊接 参数	456
5.3.5 CMT 焊接工艺	299	6.3 低合金调质钢的焊接	462
5.3.6 TIME 焊接工艺	300	6.3.1 化学成分和力学性能	462
5.3.7 双丝焊焊接工艺	302	6.3.2 低合金调质钢的焊接性	462
5.3.8 窄间隙 MIG 焊	307	6.3.3 低碳调质钢的焊接工艺	470
5.4 电阻焊	310	6.3.4 中碳调质钢的焊接	481
5.4.1 电阻焊类型	310	6.4 低合金耐热钢和低温钢的焊接	486
5.4.2 金属材料电阻焊的焊接性	310	6.4.1 低合金耐热钢的焊接	486

6.4.2 低温钢的焊接	496	7.4 电阻焊设备	726
6.5 不锈钢的焊接	502	7.4.1 电阻焊设备的分类	726
6.5.1 奥氏体不锈钢的焊接	502	7.4.2 电阻焊设备的组成	728
6.5.2 铁素体不锈钢的焊接	513	7.4.3 电阻焊机的供电装置	728
6.5.3 马氏体不锈钢的焊接	523	7.4.4 电阻点焊机	730
6.5.4 双相不锈钢的焊接	531	7.4.5 电阻凸焊机	736
6.6 有色金属的焊接	540	7.4.6 电阻缝焊机	737
6.6.1 铝及铝合金的焊接	540	7.4.7 电容储能缝焊机、点焊机	741
6.6.2 镁及镁合金的焊接	554	7.4.8 电阻对焊机	741
6.6.3 钛及钛合金的焊接	563	7.4.9 电阻焊机的选用	744
6.7 高温合金的焊接	579	7.5 激光焊和电子束焊设备	745
6.7.1 高温合金的成分与性能	579	7.5.1 激光焊设备	745
6.7.2 高温合金的焊接性	585	7.5.2 电子束焊设备	759
6.7.3 高温合金焊接工艺	586	7.6 焊接自动化装备	768
6.8 陶瓷与金属的连接	591	7.6.1 通用型自动焊机	768
6.8.1 陶瓷材料的组成与性能	591	7.6.2 专用型自动焊装备	770
6.8.2 陶瓷与金属的连接特点	593	7.6.3 焊接机器人	796
6.8.3 陶瓷与金属的扩散焊	598	7.6.4 焊接变位设备	826
6.9 铸铁的焊接	604	7.6.5 焊接传感器与摆动器	842
6.9.1 铸铁材料	604	7.6.6 焊接自动化辅助工装夹具	857
6.9.2 铸铁的焊接工艺	607	7.7 其他焊接设备	863
6.10 异种材料的焊接	610	7.7.1 螺柱焊设备	863
6.10.1 异种金属连接的特点	610	7.7.2 超声波焊接设备	871
6.10.2 异种钢的焊接	614	7.7.3 摩擦焊设备	876
6.10.3 异种有色金属的焊接	623	参考文献	885
6.10.4 复合钢的焊接	628	第8章 钎焊	887
6.10.5 钢与有色金属的焊接	631	8.1 钎焊方法	887
参考文献	637	8.2 钎料	897
第7章 焊接装备与自动化	639	8.2.1 软钎料	897
7.1 弧焊电源	639	8.2.2 硬钎料	903
7.1.1 弧焊电源的分类	639	8.3 钎剂	920
7.1.2 弧焊电源的主要特性	641	8.3.1 软钎剂	920
7.1.3 弧焊电源的原理	641	8.3.2 硬钎剂	927
7.1.4 焊条电弧焊电源	644	8.4 钎焊接头设计	928
7.1.5 埋弧焊电源	649	8.5 钎焊试验方法	931
7.2 埋弧焊设备	653	8.5.1 钎焊润湿性能试验方法	931
7.2.1 埋弧焊设备的组成与分类	653	8.5.2 钎焊接头强度试验方法	932
7.2.2 典型埋弧焊设备	655	8.5.3 无铅软钎料试验方法	935
7.2.3 埋弧焊配套设备	661	参考文献	940
7.3 气体保护焊设备	667	第9章 热切割	941
7.3.1 钨极惰性气体保护焊设备	667	9.1 热切割方法	941
7.3.2 熔化极气体保护焊设备	677	9.2 气割	943
7.3.3 等离子弧焊设备	695	9.2.1 各种燃气的物理化学性质	943
7.3.4 高效气体保护弧焊设备	705	9.2.2 常见材料的气割性	944
7.3.5 气体保护焊设备的选用	719	9.2.3 割炬	945

