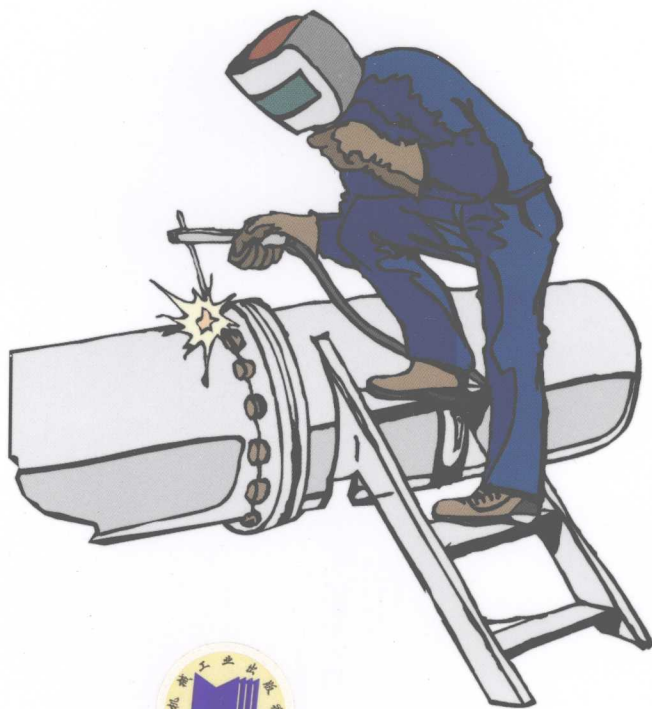




职业教育“十一五”规划教材
焊接专业“双证制”教学改革用书

金属材料焊接工艺

李荣雪 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠 电子教案
www.cmpedu.com

职业教育“十一五”规划教材
焊接专业“双证制”教学改革用书

金属材料焊接工艺

主 编 李荣雪
参 编 李令义 许志安
徐双钱 王现荣
主 审 支道光



机械工业出版社

本书主要讲授常用金属材料的焊接性, 以及如何根据金属材料的焊接性选择焊接方法、焊接材料、预热、后热及其他焊接工艺措施等。全书共分七个单元, 包括金属材料焊接性及分析试验方法、非合金钢(碳素钢)及其焊接工艺、合金结构钢及其焊接工艺、不锈钢及其焊接工艺、耐热钢及其焊接工艺、铸铁及其焊接工艺和非铁金属材料(有色金属)及其焊接工艺。

本教材内容旨在突出职业教育特点, 理论知识深度适宜, 注重工程实用性; 论述中以实际应用为着眼点, 不作纯学术理论的探讨; 在编写上考虑了教学规律与教学实践方面的要求; 编写模式新颖, 将需要掌握的知识点进行分解, 按单元、综合知识模块、能力知识点分层次编写, 每单元开始部分安排有“学习目标”, 单元末安排有“综合训练”, 并兼顾了焊工考证的考点内容, 以满足“双证制”教学需要。为便于教学, 书末有部分综合训练答案, 另外本书还配备了电子教案, 选用本书作为教材的教师可登录 www.cmpedu.com 注册下载, 或联系责任编辑(010-88379182)。

本书可作为高等职业教育及各类成人教育焊接专业教材或培训用书, 也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料焊接工艺/李荣雪主编. —北京: 机械工业出版社, 2008. 1
职业教育“十一五”规划教材. 焊接专业“双证制”教学改革用书
ISBN 978-7-111-23348-0

I. 金… II. 李… III. 金属材料-焊接工艺-专业学校-教材
IV. TG457.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第025969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: 崔占军 齐志刚 责任编辑: 齐志刚 董连仁
责任校对: 李秋荣 封面设计: 姚毅 责任印制: 杨曦
北京机工印刷厂印刷

2008年3月第1版第1次印刷
184mm×260mm·12.75印张·314千字
0 001—4 000册
标准书号: ISBN 978-7-111-23348-0
定价: 20.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379182
封面无防伪标均为盗版

前 言

为了进一步贯彻《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》的文件精神，加强职业教育教材建设，满足职业院校深化教学改革对教材建设的要求，机械工业出版社于2006年11月在北京召开了“职业教育焊接专业教材建设研讨会”。在会上，来自全国十多所院校的焊接专业专家、一线骨干教师研讨了在新的职业教育形势下焊接专业的课程体系，确定了面向中职、高职层次两个系列教材的编写计划。本书是根据会议所确定的教学大纲和高等职业教育培养目标组织编写的。

本书主要讲授常用金属材料的焊接性，以及如何根据金属材料的焊接性选择焊接方法、焊接材料、预热、后热及其他焊接工艺措施等。本书重点强调培养学生编写常用金属材料焊接工艺的能力，内容力求体现“宽、精、应用”的特色。基础理论以应用为目的，以够用为度，教学内容选择宽而精，加强针对性与应用性。本教材根据培养目标的要求，结合学生的年龄特点，编写模式新颖，将需要掌握的知识点进行分解，按单元、综合知识模块、能力知识点分层次编写。每单元开始部分安排有“学习目标”，单元末安排有“综合训练”，并兼顾了焊工考证的考点，以满足“双证制”教学需要。

