

中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证系列培训教材

焊工技术丛书

航空弧焊技术

HANGKONG HUHAN JISHU

张学军 郭绍庆 张文扬 主编

- ◆ 金属材料基本知识
- ◆ 热处理基本知识
- ◆ 焊接基本知识
- ◆ 焊接材料
- ◆ 航空材料焊接性
- ◆ 弧焊工艺
- ◆ 焊接应力和变形
- ◆ 焊接缺陷和质量检验



航空工业出版社

中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证系列培训教材

焊工技术丛书

航空弧焊技术

张学军 郭绍庆 张文扬 主编

航空工业出版社

内 容 提 要

本书以航空材料及其弧焊技术为对象,重点论述航空材料焊接性、焊接工艺、焊接材料、缺陷及质量检验,以及弧焊原理、设备、热处理等基本知识。全书共计11章,包括弧焊方法及在航空工业中的应用、金属材料基本知识、热处理基本知识、焊接基本知识、焊接电源及工装、焊接材料、航空材料的焊接性、弧焊工艺、焊接应力和变形、焊接缺陷及质量检验、弧焊安全知识和安全操作技术。

本书适用于航空工业焊工技能培训和资格鉴定,也可作为焊接技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空弧焊技术/张学军,郭绍庆,张文扬主编. --
北京:航空工业出版社,2014.5
ISBN 978-7-5165-0369-0

I. ①航… II. ①张… ②郭… ③张… III. ①航空材料—焊接工艺 IV. ①V261.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第083797号

航空弧焊技术

Hangkong Huhan Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84934379 010-84936343

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2014年5月第1版

2014年5月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:21

字数:552千字

印数:1—3000

定价:90.00元

编审委员会

主 任：李 伟

副主任：李 莉 陶春虎

委 员：于 浩 王宇魁 王 斌 尹泰伟 史亦韦

叶 勇 闫秀芬 刘昌奎 刘晓燕 刘 嘉

吕 健 何玉怀 何 军 张田仓 张学军

李秀芬 张世林 李 泽 李 剑 杨国腾

杨胜春 杨春晟 张银东 金冬岩 欧阳小琴

苗蓉丽 季 忠 武振林 胡成江 侯丽华

郭广平 郭子静 徐友良 章菊华 黄玉光

熊 瑛

编审委员会秘书处

主 任：宋晓辉

成 员：马 瑞 马文利 任学冬 李 彦 李 轩

张文扬 周静怡 赵 梦 盖依冰 焦泽辉

谢文博 程 琴

序 言

公元前 2025 年的汉莫拉比法典，就提出了对制造有缺陷产品的工匠给予严厉的处罚，当然，这在今天以人为本的文明世界看来是不能予以实施的。即使在当时，汉莫拉比法典在总体上也并没有得到真正有效的实施，其主要原因在于没有理化检测及评定的技术和方法来评价产品的质量以及责任的归属。从公元前 2025 年到工业革命前，对产品质量问题处罚的重要特征是以产品质量造成的后果和负责人为对象的，而对产品制造过程和产品质量的辨识只能靠零星、分散、宏观的经验世代相传。由于理化检测和评估技术的极度落后，汉莫拉比法典并没有解决如何判别造成质量问题 and 失效的具体原因的问题。

近代工业革命给人类带来了巨大物质文明，也不可避免地给人类带来了前所未有的灾难。约在 160 多年前，人们首先遇到了越来越多的蒸汽锅炉爆炸事件，在分析这些失效事故的经验教训中，英国于 1862 年建立了世界上第一个蒸汽锅炉监察局，把理化检测和失效分析作为仲裁事故的法律手段和提高产品质量的技术手段。随后在工业化国家中，对产品进行检测和分析的机构相继出现。材料和结构的检测开始受到重视则是近半个世纪的事情。第二次世界大战及后来发生的大量事故与故障，推动了力学、无损、物理、化学和失效分析的快速发展，如断裂力学、损伤力学等新兴学科的诞生以及扫描电镜、透射电镜、无损检测、化学分析等大量的先进分析设备等的应用。