9.2.4 气割的主要工艺因素	946	10.6 焊接应力与变形的降低或消除	1010
9.2.5 气割工艺	948	10.6.1 焊接变形的降低或消除	1010
9.2.6 气割质量	950	10.6.2 焊接残余应力的降低或消除	1012
9.3 碳弧气刨	953	参考文献	1013
9.3.1 碳弧气刨设备	953	第 11 章 焊接质量与管理	1015
9.3.2 碳弧气刨工艺	955	11.1 焊接缺陷	1015
9.4 等离子弧切割	958	11.1.1 焊接缺陷及其特征	1015
9.4.1 等离子弧切割特点	958	11.1.2 焊接缺陷的危害及对质量的 影响	1021
9.4.2 等离子弧切割气体与电极	959	11.2 焊接无损检测	1021
9.4.3 等离子弧切割工艺	960	11.2.1 目视检测	1021
9.4.4 等离子弧切割质量	964	11.2.2 射线检测	1023
9.5 激光切割	966	11.2.3 超声检测	1031
9.5.1 激光切割原理与特点	966	11.2.4 渗透检测	1038
9.5.2 激光切割设备与工艺	966	11.2.5 磁粉检测	1041
9.5.3 激光切割质量及影响因素	973	11.2.6 无损检测方法的选用	1043
9.6 水下切割	977	11.3 焊接接头强度试验方法	1044
9.6.1 水下切割方法	977	11.3.1 焊缝及熔敷金属拉伸性能检测	1046
9.6.2 水下切割工艺	979	11.3.2 焊接接头拉伸性能检测	1046
参考文献	984	11.3.3 焊接接头弯曲及压扁性能检测	1047
第 10 章 焊接应力与变形	985	11.3.4 焊接接头冲击试验	1050
10.1 金属的高温性能	985	11.3.5 焊接接头硬度测试试验	1052
10.2 焊接变形与应力的测量	986	11.4 焊接从业人员与工艺信息化管理	1054
10.2.1 焊接变形的测量	986	11.4.1 焊接工艺设计与管理系统	1054
10.2.2 焊接残余应力的测量	987	11.4.2 焊工培训与档案管理数据库 系统	1056
10.3 焊接变形的估算	988	11.4.3 焊接生产与质量信息管理数据库 系统	1057
10.3.1 焊接变形的分类	988	11.4.4 焊接标准和知识咨询数据库 系统	1058
10.3.2 横向变形的估算	988	11.4.5 现代焊接教育与培训模式	1059
10.3.3 纵向变形的估算	991	11.4.6 焊工技术档案管理系统开发	1060
10.3.4 弯曲变形的估算	992	11.5 焊接安全与卫生	1062
10.3.5 角变形的估算	992	11.5.1 概述	1062
10.4 焊接残余应力的典型分布	996	11.5.2 焊接安全与卫生标准	1062
10.4.1 平板对接焊缝的残余应力	996	11.5.3 焊接安全技术	1067
10.4.2 厚板对接焊缝的残余应力	998	11.5.4 焊接劳动卫生防护	1072
10.4.3 圆筒体和球壳焊缝的残余应力	998	参考文献	1079
10.4.4 圆形封闭焊缝的残余应力	1002	附录	1081
10.4.5 梁构件的焊接残余应力	1002	附录 A 国家及行业焊接标准目录	1081
10.4.6 表面堆焊的残余应力	1002	附录 B 常用英语焊接缩略语	1084
10.4.7 点焊接头的残余应力	1002	附录 C 化学元素周期表	1087
10.4.8 角接头的残余应力	1004	附录 D 常用单位换算	1088
10.4.9 搅拌摩擦焊接头的残余应力	1004		
10.5 焊接残余应力的估算	1008		
10.5.1 纵向残余应力的估算	1008		
10.5.2 对接接头的横向拘束应力估算	1009		
10.5.3 筒体环缝焊接的残余应力估算	1009		

第1章 焊接成形

1.1 焊接方法与分类

焊接方法分类繁多，而且新的方法仍在不断涌现，这里主要列出族系法、一元坐标法和二元坐标法。

在族系法分类中，首先将焊接方法划分为三大

类，即熔焊、固相焊和钎焊。其次，将每一大类方法，例如熔焊，按能源种类细分为电弧焊、气焊、铝热焊、电渣焊等类；电弧焊，又分为熔化极电弧焊、非熔化极电弧焊，如图 1.1-1、表 1.1-1 ~ 表 1.1-3 所示。表 1.1-4 和表 1.1-5 分别为一元法和二元坐标法分类。表 1.1-6 ~ 表 1.1-8 为常用焊接方法的适用性。

