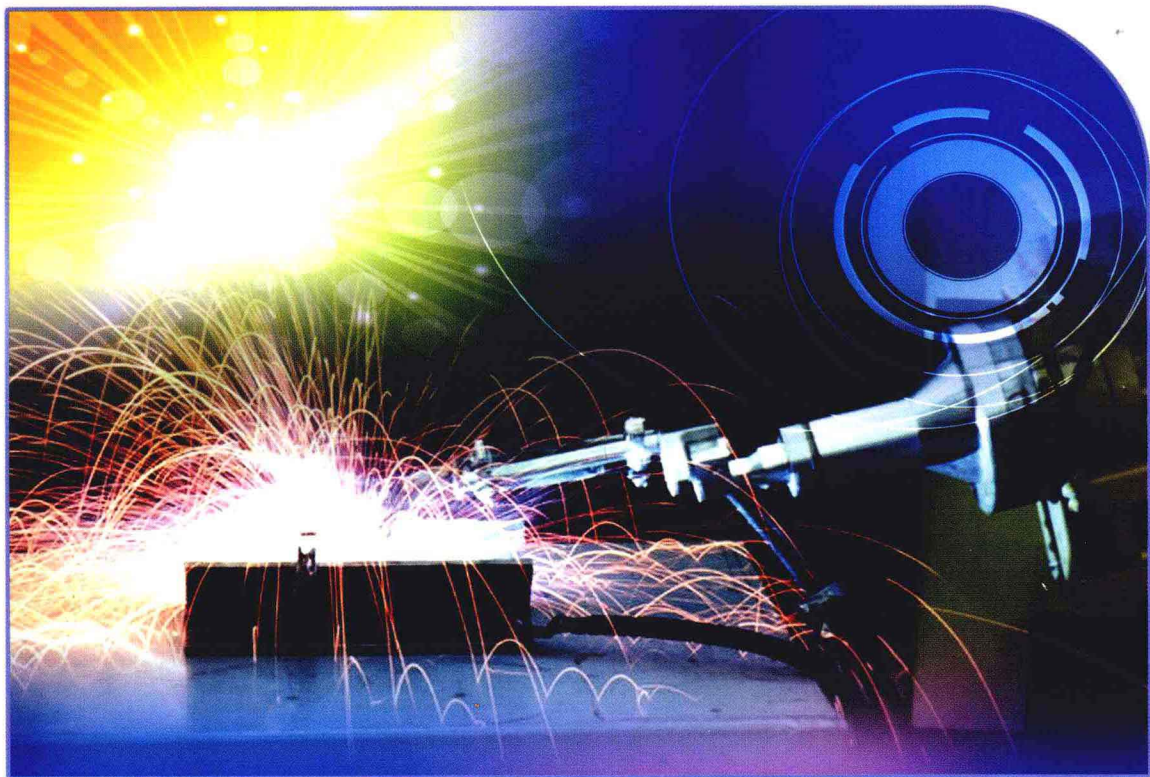




高等院校“十二五”精品课程建设成果



金属材料焊接

JINSHU CAILIAO HANJIE

主 编 王现荣 丁艳辉
主 审 李国彬



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等院校“十二五”精品课程建设成果

金属材料焊接

主 编 王现荣 丁艳辉
副主编 刘国杰 张金娟 王 磊
主 审 李国彬
参 编 赵 强 王洪强 代秋芬



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

“金属材料焊接”是焊接专业的一门主干专业核心课程。本教材采用项目教学法,主要讲授金属材料的焊接性以及根据常用金属材料的焊接性选择焊接方法、焊接材料、工艺措施等。本书联系实际应用,共分9个项目,分别讲述了金属焊接性、碳素钢焊接、低合金结构钢焊接、低温钢焊接、耐热钢焊接、不锈钢焊接、铸铁焊接、有色金属焊接和异种金属材料焊接等内容。本书内容旨在突出高等教育特点,理论知识深浅适宜,注重工程实用性;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,按项目、分任务作为层次安排编写。在教材的编写中,文字叙述力求简明扼要,通俗易懂。本书可作为高等院校焊接专业的教材或培训用书,也可供从事焊接理论研究、焊接生产、施工等工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

