

工人高级操作技能
训练辅导丛书

电焊工

工人高级操作技能训练辅导丛书编委会 编

机械工业出版社

56143
37
3

工人高级操作技能训练辅导丛书

电 焊 工

工人高级操作技能训练辅导丛书编委会 编

10765/23



机械工业出版社



B753216

本书主要介绍焊接性试验的本质、常用材料的焊接特点及焊接材料；手弧焊、埋弧焊、电渣焊及气体保护焊的操作方法及新发展；焊接返修；分析和编制焊接工艺及焊接管理等内容。提供了许多新的数据、资料、标准，在编写时着重生产实践与理论相结合。

本书是高级电焊工操作技能培训的教学参考书，也可供有关人员，特别是从事焊接生产实际工作的人员参考。

本书由上海锅炉厂范铮主编，江汉承(第四单元)、戴锁(第五单元)、陈迺虎(第七单元)协编，由郑州电缆厂李仁义主审，上海锅炉厂牛明安协审。

电 焊 工

工人高级操作技能训练辅导丛书编委会 编

责任编辑：何月秋 责任校对：宁秀娥
封面设计：肖 晴 版式设计：霍永明
责任印制：张俊民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 24 ·字数 587 千字

1991年3月北京第一版·1991年3月北京第一次印刷

印数 00,001—12,500·定价：11.20元

ISBN 7-111-02387-0/TG·568

工人高级操作技能训练辅导丛书
编委会名单

主任委员：郭洪泽

副主任委员：李宜春 田国开

委员：（以姓氏笔划为序）

王美珍 刘葵香 杨晓毅 张惠英 胡有林

胡振中 董无岸 董慎行

前 言

高级技术工人是体力劳动与脑力劳动融为一体的新型的专门人才，是增强企业活力和国家四化建设的重要技术力量。高级技术工人的状况如何，是企业素质好坏的一个重要标志。

当前，机电工业企业中高级技术工人数量不足、技术素质偏低、年龄偏高、青黄不接，后继乏人，已成为企业生产发展和技术进步的严重障碍。大力开展高级技术工人培训工作，加紧培养一批高级技术工人，尽快改变企业高级工严重短缺的局面，建成一支以中级工为主体，高级工为骨干的技术工人队伍，是进一步发展机电工业的当务之急。

1987年原国家机械工业委员会制定颁布了《工人高级操作技能训练大纲(试行)》，作为机械行业开展高级工操作技能培训的依据。为了帮助企业更好地贯彻《大纲》，提高技能培训质量，并为广大中、高级技术工人自学成才提供方便，现又组织力量编写了《工人高级操作技能训练辅导丛书》。《丛书》共16种，包括了《大纲》中列入的15个通用技术工种，有车工、镗铣工(镗工部分)、镗铣工(铣工部分)、刨工、磨工、齿轮工、钳工、工具钳工、铸造工、锻工、模锻工、铆工、电焊工、模型工、热处理工和维修电工。

《丛书》是依据《工人技术等级标准(通用部分)》中有关工种的“应会”部分和《工人高级操作技能训练大纲(试行)》的要求编写的。编写的指导思想坚持了“面向企业，面向生产，自学为主，学以致用”的原则，紧密围绕提高工人的实际操作技能和分析解决生产中实际问题的能力这一根本宗旨，重点介绍了具有代表性和先进性的生产工艺、设备及操作方法、技能技巧，并把有关的技能知识有机地融合进去。

在具体内容的安排上，各书以本工种中级工“应会”为起点，依次介绍了高级工应掌握的复杂设备的调整、试车方法；复杂装置和设备生产岗位的全部操作要求；复杂、典型零件的加工工艺、检查方法和先进的操作技巧；国内外有关的新技术、新工艺、新材料、新设备的推广、应用情况。书中收集列举了大量的操作实例，图文并茂，具有较强的针对性、实用性，有助于工人举一反三，利用所掌握的工艺分析能力、技能知识和操作方法，解决生产中的实际问题，开展技术革新。

《丛书》是由上海机电工业管理局组织企业的工程技术人员、技工培训教师和优秀的老技师、老工人合作编写的。北京、江苏、河南、湖南、陕西等省、市机械工业企业的有关同志参加了审稿。

编写、出版高级工操作技能训练方面的书，在我国还是第一次，缺乏借鉴，难度很大。为了编好《丛书》，编、审人员和有关方面付出了艰巨的劳动，谨向他们致以衷心的感谢！并恳切地希望广大技工教育工作者和读者给《丛书》多提宝贵意见，以便将来修订，使之更好地为高级工培训工作服务。

工人高级操作技能训练辅导丛书编委会

1989年2月

目 录

前言

第一单元 概述	1
第二单元 常用金属材料及其焊接特点	3
(一) 焊接性试验方法及选择	3
(二) 常用金属材料及其焊接特点	36
第三单元 焊接材料	63
(一) 手工电弧焊焊条	63
(二) 埋弧焊及电渣焊用焊丝、焊剂	88
(三) 气体保护焊用焊接材料	94
(四) 常用压力容器、管道焊接材料的选用推荐表	98
第四单元 手工电弧焊的操作技能	102
(一) 手工电弧焊电源	102
(二) 板状试件的单面焊双面成形焊接	107
(三) 小直径管状试件的单面焊双面成形焊接	117
(四) 大直径管状试件的单面焊双面成形焊接	123
(五) 管-板试件单面焊双面成形焊接	126
(六) 单面焊双面成形连弧焊操作法实例	133
第五单元 埋弧焊	139
(一) 自动埋弧焊机及其调节原理	139
(二) 纵、环缝焊接	143
(三) 埋弧焊应用特例	159
第六单元 电渣焊	173
(一) 电渣焊的特点	173
(二) 丝极电渣焊	175
(三) 电渣焊的其它应用	179
第七单元 气体保护焊	183
(一) 钨极氩弧焊	183
(二) 气体保护焊应用的新发展	193
第八单元 焊接检验	207
(一) 焊接质量检验的要求和分类	207
(二) 焊接接头的非破坏性试验方法	209
(三) 焊接接头的破坏性试验方法	217
第九单元 焊接应力与变形	223
(一) 焊接应力与变形产生的原因	223
(二) 焊接应力	226
(三) 焊接变形	235
第十单元 铸铁补焊技术	249
(一) 铸铁的种类、牌号和性能	249

