



普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料焊接性

徐学利 李 霄 主编
何景山 周 勇 主审

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料焊接性

徐学利 李 霄 主编
何景山 周 勇 主审

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是焊接技术与工程专业的核心专业课教材,内容包括:金属焊接性及其试验评定、合金结构钢的焊接、不锈钢及耐热钢的焊接、铸铁的焊接、有色金属的焊接以及异种金属材料的焊接。本书着重于基本概念、基础理论,强调科学性、先进性、工程实用性,注重应用理论解决实际问题,文字简明扼要、通俗易懂。

本书可作为高等学校焊接技术与工程专业的教材,也可作为材料工程(焊接方向)、材料成型及控制工程、过程装备与控制工程、油气储运工程等相关专业的选修课教材或教学参考书,同时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。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料焊接性 / 徐学利, 李霄主编. —北京:
中国石化出版社, 2015. 5
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5114-3202-5

I. ①金… II. ①徐… ②李… III. ①金属材料-焊接-
高等学校-教材 IV. ①TG457. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 034228 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 12.25 印张 293 千字

2015 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

前言



材料是人类用于制造机器、构件和产品的物质，是人类赖以生存和延续的物质基础，是人类社会发展的基石和先导，是人类社会进步的里程碑和划时代的标志。材料、能源和信息被称为人类社会的三大支柱。金属材料一般是指工业应用中的纯金属或合金，由于其具有很好的物理性能、化学性能、力学性能以及工艺性能等，而在工业生产中得到广泛应用。

本书的特点是从焊接角度阐述金属材料焊接性及其焊接的基本理论与概念，通过引用科研和焊接生产实践中的一些技术成果和典型案例，力图由浅入深，充分注意理论性与实践性、系统性与实用性的统一和结合，启发学生独立思考，加强学生理论联系实际的训练，使其初步具备分析和解决金属材料焊接问题的能力。

本书既是高等学校焊接技术与工程专业核心课程教材，也可作为材料工程（焊接方向）、材料成型及控制工程、过程装备与控制工程、油气储运工程等有关专业的选修课教材或教学参考书，同时也可供从事与材料开发和焊接技术相关的工程技术人员参考。

本书由西安石油大学徐学利教授担任主编。其中第1~2章由徐学利教授编写，第3~6章由西安石油大学李霄副教授编写。由哈尔滨工业大学何景山教授、西安石油大学周勇教授担任主审。

本书的出版得到了国家科技支撑计划(2011BAE35B01)和西安石油大学规划教材出版基金的支持，得到了哈尔滨工业大学、西安理工大学等同行的学术帮助，得到了西安石油大学刘彦明、李光等在文图编辑方面的帮助，谨致感谢，同时也向关心本书出版的同行及所援引文献的作者表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中错误或不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

目 录



1 金属焊接性及其试验评定	(1)
1.1 金属焊接性及其影响因素	(1)
1.1.1 焊接性概念	(1)
1.1.2 影响焊接性的因素	(2)
1.2 金属焊接性试验的内容及方法	(3)
1.2.1 焊接性试验的内容	(3)
1.2.2 焊接性试验方法的分类	(4)
1.2.3 选择或制定焊接性试验方法的原则	(5)
1.3 金属焊接性的间接评定方法	(5)
1.3.1 碳当量法	(5)
1.3.2 焊接冷裂纹敏感指数法	(7)
1.3.3 热裂纹敏感性指数法	(7)
1.3.4 再热裂纹指数法	(8)
1.3.5 层状撕裂敏感性指数法	(8)
1.3.6 焊接热影响区最高硬度法	(9)
1.3.7 CCT 图法或 SHCCT 图法	(10)
1.3.8 焊接热-应力模拟法	(10)
1.4 金属焊接性直接试验方法	(13)
1.4.1 焊接冷裂纹试验方法	(13)
1.4.2 焊接热裂纹试验方法	(20)
1.4.3 焊接再热裂纹试验方法	(23)
1.4.4 层状撕裂试验方法	(24)
1.5 几种典型高强钢的焊接裂纹试验	(25)
1.5.1 HQ60 钢	(25)
1.5.2 HQ70 钢	(26)
1.5.3 12MnCrMoVCu 钢	(27)
1.5.4 14MnMoNbB 钢	(27)
1.5.5 HQ100 钢	(28)
思考题	(28)