金属材料焊接/王现荣,丁艳辉主编. —北京:北京理工大学出版社, 2012. 8

ISBN 978 - 7 - 5640 - 6744 - 1

I. ①金… II. ①王…②丁… III. ①金属材料—焊接—教材 IV. ①TG457. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 201864 号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www. bitpress. com. cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京市兆成印刷有限责任公司

开 本/710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张/13. 5

字 数/248 千字

版 次/2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑/钟 博

印 数/1~1000 册

责任校对/杨 露

定 价/37. 00 元

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

为了进一步推进高等教育发展,满足高等院校深化教学改革和对教材建设的要求,北京理工大学出版社确定了焊接专业系列教材的出版计划并组织十几所院校的焊接专家、一线骨干教师、工程技术人员研讨了焊接专业的课程体系和具体的教学大纲。本书就是根据焊接专业培养目标和教学大纲组织编写的。

本教材采用项目教学法,围绕金属材料的焊接性,讲授根据常用金属材料的焊接性选择焊接方法、焊接材料、工艺措施等。本书联系实际应用,共分9个项目,分别讲述了金属焊接性、碳素钢的焊接、低合金结构钢的焊接、低温钢的焊接、耐热钢的焊接、不锈钢的焊接、铸铁的焊接、有色金属的焊接和异种金属材料的焊接。

本书重点强调培养学生应用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。编写过程以应用为目的、以够用为尺度,教学内容的选择宽而精,加强了针对性与应用性。本书编写模式新颖,将需要掌握的知识点进行分解,“按项目、任务、评估”编写,每个项目开始有“预期目标”,由不同任务组成,项目之中有“任务展开”,项目完成之后有“自我评估”和“综合训练”。“自我评估”模块内容注重基本知识的掌握和能力拓展提高的有机结合;“任务展开”、“综合训练”则注重培养学生综合运用知识分析问题、解决问题的能力。

本书在内容处理上有以下几点说明:①全书设计紧紧围绕常用金属材料的焊接性以及根据金属材料的焊接性选择焊接工艺措施这条主线,侧重理论联系实际,提高应用能力;②考虑到此书为高等教育焊接专业用教材,故对某些理论进行了必要的精简;③注意增加了在焊接生产实际中的案例;④在教材内容的选择组织上,力争使其更具先进性和应用性;⑤充分考虑了与前导课程如金属熔焊原理及后序课程如焊接检测的关系,加强了焊接工艺等方面的内容。

此书可作为高等院校焊接专业的教学用书,也可供从事焊接理论研究、焊接生产、施工等工程技术人员参考。

全书共9个项目,由王现荣、丁艳辉任主编,刘国杰、张金娟、王磊任副主编,赵强、王洪强、代秋芬参编。具体分工为:王现荣编写绪论,项目四、项目六;丁艳辉编写项目九;王磊编写项目一;张金娟编写项目五;王磊、张金娟合编项目三;代秋芬编写项目八;刘国杰、赵强合编项目七;王洪强编写项目二。全书由王现荣统稿,河北工业大学李国彬教授主审。

在编写过程中,编者参阅了国内出版的相关教材和资料,得到了李国彬教授的有益指导和北京理工大学出版社的鼎力支持,在此一并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中的不妥之处敬请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
项目一 金属材料焊接性及试验方法	4
任务一 金属材料的焊接性	4
任务二 金属材料的焊接性试验方法	6
项目二 碳素钢的焊接	23
任务一 认识碳素钢	23
任务二 低碳钢的焊接	26
任务三 中碳钢的焊接	29
任务四 高碳钢的焊接	32
项目三 低合金结构钢的焊接	35
任务一 低合金结构钢的种类、性能与用途	35
任务二 热轧及正火钢的焊接工艺	38
任务三 低碳调质钢的焊接	50
任务四 中碳调质钢的焊接工艺	60
任务五 低合金耐蚀钢的焊接	71
项目四 低温钢的焊接	78
项目五 耐热钢的焊接	85
任务一 认识耐热钢	85
任务二 低合金耐热钢的焊接	88
任务三 中合金耐热钢的焊接	97
项目六 不锈钢的焊接	103
任务一 认识不锈钢	103
任务二 奥氏体不锈钢的焊接	109
任务三 铁素体不锈钢的焊接	119