(二) 铸铁补焊方法的选择.....	254
(三) 铸铁件补焊实例.....	256
第十一单元 不锈钢、异种金属的焊接	266
(一) Cr不锈钢的焊接.....	266
(二) Cr-Ni不锈钢的焊接	270
(三) 异种金属的焊接.....	274
第十二单元 焊接工艺分析及典型产品焊接实例.....	283
(一) 工艺分析基础.....	283
(二) 焊接工艺分析实例.....	284
(三) 典型产品焊接实例.....	289
第十三单元 焊接缺陷的处理及返修.....	319
(一) 返修工艺的编制原则.....	319
(二) 返修实例.....	323
第十四单元 焊接管理.....	331
(一) 焊接质量保证.....	331
(二) 焊接工艺管理.....	334
(三) 焊工管理.....	358
(四) 焊接材料管理.....	367
附录 文中引用的名词、术语的外文缩写及常用代号与中文的对照	372

第一单元 概 述

焊接是一门涉及多种学科的工艺技术, 仅就熔焊而言, 使用的专用电焊设备, 除了提供能源的电焊变压器、发电机外, 还涉及焊机的机械结构和电气控制部分, 焊工至少要能掌握操纵这些设备。熔化电焊是一种微型电冶金, 除了像熔炼钢铁那样有物理、化学的冶金反应外, 更有许多特殊的地方, 如熔池小、凝固快、反应时间短, 整个过程在非平衡状态下进行。焊接作为工艺手段, 要在瞬变即逝的短小时内通过“微冶金”完成焊缝, 并要一次成功, 这就不能不对母材进行研究、对焊接材料进行选择、对焊接工艺参数进行试验。一名高级焊工要有熟练的技艺、必要的基础理论知识和理论联系实际、解决实际问题的能力, 才能焊出合乎要求的焊接接头。

按照《工人高级操作技能训练大纲》的要求, 高级电焊工应具备四方面的能力:

- ① 必要的基础理论知识;
- ② 熟练的操作技巧;
- ③ 丰富的生产经验;
- ④ 判定工艺及解决焊接生产技术问题的应变能力。

本书内容大致按这些要求安排。

焊接对象是材料和结构。按照现代工程结构的工况条件(高温、高压、动载、低温、腐蚀等)对材料相应性能的要求, 从结构安全运行的角度引出对焊接接头的要求, 从而联系到与焊工操作技能和实现工艺规范技巧的关系。合金钢与合金的出现, 使焊接热影响区复杂化, 这就要求焊工要控制和改善不均匀和不平衡的组织状态, 要具备各种热处理理论知识并应用于操作实践; 还要注意钢中杂质的影响, 因为它往往成为焊接成败的关键。材料的焊接性及其评定方法以及各种材料的性能、焊接特点及其与焊材的匹配, 都是高级焊工必不可少的基础知识。

焊接检验不是对焊工本人的要求, 但却是考核焊工工作成果及保障产品质量的手段。高级焊工较深入地了解焊接检验的特点, 对运用基础理论知识、结合操作技能、获得优质焊接接头是很重要的。一位精明的焊工在接受焊接任务时, 往往是先了解要作哪些焊接检验, 以掌握焊接任务的重要程度, 从而考虑他的技能水平如何适应。控制焊接应力与变形可以说是高级焊工与初、中级焊工区分的标志。本书提供一些基本规律和定量数据, 以备焊工应变具体情况时参考。

焊接结构件的制造必须组织生产去完成, 而完成生产又必须事先做好技术准备, 还要组织好现场施工。对锅炉、压力容器这类重要结构, 国家为保证其安全运行, 以法令(《安全技术监察规程》)形式规定了其技术条件和管理程序。编写工艺守则和工艺试验报告、编制工艺或施工作业指导书, 是焊前技术准备工作之一。编写焊接工艺说明书(WPS)及进行焊接工艺评定(PQR)是锅炉、压力容器及其它重要结构件焊接的必要程序, 也是世界各国的通用程序。这也是焊前技术准备工作的重要内容。焊接除了作为焊接结构制造的重要工艺手段之外, 还用于完成修补的任务(其中包括堆焊及作为制造复合材料的手段), 以延长结构寿命、节约

投资。返修工作常常要受到结构环境、现场条件等各方面的约束，不能象生产制造那样创造优良条件，因此就必须充分发挥高级焊工理论联系实际、灵活机动地适应环境与熟练精细的操作技巧相结合的综合应变能力。焊接结构的产生往往有多种工艺可选择，故必须进行工艺分析，采取最佳方案。重要产品的质量保证还要求搞好焊接管理。本书列举了各类典型产品的焊接、修补工艺，力求从材料、焊接工艺方法、焊接设备、辅助装置、施工方法、焊接管理等多方面提高高级焊工的实际操作技能。