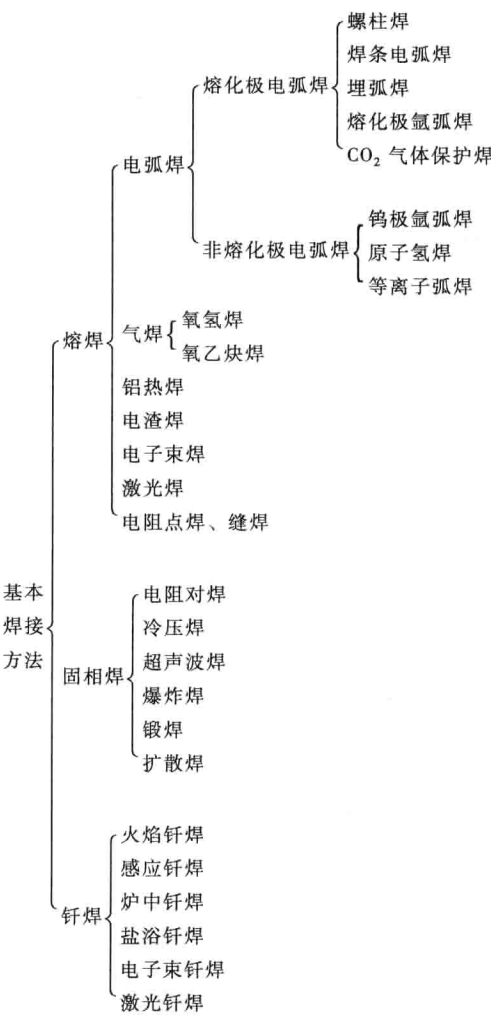


图 1.1-1 焊接方法分类（族系法）

表 1.1-1 熔焊的分类（族系法）

熔焊	电能	电弧	气体保护	钨极惰性气体保护焊
				金属极气体保护电弧焊
				等离子弧焊
				气电焊
				氢原子焊
			碳弧焊	裸焊条电弧焊
			焊剂保护	金属电极保护电弧焊
				潜弧焊
				药芯焊丝气体保护焊
				气电焊
			压力成形	闪光焊
				螺柱焊
			加压	锻焊
		电阻	熔剂	电渣焊
			加压	电阻点焊
				缝焊
				凸焊
		放射能	真空	电子束焊
				激光焊
		感应		感应焊
化学能	火焰反射	火焰		氧乙炔焊
				氧氢焊
	固体反应	熔剂		铝热焊

表 1.1-2 固相焊的分类（族系法）

固相焊接	电能	辐射能	压力成形	气体	热压焊
				真空	热压焊
			无保护		锻焊
					热辊压焊
					混合挤压焊
		加压	气体		扩散焊
			真空		扩散焊
		感应	压力	气体	感应焊
				真空	感应焊
	电阻	压力成形			电阻对焊
			加压		电阻点焊、缝焊
		火焰	压力成形		气压焊
	化学能	辐射能	加压	气体保护	扩散焊
			压力成形		锻焊
					热辊压焊
		爆炸能	成形		混合挤压焊
机械能	摩擦	压力成形			爆炸焊
		加压			摩擦焊
		压力成形			超声波焊
					冷压焊

表 1.1-3 钎焊的分类（族系法）

钎焊	电能	电弧	—	熔剂	间接碳弧钎焊
			—	气体	间接碳弧钎焊
			电阻	加压	熔剂
		感应	—	熔剂	电阻硬、软钎焊
			—	气体	铬铁钎焊
			—	熔剂	感应硬钎焊
			—	真空	感应硬、软钎焊
			—	真空	感应硬钎焊
			加压	气体	扩散钎焊
			—	真空	扩散钎焊
	放射能	—	—	气体	炉铜焊
			—	熔剂	红外线硬钎焊
			—	熔剂	炉铜焊
			—	真空	红外线硬钎焊
		加压	—	真空	炉铜焊
			—	气体	红外线硬钎焊
			—	真空	扩散钎焊
			—	真空	扩散钎焊
化学能	火焰反射	—	熔剂		火焰钎焊
		—	熔剂		炉铜焊
	放射能	—	熔剂		炉铜焊
		—	气体		炉铜焊
	传导	—	熔剂		块钎焊
		—	熔剂		铸钎焊

