

职业教育“十三五”规划教材

金属材料焊接

(第二版)

JINSHU CAILIAO HANJIE

文申柳 主编

■ 配套电子课件和习题参考答案



化学工业出版社

职业教育“十三五”规划教材

金属材料焊接

第二版

文申柳 主 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书依据最新的专业计划与课程标准编写,内容包括金属焊接性及其试验方法、非合金钢(碳钢)的焊接、低合金高强钢的焊接、低合金特殊用钢的焊接、不锈钢的焊接、铸铁的焊接、常用有色金属的焊接、异种金属的焊接、堆焊、新型金属材料的焊接及本课程的实验等。书中有大量的工程实例,并在每章前明确了学习目标、增加了观察与思考环节,每章后增加了思考与练习环节。为了方便教学,配套了电子课件和习题参考答案。

本书可作为高职高专院校、中等职业学校焊接技术及自动化专业的教材,也可作为培训用书,并可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料焊接/文申柳主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2016. 4

职业教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-26416-9

I. ①金… II. ①文… III. ①金属材料-焊接-高等职业教育-教材 IV. ①TG457.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第040524号

责任编辑:韩庆利

文字编辑:张绪瑞

责任校对:边涛

装帧设计:孙远博

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市瞰发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张11½ 字数281千字 2016年6月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:25.00元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是根据国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会制定的高职焊接技术及自动化专业教学计划和课程教学标准而编写的。不仅适合于高职焊接技术及自动化专业在校学生使用,也可供从事焊接无损检测人员参考。

本教材第一版从2008年出版后,被多所高职院校选用。但随着教学理念改变和对高职焊接技术及自动化专业人才培养提出了更高的要求,我们组织人员对本教材进行了修订。本次修订未打破原有教材总体结构,仍分为十章,主要在每章前明确了本章学习的目标、增加了观察与思考环节,每章后增加了思考与练习环节,使每章的学习内容形成一个闭环,前后呼应。同时,结合高职院校学生主要培养高素质技能型人才的要求,每章增加了大量的实例,也将本课程实验内容附录在本书后,供有关院校参考。

通过本课程的学习重点培养学生结合工程实际的分析和解决问题的能力,使学生能对常用各种材料的焊接性有充分认识,并能根据材料焊接性,结合工程实际,制定材料的焊接工艺参数。

本教材由四川化工职业技术学院文申柳、陈玲、周林军、刘海、李婷,成都瑞奇石油化学工程公司肖仕伟,四川泸天化股份有限公司张勇编写。其中第1、2章由陈玲编写,第3章周林军编写,第4章由刘海编写,第5章由李婷编写,第6、7、8章由文申柳编写,第9章由肖仕伟编写,第10章由张勇编写。

本教材由四川化工职业技术学院文申柳担任主编并负责全书统稿,由四川永鑫建筑公司傅华任主审。

本书在编写过程中,借鉴了大量国内文献资料,在此表示感谢!

本书配套电子课件和习题参考答案,可赠送给用本书作为授课教材的院校和老师,如果需要,可登录 www.cipedu.com.cn 下载。

限于编者水平有限,教材中不妥之处敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 金属焊接性及其试验方法	1
1.1 认识金属焊接性	1
1.2 金属焊接性试验方法	3
思考与练习	11
第2章 非合金钢(碳钢)的焊接	12
2.1 低碳钢的焊接	13
2.2 中碳钢的焊接	20
2.3 高碳钢的焊接	22
思考与练习	23
第3章 低合金高强钢的焊接	24
3.1 热轧及正火钢的焊接	25
3.2 低碳调质钢的焊接	34
3.3 中碳调质钢的焊接	41
思考与练习	46
第4章 低合金特殊用钢的焊接	47
4.1 低温钢的焊接	47
4.2 低合金耐蚀钢的焊接	56
4.3 珠光体耐热钢的焊接	61
思考与练习	69
第5章 不锈钢的焊接	70
5.1 不锈钢的分类和性能	70
5.2 奥氏体不锈钢的焊接	74
5.3 铁素体不锈钢的焊接	82
5.4 马氏体不锈钢的焊接	86
思考与练习	88
第6章 铸铁的焊接	90
6.1 灰铸铁的焊接	90
6.2 球墨铸铁的焊接	101
6.3 白口铸铁的焊接	103
6.4 其他铸铁的焊接	105
思考与练习	106
第7章 常用有色金属的焊接	107
7.1 铝及铝合金的焊接	107
7.2 铜及铜合金的焊接	115
7.3 钛及钛合金的焊接	123

思考与练习.....	128
第 8 章 异种金属的焊接	129
8.1 异种金属焊接概述	130
8.2 异种钢的焊接	133
8.3 钢与有色金属的焊接	138
8.4 异种有色金属的焊接	142
思考与练习.....	145
第 9 章 堆焊	146
9.1 堆焊的特点及应用	147
9.2 堆焊方法	149
9.3 常用金属材料的堆焊	153
思考与练习.....	159
第 10 章 新型金属材料的焊接	160
10.1 复合材料的焊接.....	160
10.2 硬质合金的焊接.....	163
思考与练习.....	166
附录 实验	167
实验一 斜 Y 坡口焊接裂纹试验	167
实验二 不锈钢焊接接头的晶间腐蚀实验.....	169
实验三 压板对接 (FISCO) 焊接裂纹实验.....	173
参考文献	176