读者不是初学，故本书的内容深浅程度照顾中级到技师的衔接；但又不是是一本严密的教科书，内容由浅入深、由基础知识到应用实例安排，很多内容都有前后参照、联系思考的必要。近年来，我国执行开放政策，许多标准等效采纳或参照了国外的先进标准，在焊接和材料方面尤其突出，本书介绍了一些新标准内容以备查考。为了便于对外联系，在某些焊接术语后标注了国际较通用的英文缩写。文中较全面地介绍了有关操作方面的实践经验，并给出了实例，这些实例是经过摘选的，值得很好借鉴，希望读者能“举一反三”，但也不要受这些实例的约束，必须“具体情况具体分析”。各单元后面都附有若干思考题，主要是为了帮助读者复习所学过的知识，以便启发思考。思考题答案的基本内容在各单元都可找到，但不一定限于该单元；有些答案不能在书中直接找到，而是要真正思考一番，或者可参考一些其它资料，或者回答的前提条件要自己设立。这些都是为了启发思考、发挥读者自己的聪明才智。

对高级工的考核，应以《工人高级操作技能训练大纲（试行）》（1987年12月）规定的“考核实例”为准。

第二单元 常用金属材料及其焊接特点

内容提示 本单元是必要的焊接基础理论知识。介绍焊接性的概念、评定方法及选择；介绍常用金属材料的成分、性能、焊接特点及应用范围。

目的 认识材料是焊接工作的对象，更是构成工程结构的主体，只有充分了解材料特点、结构特点、焊接工艺特点（包括操作方法）以及它们之间相互的影响，才能焊出优良的焊接接头，并保证工程结构的使用性能和安全性。

（一）焊接性试验方法及选择

1. 焊接性的概念及其评定

焊接性过去常称为可焊性，是一种综合性能，它是衡量某种金属对焊接适应性的一种尺度。由于焊接难易程度受焊接操作、焊接工艺的影响，所以比较金属的焊接性时应该采用同样的焊接操作和焊接工艺。某种材料采用的焊接操作和焊接工艺越简单代价越低，它的焊接性就越好。

从日常焊接生产中常碰到的焊接缺陷来看，在焊缝中出现的有：冷裂纹或热裂纹、气孔、夹杂物、咬边等，这固然与母材有关，但更多地与焊接工艺和操作方法有关。在母材及热影响区出现的缺陷有：冷裂纹、热裂纹、晶粒长大、析出脆化等，这虽与焊接工艺有关，但更多地是由母材的性能决定的。在使用过程中对焊接结构使用性能有影响的物理、化学性能有：强度、塑性、缺口韧性、蠕变强度、疲劳强度（包括热疲劳）、应力腐蚀、导磁性、加工性、抗中子辐射等，这是结构本身的使用价值所在。设计师往往在使用性和经济性（包括制造工艺的难易）之间来考虑选择材料和结构形式，通常设计师们是偏重于按结构使用性能的要求来定材料和结构形式的，因此就相应增加了结构制造工艺，特别是焊接工作的困难，给焊工操作提出了更高的要求，这些都牵涉到所谓“焊接性”的问题。焊接性涉及到几个方面：一个是材料方面，主要是冶金因素，称为冶金焊接性；一个是制造条件方面，涉及所用焊接方法和采取的工艺措施，称为工艺焊接性；再一个是结构方面，它包括结构形式、焊接接头形式、坡口形式、结构对使用性能的要求，称为使用焊接性。尽管对焊接性的研究是研究所或高等学校的事，但事实上，任何一种焊接结构都是由焊工来完成的，都涉及焊接方法和工艺措施，任何一种冶金上难焊的材料，都必然增加焊接工艺上的复杂性；任何一种使用上有特殊性能或较高性能要求的结构，也必须对焊接工艺或所完成的焊缝提出更多的规定或要求，这些都与焊工的操作有关，这就对高级焊工提出了要求，正如实践中常遇到的那样，凡是难焊的材料或重要结构的焊接，都要安排高级焊工去完成。为此，高级焊工要对焊接性概念及其评定方法作一些了解，以便指导正确的操作实践。

（1）冶金焊接性 一种金属或两种金属对任何一种具体焊接方法应具有冶金相容性，就是焊接时母材和焊缝金属在常见的稀释率（设填充金属量为 A ，母材量为 B ，则焊缝中填充

金属被稀释的百分数称为稀释率, 稀释率 $=\left(\frac{B}{A+B} \times 100\%\right)$ 范围内不会产生有害的组成物

或相, 能获得致密的焊缝, 并且焊成的接头有可靠的使用性。致密性应符合该产品结构要求的技术标准, 使用性应满足该产品结构的设计要求, 如低温韧性、高温强度或稳定性等指标。

因为母材、焊接方法和结构形式的不同, 对母材有影响的热效应和对焊缝有影响的稀释率变化相当大, 这对冶金焊接性有较大的影响。

1) 焊接热循环: 在焊接热源的作用下, 焊件上某点的温度随时间变化的过程(由低到高再由高到低), 称为该点的焊接热循环。

以初始温度为 27°C 、板厚为 13mm 的板, 用 3940J/mm 的线能量电弧焊的焊缝为例来看一组典型的热循环曲线(见图2-1), 最上面的是距焊缝中心线 10mm , 峰值温度为 1365°C 的点的热循环曲线; 最下面的是距焊缝中心线 25mm , 峰值温度为 515°C 的点的热循环曲线; 中间各曲线由上到下依次是距焊缝中心线 11 、 14 、 18mm 各点的热循环曲线。从这几条曲线中可以看到三个特点:

① 峰值温度随着距焊缝中心线距离的增大而迅速下降;

② 达到峰值温度的时间随着距焊缝中心线距离的增大而延长;

③ 加热和冷却速度都随距焊缝中心线距离的增大而减小。

不同的焊接方法, 焊接热循环的形态不同(见图2-2), 主要反映在: 达到的最高峰值温度、某一高温下停留时间的长短和冷却速度的不同。

2) 焊接热影响区的大小和组成: 焊接热影响区(英文缩写HAZ)的大小取决于垂直焊缝轴线方向上峰值温度的分布形态, 它越陡则HAZ越小, 反之则越大。热影响区的组织除了受热影响外, 更主要地是与成分有关, 即与母材的含碳量、合金元素和焊前原始状态有关, 可近似地用铁-渗碳体相图和热循环中的峰值温度曲线来进行分析。

① 不易淬火锅和易淬火锅热影响区的组成: 如图2-3所示, 不易淬火锅(低碳钢)的HAZ可分为过热区、正火区、部分相变区和再结晶区, 有时还有热应变脆化区。淬火锅(如低中合金高强度钢、耐热钢和低温钢等)的HAZ可分为淬火区和部分淬火区(对退火状态钢)及回火区(对淬火状态钢)。

过热区: 在固相线 T_s 和晶粒迅速长大的温度 T_k (对于低碳钢约为 1100°C)之间, 组织为奥氏体, 晶粒长大的程度与过热温度和高温停留时间有关, 温度高、时间长, 则晶粒粗大。

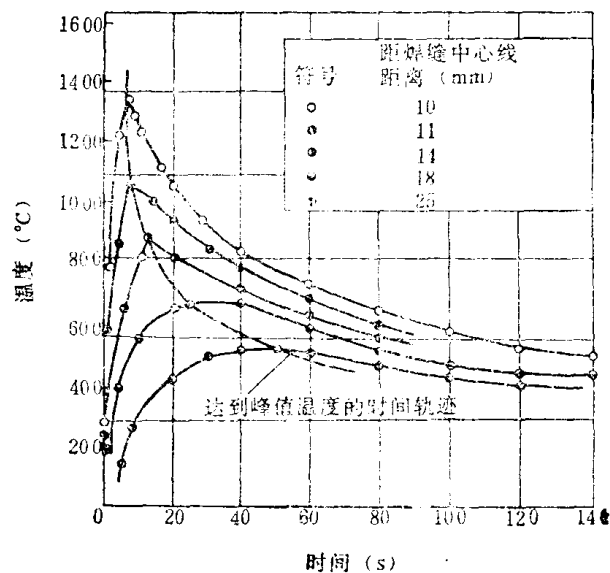


图2-1 电弧焊热影响区中各指定点的热循环曲线

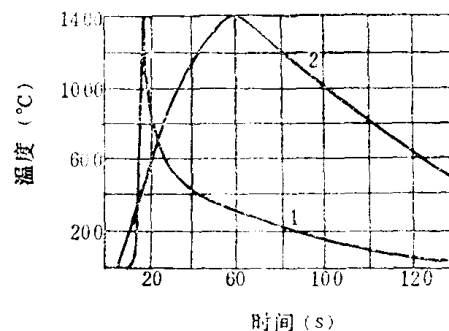


图2-2 不同焊接方法所焊焊缝的焊接热循环
1—空间气体保护焊 2—电弧焊

空冷后的组织与材料的成分有关：低碳钢为粗大的针状魏氏组织；16Mn中因为含锰，故出现少量的粒状贝氏体；15MnTi 为因为含有钛，且钛的碳化物或氮化物 溶入奥氏体，提高了奥氏体的稳定性，因而过热区全部为粒状贝氏体。过热区的粗大组织使塑性和韧性大大下降，一般认为过热区是焊接接头中最薄弱的区域。