表 1.1-4 焊接方法分类（一元坐标法）

焊接方法分类							
热源	保护方法						机械排除
	真空	惰性气体	气体	熔剂	无保护		
不加热或无传导热	冷压焊	热压焊	—	—	—		热压焊、冷压焊
机械能	爆炸焊	—	—	—	爆炸焊		摩擦焊、超声波焊
化学热	火焰、等离子体	—	等离离子弧焊	原子氢焊	—	锻焊	压力对接焊
	放热反应	—	—	—	热剂焊	—	—
电阻热	感应电阻热	—	—	—	—	感应高频焊	感应对接焊
	直接电阻热	—	—	—	电渣焊	闪光焊、高频电阻焊、凸焊	点焊、缝焊、对焊
电弧热	熔化极	—	熔化极惰性气体保护焊	熔化极CO ₂ 气体保护焊	焊条电弧焊、埋弧焊	光焊丝电弧焊、螺柱电弧焊、火花放电焊、冲击电弧焊	—
	非熔化极	—	钨极惰性气体保护焊	—	—	碳弧焊	—
放射能	电磁	—	激光焊	—	—	—	—
	电子束焊	—	—	—	—	—	—

表 1.1-5 焊接方法分类 (二元坐标法)

两材料结 合时状态	焊接过程 中手段	焊接方 法类型	电弧热			电阻热					高能束		化学反应热		机械能		间接加热									
			涂料(焊剂)保护			气体保护			熔渣 电阻	固体电阻			电子束	激光束	火焰	热剂	炸 药		传 热 介 质							
										工频		高频								接触式	感应式	接触式	感应式			
液相	熔化不 加压力	基本型	焊条 电弧 焊	埋弧 焊	—	—	钨极氩 弧焊	等离 子 弧焊	熔化极 气体保 护焊	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—							
		堆焊 电弧 堆焊	埋弧 堆焊	水下 电弧 焊	碳弧 气刨	钨极氩 弧堆焊	等离 子 弧堆焊	管状焊 丝电弧 堆焊	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—								
	熔化加 压力	基本型	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—							
		变型应 用	—	—	电 能 储 能 焊	电 弧 螺 柱 焊	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—							
固相	加压力 不熔化	—	—	—	—	—	—	—	—	—	电 阻 对 焊	电 阻 扩 散 焊	电 阻 对 焊	感 应 高 频 对 焊	电 阻 对 焊	—	超 声 波 焊	摩 擦 焊	爆 炸 焊	—	冷 压 焊	—	扩 散 焊	—		
	加压力 熔 化	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
固相兼 液相	—	基本型 钎焊	—	—	—	—	—	—	—	—	电 阻 钎 焊	—	—	高 频 感 应 钎 焊	—	—	电 子 束 钎 焊	—	—	—	—	—	—	—	浸 沾 钎 焊	—
	—	变型热 喷涂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	扩 散 钎 焊	—

表 1.1-6 常用焊接方法的适用范围

焊接方法		材料		接头形式			板厚			焊件种类											费用	
		钢铁	有色金属	对接	T形接头	搭接	薄板	厚板	超厚板	建筑	机械	车辆	桥梁	船舶	压力容器	核反应堆	汽车	飞机	家用电器	设备费用	焊接经费	
熔焊	焊条电弧焊	A	B	A	A	A	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	少	少	
	螺柱焊	A	C	C	A	D	C	A	B	A	A	A	B	A	B	B	B	C	B	中	少	
	埋弧焊	A	B	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	B	C	C	中	少	
	MAG焊	A	D	A	A	A	C	A	B	A	A	A	A	A	A	B	B	C	B	中	少	
	MIG焊	B	A	A	A	A	C	A	A	B	B	B	C	B	B	A	A	A	A	少	中	
	TIG焊	B	A	A	A	A	A	B	C	B	B	B	C	B	B	A	A	A	A	少	中	
	气焊	A	B	A	A	A	A	B	D	C	C	C	C	C	D	D	B	B	B	少	中	
	铝热焊	A	D	A	A	B	D	C	A	C	B	C	C	D	C	D	D	D	D	少	中	
	电子束焊	A	A	A	A	B	A	B	B	D	D	D	D	B	B	B	C	B	C	多	中	
压焊	电渣焊	A	D	A	A	B	D	C	A	C	B	C	C	B	B	B	D	D	D	多	少	
	气压焊	A	D	A	B	C	C	A	C	B	C	C	C	C	C	D	C	C	D	中	少	
	点焊	A	A	D	C	A	A	C	D	C	C	B	C	C	C	C	A	A	A	多	中	
	缝焊	A	B	D	D	A	A	C	D	D	C	B	C	C	D	C	A	A	A	多	中	
	凸焊	A	B	C	C	A	A	C	D	D	D	C	D	D	D	D	B	B	A	多	中	
	锻焊	A	C	A	C	D	C	A	C	C	C	C	D	C	D	C	B	C	C	中	少	
	闪光对焊	A	B	A	C	D	C	A	C	B	B	B	C	B	C	B	A	A	B	多	少	
	冷压焊	B	B	C	C	A	A	C	D	D	C	D	D	C	D	C	C	C	B	中	少	
	超声波焊	A	A	D	C	A	A	C	D	D	C	D	D	D	D	C	B	B	B	中	少	
钎焊		A	B	C	C	A	A	B	D	D	C	D	D	C	D	B	B	B	B	少	中	