勿容置疑，产品的质量可靠性要从设计入手。但就设计而言，损伤容限设计思想的实施就需要由无损检测和设计用力学性能作为保证，产品从设计开始就应考虑结构和产品的可检性，需要大量的材料性能数据作为设计输入的重要依据。

就材料的研制而言，首先要检测材料的化学成分和微观组织是否符合材料的设计要求，性能是否达到最初的基本设想，而化学成分、组织结构与性能之间的协调关系更是研制高性能材料的基础，对于材料中可能存在的缺陷更需要无损检测的识别并通过力学损伤的研究提供判别标准。

就构件制造而言，一个复杂或大型结构需要通过焊接来实现，要求在结构设计时就对材料可焊性和工艺可实施性进行评估，使选材具有可焊性、焊接结构具有可实施性、焊接接头缺陷具有可检测性，焊接操作者具有相应的技能水平，这样才能获得性能可靠的构件。

检测和焊接技术在材料的工程应用中的作用更加重要。失效分析作为服役行为和对材料研制的反馈作用已被广泛认识，材料成熟度中也已经考

虑了材料失效模式是否明确；完善的力学性能是损伤容限设计的基础，材料的可焊性、无损检测和失效模式不仅是损伤容限设计的保证，也是产品安全和可靠使用的保证。

因此，理化检测作为对材料的物理化学特性进行测量和表征的科学，焊接作为构件制造的重要方法，在现代军工产品质量控制中具有非常重要的地位和作用，是武器装备发展的重要基础技术。理化检测和焊接技术涉及的范围极其广泛，理论性与实践性并重，在军工产品制造和质量控制中发挥着越来越重要的作用。近年来，随着国防工业的快速发展，材料和产品的复杂程度日益提高，对产品安全性的保证要求越来越严格；同时，理化检测和焊接新技术日新月异，先进的检测和焊接设备大量应用，对理化检测和焊接从业人员的知识、技能水平和实践经验都提出了更高的要求。

为贯彻《军工产品质量管理条例》和国家军用标准《理化试验质量控制规范》，提高理化检测及焊接人员的技术水平，加强理化实验室的科学管理和航空产品及科研质量控制，中国航空工业集团公司（简称中航工业）成立了“中国航空工业集团公司检测及焊接人员资格认证管理中心”，下设物理冶金、分析化学、材料力学性能、非金属材料性能、无损检测、失效分析和焊工7个专业人员资格鉴定委员会，负责组织中航工业理化检测和焊接人员的专业培训、考核与资格证的发放工作。为指导培训和考核工作的开展，中国航空工业集团公司检测及焊接人员资格认证管理中心组织有关专家编写了中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证系列培训教材。

这套教材由长期从事该项工作的专家结合航空工业的理化检测和焊接技术的需求和特点精心编写而成，包括了上述7个专业的培训内容。教材全面、系统地体现了航空工业对各级理化检测和焊接人员的要求，力求重点突出，强调实用性而又注意保持教材的系统性。

这套教材的编写得到了中航工业质量安全部领导的大力支持和帮助，也得到了行业内多家单位的支持和协助，在此一并表示感谢。

中国航空工业集团公司
检测及焊接人员资格认证管理中心
2013年11月

前 言

弧焊是焊接方法中特性相似的一类方法的总称,是均以电弧作为热源的熔焊方法。电弧作为焊接热源开始于1885年,历经一百多年的发展和完善,逐渐形成了现代弧焊方法体系。在航空工业,弧焊是制造航空结构件的重要技术方法,采用弧焊方法制造的结构遍布飞机和发动机。弧焊以手工操作为主,灵活方便、适应性强、成本低,但焊接质量取决于焊工的技能水平,可以说当材料和方法确定后,产品质量就由焊工来决定了。

中航工业焊接人员资格鉴定委员会(本文简称鉴委会)是“中国航空工业集团公司检测及焊接人员资格认证管理中心”下属的7个专业人员资格鉴定委员会之一,其主要任务是依据HB 5299.1《航空工业焊接操作人员资格鉴定与认证第1部分:手工熔焊》、HB 5299.2《航空工业焊接操作人员资格鉴定与认证第2部分:电子束焊与激光焊》、HB 5299.3《航空工业焊接操作人员资格鉴定与认证第3部分:钎焊》标准,对航空焊接人员进行技术培训和资格考核。