任务四 马氏体不锈钢的焊接	123
任务五 双相不锈钢的焊接	129
项目七 铸铁焊接	134
任务一 了解铸铁焊接的应用	134
任务二 灰口铸铁同质焊缝焊接工艺	138
任务三 灰口铸铁异质焊缝焊接工艺	146
任务四 灰口铸铁钎焊工艺	154
任务五 球墨铸铁的焊接	156
项目八 有色金属的焊接	160
任务一 铝及铝合金的焊接	160
任务二 铜及铜合金的焊接	173
任务三 钛及钛合金的焊接	183
项目九 异种金属的焊接	192
任务一 异种钢的焊接	192
任务二 钢与铜及其合金的焊接	201
任务三 铝与铜的焊接	203
参考文献	206

绪 论

一、焊接技术的发展与应用

焊接作为一种金属加工方法，目前已成为一门独立的学科，它是一种精确、可靠、低成本，并且是采用高科技连接材料的方法。它广泛应用于石油化工、装备制造、电力系统、海洋工程、航空航天、交通、建筑、冶金等诸多领域，目前还没有其他方法能够比焊接更为广泛地应用于金属的连接。我国的焊接技术发展十分迅速，如图 0-1 所示的 2008 年北京奥运会主会场——“鸟巢”的外观图，“鸟巢”用钢量为 13.6 万吨，整个工程没有一颗螺丝钉和铆钉，为全焊接钢结构，焊接过程中采用了铸钢及其异种钢焊接、低温焊接等十四项焊接新技术；举世瞩目的三峡工程中所用的 28 台 70 万千瓦的水轮发电机组（图 0-2）采用的也是全焊接结构；延绵几千千米的西气东输工程（图 0-3），不论是厂房制作还是野外施工，焊接是应用最多的加工工艺。由此可见，从 19 世纪 80 年代发展起来的焊接技术，随着科学技术的发展与进步，将发挥越来越大的作用。



图 0-1 “鸟巢”外观图

焊接技术的发展主要表现在以下几方面。

1. 高效、自动化焊接技术

20 世纪末，我国焊接界把实现焊接过程的机械化、自动化作为战略目标，已经在各行业的科技发展中付诸实施，在发展焊接生产自动化和过程控制智能化，研究和开发焊接生产线及柔性制造技术，发展应用计算机辅助设计与制造技

术等方面都取得了长足的进步。

2. 新能源的应用

当前,除了各种常规焊接方法外,以电阻热为热源的电阻焊、电渣焊在生产中得到广泛应用。以高速运动的电子束为能源的电子束焊,以激光为能源的激光焊和切割,以等离子弧为能源的等离子弧焊和切割等高密度的工艺,越来越多地应用于各个领域。新兴热源(如太阳能、微波等)也将用于焊接生产实践中。

3. 新材料广泛使用

随着焊接结构向高参数、大容量、长寿命、大型化、微型化发展,需要采用一些具有特殊性能的结构材料,如超高强度钢、耐热耐蚀钢、难熔合金、活性金属、异种金属及复合材料等,用于焊接结构的材料范围正在快速地扩展。