注：A—最佳；B—佳；C—差；D—极差。

表 1.1-7 常用焊接方法所适用的接头形式及焊接位置

适用条件		焊条电弧焊	埋弧焊	电渣焊	熔化极气体保护焊				氩弧焊	等离子弧焊	气电立焊	电阻点焊	缝焊	凸焊	闪光对焊	气焊	扩散焊	摩擦焊	电子束焊	激光焊	钎焊
					喷射过渡	潜弧	脉冲喷射	短路过渡													
接头形式	对接	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	A	A	A	A	A	A	C
	搭接	A	A	B	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	C	A	A	C	B	A	A
	角接	A	A	B	A	A	A	A	A	A	B	C	C	C	C	A	C	C	A	A	C
焊接位置	平焊	A	A	C	A	A	A	A	A	A	C					A			A	A	
	立焊	A	C	A	B	C	A	A	A	A	A					A			C	A	
	仰焊	A	C	C	C	C	A	A	A	A	C					A			C	A	
	全位置	A	C	C	C	C	A	A	A	A	C					A			C	A	
设备成本		低	中	高	中	中	中	中	低	高	高	高	高	高	高	低	高	高	高	高	低
焊接成本		低	低	低	中	低	中	低	中	中	低	中	中	中	中	中	高	低	高	中	中

注：A—好；B—可用；C—一般不用。

表 1.1-8 各种常用金属材料适用的焊接方法

母 材	焊接方法								
	焊条电 弧焊	钨极氩 弧焊	等离子 弧焊	埋弧焊	熔化极气体 保护焊	药芯焊丝 电弧焊	电渣焊	电子 束焊	氧乙 炔焊
铝	C	A	A	No	A	No	Exp	B	B
黄铜	No	C	C	No	C	No	No	A	A
青铜	A	A	B	No	A	No	No	A	B
纯铜	C	A	A	No	A	No	No	A	A
铜镍合金	B	A	A	No	A	No	No	A	A
灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁	A	B	B	No	B	B	No	A	A
熟铁	A	B	B	A	A	A	No	A	A
铅	No	B	B	No	No	No	No	No	A
镁	No	A	B	No	A	No	No	No	No
因康镍合金	A	A	A	No	A	No	No	A	B
蒙乃尔合金	A	A	A	C	A	No	No	A	A
镍	A	A	A	C	A	No	No	A	A
镍银合金	No	C	C	No	C	No	No	A	B
贵金属	No	A	A	No	Exp	No	No	A	B
合金钢	A	A	A	B	A	A	A	A	A
低合金钢	A	A	A	A	A	A	A	A	A
中碳钢和高碳钢	A	A	A	B	A	A	A	A	A
低碳钢	A	A	A	A	A	A	A	A	A
不锈钢	A	A	A	A	A	B	A	A	C
工具钢	A	A	A	No	C	No	No	A	A
钛	No	A	A	Exp	A	No	No	No	No
钨	No	B	A	No	No	No	No	No	No
镁	No	C	C	No	No	No	No	No	C

注：A—推荐使用或焊接性好；B—可用，但非最佳选择，或焊接时需采取一定的处理措施；C—可用，但很少选用，或焊接性不好；No—不推荐使用或焊接性极差；Exp—试验中。