2 合金结构钢的焊接	(29)
2.1 合金结构钢的分类	(29)
2.1.1 高强度	(29)
2.1.2 珠光体耐热钢	(31)
2.1.3 低温钢	(31)
2.1.4 低合金耐蚀钢	(31)
2.2 高强度钢的成分和性能	(32)
2.2.1 热轧及正火钢的成分和性能	(32)
2.2.2 热机械轧制钢的成分和性能	(34)
2.2.3 低碳调质钢的成分和性能	(35)
2.2.4 中碳调质钢的成分和性能	(37)
2.3 高强度钢的焊接性分析	(39)
2.3.1 热裂纹	(39)
2.3.2 冷裂纹	(39)
2.3.3 再热裂纹	(42)
2.3.4 层状撕裂	(43)
2.3.5 焊接接头的强度匹配和焊缝韧性	(43)
2.3.6 焊接热影响区性能变化	(45)
2.4 高强度钢的焊接工艺特点	(51)
2.4.1 焊接方法的选择	(51)
2.4.2 坡口加工、装配及定位焊	(52)
2.4.3 焊接材料的选择	(52)
2.4.4 焊接工艺参数的确定	(55)
2.4.5 热轧及正火钢的焊接工艺要点	(58)
2.4.6 热机械轧制钢的焊接工艺要点	(60)
2.4.7 低碳调质钢的焊接工艺要点	(64)
2.4.8 中碳调质钢的焊接工艺要点	(65)
2.5 珠光体耐热钢的焊接	(67)
2.5.1 珠光体耐热钢的成分及性能	(67)
2.5.2 珠光体耐热钢的焊接性分析	(70)
2.5.3 珠光体耐热钢的焊接工艺要点	(71)
2.6 低温钢的焊接	(72)
2.6.1 低温钢的成分及性能	(72)
2.6.2 低温钢的焊接性分析	(76)
2.6.3 低温钢的焊接工艺要点	(76)
2.7 典型高强度钢焊接结构的焊接案例	(79)
2.7.1 Q345 工字梁焊接	(79)

2.7.2 X60 陕京输气管线的焊接	(80)
2.7.3 35CrMo 卷轴的焊接	(81)
思考题	(82)
3 不锈钢及耐热钢的焊接	(84)
3.1 不锈钢及耐热钢类型	(84)
3.1.1 基本概念	(84)
3.1.2 按成分分类	(84)
3.1.3 按用途分类	(85)
3.1.4 按组织分类	(85)
3.2 不锈钢及耐热钢的成分和性能	(86)
3.2.1 不锈钢及耐热钢的成分	(86)
3.2.2 不锈钢及耐热钢的物理性能	(86)
3.2.3 不锈钢及耐热钢的力学性能	(89)
3.2.4 不锈钢及耐热钢的耐腐蚀性能	(90)
3.2.5 不锈钢及耐热钢的高温性能	(92)
3.3 奥氏体不锈钢的焊接性分析	(93)
3.3.1 焊接接头耐蚀性	(93)
3.3.2 焊接接头热裂纹	(97)
3.3.3 焊接接头脆化	(100)
3.4 奥氏体不锈钢的焊接工艺要点	(101)
3.4.1 焊接方法的选择	(102)
3.4.2 焊接材料的选择	(102)
3.4.3 其他工艺要点	(102)
3.5 铁素体不锈钢的焊接工艺要点	(104)
3.5.1 铁素体不锈钢焊接性分析	(104)
3.5.2 铁素体不锈钢的焊接工艺要点	(105)
3.6 马氏体不锈钢的焊接工艺要点	(107)
3.6.1 马氏体不锈钢焊接性分析	(107)
3.6.2 马氏体不锈钢的焊接工艺要点	(107)
3.7 铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接工艺要点	(110)
3.7.1 铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接性分析	(110)
3.7.2 铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接工艺要点	(111)
3.8 典型不锈钢及耐热钢焊接案例	(112)
3.8.1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢小径管的焊条电弧焊	(112)
3.8.2 2Cr13 不锈钢阀杆破裂补焊	(113)
3.8.3 双相不锈钢钢管的焊接	(114)
思考题	(115)