鉴委会成立于1985年,28年来为中航工业培训并考核了近2万名焊工和焊工主考员。为了对焊工进行系统培训,提高焊工理论知识水平,1985年鉴委会秘书处组织委员和厂、所专家编写了《焊工培训知识》,后于1989年由北京航空材料研究院和航天科技集团公司703所负责对此教材进行了修改。为适应航空系统焊接技术发展的需要,2000年鉴委会秘书处再次组织专家对该教材内容和结构作了修改,在原《焊工基础知识》上进行了补充和完善,并汇集了各单位在焊工培训考核方面的经验,修订形成了在用的《焊工培训教材》和《焊工理论知识试题》。根据焊工培训需要,2008年鉴委会又组织编写了《航空钎焊技术》和《金相腐蚀技术》教材。在中航工业焊接人员培训工作中,这些教材发挥了重要的作用。

根据先进飞机和发动机的发展需要,航空结构材料向轻质、高强度、损伤容限、耐高温方向发展。这给焊接带来的影响是:在被焊材料方面,焊接性能不佳,获得综合力学性能良好的焊接接头较困难;在焊接工艺方面,焊接参数窗口窄,需要严格控制规范,同时需进行合理的焊前、焊后处理。因此,新型材料和结构的应用,对焊接操作人员特别是手工焊接操作人员,提出了新的更高的要求——需要准确把握新型材料的焊接特性,掌握焊接工艺和焊接操作技术,根据规范精心操作,这样才能获得满足要求的焊接接头。因此,鉴委会根据新型航空材料和焊接技术发展的需要,在原有教材的基础上,组织行业内的技术专家编写

了本书。

《航空弧焊技术》保留了在用《焊工培训教材》的基本结构和基本内容，同时参考其他行业焊工培训教材内容，增加近十多年新型航空结构材料焊接技术和焊接材料，重点阐述航空材料的焊接性、组织和性能、焊接工艺、焊接操作技术和焊接材料，使本书既适用于航空工业焊工技能培训，也可作为焊接技术人员的参考书。

本书由张学军、郭绍庆、张文扬编写。其中第1章、第6章、第8章、第9章、第10章、第11章由张学军编写；第7章由郭绍庆编写；第2章、第3章、第4章、第5章由张文扬编写。全书由张学军统稿，熊华平审稿。

本书引用了《锅炉压力容器焊接技术培训教材》、《焊工取证上岗培训教材》第2版、《焊接手册》第3版等著作中的部分图、表，在此对其编者表示感谢。

本书在编写过程中，北京航空材料研究院贾红、孙钊完成了部分插图的扫描和绘图工作，同时得到了第五届鉴委会委员和航空企业的大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，水平有限，书中难免有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

2013年10月

目 录

第1章 弧焊方法及在航空工业中的应用	(1)
1.1 弧焊基本方法	(1)
1.2 弧焊在航空领域的应用和发展趋势	(6)
第2章 金属材料基本知识	(11)
2.1 基本概念	(11)
2.1.1 金属及其合金	(11)
2.1.2 组元、组织、相及相变	(11)
2.1.3 固溶体、金属化合物及机械混合物	(11)
2.1.4 晶粒、晶界、晶粒度、金属再结晶	(12)
2.1.5 组织	(12)
2.1.6 金属材料的性能	(14)
2.1.7 金属材料的工艺性能	(17)
2.2 航空金属结构材料的分类、化学成分和力学性能	(18)
2.2.1 结构钢	(18)
2.2.2 不锈钢	(28)
2.2.3 高温合金	(34)
2.2.4 钛及钛合金	(39)
2.2.5 铝及铝合金	(46)
2.2.6 镁合金	(51)
2.2.7 铜及铜合金	(53)
第3章 热处理基本知识	(55)
3.1 航空热处理工艺分类	(55)
3.2 钢的热处理	(55)
3.2.1 淬火	(55)
3.2.2 回火	(55)
3.2.3 退火	(56)
3.2.4 正火	(57)
3.3 高温合金热处理	(57)
3.3.1 固溶处理	(58)
3.3.2 中间处理	(59)
3.3.3 时效处理	(59)
3.3.4 高温合金的退火热处理	(59)
3.4 铝合金热处理	(60)
3.4.1 变形铝合金退火	(60)
3.4.2 变形铝合金固溶	(61)