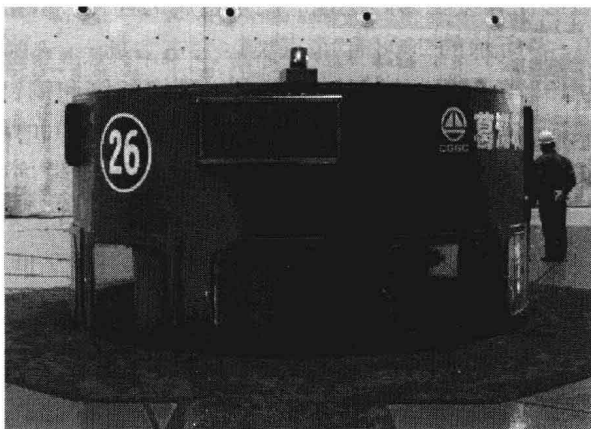


图 0-2 三峡水轮机组

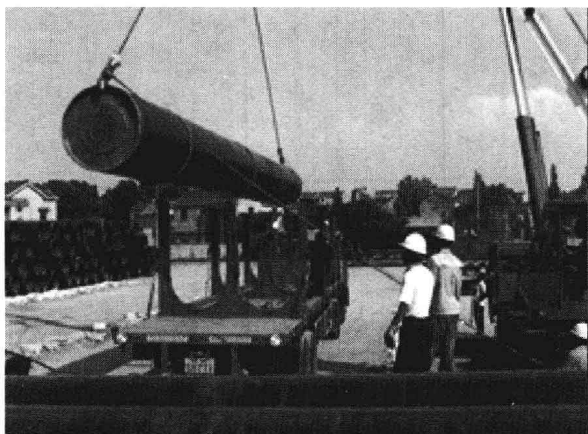


图 0-3 西气东输工程

二、本书研究的对象及内容

本书主要研究对象是各种金属材料的焊接性以及根据金属材料的焊接性选择焊接方法、焊接材料、工艺措施,具体包括以下内容。

- (1) 熟悉金属焊接性及其试验方法。
- (2) 掌握碳钢焊接、低合金高强钢焊接、低温钢焊接、低合金耐蚀钢焊接、耐热钢焊接、不锈钢焊接、有色金属焊接的焊接特点并制定相应的焊接工艺。
- (3) 掌握铸铁焊补的特点及焊接工艺。
- (4) 了解异种金属材料焊接的特点及应用,熟悉异种钢焊接、钢与铜焊接、铝与铜焊接的焊接工艺。

三、学习方法和要求

本课程是焊接专业的一门主要专业核心课,具有较强的实践性,同时也有一定的理论性,因此在学习过程中应注意理论联系实际,应结合焊接生产实例,综合运用各方面的知识,提高解决问题的能力,同时还应注意前后学习内容的衔接。

(1) 深刻理解金属焊接性的概念,熟悉常用金属材料的焊接性实验方法,能根据材料特点进行一般的焊接性分析。

(2) 在学习常用金属材料焊接时,要紧密结合金属材料的特点进行分析,联系“金属学与热处理”“熔焊原理”课程,结合“焊接方法与设备”正确选择焊接方法、焊接材料,并制定合理的焊接工艺,为今后学习和工作夯实基础。

(3) 学会多方面知识的融会贯通,要结合企业和工厂的教学实习、生产实习经历,根据不同金属材料的焊接工艺选择合适的焊条、焊剂和焊丝。对涉及的生产实例,要运用多方面的知识,提高分析问题和解决问题的能力。

项目一 金属材料焊接性及试验方法

作为焊接工程技术人员应能回答这样的问题：所选用的金属材料是否适宜焊接加工？如果适宜焊接加工，根据产品和结构的特点，应该选用何种焊接方法、焊接材料和焊接工艺参数？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研究的金属材料焊接性。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定正确焊接工艺的依据。

【预期目标】

- ★ 掌握金属材料焊接性的概念及其影响因素；
- ★ 学会根据材料的化学成分判断其焊接性；
- ★ 了解金属材料焊接性的试验方法种类并掌握一些常用的焊接性试验方法。

任务一 金属材料的焊接性

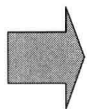
【任务描述】

- ☆ 什么是金属材料的焊接性？
- ☆ 掌握影响金属材料焊接性的因素。

【相关知识】

能力知识点 1 金属材料焊接性的概念

★焊接性：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。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和使用的可靠性，即优质的焊接接头应具备两个条件：即接头中不允许存在超过质量标准规定的缺陷；同时要具有预期的使用性能。



☆结合焊接性：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致密、无缺陷的焊接接头的能力。



☆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（如低温韧性、高温蠕变、疲劳极限、持久强度、耐腐蚀性和耐磨性等）的能力。

值得注意的是,金属焊接性是个相对的概念,同一种材料在不同的焊接工艺条件下,可以表现出很大的差异。随着新的焊接方法和焊接工艺的开发与完善,一些原来焊接性差的材料可能会得到改善,使焊接性变好;当然,随着新材料的出现和对焊接结构使用条件要求的苛刻,也将会带来新的焊接性问题。

能力知识点2 影响金属材料焊接性的因素

过去,有人把焊接性单纯地理解为金属材料本身所固有的性能,这显然是不对的。焊接性是金属材料的一种工艺性能,影响因素很多,一般可归纳为材料、工艺、结构和服役条件四大因素。