第 1 章 金属焊接性及其试验方法

不同的金属材料用不同的焊接方法进行焊接时，由于材料本身的成分和性能差异及焊接时发生了一系列复杂的冶金过程，从而对焊接操作的难易程度和材料的组织与性能产生不同的影响。为了从焊接角度对此现象进行分析，因而提出了焊接性的问题。本章将重点介绍金属焊接性的基本知识及试验方法。

知识目标

1. 理解金属焊接性的概念、内容及影响因素；
2. 掌握金属焊接性的试验方法和判断标准。

能力目标

能够采用计算方法和试验方法估判出各种金属材料的焊接性。

观察与思考

观察图 1-1 与图 1-2，分析它们在制造过程中采用的焊接工艺有哪些差异，思考为什么会有这些差异以及怎样判断各种金属材料的焊接性？

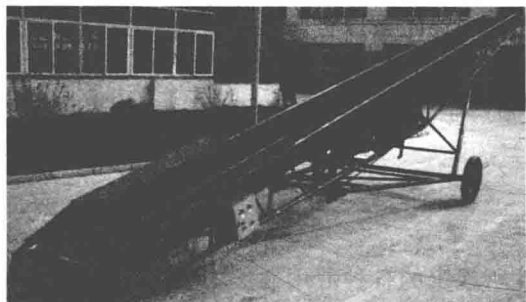


图 1-1 碳钢皮带输送机

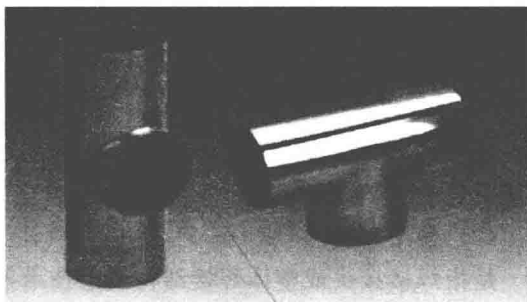


图 1-2 合金钢三通管

1.1 认识金属焊接性

1.1.1 金属焊接性的概念

焊接性是表示材料对焊接加工的适应性，是指材料在一定的焊接工艺条件下（包括焊接材料、焊接方法、焊接工艺参数和结构形式等），能否获得优质焊接接头的难易程度和该焊接接头能否在使用条件下可靠运行的一种特性。



图 1-3 交流氩弧焊焊接铝合金焊缝

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焊接性可以表现出很大的差异。

例如焊接铝合金时,如采用氧-乙炔进行气焊,火焰的热功率比电弧焊低,热量分散,焊后的焊缝金属不但晶粒粗大组织疏松,而且容易产生氧化铝夹渣及裂纹等缺陷,因而焊接性差。如改用交流氩弧焊时,热量集中,电弧燃烧稳定,焊缝金属致密,

则有良好的焊接性,如图 1-3 所示。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,也会变成焊接性好的材料;当然,随着新材料的出现和对焊接结构使用条件要求越高,又将会带来新的焊接性问题。

1.1.2 金属焊接性的内容

金属焊接性包括工艺焊接性和使用焊接性两方面的内容。

(1) 工艺焊接性

是指在一定焊接工艺条件下,能否获得优质致密、无缺陷的焊接接头的的能力。它不是金属本身所固有的性能,不仅与母材的成分与性能有关,还受焊接热源的性质、保护方式、热处理状态、接头形式及焊接方位、预热、后热等因素影响,反应了金属在焊接过程中对接头性能的改变,尤其是形成缺陷的敏感性。

对于熔化焊而言,工艺焊接性可分为热焊接性和冶金焊接性。

① 热焊接性 是指在焊接热过程中,对焊接热影响区的组织性能及产生缺陷的影响程度。它主要与被焊材质及焊接工艺条件有关,常用来评定被焊金属对热的敏感性(晶粒长大和组织性能变化等)。

② 冶金焊接性 是指冶金反应对焊接性能和产生缺陷的影响程度。包括合金元素的氧化、还原、氮化、蒸发及氢、氧和氮的溶解等对气孔、夹杂物和裂纹等的敏感性,主要影响焊缝金属的化学成分和性能。

(2) 使用焊接性

是指焊接接头或整体焊接结构满足技术条件所规定的各种使用性能的程度。主要包括力学性能、低温性能、抗脆断性能、高温蠕变、疲劳性能、持久强度、抗腐蚀性和耐磨性能等,反应了在一定工艺条件下所获得的焊接接头对使用要求的适应性。如果焊缝不能够满足使用要求可能会发生安全事故。

1.1.3 影响金属焊接性的因素

影响金属焊接性的因素很多,对于钢铁材料而言,主要有材料、设计、工艺和服役环境等四大因素。

(1) 材料因素

主要受焊接时直接参与物理化学反应和发生组织变化的母材和焊材的化学成分、冶炼轧制状态、热处理状态、组织状态和力学性能等因素的影响,其中化学成分(包括杂质的分布)是主要影响因素。

(2) 设计因素

是指焊接结构的安全性不但受到材料的影响,而且在很大程度上还受到结构形式的影响。例如结构的刚度、应力集中程度与应力状态等,不仅影响材料对焊接裂纹的敏感性,还可能影响接头的力学性能。