本书在内容处理上主要有以下突出特点：①以常用金属材料的六大类别作为六个独立单元；②每个单元按照相同的模式安排内容，即按金属材料的种类及性能→焊接性→焊接工艺要点→典型钢种的焊接工艺，以便于教师的“教”和学生的“学”；③在教材内容选择上注重理论的成熟性，工艺的先进性和应用性，不强调知识的系统性。

全书共七个单元，李荣雪编写绪论、第二、三单元，李令义编写第一单元，许志安编写第四、五单元，徐双钱编写第六单元，王现荣编写第七单元。全书由李荣雪主编，支道光教授主审。为便于教学，书末有部分综合训练答案，另外，本书还配备了电子教案，选用本书作为教材的教师可索取，联系电话010-88379182。

在编写过程中，作者参阅了国内外出版的有关教材和资料，得到了有关专家和同行的有益指导，在此一并表示衷心感谢！

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	综合知识模块四	高碳钢的焊接	27
绪论	能力知识点 1	高碳钢的成分特点与焊接性	27
第一单元 金属材料焊接性及试验	能力知识点 2	高碳钢的焊接工艺要点	27
方法	能力知识点 3	典型高碳钢零件的焊接工艺	27
综合知识模块一	金属材料焊接性		4
能力知识点 1	金属材料焊接性的概念		4
能力知识点 2	金属材料焊接性的影响因素		5
综合知识模块二	金属材料焊接性的评定内容与试验方法		7
能力知识点 1	金属材料焊接性评定的内容		8
能力知识点 2	金属材料焊接性试验方法种类		8
综合知识模块三	金属材料焊接性的评定与试验		9
能力知识点 1	金属材料焊接性的分析与评定方法		9
能力知识点 2	金属材料焊接性试验方法		12
综合训练			18
第二单元 非合金钢（碳素钢）及其焊接工艺			20
综合知识模块一	钢材分类与非合金钢		20
能力知识点 1	钢材分类		20
能力知识点 2	非合金钢		21
综合知识模块二	低碳钢的焊接		21
能力知识点 1	低碳钢的成分特点与焊接性		21
能力知识点 2	低碳钢的焊接工艺要点		22
能力知识点 3	低碳钢的特殊焊接工艺		23
综合知识模块三	中碳钢的焊接		24
能力知识点 1	中碳钢的成分特点与焊接性		24
能力知识点 2	中碳钢的焊接工艺要点		25
能力知识点 3	典型中碳钢零件的焊接工艺		26
	综合训练		29
	第三单元 合金结构钢及其焊接工艺		30
	综合知识模块一	合金结构钢的种类、性能与用途	30
	能力知识点 1	合金结构钢的分类与用途	30
	能力知识点 2	合金结构钢的成分与性能	32
	综合知识模块二	热轧及正火钢的焊接	33
	能力知识点 1	热轧及正火钢的成分和性能	33
	能力知识点 2	热轧及正火钢的焊接性	36
	能力知识点 3	热轧及正火钢的焊接工艺要点	37
	能力知识点 4	典型钢种 Q345 的焊接工艺	41
	综合知识模块三	低碳调质钢的焊接	42
	能力知识点 1	低碳调质钢的成分与性能	43
	能力知识点 2	低碳调质钢的焊接性	44
	能力知识点 3	低碳调质钢的焊接工艺要点	46
	能力知识点 4	典型钢种 WCF62 的焊接工艺	49
	综合知识模块四	中碳调质钢的焊接	50
	能力知识点 1	中碳调质钢的成分与性能	50
	能力知识点 2	中碳调质钢的焊接性	52
	能力知识点 3	中碳调质钢的焊接工艺	