1. 材料因素

材料因素是指焊接时直接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)。在相同的焊接条件下,决定母材焊接性的主要因素是它本身的物理化学性能。对钢而言,有钢的化学成分、冶炼轧制状态、热处理条件、组织状态和力学性能等,其中化学成分是主要的影响因素,它能决定热影响区的淬硬倾向、脆化倾向和产生裂纹的敏感性。

在焊接过程中焊接材料和母材熔化形成的熔池金属所发生的一系列冶金反应,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,不仅不能获得满足使用要求的接头,还会引起焊接缺陷的产生和组织性能的变化,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获得优质焊接接头的重要冶金条件。

2. 工艺因素

工艺因素包括焊接方法、焊接参数和工艺措施等。对同一母材而言,当采用不同的焊接方法和工艺措施时会表现出不同的焊接性。

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;二是保护方式直接影响冶金过程,从而影响焊缝金属的质量和性能。

工艺措施对防止焊接接头产生缺陷、提高使用性能有重要影响。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

结构因素主要是指焊接结构设计形式和焊接接头的设计形式,如结构形状、尺寸、钢板厚度、接头形式、坡口形式、焊缝布置等,其影响主要表现在热的传递和力的状态方面。不同板厚、不同接头形式或坡口形状其传热方向和传递速度不一样,从而对熔池结晶方向和晶粒长大产生影响。结构的形状、板厚和焊缝的布置等决定接头的刚度和拘束度,对接头的应力状态产生影响。不良的结晶形态、严重的应力集中和过大的焊接应力是形成焊接裂纹的基本条件。

设计时要减少接头的刚性,应使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. 服役条件

焊接结构的服役环境是多种多样的,例如工作温度、工作环境、承受载荷的类别等都属于服役条件。材料在高温下工作时,会发生蠕变;在低温或冲击载荷下工作时,会发生脆性断裂;在腐蚀介质中工作时,会发生各种腐蚀破坏的可能。总之,服役条件越苛刻,对焊接接头质量要求越高,金属材料的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、结构和服役条件密切相关,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,也不能只用一种指标来概括材料的焊接性。

【任务实施】

理解焊接性的含义,分析焊接性的影响因素。

任务二 金属材料的焊接性试验方法

【任务描述】

- ☆ 掌握金属材料焊接性试验的内容;
- ☆ 工艺焊接性的间接评定方法;
- ☆ 常用的工艺焊接性试验方法。

【相关知识】

能力知识点1 金属材料焊接性试验的内容

焊接性试验的内容主要包括两个方面:一是针对接头结合性能的工艺焊接性试验;二是针对接头使用性能的使用焊接性试验。其中,工艺焊接性试验主要用来鉴定焊接接头产生工艺缺陷的倾向,尤其是产生裂纹的倾向;使用焊接性试验主要用来鉴定焊接接头的使用性能是否满足要求。

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,焊接性试验的内容主要包括以下几方面。

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,晶界处形成低熔点共晶产物,在焊接热应力作用下形成的一种缺

陷。因此,常用金属抗热裂纹的能力来作为判定金属材料冶金焊接性的指标,是焊接性试验的一项重要内容。

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和较低温度下产生的,与金属的成分、焊接应力及扩散氢含量有关的焊接缺陷。冷裂纹具有延迟性,对焊接接头和焊接结构危害更大。因此金属材料对冷裂纹的敏感性试验是很重要又最常用到的焊接性试验。



想一想:

热裂纹和冷裂纹有何特点?产生机理有何不同?

3. 焊接接头抵抗脆性断裂的能力

焊接接头由于经过冶金反应、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转变。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。使用要求是多方面的,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抗腐蚀性能,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,所以应该做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 金属材料焊接性的试验方法与选择原则

1. 焊接性试验方法分类

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。

直接法有两种情况:一种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;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,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。

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、力学性能的试验,并进行分析与测定,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1-1。

表 1-1 金属材料焊接性试验方法分类

试验方法	工艺焊接性试验	使用焊接性试验
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	用碳当量推测焊接性 以裂纹敏感指数及临界应力为判据 连续冷却组织转变图 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

2. 焊接性试验方法的选择原则

选择焊接性试验方法时一般应遵循下列原则。

(1) 针对性 所选择的试验方法，其试验条件要尽量与实际焊接时的条件相一致，这些条件包括母材、焊接材料、接头形式、接头受力状态、焊接参数等，且还需考虑到产品的使用条件，尽量使之接近，只有这样，其试验结果才能较准确地显示出实际生产时可能发生的问题或可能出现的情况。