(3) 工艺因素

是指施工时所采用的焊接方法、焊接工艺规程和焊后热处理等因素。

(4) 服役环境因素

是指焊接结构的工作温度、负荷条件(载荷种类、施加方式和速度等)和工作环境(化工区、沿海及腐蚀介质等)。一般而言,工作环境越恶劣,则对焊接性会提出更高的要求。

综上所述,金属的焊接性与以上四方面都有密切的关系,因而,在分析焊接性时,不能单纯地以某一因素独立进行分析,而应结合多方面因素进行综合分析。

1.2 金属焊接性试验方法

随着新材料、新结构、新的工艺方法及服役环境等因素的变化,为了保证优质的焊接接头,必须对产品进行焊接性分析和试验。

1.2.1 金属焊接性试验内容

(1) 焊缝金属抗热裂纹的能力

热裂纹是焊缝中较常见且危害严重的缺陷,因此常用金属抗热裂纹的能力来判定金属材料冶金焊接性的指标。

(2) 焊缝及热影响区抗冷裂纹的能力

抗冷裂纹的能力是判定金属材料冶金焊接性和热焊接性的指标之一,它主要针对线材进行试验。

(3) 焊接接头抗脆性转变的能力

焊接时,焊接接头由于受各种因素的影响会发生脆性转变,从而使韧性降低,将会影响使用焊接性。因而,对于在低温下工作和承受冲击载荷的焊接结构,焊接接头抗脆性转变的能力也是一项重要试验内容。

(4) 焊接接头的使用性能

焊接接头的使用性能对焊接性有不同的要求,因而应根据特定的工作条件和设计的技术要求制定专门的焊接性试验方法。

1.2.2 金属焊接性试验方法

根据不同目的,焊接性的试验方法有很多,如图 1-4 所示。在选择或制定焊接性试验方法时必须遵循针对性、可靠性和经济性的原则。下面分别从工艺和使用焊接性两方面介绍几种常焊接性试验方法。

(1) 工艺焊接性试验方法

① 碳当量估算法 所谓“碳当量”就是把钢中包括碳在内和其他合金元素对淬硬、冷裂及脆化等的影响折合成碳的相当含量。碳当量的计算公式很多,目前以国际焊接学会(IIW)所推荐的 CE(IIW)和日本 JIS 标准所规定的 C_{eq} (JIS)应用较为广泛。

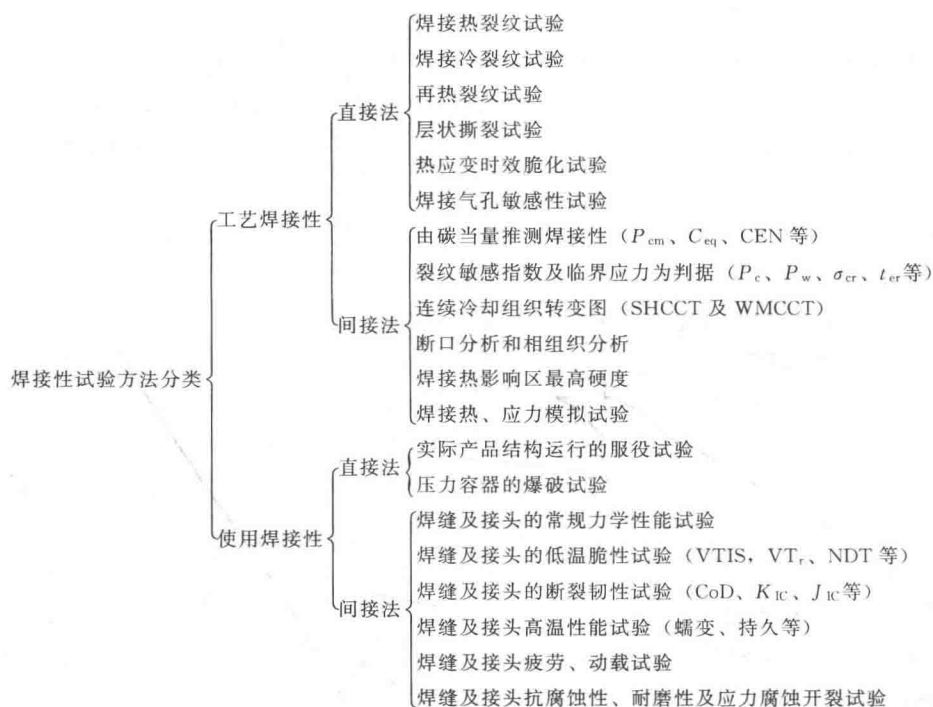


图 1-4 焊接性试验方法分类

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} (\%)$$

此式适用于中高强度的非调质低合金高强钢 ($\sigma_b = 500 \sim 900 \text{ MPa}$) 及含碳量大于 0.18% 的钢种。板厚小于 20mm, $CE(IIW) < 0.4\%$ 时, 钢材的淬硬倾向不大, 焊接性良好, 不需预热; 当 $CE(IIW) = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时, 特别是大于 0.5% 时, 钢材的淬硬倾向大, 焊接时需要预热才能防止裂纹; 当 $CE(IIW) > 0.6\%$ 时, 钢材的淬硬倾向强烈, 属于较难焊的材料, 需要采取较高的预热温度等严格的工艺措施。