3.4.3	变形铝合金时效	(62)
3.4.4	变形铝合金的其他热处理	(63)
3.4.5	变形铝合金加工及热处理状态标记	(64)
3.4.6	铸造铝合金热处理	(64)
3.4.7	铝合金热处理缺陷	(64)
3.5	钛合金热处理	(65)
3.5.1	去应力退火	(65)
3.5.2	完全退火	(66)
3.5.3	等温退火和双重退火	(66)
3.5.4	固溶和时效	(67)
3.5.5	钛合金的形变热处理	(67)
3.5.6	钛合金热处理应注意的问题	(67)
第 4 章	焊接基本知识	(68)
4.1	焊接热过程	(68)
4.1.1	焊接热过程的特点	(68)
4.1.2	电弧及产生电弧的条件	(68)
4.1.3	焊接电弧产生过程及电弧的构造	(69)
4.1.4	焊接电弧偏吹	(69)
4.1.5	焊接温度场	(70)
4.1.6	焊接热循环	(71)
4.1.7	焊接热效率及焊接线能量	(71)
4.2	焊接冶金过程	(72)
4.2.1	焊接冶金过程及其特点	(72)
4.2.2	金属熔化及熔滴过渡	(73)
4.2.3	焊接区气体与金属的作用	(74)
4.2.4	保护焊缝金属的途径	(75)
第 5 章	焊接电源及工装	(76)
5.1	焊接电源	(76)
5.1.1	弧焊电源的分类和基本要求	(76)
5.1.2	弧焊电源特性和电弧特性	(77)
5.1.3	焊机负载持续率和许用焊接电流	(78)
5.1.4	常用的弧焊电源	(78)
5.1.5	弧焊电源的选择	(81)
5.1.6	弧焊电源的正确使用	(81)
5.1.7	弧焊电源常见故障及排除	(81)
5.1.8	弧焊用工具及辅助工具	(83)
5.2	钨极氩弧焊设备	(83)
5.2.1	钨极氩弧焊设备的组成	(83)
5.2.2	钨极氩弧焊对电源的要求	(83)
5.2.3	钨极氩弧焊焊枪	(84)
5.2.4	氩弧焊的气路系统	(85)
5.3	等离子弧焊及切割设备	(86)

5.3.1 等离子弧焊设备	(86)
5.3.2 等离子弧切割设备	(87)
5.4 CO ₂ 气体保护焊设备	(88)
5.5 气焊(氧乙炔焊)设备及工具	(89)
5.6 焊接工艺装备及工装夹具	(90)
5.6.1 焊接工艺装备	(90)
5.6.2 焊接工装夹具	(92)
第6章 焊接材料	(95)
6.1 焊接材料分类	(95)
6.2 焊条	(95)
6.2.1 焊条的组成	(95)
6.2.2 焊条的分类	(97)
6.2.3 焊条牌号和型号	(98)
6.2.4 焊条工艺性能	(103)
6.2.5 航空焊条	(106)
6.2.6 焊条的使用和保管	(109)
6.3 焊丝	(111)
6.3.1 药芯焊丝	(111)
6.3.2 实心焊丝	(114)
6.4 焊剂	(120)
6.4.1 焊剂分类	(120)
6.4.2 焊剂的作用和要求	(120)
6.5 焊接用气体和钨极	(121)
6.5.1 焊接用气体	(121)
6.5.2 焊接用钨极	(123)
第7章 航空材料的焊接性	(125)
7.1 焊接性	(125)
7.1.1 焊接性的定义	(125)
7.1.2 影响焊接性的因素	(125)
7.1.3 焊接性试验内容	(125)
7.1.4 焊接性的评定方法	(125)
7.2 结构钢的焊接	(128)
7.2.1 低碳钢的焊接特性及其工艺要点	(128)
7.2.2 低合金贝氏体高强度钢焊接特性及其工艺要点	(128)
7.2.3 低合金调质高强度钢焊接特性及其工艺要点	(129)
7.2.4 低合金超高强度钢焊接特性及其工艺要点	(130)
7.2.5 低碳高合金二次硬化超高强度钢焊接特性及其工艺要点	(132)
7.2.6 高强度铸钢的焊接	(142)
7.3 不锈钢的焊接	(142)
7.3.1 奥氏体不锈钢的焊接特性及工艺要点	(142)
7.3.2 铁素体不锈钢的焊接特性及工艺要点	(146)
7.3.3 马氏体不锈钢的焊接特性及工艺要点	(147)