4 铸铁的焊接	(116)
4.1 铸铁的种类及性能	(116)
4.1.1 白口铸铁	(116)
4.1.2 灰口铸铁	(117)
4.1.3 可锻铸铁	(118)
4.1.4 球墨铸铁	(119)
4.1.5 蠕墨铸铁	(120)
4.2 灰口铸铁的焊接性分析	(120)
4.2.1 焊接接头白口及淬硬组织	(120)
4.2.2 焊接裂纹	(122)
4.3 灰口铸铁的焊接工艺要点	(123)
4.3.1 同质焊缝(铸铁型)熔化焊	(124)
4.3.2 异质焊缝(非铸铁型)电弧冷焊	(128)
4.3.3 钎焊	(131)
4.3.4 氧乙炔火焰粉末喷焊	(132)
4.4 球墨铸铁的焊接工艺要点	(133)
4.4.1 球墨铸铁的焊接性分析	(133)
4.4.2 球墨铸铁的焊接工艺要点	(133)
4.5 典型灰口铸铁焊接案例	(134)
思考题	(135)
5 有色金属的焊接	(136)
5.1 铝及铝合金的焊接	(136)
5.1.1 铝及铝合金的分类、成分及性能	(136)
5.1.2 铝及铝合金的焊接性分析	(139)
5.1.3 铝及铝合金的焊接工艺要点	(148)
5.2 钛及钛合金的焊接	(153)
5.2.1 钛及钛合金的分类、成分及性能	(153)
5.2.2 钛及钛合金的焊接性分析	(155)
5.2.3 钛及钛合金的焊接工艺要点	(159)
5.3 铜及铜合金的焊接	(161)
5.3.1 铜及铜合金的分类、成分及性能	(161)
5.3.2 铜及铜合金的焊接性分析	(163)
5.3.3 铜及铜合金的焊接工艺要点	(165)
5.4 典型铝及铝合金焊接案例	(168)
思考题	(169)
6 异种金属材料的焊接	(170)
6.1 珠光体钢与奥氏体钢的焊接	(170)

6.1.1 异种钢的焊接性分析	(170)
6.1.2 异种钢的焊接工艺要点	(176)
6.2 复合钢板的焊接工艺要点	(177)
6.3 钢与铝及铝合金的焊接	(179)
6.3.1 钢与铝及铝合金焊接性分析	(179)
6.3.2 钢与铝及铝合金焊接工艺要点	(180)
6.4 钢与铜及铜合金的焊接	(181)
6.4.1 钢与铜及铜合金焊接性分析	(181)
6.4.2 钢与铜及铜合金焊接工艺要点	(182)
6.5 典型异种钢焊接案例	(183)
思考题	(184)
参考文献	(185)



1 金属焊接性及其试验评定

科学研究和工程实践表明,某些金属材料具有较高的强度、塑性和耐蚀性等,但用这些材料制造焊接结构时,因其在焊接加工时所经受的加热、熔化、化学反应、结晶、冷却、固态相变等一系列复杂过程,这些过程又都是在温度、成分及应力极不平衡的条件下发生的,有可能出现裂纹、气孔、夹渣等缺陷,或者虽然能得到完整的焊接接头,但其性能却达不到要求,这就大大限制了这些材料的使用范围。仅从材料本身的化学成分、物理性能和力学性能不足以判断它在焊接过程中是否会出现问题以及焊接后能否满足使用要求,这就要求从焊接的角度出发来分析和研究材料的某些特定性能,也就是材料的焊接性问题。

1.1 金属焊接性及其影响因素

1.1.1 焊接性概念

(1) 焊接性定义

焊接性是指材料是否能适应焊接加工而形成完整的、具备一定使用性能的焊接接头的能力。也就是说,焊接性说明了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(包括焊接方法、焊接材料、焊接参数和结构形式等),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能力。

焊接性包括两方面内容:一是材料在焊接加工中是否容易产生缺陷;二是焊成的接头在一定的使用条件下是否具有可靠运行的能力。这也说明,焊接性不仅包括结合性能,而且也包括结合后的使用性能。

焊接性只是一个相对的概念,对于一定的材料,在简单的焊接工艺条件下,能保证不产生焊接缺陷,且具有优异的使用性能或满足技术条件要求,则认为焊接性优良;必须采用复杂的焊接工艺条件方能实现优质焊接时,则认为焊接性较差。

(2) 焊接性分类

根据焊接性内容所包括的结合性能和使用性能两个方面,焊接性可分为工艺焊接性和使用焊接性。

工艺焊接性是指材料在一定的焊接工艺条件下,能否获得优质、致密、无缺陷焊接接头的能力。它涉及焊接制造工艺过程中的焊接缺陷问题,如裂纹、气孔、断裂等。

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性能的程度,包括常规力学性能(如强度、塑性、韧性等)或特定工作条件下的使用性能(如低温韧性、断裂韧性、高温蠕变强度、持久强度、疲劳性能以及耐蚀性、耐磨性等)。

同时,对于熔化焊而言,焊接过程一般包括冶金过程和热过程。冶金过程主要影响焊缝金属的组织 and 性能,而热过程主要影响热影响区的组织 and 性能,因此又把焊接性分为冶金焊接性和热焊接性。

冶金焊接性是指冶金反应对焊缝化学成分、焊缝缺陷及焊缝使用性能的影响程度,主要包括合金元素的氧化、还原、蒸发,氧、氢、氮等的溶解,还包括焊缝金属对气孔、夹渣、裂纹等缺陷的敏感性,以及对焊缝硬度、强度、韧性、耐蚀性等使用性能的影响。冶金焊接性除受母材本身化学成分的影响之外,焊接材料、保护气体、焊接方法及焊接工艺参数等对冶金焊接性也有一定的影响。一般可在研制新型金属材料时考虑改善冶金焊接性,也可以通过发展新焊接材料、新焊接工艺等途径来改善冶金焊接性。