例如: 已知 20CrMo 钢中, $w_C = 0.20\%$, $w_{Mn} = 0.5\%$, $w_{Cr} = 0.90\%$, $w_{Mo} = 0.20\%$, $w_{Ni} = 0.030\%$, $w_{Cu} = 0.030\%$, 根据国际焊接学会 (IIW) 所推荐的 $CE(IIW)$ 求该钢种的碳当量, 并判断其焊接性。

解: 根据国际焊接学会 (IIW) 所推荐的 $CE(IIW)$ 如下:

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} (\%)$$

把 20CrMo 钢中各个元素的含量带入公式计算可得

$$CE(IIW) = 0.5\%$$

说明该钢材的焊接性一般, 为了保证焊接质量需要一定的预热等处理措施。

$$C_{eq}(JIS) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%)$$

此式适用于低碳调质低合金高强度钢 ($\sigma_b = 500 \sim 1000 \text{ MPa}$) 及含碳量大于 0.18% 的钢种。其化学成分范围: $w_C \leq 0.2\%$, $w_{Si} \leq 0.55\%$, $w_{Mn} \leq 1.5\%$, $w_{Cu} \leq 0.5\%$, $w_{Ni} \leq 2.5\%$, $w_{Cr} \leq 1.25\%$, $w_{Mo} \leq 0.7\%$, $w_V \leq 0.1\%$, $w_B \leq 0.006\%$ 。

碳当量可预测某钢种焊接性, 从而确定其工艺措施。一般来说, $CE(IIW)$ 和 $C_{eq}(JIS)$

的数值越高，被焊钢材的淬硬倾向越大，热影响区越容易和产生冷裂纹，它们的关系如图 1-5 和表 1-1 所示。

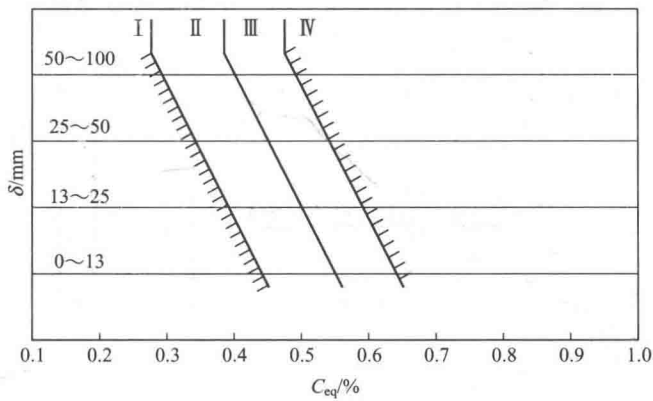


图 1-5 焊接性与 C_{eq} 和板厚 δ 的关系
I ~ IV—焊接性等级，见表 1-1

表 1-1 不同焊接性等级的工艺要求

焊接性	用普通酸性焊条	用低氢焊条	消除应力	敲击处理
I. 优良	不需预热	不需预热	不需	不需
II. 较好	预热 40~100℃	-10℃ 以上不需预热	任意	任意
III. 尚好	预热 150℃	预热 40~100℃	希望	希望
IV. 可以	预热 150~200℃	预热 100℃	必要	希望

② 焊接冷裂纹敏感系数 对于低碳微量多合金元素的低合金高强钢，碳当量估算法就不适用了，日本伊藤等人采用斜 Y 形铁件试验，考虑扩散氢和拘束条件，对 200 多个钢种进行了大量试验，求得了焊接冷裂纹敏感系数计算公式。

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$
$$P_c = P_{cm} + \frac{[H]}{60} + \frac{\delta}{600}$$

式中 P_{cm} ——钢中合金元素的碳当量，%；
 P_c ——焊接冷裂纹敏感系数；
[H]——甘油法测定的扩散氢含量，mL/100g；
 δ ——板厚，mm。

上两式的适用范围： $w_C = 0.07\% \sim 0.22\%$ ， $w_{Si} = 0 \sim 0.60\%$ ， $w_{Mn} = 0.4\% \sim 1.4\%$ ， $w_{Cu} = 0 \sim 0.5\%$ ， $w_{Ni} = 0 \sim 1.2\%$ ， $w_{Mo} = 0 \sim 0.7\%$ ， $w_V = 0 \sim 0.12\%$ ， $w_{Nb} = 0 \sim 0.04\%$ ， $w_{Ti} = 0 \sim 0.05\%$ ， $w_B = 0 \sim 0.005\%$ 。

③ CCT 图或 SHCCT 图法 对于各类低合金钢，可以利用其各自的连续冷却曲线 (CCT 图) 或模拟焊接热影响区的连续冷却曲线 (SHCCT 图) 分析焊接性。这些曲线可以较方便地预测焊接热影响区的组织、性能和硬度，从而可推测某钢在一定焊接条件下的淬硬倾向和冷裂纹敏感性，从而作为调节焊接线能量和改进焊接工艺的依据。