7.3.4	奥氏体—铁素体不锈钢的焊接	(152)
7.3.5	沉淀硬化不锈钢的焊接	(152)
7.4	高温合金的焊接	(157)
7.4.1	高温合金的焊接性	(157)
7.4.2	镍基高温合金的焊接	(158)
7.4.3	铁基高温合金的焊接	(161)
7.4.4	钴基高温合金的焊接	(164)
7.4.5	铸造高温合金的焊接	(165)
7.5	钛及钛合金的焊接	(165)
7.5.1	钛及钛合金的焊接特性	(165)
7.5.2	钛及钛合金的氩弧焊工艺要点	(166)
7.5.3	不同种类钛及钛合金的焊接	(167)
7.6	铝合金的焊接	(188)
7.6.1	铝合金的分类及焊接性	(188)
7.6.2	铝合金的焊接特点	(188)
7.6.3	铝合金的焊前清理	(189)
7.6.4	铝及铝合金焊前化学清洗方法	(189)
7.6.5	防锈铝合金的焊接	(189)
7.6.6	硬铝合金的焊接	(194)
7.6.7	锻铝合金的焊接	(197)
7.6.8	铝锂合金的焊接	(198)
7.6.9	铸造铝合金的焊接	(213)
7.7	镁合金的焊接	(214)
7.7.1	镁合金焊接的特点	(214)
7.7.2	变形镁合金的焊接	(214)
7.7.3	铸造镁合金的焊接	(215)
7.8	金属间化合物的焊接	(216)
7.8.1	钛铝金属间化合物	(216)
7.8.2	镍铝金属间化合物	(217)
7.9	铜及铜合金的焊接	(218)
7.9.1	铜及铜合金的焊接特点	(218)
7.9.2	铜及铜合金的焊接工艺要点	(219)
7.9.3	紫铜的焊接	(219)
7.9.4	黄铜的焊接	(220)
7.9.5	青铜的补焊	(220)
7.10	铸钢及铸铁的补焊	(220)
7.10.1	铸钢的补焊	(220)
7.10.2	铸铁的补焊	(221)
第8章	弧焊工艺	(223)
8.1	焊条电弧焊工艺	(223)
8.1.1	焊前准备	(223)
8.1.2	焊接操作	(227)
8.1.3	焊条电弧焊常见缺陷及防止措施	(236)

8.2 钨极氩弧焊工艺	(237)
8.2.1 焊前准备	(237)
8.2.2 焊接操作	(244)
8.2.3 钨极氩弧焊常见缺陷及防止措施	(255)
8.3 CO ₂ 气体保护焊工艺	(255)
8.3.1 焊前准备	(255)
8.3.2 焊接操作	(259)
8.3.3 CO ₂ 气体保护焊常见缺陷及防止措施	(264)
8.4 气焊工艺	(264)
8.4.1 焊前准备	(264)
8.4.2 焊接操作	(267)
8.4.3 气焊常见缺陷及防止措施	(270)
8.5 焊后热处理	(270)
8.5.1 结构钢焊件焊后热处理	(271)
8.5.2 不锈钢焊件焊后热处理	(271)
8.5.3 高温合金焊件焊后热处理	(273)
8.5.4 铝合金焊件焊后热处理	(274)
8.5.5 钛合金焊件焊后热处理	(274)
第9章 焊接应力和变形	(276)
9.1 焊接应力和变形产生的原因	(276)
9.2 焊接应力和控制	(276)
9.2.1 焊接残余应力的分布	(277)
9.2.2 焊接残余应力的影响	(278)
9.2.3 焊接残余应力控制和消除	(279)
9.3 焊接变形和控制	(281)
9.3.1 焊接变形分类	(281)
9.3.2 焊接变形的控制	(282)
9.3.3 焊接变形的消除	(283)
第10章 焊接缺陷和质量检验	(284)
10.1 焊接缺陷分类	(284)
10.2 焊接裂纹	(292)
10.2.1 热裂纹	(292)
10.2.2 再热裂纹	(295)
10.2.3 冷裂纹	(295)
10.2.4 层状撕裂	(296)
10.3 焊接气孔	(297)
10.3.1 析出型气孔和反应型气孔	(297)
10.3.2 焊接气孔的预防措施	(298)
10.4 其他焊接缺陷	(298)
10.4.1 固体夹杂	(298)
10.4.2 未熔合和未焊透	(299)
10.4.3 形状缺陷	(299)