热焊接性是指焊接热过程对焊接热影响区缺陷和使用性能产生影响的程度,主要包括被焊金属材料的化学成分、物理性能、化学性能、焊接方法、焊接线能量等焊接工艺条件对焊接缺陷的敏感性,以及对热影响区硬度、强度、韧性、耐蚀性等使用性能的影响。与焊缝金属不同,焊接时热影响区的化学成分一般不会发生明显的变化,而且不能通过改变焊接材料来进行调整,即使有些元素可以由熔池向熔合区或热影响区粗晶区扩散,也是很有限的。为了改善热焊接性,除了正确选择母材之外,还要选择适当的焊接方法,确定合理的焊接工艺条件。

1.1.2 影响焊接性的因素

影响焊接性的因素很多,对于金属材料而言,可归纳为材料、设计、工艺及服役环境四大因素。

(1) 材料因素

材料因素不仅包括母材本身的化学成分、冶炼轧制状态、热处理状态、组织状态和力学性能等,也包括所选用的焊接材料,如采用焊条电弧焊时所选用的焊条、采用埋弧焊时所选用的焊丝和焊剂、采用气体保护焊时所选用的焊丝和保护气体等。母材和焊接材料在焊接过程中直接参与熔池或熔合区的冶金反应,对焊接性和焊接质量有重要影响。母材或焊接材料选用不当时,可能会导致焊缝化学成分不合格、力学性能和其他使用性能降低,甚至产生裂纹、气孔、夹渣等焊接缺陷,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。

另外,一方面母材的熔点、导热系数、密度、热容量等因素,也会对其熔化、结晶、相变及焊接热循环产生影响,从而影响焊接性;另一方面,母材中所含元素若与氧的亲合力较强时,在焊接高温下极易氧化,也会对焊接性产生影响。

(2) 设计因素

设计因素是指焊接结构设计的安全性,它不仅受到材料本身性能的影响,而且在很大程度上还受到结构形式的影响。如在焊接结构设计时应尽量使接头处的拘束度较小,能够自由收缩,避免产生焊接裂纹等缺陷。同时,一方面要尽量避免接头处的缺口、截面突变、堆高过大、交叉焊缝等,减少应力集中的影响;另一方面也要避免增大母材厚度或焊缝体积,改善焊接接头应力状态。

(3) 工艺因素

工艺因素包括施工时所选用的焊接方法、焊接工艺措施(如焊接线能量、焊接材料、预热温度、焊接顺序和焊后热处理工艺)等。对于同一种金属材料,选用不同的焊接方法或工

艺措施,所表现出来的焊接性有很大差异。

焊接方法对焊接性的影响,首先是其焊接热源的能量密度、温度以及焊接线能量的大小,其次是焊接保护的方式,如渣保护、气保护、渣-气联合保护以及真空等。对于热敏感性较强的高强钢,从防止过热出发,可选用窄间隙气体保护焊、脉冲电弧焊、等离子弧焊等,有利于改善其焊接性;铝及铝合金用气焊较难进行焊接,但用氩弧焊就能取得良好的效果;钛及钛合金对氧、氮、氢极为敏感,用气焊和焊条电弧焊较难进行焊接,而用氩弧焊或电子束焊就比较容易焊接。

工艺措施对防止焊接缺陷,提高接头使用性能有重要的作用。最常见的工艺措施有焊前预热、焊后缓冷和焊后热处理等。这些工艺措施对防止热影响区淬硬变脆、减小焊接应力、避免氢致冷裂纹等都是较有效的。合理安排焊接顺序能减小应力和变形,原则上应使被焊工件在整个焊接过程中尽量处于无拘束的自由膨胀和收缩状态。

(4) 服役环境因素

服役环境因素是指焊接结构的工作温度、负荷条件(动载、静载、冲击等)和工作环境(化工区、沿海区及腐蚀介质等)。

在高温下工作的焊接结构,要求材料具有足够的耐高温强度,良好的化学稳定性与组织稳定性,较高的蠕变强度等;在常温下工作的焊接结构,要求材料在自然环境中具有良好的力学性能;在低温下工作的焊接结构,要特别注意材料在低温环境下的性能,尤其是韧性,以防止发生低温脆性破坏。焊接结构根据其服役情况的不同,可能承受不同的静载荷、疲劳载荷、冲击载荷等。工作介质有腐蚀性时,要求焊接接头应当具有耐腐蚀性能。一般而言,使用条件越苛刻,焊接性就越不易保证。