④ 焊接热影响区最高硬度试验方法 此方法可间接判断被焊钢材的淬硬倾向和冷裂纹

的敏感性。试件的尺寸和形状如图 1-6 和表 1-2，其标准厚度为 20mm，若板厚超过 20mm，则须机械切削加工成 20mm 厚，并保留一轧制表面；若板厚低于 20mm，则不需加工。焊前应先把试件表面的水、油、锈和氧化皮等清理干净，试件两端支撑架空，保留足够的空间。

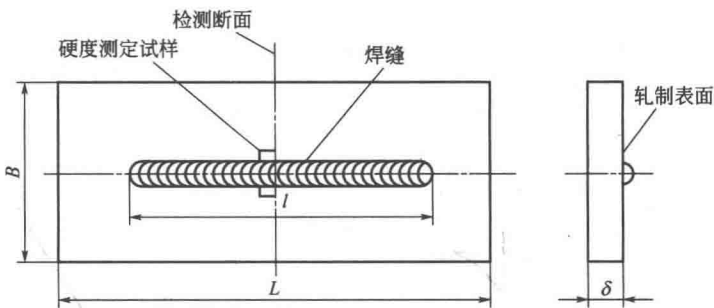


图 1-6 最高硬度试验及取样

表 1-2 热影响区最高硬度试件尺寸

试件号	L/mm	B/mm	l/mm
1 号试件	200	75	125±10
2 号试件	200	150	125±10

1 号试件在室温下焊接，2 号试件在预热温度下焊接，焊接工艺参数为：焊接电流 $I=170\text{A}\pm10\text{A}$ ，焊接速度 $v=150\text{mm/min}\pm10\text{mm/min}$ ，焊条直径 $\phi4\text{mm}$ 。

试件焊好后，让其自然冷却，待 12h 后，用机械加工的方法沿图 1-6 的检测断面进行垂直切割焊道，然后对检测断面进行研磨并腐蚀，按图 1-7 所示的位置，在 O 点两侧每隔 0.5mm 取一个测定点，共取 7 个以上的点，用载荷为 10kg 的维氏硬度进行测量。

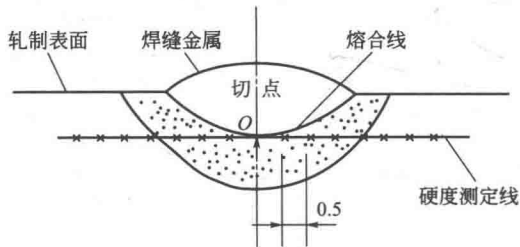


图 1-7 硬度的测量位置

⑤ 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验法 此方法主要用于评价碳素钢和低合金高强度钢打底焊缝及其热影响区的冷裂纹倾向。

a. 制备试件 试件采用机械加工，其形状和尺寸如图 1-8 所示。

b. 试验 焊接工艺参数为：焊接电流 $I=170\text{A}\pm10\text{A}$ ，电弧电压 $U=24\text{V}\pm2\text{V}$ ，焊接速度 $v=150\text{mm/min}\pm10\text{mm/min}$ ，焊条直径 $\phi4\text{mm}$ 。焊条事先应严格烘干。