10.5 焊接检验	(300)
10.5.1 破坏性检验	(300)
10.5.2 非破坏性检验	(303)
第11章 焊接安全知识和安全操作技术	(307)
11.1 焊接过程中的有害和危险因素	(307)
11.2 安全防护和事故预防	(310)
11.3 安全操作	(311)
参考文献	(317)

第 1 章 弧焊方法及在航空工业中的应用

1.1 弧焊基本方法

利用电弧作为热源的熔焊方法即电弧焊，简称弧焊。电弧作为焊接热源开始于 1885 年，当时出现了碳弧焊，1892 年发现了金属极电弧，电弧焊开始真正应用于工业生产；20 世纪初相继发明了薄药皮焊条和厚药皮焊条，出现了焊条电弧焊；1935 年发明了埋弧焊，大大提高了焊接效率；20 世纪 40 年代初，惰性气体保护电弧焊在生产中开始应用；1953 年出现了 CO_2 气体保护焊，1957 年出现了等离子弧焊。至此，现代工业应用的电弧焊基本方法都已出现，未来电弧焊将主要向自动化、智能化、高效率、节能、环保方向发展。

电弧焊基本焊接方法包括：焊条电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、 CO_2 气体保护焊、等离子弧焊、埋弧焊。

(1) 焊条电弧焊

焊条电弧焊是用手工操纵焊条进行焊接的电弧焊方法。手工焊条电弧焊在各种焊接方法中占有重要位置，同其他弧焊方法相比，焊条电弧焊具有设备简单、操作灵活方便、适用范围广的特点，特别适合批量小、形状复杂、不规则焊缝焊接生产。另外，可以通过药皮过渡对焊缝金属进行合金化，可根据需要设计成不同特性的焊条，如耐磨堆焊、耐热焊条等。因此，在航空、船舶、石油、化工、建筑、兵器、矿山机械等行业焊条电弧焊被广泛应用。焊条电弧焊的主要不足是：手工操作，劳动强度大；频繁更换焊条，大批量生产时效率较低；焊接烟尘污染较大；焊接质量受操作人员技能水平影响大；容易产生焊接缺陷。常用的焊条有碳钢、低合金钢、耐热钢、不锈钢、镍基合金、铸铁、堆焊焊条等，铜合金、铝合金焊条应用较少。

(2) 钨极氩弧焊

钨极氩弧焊是使用纯钨或钍钨、铈钨作为电极，以氩气作为保护气体的电弧焊方法，也称 TIG 焊。同焊条电弧焊、 CO_2 气体保护焊相比，钨极氩弧焊焊接过程外界污染少，焊缝金属纯净度高，特别是扩散氢含量低；焊接过程稳定，无熔渣、熔滴过渡，无焊接飞溅；焊缝成形美观；焊接气孔、夹渣缺陷少；可自动连续送进焊丝焊接，易于实现焊接自动化。钨极氩弧焊设备相对简单，容易操作，适用范围广，采用手工操作时，可以实现复杂焊缝焊接。钨极氩弧焊对焊前清理要求严格，需要去除油、锈和其他污物，否则易产生气孔。另外，钨极氩弧焊熔深较浅，熔覆速度较低，钍钨极有放射性。由于钨极氩弧焊焊缝金属纯净度高，接头综合性能好，特别适合钛合金、铝合金、镁合金、镍合金等有色金属焊接。