总之,焊接性与材料、设计、工艺和服役环境等因素有着密切关系,人们不可能脱离这些因素而简单地认为某种金属材料的焊接性好或不好,也不能只用某一种指标来概括某种金属材料的焊接性,必须根据使用条件对焊接结构的使用要求,结合实际焊接工艺条件评定金属材料的焊接性。

1.2 金属焊接性试验的内容及方法

焊接性试验的目的在于查明材料在指定的焊接工艺条件下可能产生的问题及产生问题的原因,以确定合理的焊接工艺或提出金属材料改进的方向。

1.2.1 焊接性试验的内容

从焊接性的概念出发,结合金属材料的性能特点和焊接结构的服役条件,焊接性试验的主要内容包括以下几个方面。

(1) 焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力

焊接熔池金属结晶时,由于存在一些有害的元素(如S、P等),并受热应力的作用,可能在焊接熔池金属结晶后期产生热裂纹。热裂纹是一种较常发生且危害严重的缺陷,所以焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力是衡量金属材料焊接性的重要内容之一。焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力通常是通过热裂纹试验来进行评定的,热裂纹试验与焊接材料关系密切,同时母

材和焊接工艺也对其有一定的影响。

(2) 焊缝及热影响区金属抵抗产生冷裂纹的能力

焊缝及热影响区金属在焊接热循环作用下, 由于组织及性能变化, 加之受焊接应力和扩散氢的影响, 可能产生冷裂纹。冷裂纹是金属材料焊接过程中可能出现的一种最为严重的焊接缺陷, 所以焊缝及热影响区金属抵抗产生冷裂纹的能力不仅是衡量金属材料焊接性的重要内容, 而且也是最常用的焊接性试验之一。冷裂纹试验一般针对母材进行试验。

(3) 焊接接头抵抗脆性转变的能力

经过焊接过程的局部加热、局部熔化、冶金反应、焊缝结晶、固态相变等一系列过程, 焊接接头由于受晶粒粗化、脆性组织、夹杂物等的影响, 其韧性显著下降, 即焊接接头发生所谓的脆性转变。对于在各种复杂工况环境下工作的焊接结构而言, 焊接接头的韧性下降是导致其脆性破坏的主要原因之一。焊接接头抗脆性转变能力也是衡量金属材料焊接性的一项重要内容。

(4) 焊接接头的使用性能

由于焊接结构的使用性能对金属材料的焊接性提出许多不同的要求, 所以有很多焊接性试验项目是从使用性能角度出发制定的, 即根据特定的使用条件制定专门的焊接性试验方法。如层状撕裂试验、应力腐蚀试验、氢致开裂试验等。

另外, 针对不同的金属材料、不同的焊接材料、不同的焊接工艺、不同的服役条件, 金属材料焊接性试验的内容还包括焊缝金属抵抗产生气孔、夹渣(夹杂)等焊缝缺陷的能力、热影响区金属抵抗产生再热裂纹的能力等。

1.2.2 焊接性试验方法的分类

焊接性试验方法有许多种, 按照其特点可以归纳为间接评定法和直接试验法两种类型。

(1) 间接评定法

这类焊接性评定方法一般根据母材或焊缝金属的化学成分-组织-性能之间的关系, 结合焊接热循环过程特点进行分析或评价。

1) 工艺焊接性的间接评定。常用的有碳当量法、焊接裂纹敏感指数法、连续冷却组织转变曲线法、焊接热-应力模拟法、焊接热影响区最高硬度法和焊接断口分析及组织分析法等。

2) 使用焊接性的间接评定。常用的有焊缝及焊接接头的常规力学性能试验, 焊缝及焊接接头的断裂韧性试验, 焊缝及焊接接头的低温脆性试验, 焊缝及焊接接头的高温性能试验, 焊缝及焊接接头的耐腐蚀性、耐磨损性试验和焊缝及焊接接头的疲劳试验等。

(2) 直接试验法

这类焊接性试验方法一般是仿照实际焊接条件, 通过焊接过程观察是否产生某种焊接缺陷或产生缺陷的程度大小, 直观地评定金属材料的焊接性。

1) 焊接冷裂纹试验。常用的有斜 Y 形坡口焊接裂纹试验、插销试验、拉伸拘束裂纹试验和刚性拘束裂纹试验等。

2) 焊接热裂纹试验。常用的有可调拘束裂纹试验、压板对接裂纹试验和刚性固定对接裂纹试验等。

3) 再热裂纹试验。常用的有 H 形拘束试验、缺口试棒应力松弛试验和 U 形弯曲试验等, 也可以利用斜 Y 形坡口对接裂纹试验或插销试验进行再热裂纹试验。

4) 层状撕裂试验。常用的有 Z 向拉伸试验、Z 向窗口试验等。

5) 应力腐蚀裂纹试验。常用的有 U 形弯曲试验、缺口试验和预制裂纹试验等。

6) 实际产品结构实物试验。常用的有水压试验、爆破试验、结构运行的服役试验等。

1.2.3 选择或制定焊接性试验方法的原则

国内外有关焊接性试验方法已经有许多种, 而且随着科学技术的发展及金属材料性能要求的不断提高, 焊接性试验方法还会不断增多。选择或制定焊接性试验方法时必须遵循下列原则:

1) 可比性。焊接性试验的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、环境温度、接头受力状态和焊接工艺参数等, 而且试验条件还应考虑到产品的使用条件, 尽量使之接近。只有这样才能使焊接性试验结果比较确切地显示出实际生产时可能发生的问题或可能获得的结果, 才有可比性。

2) 针对性。应针对具体焊接结构制定焊接性试验方案, 其中包括母材、焊接材料、接头形式、接头应力状态、焊接工艺参数等。同时试验条件还应考虑到产品的使用条件。国家或国际上已经颁布的标准试验方法, 应优先选择, 并严格按标准的规定进行试验, 还没有建立相应标准的, 应选择国内外同行中较为通用的或公认的试验方法, 这样才能使焊接性试验具有良好的针对性, 试验结果才能比较确切地反映出实际生产中可能出现的问题。

3) 再现性。焊接性试验的结果要稳定可靠, 应具有较好的再现性。试验所得数据不可过于分散, 只有这样才能正确显示变化规律, 获得能够指导实际生产的结论。为此, 试验方法应尽可能减少或避免人为因素的影响, 多采用自动化、机械化的操作, 少采用人工操作。另外, 应严格控制试验条件, 避免随意性。

4) 经济性。应注意试验方法的经济性。在能获得可靠试验结果的前提下, 应力求减少材料消耗, 避免复杂昂贵的加工工序, 缩短试验周期, 节省试验费用。

1.3 金属焊接性的间接评定方法

金属材料焊接性的间接评定方法包括工艺焊接性的间接评定方法和使用焊接性的间接评定方法两个方面。一般而言, 焊接工作者首先关注的是金属材料的工艺焊接性, 因此本节主要介绍金属材料工艺焊接性的间接评定方法。

1.3.1 碳当量法

钢材的化学成分对焊接热影响区的淬硬、冷裂及脆化倾向有直接影响, 因此可以利用钢材的化学成分来间接评定其对焊接冷裂纹的敏感性。对钢材中的各种元素而言, 碳对焊接冷裂纹敏感性的影响最为显著。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为碳的相对含量, 作为粗略评定钢材冷裂倾向的参数指标, 即所谓碳当量 (Carbon Equivalent, CE 或 C_{eq})。

由于世界各国和各研究单位所采用的试验方法和钢材的合金体系不同，各自建立了许多有一定适用范围的碳当量计算公式。

(1) 国际焊接学会(IIW)推荐采用

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\%) \tag{1-1}$$

此式适用含碳量较高($w_C \geq 0.18\%$)，强度级别中等($R_m = 500 \sim 900\text{MPa}$)的非调质低合金高强钢。对于板厚小于 20mm 的钢板， $CE < 0.4\%$ 时，钢材淬硬倾向不大，焊接性良好，焊前可不预热；当 $CE = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时，尤其是大于 0.5%时，钢材易淬硬，焊接性变差，焊前需要预热才能防止裂纹，且随着钢板厚度的增加，其预热温度也应相应地提高。

(2) 日本焊接工程师学会(JIS)推荐采用

$$CE_{JIS} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (\%) \tag{1-2}$$

此式适用低碳调质钢($R_m = 500 \sim 1000\text{MPa}$)，其化学成分范围： $w_C \leq 0.2\%$ 、 $w_{Si} \leq 0.55\%$ 、 $w_{Mn} \leq 1.5\%$ 、 $w_{Cu} \leq 0.5\%$ 、 $w_{Ni} \leq 2.5\%$ 、 $w_{Cr} \leq 1.25\%$ 、 $w_{Mo} \leq 0.7\%$ 、 $w_V \leq 0.1\%$ 、 $w_B \leq 0.006\%$ 。对于板厚小于 25mm，手工焊线能量 17kJ/cm，被焊钢材强度与其预热温度范围见表 1-1。

表 1-1 钢材强度与其预热温度范围

钢材强度 R_m 级别/MPa	碳当量 $CE_{JIS} / \%$	预热温度 T_p 范围/ $^{\circ}\text{C}$
500	0.46	不预热
600	0.52	75
700	0.52	100
800	0.62	150