要点	53	能力知识点 3 低、中合金耐热钢的焊接	
综合知识模块五 低温钢的焊接	56	工艺要点	97
能力知识点 1 低温钢的分类、成分与		能力知识点 4 典型耐热钢的焊接	
性能	57	实例	100
能力知识点 2 低温钢的焊接性	59	综合知识模块三 高合金耐热钢的焊接	103
能力知识点 3 低温钢的焊接工艺要点	60	能力知识点 1 高合金耐热钢的焊接	
能力知识点 4 典型低温钢的焊接工艺	61	性	103
综合训练	61	能力知识点 2 高合金耐热钢的焊接工	
第四单元 不锈钢及其焊接工艺	64	艺要点	105
综合知识模块一 不锈钢的类型与性能	64	能力知识点 3 高合金耐热钢的焊接	
能力知识点 1 不锈钢的类型	64	实例	109
能力知识点 2 不锈钢的性能	67	综合知识模块四 珠光体钢与奥氏体不锈钢	
综合知识模块二 奥氏体不锈钢的焊接	69	的焊接	110
能力知识点 1 奥氏体不锈钢的焊接性	69	能力知识点 1 珠光体钢与奥氏体不锈钢	
能力知识点 2 奥氏体不锈钢的焊接工		的焊接性	111
要点	74	能力知识点 2 珠光体钢与奥氏体不锈钢	
能力知识点 3 双相不锈钢的焊接性及焊		的焊接工艺要点	116
接工艺要点	78	能力知识点 3 复合钢板的焊接特点	117
能力知识点 4 典型钢种 18-8 型不锈钢		能力知识点 4 焊接工程实例	120
的焊接工艺	81	综合训练	123
综合知识模块三 铁素体不锈钢的焊接	81	第六单元 铸铁及其焊接工艺	125
能力知识点 1 铁素体不锈钢的焊接性	81	综合知识模块一 铸铁的类型与性能	125
能力知识点 2 铁素体不锈钢的焊接工		能力知识点 1 铸铁的种类及成分	
要点	83	特点	125
能力知识点 3 典型铁素体不锈钢的焊接		能力知识点 2 铸铁的组织及性能	126
工艺	84	综合知识模块二 灰铸铁的焊接	128
综合知识模块四 马氏体不锈钢的焊接	86	能力知识点 1 灰铸铁的焊接性	128
能力知识点 1 马氏体不锈钢的焊接性	86	能力知识点 2 灰铸铁的焊接工	
能力知识点 2 马氏体不锈钢的焊接工		要点	132
要点	87	综合知识模块三 球墨铸铁的焊接	142
能力知识点 3 马氏体不锈钢焊接实例	89	能力知识点 1 球墨铸铁的焊接性	142
综合训练	89	能力知识点 2 球墨铸铁的焊接工	
第五单元 耐热钢及其焊接工艺	92	要点	142
综合知识模块一 耐热钢的类型与性能	92	综合训练	144
能力知识点 1 耐热钢的类型	92	第七单元 非铁金属材料及其焊接	
能力知识点 2 耐热钢的性能	92	工艺	146
能力知识点 3 对耐热钢焊接接头性能的		综合知识模块一 铝及铝合金的焊接	146
基本要求	93	能力知识点 1 铝及铝合金的类型及性能	
综合知识模块二 低、中合金耐热钢的		特点	146
焊接	94	能力知识点 2 铝及铝合金的焊接性	150
能力知识点 1 低合金耐热钢的成分与		能力知识点 3 铝及铝合金的焊接工	
性能特点	94	要点	157
能力知识点 2 低合金耐热钢的焊接性	96		

综合知识模块二 铜及铜合金的焊接	164
能力知识点1 铜及铜合金的类型及性能特点	164
能力知识点2 铜及铜合金的焊接性	166
能力知识点3 铜及铜合金的焊接工艺要点	168
综合知识模块三 钛及钛合金的焊接	175
能力知识点1 钛及钛合金的类型及性能特点	175

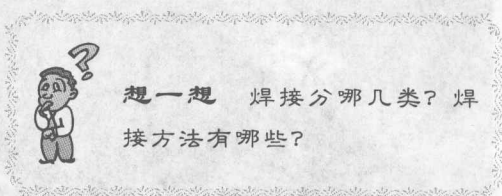
能力知识点2 钛及钛合金的焊接性	177
能力知识点3 钛及钛合金的焊接工艺要点	178
综合训练	182
附录	183
附录A 焊条标准	183
附录B 部分综合训练参考答案	194
参考文献	196

绪 论

1. 焊接技术的发展及应用

焊接作为金属加工方法已发展成一门独立的学科,焊接新技术新工艺的不断成熟与发展使其应用越来越广泛。在机械制造、航空航天、石油化工、能源、交通、建筑、冶金等领域广泛使用的金属结构都属于焊接结构,在加工过程中都离不开焊接。一些发达国家利用焊接加工的钢材量已经超过钢产量的一半。大量的铝、铜、钛等非铁金属的结构也是用焊接方法制造的。随着科学技术的发展和使用要求的日益提高,具有特殊性能的新型结构材料不断涌现,对焊接技术的要求也越来越高,因此材料的焊接性,特别是金属材料的焊接性,也越来越受到密切关注。

现代焊接技术是从 19 世纪 80 年代末发展起来的,至今不过百余年。焊接技术的发展依托于科学技术的进步,而焊接加工的优越性使之成为在各种装备制造中必不可少的手段。目前用于生产的焊接方法已超过 50 种。除常规的电弧焊方法



外,电阻焊、电渣焊、电子束焊、激光焊、等离子弧焊等焊接方法的使用,使现代化的大型设备能够大量采用焊接结构,如大型高压容器与储罐、大吨位运输船舶、核电站、水力及火力发电站、超音速飞机等的制造中都采用了焊接技术;焊接技术还用于电子元件、火箭、宇宙飞船等尖端精密产品的制造中。近年来的大型焊接结构及焊接技术在尖端精密产品中的应用见图 0-1。