表 1.1-9 ~ 表 1.1-12 为各种电弧焊接方法、焊接 作方式下的人-机关系。
性及应用范围的比较。表 1.1-13 给出了不同焊接操

表 1.1-9 电弧焊方法比较

焊接方法		焊条电弧焊			CO ₂ 气体保护焊			钨极氩弧焊		熔化极氩弧焊			埋弧焊		等离子弧焊		
焊接设备		交、直流弧焊机			CO ₂ 半自动焊机			TIG 焊机		MIG 焊机			埋弧焊机		等离子弧焊机		
焊件材质及板厚		低碳钢、高强度钢、不锈钢、特种钢、铜合金 1.6mm 以上			低碳钢、高强度钢、特种钢 1.6mm 以上			低碳钢、不锈钢、特种钢和铝、铜、钛及其合金 0.5mm 以上		高强度钢、特种钢 3.2mm 以上			低碳钢、不锈钢 6mm 以上		低碳钢、高强度钢、不锈钢和钛、铜合金 0.2mm 以上		
焊接位置		平焊、立焊、横焊、仰焊			平焊、立焊、横焊、仰焊			平焊、立焊、仰焊		平焊、立焊			平焊		平焊、立焊		
典型焊接实例 (平焊)	板厚/mm	3.2	9	25	3.2	9	25	1.6	3.2	3.2	9	25	9	25	1.6	3.2	9
	坡口形式	I	V	X	I	V	X	I	V	I	V	X	V	X	I	I	I
	焊接电流/A	100	170	300	120	320	450	80	130	120	350	400	800	800 ~ 1200	80	95	200
	焊接速度/(m/h)	6	2.5	5.5	3.6	6.5	20	5	6.7	4.7	7.2	22.3	3.6	13.8	2	2.5	4

(续)

焊接方法	焊条电弧焊	CO ₂ 气体保护焊	钨极氩弧焊	熔化极氩弧焊	埋弧焊	等离子弧焊
焊接设备	交、直流电弧焊机	CO ₂ 半自动焊机	TIG 焊机	MIG 焊机	埋弧焊机	等离子弧焊机
操作范围	焊钳和焊机间距 50m 以下	焊炬与送丝装置间距 3m; 送丝装置与焊机间距 25m 以下	焊枪与焊机间距 4 ~ 8m	焊枪与送丝装置间距 3m; 送丝装置与焊机间距 25m 以下	焊接小车与焊机间距 25m 以下	焊枪与焊机间距 5 ~ 10m
与交流焊机的价格比	直流焊机为 3 ~ 4	5 ~ 7	4 ~ 6	8 ~ 10	20 ~ 30	10 ~ 20
焊接材料	焊条	CO ₂ 焊用焊丝、CO ₂ 气体	焊丝、氩气	MIG 焊用焊丝、氩气	焊丝、焊剂	氩气、焊丝
焊道外观	良	稍差	良	良	良	良
受风的影响	小	大	大	大	小	大
受焊工操作技术的影响	大	中	大	中	小	小
焊接辅具	焊钳	导电嘴、喷嘴	喷嘴、钨极	导电嘴、喷嘴	导电嘴	喷嘴、钨极
备注	灵活性高, 既能焊薄板, 也能焊厚板 效率低	薄板、厚板均适用 效率高	适于一切金属的焊接 质量好, 效率低	主要适于有色金属 效率高	适于直焊缝和环焊缝, 要求坡口精度高 效率高	适于直焊缝或环焊缝; 要求坡口精度高

表 1.1-10 MIG 焊、CO₂ 气体保护焊、TIG 焊的比较

焊接方法		MIG 焊		CO ₂ 气体保护焊			TIG 焊	
电源		无脉冲	有脉冲	无脉冲	无脉冲	有脉冲	无脉冲	有脉冲
焊丝		实心焊丝	实心焊丝	实心焊丝	药芯焊丝	实心焊丝	实心焊丝	
保护气体		Ar (Ar + CO ₂ 、Ar + O ₂)		CO ₂	CO ₂ + Ar		Ar	
工艺性能	全位置焊	稍差	佳	差	佳	佳	最佳	
	单面焊	佳	佳	稍差	较佳	较佳	佳	
	电弧稳定性	良	良	稍差	良	良	佳	
	飞溅量	粒小且少	几乎没有	粒大、较多	粒小、较少	粒小、较少	无	
	脱渣性	良	良	差	良	较差	无渣	
	焊丝送给	良	良	良	较差	良	良	
	电弧声音	柔和	柔和	较大	稍柔和	稍柔和	非常柔和	
焊接质量	烟尘量		少	少	较多	多	较少	
	外观	焊波	细	细而匀	粗	较粗	较粗	细而匀
		余高	平	平	凸	稍凸	稍凸	平
	内部	熔深	稍浅	稍浅	深	稍深	稍深	浅
		抗气孔性	稍差	稍差	良	良	良	良
效率	抗裂性		良	良	良	较差	良	良
	焊接电流范围/A		200 ~ 350	200 ~ 300	200 ~ 350	200 ~ 350	200 ~ 300	150 ~ 300
	熔敷率/(g/min)		60 ~ 140	60 ~ 110	60 ~ 140	60 ~ 140	60 ~ 110	—
	熔敷效率(%)		96 ~ 99	96 ~ 99	90 ~ 95	85 ~ 90	90 ~ 95	100
适用材料	熔渣去除		易	易	稍难	较易	较易	(无熔渣)
	碳钢		佳	佳	最佳	最佳	厚板: 佳 薄板: 最佳	佳
	高强度钢		最佳	最佳	较差	较差	较差	佳
	不锈钢		佳	佳	差	差	差	最佳
	有色金属		佳	佳	差	差	差	最佳