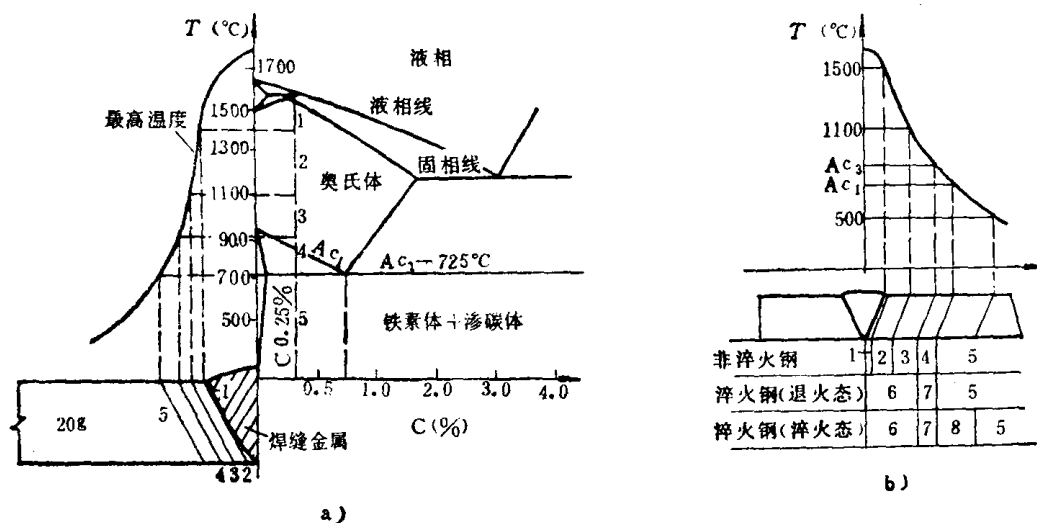


图2-3 不易淬火钢和易淬火钢的热影响区示意图

a) 低碳钢HAZ的组织变化

1—过热区 2—正火区 3—部分相变区 4—再结晶区 5—母材

b) 低碳钢和淬火钢接头HAZ的各组成部分

1—熔合区 2—过热区 3—正火区 4—部分相变区

5—母材 6—淬火区 7—部分淬火区 8—回火区

正火区：在 $T_{\text{A}_3} \sim A_3$ 之间，又称细晶区或相变重结晶区，对于低碳钢该区约为900~1100 $^{\circ}\text{C}$ 。加热到该温度区域时，铁素体和珠光体全部变成奥氏体，由于晶粒来不及长大，故冷却后得到均匀、细小的铁素体和珠光体，相当于正火热处理。材料的强度高，塑性、韧性也好，一般认为是焊接接头中综合机械性能最好的区域。

部分相变区：在 $A_1 \sim A_3$ 之间，又称不完全重结晶区。加热时母材中的珠光体和部分铁素体转变成细小的奥氏体，但仍保留部分晶粒比较粗大的铁素体。冷却后，细小的奥氏体转变成细珠光体和铁素体，加上原来的粗大铁素体，晶粒大小极不均匀，所以机械性能不好，强度有所下降。

再结晶区：只在塑性变形、母材晶粒变形、破碎、焊接后才存在。破碎的晶粒加热到450 $^{\circ}\text{C} \sim A_1$ 之间发生再结晶，晶粒复原、强度稍有下降、塑性回升，总的来说该区域的机械性能变化不大。

热应变脆化区：对于低碳钢、低合金高强度钢或低温钢，当钢中含氮较高时，在200~600 $^{\circ}\text{C}$ （以250 $^{\circ}\text{C}$ 为最敏感）范围内产生热应变，导致材料的韧性和塑性显著下降，这种现象称为热应变脆化。因为它出现在 A_1 相变温度以下，有人也称之为亚热影响区脆性。热应变脆化是近10多年来焊接界研究的课题。80年代初，我国发现联邦德国的StE36钢（相当于我国16MnR钢）有亚热影响区脆性，这种钢用于低温容器时就要注意这个问题。出现热应变脆化现象是钢材的问题，不是焊工操作的问题。作为一个高级焊工，要掌握热应变脆化的理论和经验，努力把它们联系起来，使操作和经验都有坚实的理论基础。

淬火区：对于易淬火钢，由于焊接时加热到 $A_3 \sim T_s$ 之间，焊后自然冷却较快，容易产生马氏体。在近缝的过热区是粗大的马氏体，特别脆，而在相当于正火温度范围内则为细小马氏体，也可能产生贝氏体或屈氏体的混合组织区。淬火组织强度、硬度高，塑性、韧性低，再加上组织不均匀，故容易产生冷裂纹。

部分淬火区：焊接时加热到 $A_1 \sim A_3$ 范围，珠光体变成奥氏体，铁素体几乎没有变化；冷却下来时，奥氏体转变成马氏体或屈氏体、珠光体（视碳及合金元素的种类和含量定）。组织不均匀，强度有所下降。

回火区：对原始状态为退火态的易淬火钢不存在此区。原来是淬火态的母材，由于焊接时加热到低于 A_1 的温度，也就是对原淬火组织进行回火。随着温度范围的变化，可能是高温、中温或低温回火，相应得到回火索氏体、屈氏体或贝氏体组织。总的来说，韧性都比原淬火状态有所提高。若原始母材为淬火加回火状态，高于原回火温度则发生组织和性能变化，低于原回火温度则组织不变。

② 不锈钢热影响区的组成：不锈钢分为奥氏体型、铁素体型和马氏体型三种。马氏体不锈钢的HAZ和易淬火钢的情况一样（见图2-3b），铁素体和奥氏体不锈钢的HAZ可分为过热区、 σ 相脆化区、敏化区和475℃脆性区（见图2-4）。但是 σ 相脆化区、敏化区和475℃脆性区都只在一定的焊接热循环条件下才会出现，只要焊接时焊工操作控制得当，这些都可以避免。

过热区：加热温度在 $T_{ks} \sim T_s$ 之间。奥氏体或铁素体不锈钢在加热和冷却过程中都不发生相变，只是当温度超过 T_{ks} 时，晶粒急剧长大，温度越高，高温停留时间越长，晶粒就越大，使塑性和韧性下降。

σ 相脆化区：若不锈钢在650~850℃之间停留时间过长，不锈钢中的铁素体会析出一种很硬很脆的 σ 相，它割断了晶粒间的联系，使塑性和韧性严重下降，抗晶间腐蚀性能也下降。

敏化区：在450~850℃停留一定时间（如在700~750℃只需十几秒到几分钟）后，奥氏体不锈钢中的碳和铬在晶粒边界形成 $Cr_{23}C_6$ ，使晶粒边界局部贫铬而丧失抗腐蚀能力，造成不锈钢焊缝边缘的晶间腐蚀，甚至象刀刻过一样，所以也称为刀口腐蚀。

475℃脆性区：在400~600℃（在475℃最敏感）停留一定时间后，铁素体不锈钢的硬度明显增高，韧性显著下降。某些含有铁素体的奥氏体不锈钢也会产生475℃脆性。