随着焊接产品使用要求的不断提高,需要采用一些具有特殊性能的结构材料,如高强度钢、超高强度钢、耐热耐蚀钢、难熔合金、非铁金属及其合金、活性金属、异种金属及复合材料等,因此对焊接技术提出了更高的要求;反过来也促进了焊接技术与焊接工艺的发展,促进了焊接生产的机械化和自动化,如焊接机器人、自动焊接生产线在我国制造业中应用也越来越广泛。

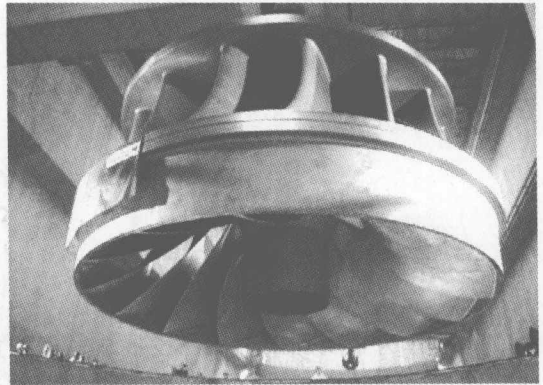
2. 本课程的主要内容

《金属材料焊接工艺》论述的对象是各种金属材料的焊接性,以及根据其焊接性特点制订合理的焊接工艺。主要内容如下:

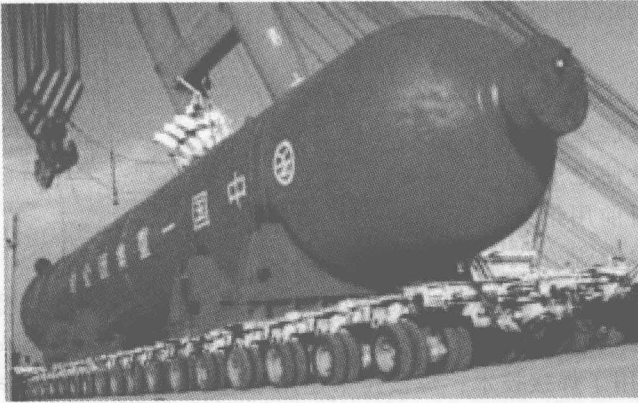
- 1) 金属材料的焊接性及其评定和试验方法。
- 2) 常用焊接结构金属材料的焊接性特点及其焊接工艺要点。常用金属材料主要包括非合金钢、低合金钢、不锈钢、耐热钢、铝及其合金、铜及其合金、钛及其合金等。
- 3) 铸铁的补焊。



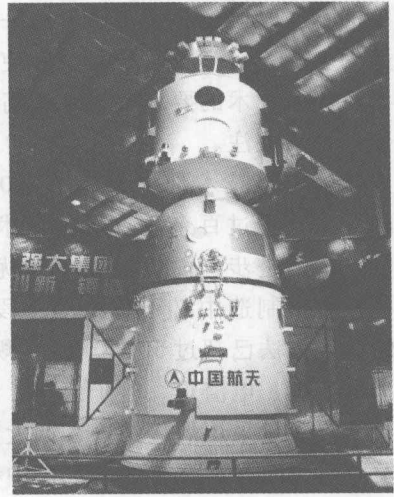
a)



b)



c)



d)

图 0-1 焊接技术在大型结构及尖端精密产品中的应用

a) 国家主体育场“鸟巢” b) 三峡水轮机转轮

c) 大型热壁加氢反应器 d) 神州三号

本课程的教学目标如下：

1) 掌握常用金属材料的焊接性特点，熟悉其在焊接过程中易产生的问题及解决问题的途径和方法。

2) 掌握金属材料焊接性的概念，熟悉常用金属焊接性的试验方法、特点及选用原则，能够根据金属材料的化学成分进行焊接性分析及常规的工艺试验。

3) 能够根据给定的金属材料，正确选择焊接方法、焊接材料，并制订合理的焊接工艺。

使用本教材应掌握如下原则：

1) 注重理论与实践的结合。影响焊接接头质量的因素非常复杂，同一种材料，在采用不同的焊接工艺或用于不同的产品时，出现的问题可能不一样，焊接性的表现也可能不同，因此分析问题时一定要结合具体的焊接生产条件和使用要求。

2) 学会多方面知识的融会贯通。本课程应在掌握“金属学与热处理”、“金属熔焊原



理”和“焊接方法与设备”等课程知识的基础上进行学习。“金属材料焊接工艺”所涉及的知识 and 实际问题非常广泛，只有将多方面的知识综合运用，才能提高分析问题和解决问题的能力。

3) 掌握唯物辩证法分析问题的原则。焊接条件下各种变化过程存在诸多影响因素，要在众多因素中找到起主要作用的因素，抓住解决问题的关键所在，从而使问题易于解决。

本书在编写过程中，参考了国内外有关焊接工程方面的书籍、文献、标准、规范、规程、手册、教材、讲义、论文、报告、专利、软件、数据库、网络资源等，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，参考了国内外有关焊接工程方面的书籍、文献、标准、规范、规程、手册、教材、讲义、论文、报告、专利、软件、数据库、网络资源等，在此表示衷心的感谢。