(续)

焊接方法		MIG 焊		CO ₂ 气体保护焊			TIG 焊	
电源		无脉冲	有脉冲	无脉冲	无脉冲	有脉冲	无脉冲	有脉冲
焊丝		实心焊丝	实心焊丝	实心焊丝	药芯焊丝	实心焊丝	实心焊丝	
保护气体		Ar(Ar + CO ₂ 、Ar + O ₂)		CO ₂	CO ₂ + Ar		Ar	
评价	高精度自动化	佳	最佳	较差	差	佳	最佳	
	质量	佳	最佳	稍差	稍差	稍差	最佳	
	效率	厚板	最高	高	最高	最高	高	低
		薄板	高	最高	高	较低	高	低
适合 焊件 类型	造船、桥梁	佳	差	最佳	最佳	佳	差	
	生产机械、车辆	佳	佳	佳	差	最佳	差	
	压力容器	最佳	最佳	差	差	差	佳	
	原子能配管	佳	佳	差	差	差	最佳	
	飞机、潜水艇	差	差	差	差	差	最佳	

表 1.1-11 MIG 焊、TIG 焊焊接性能比较

焊接方法		MIG 焊				TIG 焊		
		大电 流焊接	短路过渡焊接	脉冲焊		大电 流焊接	脉冲焊	
				高频	低频		高频	低频
焊接材料	焊丝	实心焊丝				实心焊丝		
	保护气体	Ar + CO ₂ 、Ar + O ₂				Ar		
焊接设备	电源特性	平特性		平特性 陡降特性	平特性	陡降特性		
	脉冲频率	—		50Hz、100Hz	≤2Hz	—	10 ~ 25kHz	0.5 ~ 10Hz
	送丝方式	等速送进		高、低速送进		等速送进	等速或变速送进	
焊接位置		平焊、横焊、 横角焊	全位置焊			平焊、立焊	全位置焊	
焊接性能	焊缝金属性能	良好				极好		
	X 射线检测性能	良好	单层良好， 多层差	良好		良好		
	焊道形状	焊波细、 焊道平	焊波细， 呈凸状	焊波细、焊道平		焊波细而匀		
	熔深	稍深呈指状	浅	可控		可控		

(续)

焊接方法		MIG 焊				TIG 焊		
		大电流焊接	短路过渡焊接	脉冲焊		大电流焊接	脉冲焊	
				高频	低频		高频	低频
焊接性能	电弧稳定性	良好				良好		
	飞溅	基本没有	少且粒小	基本没有		基本没有		
	熔滴过渡	喷射过渡	短路过渡	脉冲喷射过渡	喷射过渡 短路过渡	搭桥过渡		
	接头精度	要求高	要求低	要求较高		要求高		
特点		工艺性好,熔深大,焊接接头性能良好	可控制焊接热输入,可焊薄板和全位置焊接	可控制焊接热输入,可进行中厚板全位置焊接		工艺性好,焊道外观好,接头性能良好	可控制焊接热输入,可焊接薄板和进行全位置焊接	