(2) 可比性 只有试验条件完全相同时，两个试验的结果才具有可比性。因此，凡是国家或国际上已经颁布的标准试验方法，应优先选择并严格按照标准的规定进行试验。尚没有建立标准的，应选择国内外同行业中较为通用的试验方法进行试验。

(3) 可靠性 焊接性试验的结果要稳定可靠，具有较好的再现性。试验数据不可过于分散；否则难以找出变化规律和导出正确的结论，为此试验条件和试验程序要严格规定，防止随意性。

(4) 经济性 在符合上述原则并可获得可靠结果的前提下，力求减少材料消耗，避免复杂昂贵的加工工序，节省试验费用。

能力知识点 3 常用的金属材料焊接性分析方法

1. 碳当量法

钢材的化学成分对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。将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推荐的 Ceq 应用较广泛。碳当量计算公式和应用范围见表 1-2。

表 1-2 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 $CE = C + \frac{MnCr + Mo + V}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\%)$	中高强度的非调质 低合金高强度钢 $\sigma_b = 500 \sim 900 \text{ MPa}$	化学成分： $0.18\% \leq w_c \leq 0.20\%、w_{si} \leq 0.55\%、$ $w_{Mn} \leq 1.5\%、w_{Cu} \leq 0.5\%、$ $w_{Ni} \leq 2.5\%、w_{Cr} \leq 1.25\%、$ $w_{Mo} \leq 0.7\%、w_V \leq 0.1\%、$ $w_B \leq 0.006\%$
日本工业标准（JIS）规定 $Ceq \text{ (JIS)} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (\%)$	调质低合金高强度钢 $\sigma_b = 500 \sim 1000 \text{ MPa}$	
美国焊接学会（AWS）推荐 $Ceq \text{ (AWS)} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} \quad (\%)$	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：公式中的元素符号即该元素的质量分数		

用碳当量法估计焊接性的优劣是比较粗略的，只考虑了几种元素的影响，并且没有考虑元素之间的相互作用，更没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。

用碳当量法评定钢材焊接性和制定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 20 mm 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% ~ 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，焊接时必须严格工艺措施，如预热、缓冷、后热及焊后热处理等。

（2）使用日本工业标准（JIS）规定的 Ceq（JIS）对板厚小于 20 mm 的钢材和采用焊条电弧焊时，对于强度等级不同的钢材规定了不产生裂纹的临界值和相应的预热措施，见表 1-3。

表 1-3 钢材强度级别、碳当量和预热温度的关系

钢材强度级别 σ_b/MPa	$Ceq \text{ (JIS)} / \%$	预热温度临界值/ $^{\circ}\text{C}$
500	0.46	不预热
600	0.52	75
700	0.52	100
800	0.62	150

(3) 使用美国焊接学会推荐的 C_{eq} (AWS) 应根据 C_{eq} (AWS) 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 1-4 确定出其焊接的最佳工艺措施。

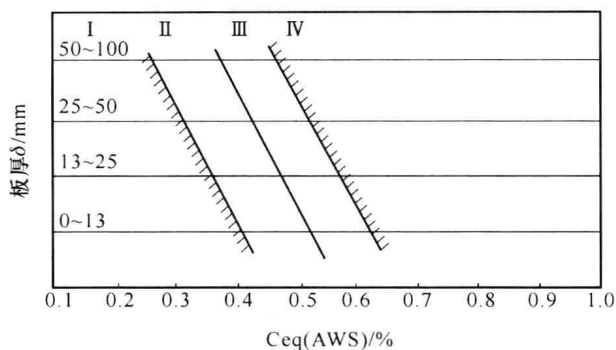


图 1-1 焊接性与碳当量和板厚的关系

I—优良；II—较好；III—尚好；IV—尚可

表 1-4 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	-10 以上不预热	两可
III (尚好)	预热 150	预热 40 ~ 100	需要
IV (尚可)	预热 150 ~ 200	预热 100	需要

2. 焊接冷裂纹敏感指数法

20 世纪 60 年代后, 世界各国为改进钢的性能和焊接性, 大力发展低碳微合金的低合金高强钢。对于这类钢碳当量法已不适用, 为此日本伊藤等在大量试验的基础上, 提出了焊接冷裂纹敏感指数 (P_{cm}) 公式。