金属材料焊接工艺 第一章 绪论

金属材料焊接工艺 第一章 绪论

金属材料焊接工艺是金属材料加工的重要手段，也是金属材料加工的重要组成部分。本书在编写过程中，参考了国内外有关焊接工程方面的书籍、文献、标准、规范、规程、手册、教材、讲义、论文、报告、专利、软件、数据库、网络资源等，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，参考了国内外有关焊接工程方面的书籍、文献、标准、规范、规程、手册、教材、讲义、论文、报告、专利、软件、数据库、网络资源等，在此表示衷心的感谢。



金属材料焊接工艺是金属材料加工的重要手段，也是金属材料加工的重要组成部分。本书在编写过程中，参考了国内外有关焊接工程方面的书籍、文献、标准、规范、规程、手册、教材、讲义、论文、报告、专利、软件、数据库、网络资源等，在此表示衷心的感谢。

第一单元 金属材料焊接性及试验方法

【学习目标】 本单元主要讲述金属材料焊接性及其影响因素、焊接性试验方法及应用。

通过本单元学习，掌握金属材料焊接性的概念及其影响因素，了解金属材料焊接性的试验方法及应用，学会根据材料的化学成分来判断其焊接性。

用作焊接结构的金属材料在焊接时要经受加热、熔化、冶金反应、冷却结晶、固态相变等一系列复杂的变化过程。这些过程又是在温度、成分和应力极不平衡的条件下进行的，有可能在焊接区造成各种缺陷，或者使金属的性能下降而不能满足使用要求，因此金属材料的焊接性是一项很重要的性能指标，更是选择焊接方法和制订正确焊接工艺的依据。实践证明，不同的金属材料获得优质焊接接头的难易程度不同，或者说各种金属材料对焊接加工的适应性不同。这种适应性就是通常所说的金属材料焊接性。

综合知识模块一 金属材料焊接性

能力知识点 1

金属材料焊接性的概念

金属材料焊接性根据 GB/T3375—1994《焊接术语》的定义为：“金属材料在限定的施工条件下焊接成规定设计要求的构件，并满足预定服役要求的能力”。根据上述定义，优质的焊接接头应具备两个条件：一是接头中不允许存在超过质量标准规定的缺陷；二是要具有预期的使用性能。换句话说，就是金属材料焊接性是指金属材料对焊接加工的适应性，它包括工艺焊接性和使用焊接性。

1. 工艺焊接性

工艺焊接性是指金属材料对各种焊接方法的适应能力，也就是在一定的焊接工艺条件下能否获得符合要求的优质焊接接头的的能力。它不是金属材料本身所固有的性能，但取决于金属的成分和性能，并且随着焊接方法、焊接材料和工艺措施的发展而变化，某些原来不能焊接或不易焊接的金属材料，可能会变得能够或者易于焊接。



想一想 金属材料本身固有的性能有哪些？这些性能可以改变吗？



对于熔焊，在焊接过程中金属要经过热过程和冶金反应。热过程主要影响接头热影响区的组织和性能；而冶金反应主要影响的是焊缝金属的组织和性能，因而又把工艺焊接性划分为热焊接性和冶金焊接性。热焊接性是指焊接热循环对热影响区组织性能的影响程度，它主要与母材材质和焊接工艺条件有关；冶金焊接性是指冶金反应对焊缝金属性能和产生缺陷的影响程度，它与高温下的熔池金属与气相、熔渣等相之间发生的一系列的氧化、还原、气体溶解等冶金反应有关，主要评定母材对气孔、夹渣、裂纹等冶金缺陷的敏感性。

2. 使用焊接性

使用焊接性是指焊接接头或整体结构满足技术条件中所规定的使用性能的能力。它取决于焊接结构所满足的技术条件规定的各种性能，通常包括常规力学性能（强度、硬度、塑性、韧性）和低温韧性、断裂性能、高温强度、疲劳极限、持久强度、耐腐蚀性和耐磨性等。

能力知识点 2

金属材料焊接性的影响因素

焊接性是金属材料对焊接加工的适应性，影响因素很多，一般归纳为材料、工艺、结构和使用条件四个因素。

1. 材料因素

材料因素是指焊接时参与冶金反应和发生组织变化的所有材料（包括母材和焊接材料），例如焊条电弧焊的焊条、埋弧焊的焊丝和焊剂、气体保护焊的焊丝和保护气等，在焊接所形成的熔池中发生一系列的冶金反应，决定着焊缝金属的成分、组织、性能及缺陷的形成。如果焊接材料选择不当，与母材不匹配，则会造成焊缝成分不合格、力学性能和其他使用性能降低，甚至导致产生裂纹、气孔、夹渣等焊接缺陷，也就是使工艺焊接性变差，因此正确选用母材和焊接材料是保证良好焊接性的重要因素。