表 1.1-12 几种气体保护焊接方法的应用及特点

焊接方法	焊接位置	被焊材料	板厚	特点
CO ₂ 短路过渡焊	全位置	低碳钢和低合金结构钢	薄板和中厚板	生产率较低(每分钟熔化焊丝 20g 左右),飞溅较大,焊接厚板时易产生夹渣和未焊透
TIG 焊	全位置	碳钢、低合金钢、合金钢和铝、镁、铜、钛及其合金等	薄板和中厚板,也可以焊厚板	生产率较低(每分钟熔化焊丝 10g 左右),无飞溅。焊厚板时为增加熔透能力,可加 1% 的 H ₂
脉冲 TIG 焊	全位置	碳钢、低合金钢、合金钢和铝、镁、铜、钛及其合金等	薄板和中厚板,也可以焊厚板	生产率较低(每分钟熔化焊丝 10g 左右),无飞溅。尤其适于根部焊道,单面焊双面成形
MIG 焊(包括混合气体)射流过渡	射流过渡只能用于平焊。采用细丝时,也可用于立焊和横焊	碳钢、低合金钢、合金钢和铝、镁、铜、钛及其合金等	中、厚板	生产率高(每分钟熔化焊丝 30g 左右),适于填充焊道。电弧稳定,飞溅小
混合气体保护短路过渡焊 (Ar + CO ₂ 40% ~ 50%)	全位置	低碳钢和低合金钢	可以焊 30mm 以下的板材	生产率较高(每分钟熔化焊丝 25g 左右),焊接电流可达 160 ~ 180A 左右,电弧稳定,飞溅小,熔深较大
脉冲 MIG 焊(氩或富氩气体)	全位置	低碳钢、低合金钢、不锈钢和铝、镁、铜、钛及其合金等	薄板和中厚板,也可以焊厚板	生产率较低(每分钟熔化焊丝 20g 左右),焊接电流可达 120 ~ 160A,电弧稳定,飞溅小

注：表中百分数为气体的体积分数。

表 1.1-13 不同焊接操作方式下的人-机关系

操作方式 操作功能	焊条电弧焊 (闭环)	半自动焊 (闭环)	机械化焊接 (闭环)	自动焊 (开环)	机器人焊接 (开环或闭环)	自适应焊接 (闭环)
引弧、维弧和弧长调节	焊工	焊机	焊机	焊机	焊机	焊机
焊丝/焊条的送进及指向	焊工	焊机	焊机	焊机	焊机	焊机
调节电弧以控制熔池行为	焊工	焊工	焊机	焊机	不装或装有传感器的焊机(机器人)	装有传感器的焊机
沿焊接方向移动电弧	焊工	焊工	焊机	沿着预定的路径	不装或装有传感器的焊机(机器人)	装有传感器的焊机
焊缝跟踪	焊工	焊工	焊接操作人员	沿着预定的路径	不装或装有传感器的焊机(机器人)	装有传感器的焊机
校正电弧以克服偏差	焊工	焊工	焊接操作人员	不校正,因此可能会有焊缝缺陷	装有传感器的焊机(机器人)	装有传感器的焊机

1.2 焊接方法与热源特征

1.2.1 常用焊接方法的热源特性

各种焊接热源的主要特性见表 1.2-1; 表 1.2-2 和表 1.2-3 分别给出不同焊接方法的电弧热效率 η 和常用电弧焊接方法的有效功率因数。常用焊接热源的功率密度和热量消耗如图 1.2-1 所示, 图 1.2-2 比较了常用焊接热源的热输入。

表 1.2-1 各种焊接热源的主要特性

热 源	最小加热面积/ m^2	最大功率密度/ (kW/cm^2)	正常焊接条件下温度/ K
氧乙炔焰	10^{-6}	2×10^4	3473
金属极电弧	10^{-7}	10^5	6000
钨极氩弧	10^{-7}	1.5×10^5	8000
埋弧焊	10^{-7}	2×10^5	6400
电渣焊	10^{-6}	10^5	2300
熔化极氩弧和 CO_2 气体保护电弧	10^{-8}	$10^5 \sim 10^6$	—
等离子弧	10^{-9}	1.5×10^6	18000 ~ 24000
电子束	10^{-11}	$10^8 \sim 10^{10}$	—
激光束	10^{-12}	$10^8 \sim 10^{10}$	—

表 1.2-2 不同焊接方法的电弧热效率 η

焊接方法	碳弧焊	厚皮焊条电弧焊	埋弧焊	电渣焊	电子束焊及激光焊	钨极氩弧焊		熔化氩弧焊	
						交流	直流	钢	铝
热效率 η (%)	0.5 ~ 0.65	0.77 ~ 0.87	0.77 ~ 0.90	0.83	> 0.9	0.68 ~ 0.85	0.78 ~ 0.85	0.66 ~ 0.69	0.7 ~ 0.85

表 1.2-3 常用电弧焊方法的有效功率因数

电弧焊方法	直流焊条电弧焊	交流焊条电弧焊	埋弧焊	CO_2 气体保护焊	钨极氩弧焊	熔化极氩弧焊
有效功率因数 (%)	0.75 ~ 0.85	0.65 ~ 0.75	0.80 ~ 0.90	0.75 ~ 0.90	0.65 ~ 0.75	0.70 ~ 0.80