(3) 美国焊接学会(AWS)推荐采用

$$C_{eq\text{AWS}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \left(\frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} \right) \quad (\%) \tag{1-3}$$

此式适用碳钢和低合金高强钢，其化学成分范围： $w_C \leq 0.6\%$ 、 $w_{Mn} \leq 1.6\%$ 、 $w_{Ni} \leq 3.3\%$ 、 $w_{Mo} \leq 0.6\%$ 、 $w_{Cr} \leq 1.0\%$ 、 $w_{Cu} = 0.5\% \sim 1\%$ 、 $w_P \leq 0.05\% \sim 0.15\%$ 。一般根据计算所得的碳当量再结合焊件的厚度，先从图 1-1 中查出该钢材焊接性等级，再从表 1-2 中确定其最佳焊接工艺措施。

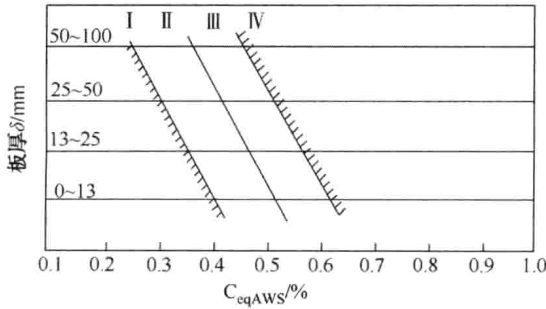


图 1-1 碳当量(C_{eq})与板厚 δ 的关系
I—优良；II—较好；III—尚好；IV—尚可

表 1-2 不同焊接性等级钢材的最佳焊接工艺措施

焊接性等级	酸性焊条	碱性低氢型焊条	消除应力	敲击焊缝
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 (尚可)	预热 150~200℃	预热 100℃	需要	希望

上述几种碳当量计算公式都说明,碳当量越大,冷裂倾向也越大。但用碳当量评定钢材焊接性是比较粗略的,这是因为公式中只包括了几种元素,而实际钢材中还含有其他元素;在不同含量和不同合金系统中各元素作用的大小不可能是相同的;元素之间的相互影响也不能用简单的公式反映。所以,碳当量法一般仅限于从理论上对钢材的焊接性进行初步分析,而且在应用时还应特别注意有关公式的适用范围。

1.3.2 焊接冷裂纹敏感指数法

合金结构钢焊接时产生冷裂纹的原因除化学成分外,还与焊缝金属组织、扩散氢含量、接头拘束度等密切相关。通过对 200 余种不同化学成分钢材,不同厚度及不同的焊缝含氢量进行试验,求得的几种冷裂纹敏感性、预热温度计算公式及其应用条件见表 1-3。

表 1-3 几种冷裂纹敏感性、预热温度计算公式及其应用条件

冷裂纹敏感性公式	预热温度/℃	应用条件
$P_c = P_{cm} + \frac{[H]}{60} + \frac{\delta}{600}$ $P_w = P_{cm} + \frac{[H]}{60} + \frac{R}{400000}$	$T_0 = 1440P_c - 392$	斜 Y 形坡口试件,适用于 $w_c \leq 0.17\%$ 的低合金钢, $[H] = 1 \sim 5\text{mL}/100\text{g}$, $\delta = 19 \sim 50\text{mm}$
$P_H = P_{cm} + 0.0751g[H] + \frac{R}{400000}$	$T_0 = 1600P_H - 408$	斜 Y 形坡口试件,适用于 $w_c \leq 0.17\%$ 的低合金钢, $[H] > 5\text{mL}/100\text{g}$, $R = 500 \sim 33000\text{MPa}$
$P_{HT} = P_{cm} + 0.0881g[\lambda H'_D] + \frac{R}{400000}$	$T_0 = 1400P_{HT} - 330$	斜 Y 形坡口试件, P_{HT} 考虑了氢在熔合区附近的聚集

表中, $[H]$ 为熔敷金属中的扩散氢含量 ($\text{mL}/100\text{g}$), 可采用日本 JIS 甘油法与我国 GB/T 3965—2012 测氢法测定; δ 为被焊钢材板厚 (mm); R 为拘束度 (MPa); $[H'_D]$ 为熔敷金属中的有效扩散氢含量 ($\text{mL}/100\text{g}$); λ 为有效系数 (低氢型焊条 $\lambda = 0.6$, $[H'_D] = [H]$; 酸性焊条 $\lambda = 0.48$, $[H'_D] = [H]/2$); P_{cm} 为冷裂纹敏感系数。

$$P_{cm} = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{V}}{10} + 5B \quad (\%) \quad (1-4)$$