2. 工艺因素

对同一母材而言，当采用不同焊接方法和工艺措施时会表现不同的焊接性。例如，铝及其合金由于对氧敏感而不能用二氧化碳气体保护焊焊接，但用氩弧焊可以获得良好的接头质量；钛合金对氧、氮、氢极为敏感，不宜采用气焊和焊条电弧焊，但用氩弧焊或真空电子束焊就比较容易焊接；奥氏体不锈钢，为保证接头耐蚀性的要求可以采用焊条电弧焊和氩弧焊，但不可以采用电渣焊焊接。

焊接方法对焊接性的影响主要表现在两个方面：一是热源特点（能量密度、温度和热输入），直接影响焊接热循环的主要参数，从而影响接头的组织和性能；二是保护方式（渣保护、气保护、气-渣联合保护、真空保护等），直接影响冶金过程，从而影响焊缝金属的质量和性能。例如对过热比较敏感的高强度钢，可以采用窄间隙气体保护焊和等离子弧焊等，以防过热，从而改善其焊接性。

工艺措施对防止焊接接头产生缺陷、提高使用性能有着重要影响。常用的工艺措施是焊前预热、缓冷、焊后热处理和合理安排焊接顺序等，这些措施对防止热影响区淬硬、减小焊接应力、防止焊接裂纹等是非常有效的。

3. 结构因素



结构因素主要是指结构设计形式和焊接接头形式。它主要影响应力的分布状态，进而影响焊接性。例如结构形状、尺寸、板厚、接头形式、坡口形式、焊缝布置及截面形状等都是影响焊接性的结构因素。在结构设计时应使焊接接头处的应力处于较小状态，焊接时能够自由收缩，避免接头处的缺口、截面突变、余高过大、交叉焊缝等，这样有利于减小应力集中，防止产生焊接裂纹。

4. 使用条件

焊接结构的使用条件是多种多样的，例如工作温度高低、工作介质的性质、承受载荷的类别和环境状况等都属于使用条件。材料在高温下的蠕变、低温下的脆性断裂、腐蚀介质的腐蚀性等，都对焊接接头质量有更高的要求。也就是说，使用条件越苛刻，金属材料焊接性就越不容易得到保证。

总之，金属材料焊接性与材料、工艺、结构和使用条件密切相关，任何情况下都不能脱离这些因素而简单地认为某种材料的焊接性好或不好，也不能只用一个指标来概括材料的焊接性。常用金属材料焊接难易程度见表 1-1，常用金属材料焊接中易出现的问题见表 1-2。

表 1-1 常用金属材料焊接难易程度

金属及合金		焊条 电弧焊	埋弧焊	CO ₂ 气体 保护焊	氩弧焊	电渣焊	电子 束焊	气焊	电阻焊
非合 金钢	低碳钢	A	A	A	B	A	A	A	A
	中碳钢	A	A	A	B	B	A	A	A
	高碳钢	A	B	B	B	B	A	A	D
铸铁	灰铸铁	A	D	A	D	B	D	B	D
低合 金钢	锰钢	A	A	A	B	B	A	B	D
	铬钒钢	A	A	A	B	B	A	B	D
不锈钢	马氏体不锈钢	A	A	B	A	C	A	B	C
	铁素体不锈钢	A	A	B	A	C	A	B	A
	奥氏体不锈钢	A	A	A	A	C	A	B	A
非铁 金属 材料	纯铝	B	D	D	A	D	A	B	A
	非热处理强化 铝合金	B	D	D	A	D	A	B	A
	热处理强化 铝合金	B	D	D	A	D	A	B	A
	镁合金	D	D	D	A	D	B	C	A
	钛合金	D	D	D	A	D	A	D	A
	铜合金	B	D	C	A	D	B	B	C

注：A—通常采用，B—有时采用，C—很少采用，D—不采用。



表 1-2 常用金属材料焊接中易出现的问题

材料	可能出现的问题	
	工艺方面	使用方面
低碳钢	厚板的刚性拘束裂纹 (热应力裂纹)	1) 板厚方向塑性降低 2) 板厚方向缺口韧性低, 疲劳极限降低
中、高碳钢	1) 焊道下裂纹 2) 热影响区硬化	
低合金钢 (热轧及正火钢)	1) 焊道下裂纹 2) 热影响区硬化	1) 焊缝区塑性低 2) 抗拉强度低, 疲劳极限低 3) 容易引起脆性破坏 4) 钢板的异向性大
低合金高强度钢 (调质钢)	1) 焊缝金属冷裂纹 2) 热影响区软化 3) 厚板焊道下裂纹 4) 热影响区硬化裂纹	1) 焊缝区塑性低 2) 抗拉强度低, 疲劳极限低 3) 容易引起脆性破坏
低、中合金 Cr-Mo 钢	1) 焊缝金属冷裂纹 2) 热影响区硬化裂纹	1) 焊缝区塑性低 2) 高温、高压、氢脆
奥氏体不锈钢	1) 焊缝热裂纹 2) 由于高温加热碳化物脆化 3) 焊接变形大	1) 高温使用时 σ 相脆化 2) 焊接热影响区耐蚀性下降 (晶间腐蚀) 3) 氯离子引起的应力腐蚀裂纹 4) 焊缝低温冲击韧度下降
铝及其合金	1) 高温塑性下降, 脆性裂纹 2) 焊缝收缩裂纹 3) 时效裂纹 4) 气孔	1) 焊缝金属化学成分不一致 2) 焊缝金属强度不稳定 3) 接头区软化
铜及其合金	1) 高温塑性下降, 脆化裂纹, 不熔合 2) 焊缝收缩裂纹 3) 气孔	1) 热影响区软化 2) 焊缝金属化学成分不一致 3) 热影响区脆化