(3) 熔化极氩弧焊

熔化极氩弧焊是在钨极氩弧焊基础上发展形成的，是以连续送进的焊丝作为电极，以氩气或富氩混合气体作为保护气体的电弧焊方法。以 Ar 、 $\text{Ar} + \text{He}$ 作为保护气的也称熔化极惰性气体保护焊，简称 MIG 焊；以 $\text{Ar} + \text{O}_2$ 、 $\text{Ar} + \text{CO}_2$ 、 $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ 作为保护气的亦称

熔化极活性气体保护焊，简称 MAG 焊。与钨极氩弧焊相比，熔化极氩弧焊焊接熔深大，熔覆效率高；与 CO₂ 气体保护焊相比，焊接电弧稳定，熔滴过渡稳定，焊接飞溅少，焊缝成形美观，气孔、夹渣缺陷少，焊缝综合力学性能好。熔化极氩弧焊同钨极氩弧焊一样，对焊前清理要求严格，需要去除油、除锈和去除其他污物，否则易产生气孔。焊接结构钢时，通常选择 MAG 焊；焊接不锈钢、高合金钢时，可选择 MAG 焊，但保护气氛中 O₂ 要尽量低；焊接高温合金以及钛合金、铝合金、镁合金、镍合金等有色金属时，应选择 MIG 焊。

(4) CO₂ 气体保护焊

即以连续送进的焊丝作为电极，以 CO₂ 气体作为保护气的电弧焊方法。与焊条电弧焊相比，CO₂ 气体保护焊为半自动或自动化焊接，焊接效率高；焊接材料为实芯焊丝或药芯焊丝，焊接热能主要用来熔化金属，耗能低；焊后焊缝表面形成的熔渣少，易于清理。与熔化极氩弧焊相比，采用更便宜的 CO₂ 气体保护，成本较低。另外，采用半自动 CO₂ 焊，操作灵活方便，适合批量小、形状复杂、不规则焊缝焊接生产。与其他焊接方法相比，CO₂ 气体保护焊的缺点是焊接飞溅大，焊后清理工作量大，焊缝成形不够美观。CO₂ 气体保护焊适合焊接碳钢、低合金钢，不易焊接不锈钢、高温合金，不能焊接钛合金、铝合金、镁合金、镍合金等有色金属。

(5) 等离子弧焊

等离子弧是一种压缩电弧，是通过等离子弧焊炬，使钨极氩弧受到水冷铜喷嘴孔道的机械压缩、冷却等离子气的热压缩、弧柱截面变细和电流密度增大而引起的较强的电磁压缩，造成钨极氩弧弧柱显著变细，电流密度增加，能量密度增大，电弧温度急剧上升，电弧介质电离度剧增，形成等离子弧。与钨极氩弧焊相比，等离子弧焊电弧温度高，能量密度大，挺直度好，穿透力强；焊缝深宽比大，焊接热影响区小；小电流时，电弧稳定，适合焊接薄壁零件；钨极内缩在喷嘴内，不产生焊缝夹钨缺陷。等离子弧焊可用于焊接多种合金，焊接接头综合力学性能好。