为了尽量减少热影响区处于危险温度区间的时间，焊接工艺中常规定焊后强制冷却，如采用水冷。但是，对马氏体不锈钢绝对不可焊后水冷，而是要保温缓冷。

（2）工艺焊接性 焊接接头是通过制造工艺来实现的，因此必须考虑各种工艺方法的影响。通常对于低碳钢结构，只要考虑母材和焊缝金属的性能和成分就可以了；对于合金钢、高强度钢等，则还要考虑焊接方法和工艺过程可能对焊缝和母材HAZ性能有很大作用，影响钢材的焊接性。选择焊接方法和工艺应考虑零部件的尺寸、接头位置、部件焊接量、焊缝外观要求、成本、可能产生的缺陷和热处理方法等。

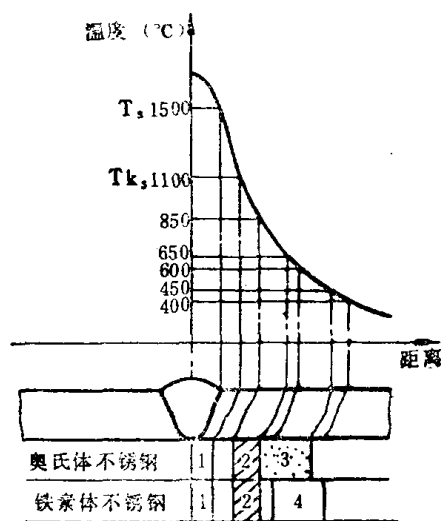


图2-4 不锈钢热影响区的示意图

1—过热区 2— σ 相脆化区 3—敏化区
4—475℃脆性区

1) 焊接线能量 (或称热输入量): 很多焊接方法都利用热源, 最常用的热源是电弧, 现以电弧焊为例来说明。

线能量是焊接热源 (电弧) 输入给单位长度焊缝上的能量, 它由热源的总输入功率和热源移动速度之比来计算:

$$H = \frac{P}{v} = \frac{UI}{v} \quad (2-1)$$

式中 H ——线能量(J/mm);

P ——热源总输入功率(W), 对于电弧焊 $P = UI$;

v ——热源的移动速度(mm/s);

U ——电弧电压(V);

I ——焊接电流(A)。

如果要精确计算热的影响, 就应采用有效线能量 H_n :

$$H_n = \eta \frac{UI}{v} \quad (2-2)$$

式中的 η 为热效率, 表示过渡到工件上的热量和热源产生的总热量的比值。一般手弧焊的热效率大于0.8, 埋弧焊大于0.9, 它们都接近1.0, 所以通常都以 $\eta = 1.0$ 来计算, 误差不超过10~20%。

焊接易淬火钢时, 为避免产生淬火裂纹, 常常要控制焊缝中心线冷却通过某一关键温度 T_c 的冷却速度(率), 一般取奥氏体等温转变(TTT)图中“鼻尖”处的温度, 大多数钢可取 $T_c = 550^\circ\text{C}$, 这样我们就可以计算焊接条件下的临界冷却速度或者防止裂纹必须的预热温度。

需要6道以上焊道才能焊成接头的板称为“厚”板, 厚板冷却速度的计算公式为:

$$R = \frac{2\pi k(T_c - T_0)}{H_n} \quad (2-3)$$

用4道以下焊道就能焊成接头的板称为“薄”板, 薄板冷却速度的计算公式为:

$$R = 2\pi k \rho c \left(\frac{t}{H_n} \right)^2 (T_c - T_0)^3 \quad (2-4)$$

为区别板的“厚”、“薄”, 采用“相对板厚” τ , 其计算公式为:

$$\tau = t \sqrt{\frac{PC(T_c - T_0)}{H_n}} \quad (2-5)$$

式中 R ——焊缝中心冷却时通过关键温度 T_c 瞬间的冷却速度(率)($^\circ\text{C}/\text{s}$);

k ——金属的热导率[W/(m·K)];

ρc ——容积比热容[J/(mm³·K)], 钢取0.0044;

t ——板件厚度(mm);

H_n ——有效线能量(J/mm);

T_0 ——预热温度($^\circ\text{C}$), 室温取 25°C 。

由式(2-5)算出: $\tau > 0.90$ 用厚板公式(2-3), $\tau < 0.60$ 则用薄板公式(2-4)。随机区分可取 $\tau = 0.75$, 计算误差不超过15%。例如, 用电渣焊焊300mm厚的板, 由于它的 H_n 很大, 故计算冷却速度时就要用薄板公式(2-4), 这就要引入“相对板厚”的概念而不能引用常识中板的厚、薄概念。

例! 某淬火钢, $t = 6\text{mm}$, 焊接时 $U = 25\text{V}$, $I = 300\text{A}$, $\eta = 0.9$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $T_c = 550^\circ\text{C}$ 。

在板面上试焊, 热源的移动速度 $v = 6、7、8、9、10\text{mm/s}$ 。在各焊道横截面上作硬度试验时发现 $v = 9、10\text{mm/s}$ 的HAZ中有高硬度组织(一般规定碳钢或碳锰硅钢 $HV_{\max} \leq 350$, 低碳合金钢 $HV_{\max} \leq 400$)。

可见 $v = 8\text{mm/s}$ 时, 大致对应临界冷却速度。故:

$$H_n = \frac{\eta UI}{v} = \frac{0.9 \times 25 \times 300}{8} = 843.75 (\text{J/mm})$$

$$\tau = t \sqrt{\frac{\rho c (T_c - T_0)}{H_n}} = 6 \sqrt{\frac{0.0044 \times (550 - 25)}{843.75}} = 0.31$$