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + (Mn + Cu + Cr) \frac{1}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (%) \quad (1-1)$$

$$P_c = P_{cm} + \frac{[H]}{60} + \frac{\delta}{600} \quad (1-2)$$

式中, δ ——板厚 (mm);

$[H]$ ——焊缝中扩散氢含量 (mL/100g)。

该公式适用于 $\sigma_b = 400 \sim 1\,000$ MPa 的低合金高强钢, 不仅包括了母材的化学成分, 又考虑了熔敷金属含氢量与拘束条件 (板厚) 的作用。

P_{cm} 适用条件: $w_C = 0.07\% \sim 0.22\%$ 、 $w_{Si} \leq 0.60\%$ 、 $w_{Mn} = 0.4\% \sim 1.40\%$ 、 $w_{Cu} \leq 0.50\%$ 、 $w_{Ni} \leq 1.20\%$ 、 $w_{Cr} \leq 1.20\%$ 、 $w_{Mo} \leq 0.7\%$ 、 $w_V \leq 0.12\%$ 、 $w_{Nb} \leq 0.04\%$ 、

$w_{\text{T}} \leq 0.05\%$ 、 $w_{\text{B}} \leq 0.005\%$ 、 $\delta = 19 \sim 50 \text{ mm}$ 、 $[H] = 1.0 \sim 5.0 \text{ mL/100 g}$ （按 GB/T3965—1995《熔敷金属中扩散氢测定法》测定）。

3. 利用金属材料的物理性能分析

金属材料的熔点、热导率、线膨胀系数、比热容和密度等物理性能，对焊接热循环、熔池冶金过程、结晶与相变过程等都有明显的影响。根据金属材料的物理性能特点，可以预计在焊接过程中可能出现的问题，从而制定出相应的防止措施。例如，热导率大的材料（铜），由于其传热快，焊接时熔池结晶速度快容易产生气孔和熔透不足；而热导率低的材料（钛、不锈钢），焊接时由于温度梯度大而产生较大的应力及变形，而且还会因为高温停留时间延长而导致焊缝金属晶粒粗大。此外，焊接线胀系数大的材料（如不锈钢），接头的应力和变形必然更严重；焊接密度小的材料（如铝及其合金），则容易在焊缝中产生气孔和夹杂。

4. 利用金属材料的化学性能分析

化学性质比较活泼的金属（如铝、镁、钛及其合金），在焊接条件下极易被氧化，有些金属材料甚至对氧、氮、氢等气体都极为敏感，焊接这些材料时需要采取惰性气体保护焊和在真空中焊接等保护可靠的焊接方法，有时甚至在焊缝背面也要进行保护。例如，钛对氧、氮、氢等气体都极为敏感，吸收这些气体后力学性能显著降低，特别是韧性降低严重，因此要严格控制这些气体对焊缝及热影响区的影响。

5. 利用合金相图或连续冷却组织转变（CCT）图分析

金属材料大多是合金，因而可以利用其相图分析其焊接性。例如，对于共晶相图来讲，其固、液相线之间的温度区间大小，会影响结晶时的成分偏析、低熔点共晶的生成和脆性温度区间的大小，这是分析热裂纹倾向的重要参考依据；若凝固结晶时形成单相组织，则焊缝晶粒易于长大，这也是形成热裂纹的重要影响因素。

对于各种低合金钢来说，可以利用各自的连续冷却组织转变图（CCT图）或模拟热影响区的连续冷却组织转变图（SHCCT图）分析其焊接性。这些图反映了焊接热影响区从高温连续冷却时，热影响区显微组织和室温硬度与冷却速度的关系，可以根据转变图预测热影响区组织、性能和硬度变化，从而预测某种钢焊接热影响区的淬硬倾向和产生冷裂纹的可能性，以便确定适当的焊接工艺条件。

能力知识点4 金属材料工艺焊接性试验方法

一、斜Y形坡口焊接裂纹试验法

这是一种在工程上广泛应用的试验方法。该试验广泛应用于评定碳钢和低合金高强度钢焊接热影响区对冷裂纹的敏感性，属于自拘束裂纹试验，其试验要求