拘束焊缝用低氢型焊条进行双面焊接，先从背面焊第一层，然后再焊正面第一层，以后依次交替焊接。在焊接时，要注意防止角变形和未焊透。

试验焊缝在焊前应清理干净，最后用丙酮清洗。分别按图 1-9(a)、(b) 所示采用焊条电弧焊或焊条自动送进装置进行焊接。

焊完后将试件放置 48h 后，用肉眼或放大镜检测表面裂纹，然后用机械方法截取一段试

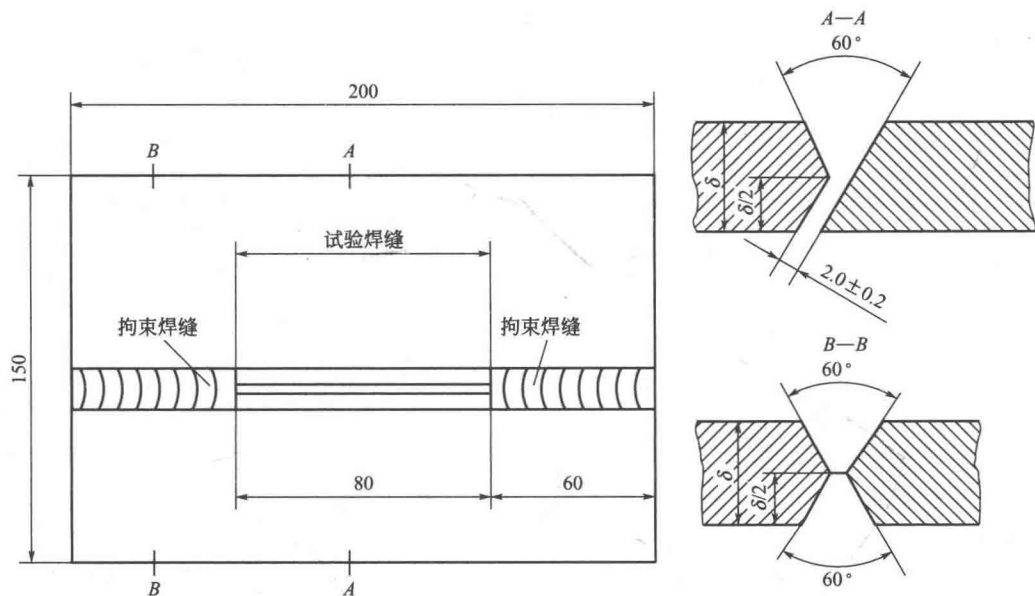


图 1-8 斜 Y 形坡口焊接裂纹试验用试件形状及尺寸

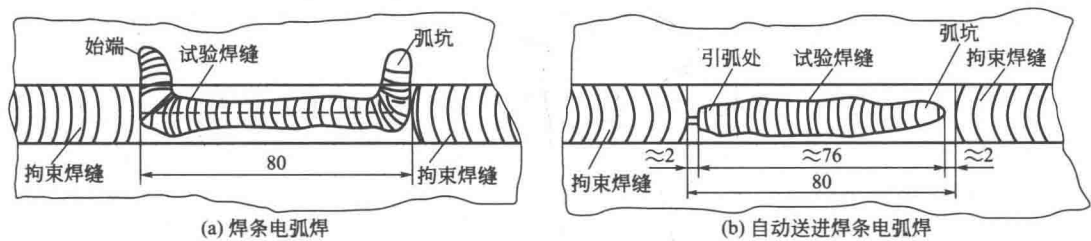


图 1-9 试验焊缝的焊接方式

验焊缝，并对其断面进行研磨腐蚀，用放大 20~30 倍的金相显微镜检测裂纹。

c. 计算 试件上裂纹按图 1-10 所示进行计算。

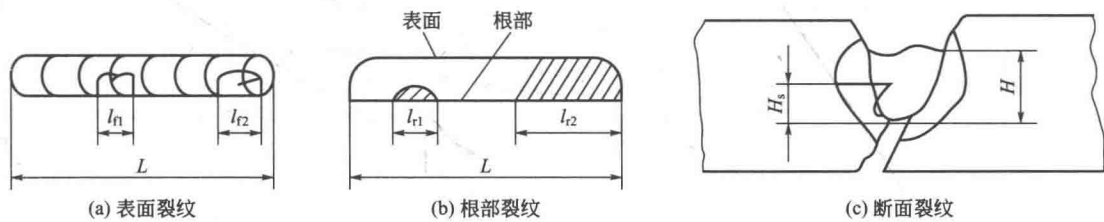


图 1-10 试件上裂纹长度计算

(a) 表面裂纹率

$$C_f = \frac{\sum l_f}{L} \times 100\%$$

式中 C_f ——表面裂纹率，%；

$\sum l_f$ ——表面裂纹长度之和，mm；

L ——试验焊缝的长度，mm。

(b) 根部裂纹 试样先进行着色检测，然后再拉断或弯断。

$$C_r = \frac{\sum l_r}{L} \times 100\%$$

式中 C_r ——根部裂纹率，%；
 $\sum l_r$ ——根部裂纹长度之和，mm；
 L ——试验焊缝的长度，mm。

(c) 断面裂纹率 将试验焊缝宽度开始均匀处与焊缝弧坑中心之间的距离四等分，然后截取五个横断面，分别计算出五个横断面的裂纹率，然后取平均值。

$$C_s = \frac{H_s}{H} \times 100\%$$

式中 C_s ——断面裂纹率，%；
 H ——试样焊缝的最小厚度，mm；
 H_s ——断面裂纹的高度，mm。

由于该试验的接头拘束度大，根部尖角又有应力集中，试验条件苛刻，因而一般认为表面裂纹率小于 20%，用于生产是安全的，但不能有根部裂纹。

除了斜 Y 坡口试件外，还有直 Y 坡口对接裂纹试验，它主要用于考核焊条金属对根部裂纹的敏感性，其试验方法与斜 Y 坡口试件一样。

⑥ 插销试验 此法主要测出材料的临界应力值，再根据临界应力越小的材料，其裂纹敏感性越强的现象来定量测定钢材焊接热影响区的冷裂纹敏感性，由于其操作简便且节省材料，因而得到了广泛应用。

首先将被测材料加工成 $\phi 8\text{mm}$ 或 $\phi 6\text{mm}$ 的圆棒（即插销），并在试件一端开一首尾相接的环形或首尾有一定距离的螺旋缺口，如图 1-11 和表 1-3 所示，缺口位置与线能量有关，如表 1-4 所示。再将试件带有缺口的一端插入加工后的底板的孔内，如图 1-12 所示，其上端与底板的上表面平齐，下端与加载夹头连接。然后在底板上按规定的焊接线能量熔敷一焊道，并使其通过插销的中心，并注意该焊道的熔深应保证缺口位于热影响区的粗晶部位，如图 1-13 所示。