综合知识模块二 金属材料焊接性的评定内容与试验方法

金属材料焊接性是制订焊接工艺的依据, 从获得完整且满足使用要求的优质焊接接头出发, 针对不同材料和不同的使用要求, 焊接性评定的内容和试验的方法也有所不同。

**能力知识点 1****金属材料焊接性评定的内容****1. 焊缝金属抵抗热裂纹的能力**

焊缝热裂纹是一种较常发生又对焊接接头危害严重的焊接缺陷,是熔池金属在结晶过程中,由于存在易形成低熔点共晶产物的有害元素 S、P 等,并在焊接热应力作用下形成的。这是焊接过程中必须避免的一种缺陷。热裂纹的产生既和母材有关,又与焊接材料有关。因此,测定焊缝金属抵抗热裂纹的能力是焊接性试验的一项重要内容。



想一想 热裂纹和冷裂纹有何特点?在产生机理和分布位置上有何不同?

2. 焊缝及热影响区金属抵抗冷裂纹的能力

焊接冷裂纹在合金结构钢焊接中最为常见,是焊缝及热影响区金属在焊接热循环作用下,由于组织和性能变化在较低温度下产生的,与金属的成分、焊接应力及扩散氢含量有关。另外,冷裂纹还具有延迟性,是对焊接接头和焊接结构危害更大的焊接缺陷。因此,金属材料对冷裂纹的敏感性试验是既重要又最常用的焊接性试验。

3. 焊接接头抵抗脆性断裂的能力

焊接接头由于经受冶金反应、结晶、固态相变等一系列过程,可能发生粗晶脆化、组织脆化、热应时效脆化等现象,使接头的韧性严重降低,对于在低温下工作和承受冲击载荷的焊接结构,会因为焊接接头的韧性降低而发生脆性破坏。因此,对用作这类结构的材料应做抗脆断能力试验。

4. 焊接接头的使用性能

根据焊接结构的使用条件对焊接性提出的性能要求来确定试验内容。使用条件是多方面的,因此试验也是多种多样的,例如在腐蚀介质中工作的焊接结构要求具有耐腐蚀性能,焊接接头应该做耐晶间腐蚀或耐应力腐蚀能力试验;厚板结构在厚度方向承受较大载荷时要求具有抗层状撕裂性能,就应该做 Z 向拉伸或窗口试验;此外,还有低温钢的低温冲击韧度、耐热钢的高温蠕变强度、承受交变载荷的疲劳极限以及产品技术条件要求的其他特殊性能。

能力知识点 2**金属材料焊接性试验方法种类**

金属材料焊接性试验的方法很多,根据试验内容和特点可以分为工艺焊接性和使用焊接性两大方面的试验,每一方面又可分为直接法和间接法两种类型。

(1) 直接法 有两种情况:一种情况是模拟实际焊接条件,通过实际焊接过程考查是否发生某种焊接缺陷,或发生缺陷的严重程度,根据结果直接评价材料焊接性(即焊接性对比试验);也可以通过试验确定出获得符合要求的焊接接头所需的焊接条件(即工艺适应性试验),这种情况一般用于工艺焊接性试验。另一种情况是直接在实际产品上进行焊接性试验,例如压力容器的焊接试板,主要用于使用焊接性试验。

(2) 间接法 一般不需要焊接,只需对产品使用的材料做化学成分、金相组织或力学性



能的试验分析与测定, 根据结果和经验推测材料的焊接性。

金属材料焊接性试验方法分类见表 1-3。

表 1-3 金属材料焊接性试验方法种类

	工艺焊接性	使用焊接性
直接法	焊接热裂纹试验 焊接冷裂纹试验 消除应力裂纹试验 层状撕裂试验 热应变时效脆化试验 焊接气孔敏感性试验	实际产品结构运行的服役试验 压力容器的爆破试验
间接法	用碳当量测定 裂纹敏感指数及临界应力为判据 连续冷却组织转变图 (SHCCT) 断口分析及相组织分析 焊接热影响区最高硬度 焊接热、应力模拟试验	焊缝及接头的常规力学性能试验 焊缝及接头的低温脆性试验 焊缝及接头的断裂韧性试验 焊缝及接头高温性能试验 焊缝及接头疲劳、动载试验 焊缝及接头耐蚀性、耐磨性及应力腐蚀开裂试验