此公式适用的化学成分范围: $w_C = 0.07\% \sim 0.22\%$ 、 $w_{Si} \leq 0.60\%$ 、 $w_{Mn} = 0.40\% \sim 1.40\%$ 、 $w_{Cu} \leq 0.50\%$ 、 $w_{Ni} \leq 1.20\%$ 、 $w_{Cr} \leq 1.20\%$ 、 $w_{Mo} \leq 0.70\%$ 、 $w_V \leq 0.12\%$ 、 $w_{Nb} \leq 0.04\%$ 、 $w_{Ti} \leq 0.50\%$ 、 $w_B \leq 0.005\%$ 。

1.3.3 热裂纹敏感性指数法

考虑化学成分对焊接热裂纹敏感性的影响,对于一般低合金高强度钢,包括低温钢和珠光体耐热钢,可采用热裂纹敏感性指数 (HCS) 进行间接评定;对于高强度级的合金结构钢,可

采用临界应变增长率(CST)进行间接评定,其计算公式分别为:

$$HCS = \frac{C(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100})}{3Mn + Cr + Mo + V} \times 10^3 \quad (1-5)$$

当 $HCS \leq 4$ 时,热裂纹敏感性较低。一般 HCS 越大,钢材热裂纹敏感性也越大。

$$CST = (-19.2C - 97.2S - 0.8Cu - 1.0Ni + 3.9Mn + 65.7Nb - 618.5B + 7.0) \times 10^{-4} \quad (1-6)$$

当 $CST \geq 6.5 \times 10^{-4}$ 时,热裂纹敏感性较低。一般 CST 越大,钢材热裂纹敏感性越小。

1.3.4 再热裂纹指数法

根据合金元素对低合金结构钢再热裂纹敏感性的影响,可采用下列方法评定其再热裂纹敏感性。

(1) ΔG 法

$$\Delta G = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2 \quad (\%) \quad (1-7)$$

当 $\Delta G < 0$ 时,不易产生再热裂纹; $\Delta G \geq 0$ 时,对再热裂纹敏感。对于碳含量 $w_c > 0.1\%$ 的低合金钢,式(1-7)可修正为:

$$\Delta G' = \Delta G + 10C = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2 + 10C \quad (\%) \quad (1-8)$$

当 $\Delta G' \geq 2$ 时,对再热裂纹敏感,易产生再热裂纹;当 $1.5 \leq \Delta G' < 2$ 时,对再热裂纹中等敏感;当 $\Delta G' < 1.5$ 时,对再热裂纹不敏感,不易产生再热裂纹。

(2) P_{SR} 法

$$P_{SR} = Cr + Cu + 2Mo + 5Ti + 7Nb + 10V - 2 \quad (\%) \quad (1-9)$$

当 $P_{SR} \geq 0$ 时,对再热裂纹敏感。

此公式适用的化学成分范围: $w_{Cr} \leq 1.5\%$ 、 $w_{Mo} \leq 2.0\%$ 、 $w_{Cu} \leq 1.0\%$ 、 $0.10\% \leq w_c \leq 0.25\%$ 、 $w_{V+Nb+Ti} \leq 0.15\%$ 。

1.3.5 层状撕裂敏感性指数法

考虑层状撕裂属于低温开裂,主要与钢中夹杂物的数量、种类和分布等有关,在对抗拉

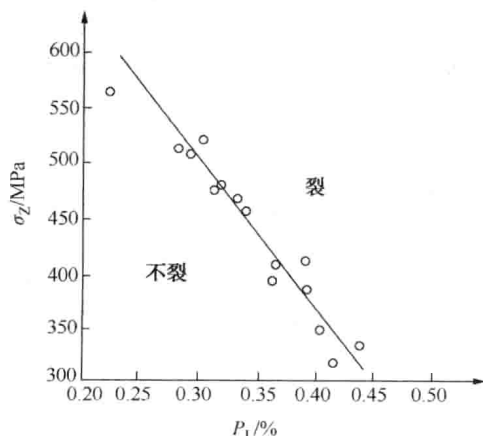


图 1-2 层状撕裂敏感指数 P_L 与临界应力值 σ_Z 的关系

强度为 500~800MPa 的低合金结构钢进行插销试验(沿板厚方向截取试棒)和窗形拘束裂纹试验的基础上,提出下列计算层状撕裂敏感指数的公式。

$$P_L = P_{cm} + \frac{[H]}{60} + 6S \quad (1-10)$$

式中 P_{cm} ——冷裂纹敏感系数,见式(1-4);

$[H]$ ——熔敷金属中的扩散氢含量, mL/100g;

S ——钢中的硫含量, %。

上式适用于低合金结构钢焊接热影响区附近产生的层状撕裂。根据层状撕裂敏感指数 P_L 在图 1-2 中可求得插销试验 Z 向不产生层状撕裂的临界应力值 σ_Z 。