应用薄板公式 (2-4) 得:

$$R = 2\pi \times 0.028 \times 0.0044 \times \left(\frac{6}{843.75} \right)^2 \times (550 - 25)^3$$

$$= 2\pi \times 0.028 \times 32.2 = 5.7 (^\circ\text{C/s})$$

结果表明: 这种钢在焊接条件下的最大安全冷却速度约为 6°C/s 。实际焊接时, 可以采用预热来降低冷却速度。

例2 与例1相同的淬火钢(即 $T_c = 550^\circ\text{C}$, 临界冷却速度为 5.7°C/s), 按下列规范焊接: $U = 25\text{V}$, $I = 250\text{A}$, $v = 7\text{mm/s}$, $\eta = 0.9$, 计算结果见表2-1。

表2-1 不同板厚所要求的预热温度 T_0 。

序 号	板 厚 (mm)	T_0 ($^\circ\text{C}$)	相 对 板 厚 τ	应 用 公 式
1	5	-24	0.23	薄板(2-4)
2	9	162	0.41	薄板(2-4)
3	25	354	0.82	薄板(2-4)
4	25	389	0.74	厚板(2-3)
5	50	389	1.48	厚板(2-3)

由表 2-1 中可知: 1、2 为薄板, 1 不需预热, 2 则需预热。5 为厚板, 要预热。3、4 为中间情况, 不厚也不薄, 两种公式的计算结果相近。而“厚板”的预热温度与板厚无关, 只与线能量有关, 在一定的材料, 一定的临界冷却速度下, H_n 越高, 则 T_0 要求越低。

选择预热温度可根据经验, 有可能的话也应进行计算。最佳的预热温度是保证冷却速度不大于临界冷却速度, 过度预热是不必要的, 不仅会恶化劳动条件, 同时还要扩大 HAZ 范围, 有害无益。把预热温度看成是合金钢的特性更是错误的, 合金钢的特性是有一定的临界冷却速度而不是预热温度。随着板厚的变化, 预热温度是变化的。

2) 工艺焊接性的主要试验方法: 以焊接试样为主要手段的试验通称为直接试验方法。通过它能实际测定正确控制焊接工艺参数条件下的焊接接头对裂纹、气孔、夹渣等缺陷的敏感性, 以便在结构生产制造中应用。这些试验方法的设计应该是敏感的、可再现的、试验准备和操作是简单的, 并且试验结果与焊接工艺能直接联系。焊接裂纹是最引人关注的, 各国焊接工作者都在这方面倾注了大量的人力物力, 提出的试验方法也有几百种, 但归结起来不外乎从材料、工艺、结构几方面来考虑焊接冷裂纹和热裂纹。我国也在1984年颁布了焊接性试验方法的国家标准(GB4675—84)。本书仅围绕国标的五种方法, 介绍国际通用方法的概况。工艺焊接性试验方法大致分为三类: 焊道下裂纹试验方法、拘束裂纹试验方法和模拟接头试验

方法。没有一种方法是万能的或绝对的，可视需要作相对比较。

① 纵向焊道下裂纹试验：这是美国巴特尔研究所于40年代末提出的简单方法，用来测定钢材对焊道下裂纹的敏感性。从待焊材料上切取50mm宽、75mm长(轧制方向)、原板厚度的试板若干块，在中间堆焊32mm长的焊道；用 $\phi 3.2\text{mm}$ 的 E4310(J425)焊条，电流 100A、电压24~26V、焊接速度250mm/min(线能量约600J/mm)的标准规范，在试板中间堆焊 32mm 长的焊道。每块试板可预冷或预热到某一温度(通常为 21℃)，焊接时和焊后1min 内把试板浸在某种温度的液体中，上表面露出 6mm，然后取出试板并在室温下时效 24h，再在593℃回火 1h，以免试板在加工时出现裂纹。沿焊缝中心线取纵向截面进行磁粉或金相检查，以裂纹投影总长度(交叠的长度不计算)与原焊道长度之比来表示对焊道下裂纹的敏感性。10个试板试验的平均数重复性约在10%之内，5个试板试验的平均数重复性约在20%之内。

② 搭接接头 (CTS) 焊接裂纹试验 (简称 CTS法或受控热流法)：这是40 年代末英国焊接研究所提出的方法，主要是研究防止低合金结构钢 HAZ出现冷裂纹的焊接条件。日本纳入标准为JIS Z3154—1979，我国等效采纳定为 GB4675.2—84，但稍有改变。试验方法是把大小不同的两块试板用螺栓连接 (见图2-5)，先焊两侧的拘束焊缝 (焊脚尺寸：厚 6mm 的板为6mm、12mm 板为9mm、25和50mm板为12mm)，等冷却到室温 (或预定温度) 后焊接试验焊缝 1，再冷却后再焊试验焊缝 2，在室温时效 24h (国标为48h) 后，沿 N-N、M-M、L-L、X-X 线用机械方法切开作磨片检查。

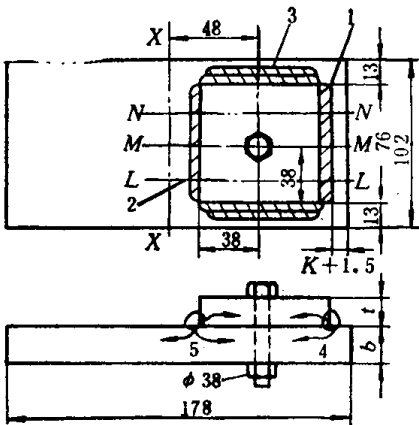


图2-5 CTS裂纹试验的试样
($t=6、12、15、26、50\text{mm}$)