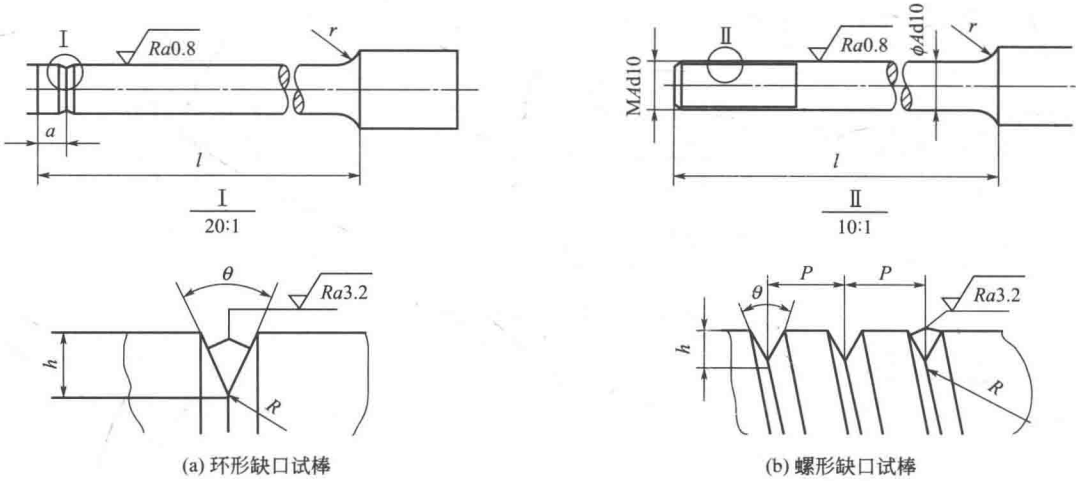


图 1-11 插销试棒的形状

在不预热的条件下，待焊后冷至 100~150℃ 时加载；如有预热，则应高出初始温度 50~70℃ 时加载，规定的载荷应在 1min 内，并在试验冷却到 100℃ 或高出初始温度 50~70℃

表 1-3 插销试棒的尺寸

缺口类别	A/mm	h/mm	θ	R/mm	P/mm	l/mm
环形	8	0.5 ± 0.05	$40^\circ \pm 2^\circ$	0.1 ± 0.02	—	大于底板的厚度， 一般为 30~150
螺形					1	
环形	6	0.5 ± 0.05	$40^\circ \pm 2^\circ$	0.1 ± 0.02	—	

表 1-4 缺口位置与线能量的关系

$E/(kJ/cm)$	a/mm	$E/(kJ/cm)$	a/mm
9	1.35	15	2.0
10	1.45	16	2.1
13	1.85	20	2.4

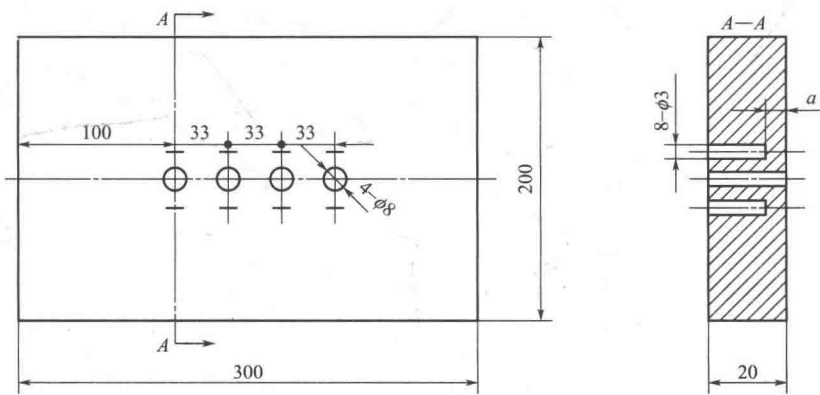


图 1-12 底板形状及尺寸

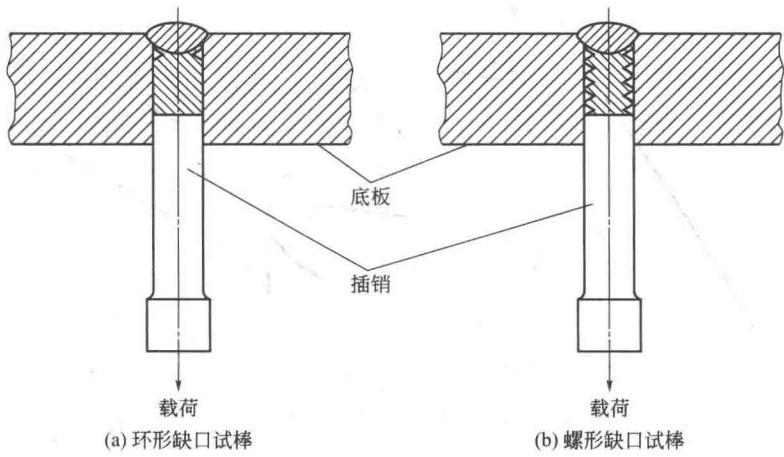


图 1-13 插销、底板及熔敷焊道

以前加载完毕；如有后热，则应在后热以前加载。

对试件加载后并保持到试件断裂，然后再逐渐小载荷重复实验，在无预热条件下，直到试件 16h 后不断裂即可卸载；如有预热或预热后加热时，载荷应至少保持 24h 后不断裂才可卸载，此时得到的应力值即为临界应力值。