(6) 埋弧焊

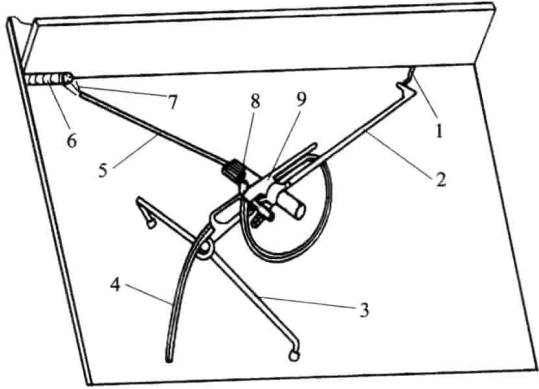
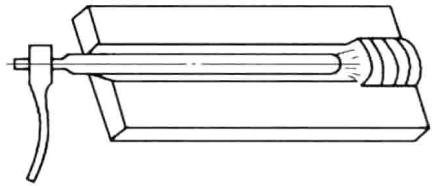
埋弧焊是以连续送进的焊丝或焊带作为电极，以覆盖在电弧周围颗粒状焊剂及其熔渣作为保护介质的电弧焊方法。与手工埋弧焊、CO₂ 气体保护焊相比，埋弧焊电弧和熔池完全被焊剂和熔渣覆盖，保护效果好，焊接过程稳定，焊缝质量好。埋弧焊是一种自动化焊接方法，并且可以采用大电流、填加大规格焊丝或焊带焊接，在电弧焊中焊接生产率最高。另外，埋弧焊可以实现大熔深，采用不开坡口或小开坡口焊接，节约焊接材料；焊接飞溅少，无弧光照射，焊工劳动条件好。由于埋弧焊过程要使用颗粒状焊剂，适宜平焊，其他位置焊接需要设计专用装置；适合中厚板、长焊缝焊接，不适合薄板焊接；主要用于碳钢、低合金钢、耐热钢、不锈钢焊接，不能用于铝合金、钛合金等有色金属焊接。

此外，电弧焊基本方法中还有原子氢焊，属于被淘汰焊接方法，不再赘述。

(7) 弧焊衍生方法

上面论述的是电弧焊基本焊接方法。随着工业发展，新材料、新结构的不断涌现，焊接难度越来越大，对焊接接头综合力学性能、缺陷、焊接变形、焊接效率、环境保护等也提出更高要求，因此在长期生产实践中，在上述基本方法的基础上，发展形成了一些衍生焊接方法。表 1-1 是电弧焊基本方法和衍生方法及其特点。

表 1-1 电弧焊基本方法和衍生方法及其特点

基本方法	衍生方法	特点
焊条电弧焊	连续焊条电弧焊	将药皮焊条制成可连续送进的盘圆状, 焊接过程实现连续送进焊条, 可进行手工和自动化焊接, 焊接生产率高
	重力焊	重力焊是高效铁粉焊条和重力焊机架相结合的一种半机械化焊接方法。焊条装在可沿滑轨向下滑动的焊条夹钳上, 并使焊条头抵在始焊处, 接通焊接电源后, 利用焊条头上涂有的专门引弧剂自动引弧, 随着焊条的熔化, 焊条夹钳在重力作用下沿着滑轨以固定角度沿着焊接方向下滑动, 形成焊缝。重力焊主要用于焊接碳钢、低合金钢的水平角焊缝和对接焊缝焊接, 生产效率高, 劳动强度低。见右图  重力焊示意图 1—定位棒; 2—滑轨; 3—支架; 4—电缆; 5—焊条; 6—焊缝; 7—电弧; 8—焊条夹钳; 9—滑块
	躺焊	躺焊是将焊条躺置在接缝上, 从一端引弧而焊条自动连续熔化焊接的一种电弧焊方法。躺焊焊缝表面光滑均匀, 可用于狭窄不便于施焊处及小截面短焊缝焊接。见右图  躺焊示意图
钨极氩弧焊	活性剂钨极氩弧焊 (A-TIG 焊)	在被焊工件焊接区域正面或背面涂覆一层活性焊剂或填加活性剂药芯焊丝, 然后进行 TIG 焊接。与普通钨极氩弧焊相比, 显著增加熔深。正面涂覆焊剂, 钛合金不开坡口, 一次可焊透 6mm, 铝合金熔深可以提高 7 倍; 背面涂覆焊剂, 可以显著改善铝合金焊缝背面成形和增加熔深; 采用钛合金药芯焊丝, 一次可焊透 12mm
	高频脉冲钨极氩弧焊	电流脉冲频率高于 10kHz。电弧受高频磁场压缩, 电弧稳定, 热量集中。焊缝宽度窄, 焊接质量好, 适合薄壁精密件焊接
	管—管钨极氩弧焊	被焊管道固定不动, 焊枪在专用焊接机头上围绕环焊缝作 360° 空间旋转, 进行全位置焊接。焊接机头包括焊枪、氩气导管、送丝机、电动机、传动齿轮、导电环、电缆等。主要用于不能翻转的管—管对接