综合知识模块三 金属材料焊接性的评定与试验

能力知识点 1

金属材料焊接性的分析与评定方法

1. 碳当量法

钢材的化学成分与焊接热影响区的淬硬及冷裂纹倾向有直接的关系, 因此可以通过钢材的化学成分来间接分析和判断其对冷裂纹的敏感性。

在钢材所含有的各种元素中, 碳对冷裂敏感性的影响最显著, 因此将钢中各种元素都按相当于若干含碳量折合并叠加起来即为“碳当量”。所以, 碳当量法就是把钢中包含碳元素在内的各种合金元素对淬硬、冷裂及脆化等的影响折合成碳的相当含量, 并以此来判断钢材的淬硬倾向和冷裂敏感性, 进而推断钢材的焊接性。该方法是一种粗略评价冷裂纹敏感性的方法。目前应用的碳当量计算公式较多, 其中国际焊接学会 (IIW) 推荐的 CE、日本工业标准 (JIS) 规定和美国焊接学会 (AWS) 推荐的 C_{eq} 应用较广泛。碳当量计算公式和应用范围见表 1-4。

碳当量计算公式说明, 钢材的碳当量值越高, 淬硬倾向就越大, 对冷裂纹就越敏感, 焊接性也就越差, 焊接时需要采取相应的工艺措施来防止冷裂纹。应指出, 用碳当量法估计焊接性的优劣是比较粗略的, 因为公式中只考虑了几种元素的影响, 实际上钢材中可能还含有其他元素, 并且没有考虑元素之间的相互作用, 特别是没有考虑板厚和焊接条件等因素的影响, 所以碳当量法只能用于对钢材焊接性的初步分析。



表 1-4 碳当量计算公式和应用范围

碳当量计算公式	适用范围
国际焊接学会 (IIW) 推荐 $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$ (%)	中高强度的非调质低合金高强度钢 $w_C \geq 0.18\%$ $\sigma_b = 500 \sim 900\text{MPa}$
日本工业标准 (JIS) 规定 $Ceq(JIS) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$ (%)	调质低合金高强度钢 ($\sigma_b = 500 \sim 1000\text{MPa}$) 化学成分 $w_C \leq 0.20\%$ 、 $w_{Si} \leq 0.55\%$ 、 $w_{Mn} \leq 1.5\%$ 、 $w_{Cu} \leq 0.5\%$ 、 $w_{Ni} \leq 2.5\%$ 、 $w_{Cr} \leq 1.25\%$ 、 $w_{Mo} \leq 0.7\%$ 、 $w_V \leq 0.1\%$ 、 $w_B \leq 0.006\%$
美国焊接学会 (AWS) 推荐 $Ceq(AWS) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/15 + Cr/5 + Mo/4 + Cu/13 + P/2$ (%)	碳钢和低合金高强度钢 化学成分 $w_C < 0.6\%$ 、 $w_{Mn} < 1.6\%$ 、 $w_{Ni} < 3.3\%$ 、 $w_{Cr} < 1.0\%$ 、 $w_{Mo} < 0.6\%$ 、 $w_{Cu} = 0.5\% \sim 1\%$ 、 $w_P = 0.05\% \sim 0.15\%$

注：碳当量计算公式中的元素符号即为该元素的质量分数，后同。

用碳当量法评定钢材焊接性和制订防止冷裂纹工艺措施按下述方法进行：

(1) 使用国际焊接学会 (IIW) 推荐的 CE 对板厚小于 20mm 的钢材，当 $CE < 0.4\%$ 时，钢材的淬硬倾向不大，焊接性良好，焊前不需预热；当 $CE = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时，钢材易于淬硬，焊接性较差，焊接时必须预热才能防止裂纹，随着板厚及碳当量的增加，预热温度也相应提高；当 $CE > 0.6\%$ 时，钢材淬硬倾向很大，焊接性差，焊接时必须采用严格的工艺措施，如预热、后热、缓冷等，以防止产生裂纹。

(2) 使用日本工业标准 (JIS) 规定的 Ceq 对板厚小于 20mm 的钢材和采用焊条电弧焊时，对于强度等级不同钢材规定了不产生裂纹的临界值和相应的预热措施，见表 1-5。

表 1-5 钢材强度级别与碳当量和预热温度的关系

钢材强度级别 σ_b/MPa	$Ceq(JIS)$ (%) 临界值	预热温度/°C
500	0.46	不预热
600	0.52	75
700	0.52	100
800	0.62	150

(3) 使用美国焊接学会 (AWS) 推荐的 Ceq ：应根据 Ceq 值再结合焊件厚度，先从图 1-1 查出该钢种焊接性的优劣等级，再根据表 1-6 确定出其焊接的最佳工艺措施。

表 1-6 钢材焊接性等级不同时的最佳焊接工艺措施

焊接性等级	酸性焊条	碱性焊条	消除应力
I (优良)	不需预热	不需预热	不需
II (较好)	预热 40 ~ 100°C	-10°C 以上不预热	两可
III (尚好)	预热 150°C	预热 40 ~ 100°C	需要
IV (尚可)	预热 150 ~ 200°C	预热 100°C	需要