⑦ T 形接头焊接裂纹试验法 此法主要用于评定填角焊缝的热裂纹倾向，也可以评定焊条及工艺参数对热裂纹的敏感性。试件的形状和尺寸与图 1-14 所示。

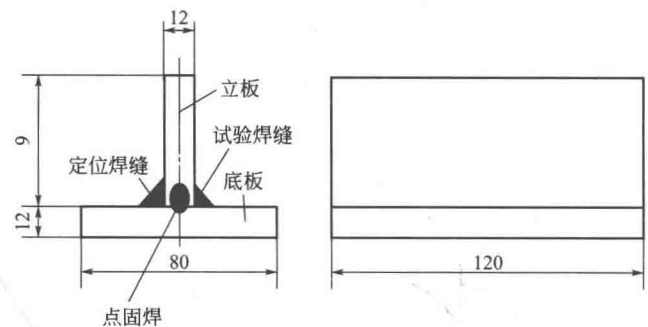


图 1-14 T 形接头试件形状及尺寸

试验时，采用直径为 4mm 的焊条，取电流规定上限进行焊接。在船形焊位置首先焊拘束焊缝 S₁，然后立即焊一道比 S₁ 小的试验焊缝 S₂，二者方向相反，如图 1-15 所示。

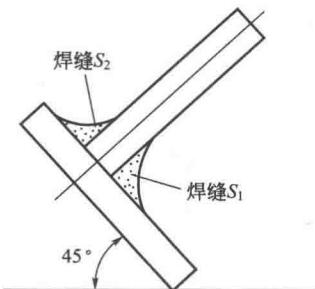


图 1-15 实验焊缝的焊接位置

待焊件冷却后，观察试验焊缝 S₂ 表面，并按下式计算裂纹率：

$$C = \frac{\sum L}{120} \times 100\%$$

式中 C——表面裂纹率，%；
ΣL——表面裂纹长度之和，mm。

工艺焊接性试验方法除了以上介绍的七种方法外，还有十字接头裂纹试验、压板对接（FISCO）焊接裂纹试验、窗口拘束裂纹试验、拉伸拘束试验（TRC 试验）和刚性拘束裂纹试验（RRC 试验）等，这里不再一一介绍。

(2) 使用焊接性试验方法

① 焊接接头力学性能试验 此法主要测定母材、焊缝及热影响区在不同的载荷作用下的强度、塑性和韧性。焊接接头的拉伸、弯曲和冲击等的取样方法如图 1-16 所示，其具体尺寸、数量和试验方法见有关标准及教材，这里不再详述。

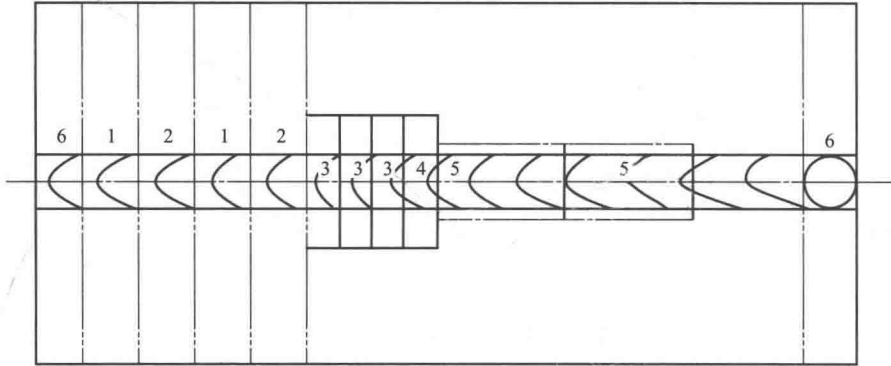


图 1-16 试板样坯截取位置

1—拉伸；2—弯曲；3—冲击；4—硬度；5—焊缝拉伸；6—舍弃

② 焊接接头抗脆断性能试验 此法通过 V 形缺口的冲击试验来评定脆性转变温度。

③ 焊接接头与焊缝金属的疲劳试验 此法主要测定焊接结构在交变载荷作用下的疲劳极限。

④ 焊接接头的抗腐蚀试验 此法主要通过硫酸-硫酸铜腐蚀试验方法(弯曲法)或硫酸-硫酸铁腐蚀试验法(失重法)来评定焊接接头的晶间腐蚀倾向;用恒负荷拉伸试验或 U 形弯曲试验来评定应力腐蚀开裂倾向。

⑤ 焊接接头的高温性能试验 此法主要评定焊接接头在高温下的拉伸强度、持久强度和蠕变极限。

思考与练习

1. 填空题

- (1) 焊接性是表示材料对焊接加工的_____。
- (2) 金属焊接性包括_____和_____两方面的内容。
- (3) 对于熔化焊而言,工艺焊接性可以分为_____和_____。
- (4) 在选择或者制定焊接性试验方法时必须遵循_____、_____和_____的原则。
- (5) 斜 Y 形坡口试验主要用于评价碳素钢和低合金高强钢打底焊缝及热影响区的_____倾向。
- (6) 插销试验主要是用于测定钢材焊接热影响区的_____敏感性。

2. 影响金属焊接性的因素有哪些?

3. 金属焊接性的实验内容有哪些?

4. 已知 12Cr1MoV 钢中, $w_C = 0.15\%$, $w_{Mn} = 0.6\%$, $w_{Cr} = 0.20\%$, $w_{Mo} = 0.30\%$, $w_V = 0.30\%$, 根据国际焊接学会(IIW)所推荐的 CE(IIW) 求该钢种的碳当量。

5. 奥氏体不锈钢(如 0Cr19Ni9)按碳当量或 P_C 的计算公式得出的数值都是很高的, 这是否说明这类钢的裂纹敏感性很高? 为什么?