1、2—试验焊缝 3—拘束焊缝 4—2 向热流
5—3 向热流 K—焊脚尺寸

用热拘束指数 (TSN) 和裂纹率来表示试板对焊接冷裂纹的敏感性。在相同的冷却条件下，某钢种不产生裂纹的TSN数越高，其抗裂性能越好。TSN用下列公式计算 (或参照表2-2)；

试验焊缝 1 $\text{TSN数} = 4(b + t) / 25$ (2-6)

试验焊缝 2 $\text{TSN数} = 4(2b + t) / 25$ (2-7)

表2-2 试板厚度和TSN数

试板厚度(in)		试验焊缝序号	TSN数	试板厚度 (in)		试验焊缝序号	TSN数
上板(t)	下板(b)			上板(t)	下板(b)		
1/4	1/4	1	2	2	2	1	16
		2	3			2	24
1/2	1/2	1	4	1/4	1/2	1	3
		2	6			2	5
1	1	1	8	1/4	1	1	5
		2	12			2	9

注：1 in=25.4mm。

用500倍的显微镜检查磨片上的裂纹，裂纹率C按下式计算：

$$C = \frac{l_{vo} + l_{nc}}{K_v + K_n} \times 100(\%) \tag{2-8}$$

式中 K_v ——垂直焊脚尺寸(mm);

K_H ——水平焊脚尺寸(mm);

l_{v0} 、 l_{H0} ——沿垂直或水平方向热影响区的裂纹长度(mm)。

综合结果也可用焊接性指标来区分等级(见表2-3), A或1最好, G或7最差。

表2-3 CTS法的焊接性指标

HAZ产生裂纹时的最大冷却速度 (在300℃时) (℃/s)	当焊脚长度6mm时在试验焊缝HAZ内		焊 接 性 指 标
	有裂纹时的TSN数	无裂纹时的TSN数	
>32	—	≤12	A或1
20~32	12	≤8	B或2
11~20	≥8	≤6	C或3
6~11	≥6	≤4	D或4
4~6	≥4	≤3	E或5
2~4	≥2	≤2	F或6
<2	≥2	—	G或7

应用CTS法进行研究的结果证明: 沸腾钢不宜采用酸性焊条焊接; 有明显带状硫偏析的沸腾钢板用酸性焊条焊接, 焊缝中容易产生热裂纹。

CTS法的上、下板间隙对试验结果有影响。改良型 CTS法就是增加装配间隙(见图2-6) 上板尺寸为 $76 \times 76 \times 35\text{mm}$ 、下板尺寸为 $300 \times 102 \times 57\text{mm}$, 装配间隙为 0.4、0.8、1.6 和 2.4mm, 用 $\phi 4\text{mm}$ 焊条焊拘束焊缝2后再焊76mm长的试验焊缝1, 焊脚尺寸 6mm, 采用船形焊。焊完第1条试验焊缝后隔3天再焊第2条试验焊缝, 可以发现当装配间隙超过0.4mm时, 试件必须预热才能防止产生裂纹, 可见做CTS试验时, 要注意上、下板之间的装配间隙。

③ Y形坡口对接焊缝裂纹试验(简称“小铁研”试验): 它是由日本铁道技术研究所提出的, 列为日本国家标准 JIS Z3151, 标准型铁研试样的尺寸为 $150 \times 330\text{mm}$, 加工较困难; 改良型试样(见图2-7) 尺寸为 $150 \times 200\text{mm}$, 两端加工成双V形坡口, 然后焊合构成拘束, 并制定为标准, 该标准为 JIS Z3158—1966, 我国等效采用, 定为国家标准 GB4675.1—84(稍有改变)。这种试样主要用来鉴定低合金高强度钢第1层焊缝热影响区产生裂纹的倾向。试验焊缝只焊1道, 而且与两端拘束焊缝不接触(约离开2~3mm), 在坡口内收弧, 弧坑要填满。以标准规范($\phi 4\text{mm}$ 焊条, $I = 170\text{A}$, $U = 24\text{V}$, $V = 150\text{mm/min}$) 在三个试样上重复试验。若测试热应力对裂纹敏感性的影响, 则至少取12个试件(6种焊接规范各作2次), 焊完后至少在24h后才检查裂纹, 先目检再做磁粉或着色检查, 然后用机械法切成6个等长的横截面试片, 作宏观和微观的裂纹检查。裂纹大多数为纵向冷裂纹和少量弧坑裂纹, 冷裂纹从焊根锐角缺口处开始沿母材HAZ扩展, 然后进入焊缝(低氢焊条), 若焊缝的塑性比HAZ的差时, 裂纹就产生在焊缝中。

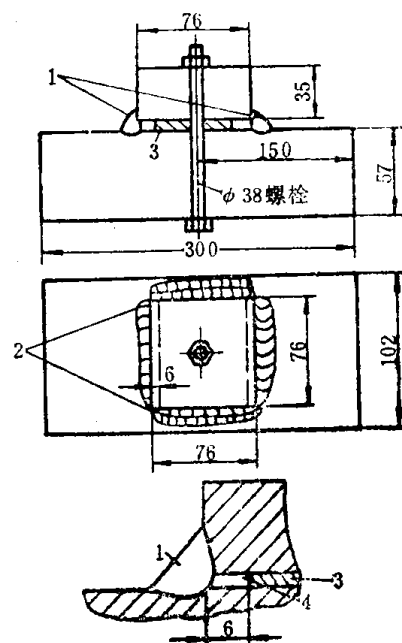


图2-6 有间隙的CTS裂纹试件

1—试验焊缝 2—拘束焊缝 3—垫块
4—间隙