

高职高专规划教材
国家精品课程配套教材

焊接检测技术

马世辉 李小棒 主编

HANJIE JIANCE JISHU





地址:北京市百万庄大街22号
邮政编码:100037

电话服务

社服务中心: 010-88361066
销售一部: 010-68326294
销售二部: 010-88379649
读者购书热线: 010-88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>
机工官网: <http://www.cmpbook.com>
机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>
封面无防伪标均为盗版

ISBN 978-7-111-42243-3

ISBN 978-7-111-42



9 787111 422433 >

定价: 24.00元

高职高专规划教材
国家精品课程配套教材

焊接检测技术

主 编	马世辉	李小棒	
副主编	刘翔宇	王金涛	
参 编	陈 瑛	张金娟	刘 丹
	王爱华	李志宇	吴静然
主 审	许利民		

机 械 工 业 出 版 社

本书是依据高等职业教育培养应用型高技能人才的目标,为适应工程材料与成型工艺专业教学改革的新形势而编写的。本书通过对焊接结构生产中的破坏性检测技术(如力学性能分析、金相检验、化学成分分析与腐蚀试验)和无损检测(如外观检查、射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测)等内容的介绍,使学生掌握焊接检测的基本知识,熟悉焊接结构常用的检测方法及工艺,进而能对主要检测设备和仪器进行基本操作。

本书适合高等职业教育各类院校焊接专业使用,也可供从事焊接和检测工作的工程技术人员参考。

本书配有电子课件,凡选用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教育服务网(www.cmpedu.com),注册后免费下载。本书无损检测部分的教学资源,也可登录国家精品课程资源网(www.jingpinke.com,高职高专“焊接接头无损检测”国家级精品课程)查询。

图书在版编目(CIP)数据

焊接检测技术/马世辉,李小棒主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 5

高职高专规划教材 国家精品课程配套教材

ISBN 978-7-111-42243-3

I. ①焊… II. ①马…②李… III. ①焊接-检验-高等职业教育-教材 IV. ①TG441.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第080345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:于奇慧 责任编辑:于奇慧 王海霞 版式设计:霍永明

责任校对:张媛 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.75印张·289千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-42243-3

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

20 世纪的最后十年,焊接技术在我国国民经济建设各个领域的应用在广度和深度方面均发生了质的飞跃,焊接结构作为焊接技术的载体,在国民经济生产的各个领域,如石油化工、船舶和海洋石油工程、军工、核设施、航空航天、冶金建筑、能源工业等,都有了广泛应用。显然,这些焊接结构必须是高质量的,否则一旦出现事故,必将造成惨重的损失。现今,焊接检测技术已被广泛应用于上述经济建设的各个领域,并在焊接结构的质量控制中起着不可替代的作用。

本书以高等职业教育培养应用型高技能人才的目标为主旨,选取知识点以“必须”、“够用”为度,叙述上力求通俗易懂、简明扼要;注重焊接检测基础知识与技能培养的结合,力求做到理论联系实际。由于焊接专业具有很强的实践性、应用性,在编写过程中结合最新行业标准,合理设置教材内容,着重培养学生解决生产现场技术问题的能力和应用新技术的能力。本书适合高等职业教育各类院校焊接专业使用,也可供从事焊接和检测工作的工程技术人员参考。

本书对焊接结构在生产中的破坏性检测(如力学性能分析、金相检验、化学成分分析与腐蚀试验)和无损检测(如外观检查、射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测)等内容作了适当介绍。以无损检测相关内容为重点,结合现行的国家标准及行业标准,着力介绍应用,重点介绍了各种检测技术在承压设备检测中的操作方法。本书共分 7 章,内容包括焊接检测基础知识、焊接接头破坏性检测和目视检测、射线检测、超声检测、表面检测、非常规焊接无损检测技术及耐压试验和泄漏检测。

参加本书编写的有承德石油高等专科学校的马世辉、李小棒、刘翔宇、王爱华、吴静然;河北机电职业技术学院的张金娟;大庆职业学院的李志宇;辽宁机电职业技术学院的刘丹;烟台工程职业技术学院的王金涛、陈瑛。全书由马世辉、李小棒任主编,刘翔宇、王金涛任副主编。承德石油高等专科学校许利民教授认真审阅了全书,并提出了很多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 焊接检测基础知识	1
1.1 焊接检测概述	1
1.2 金属焊接工艺缺陷	2
习题	13
第2章 焊接接头破坏性检测和目视检测	15
2.1 破坏性检测	15
2.2 目视检测	22
2.2.1 目视检测概述	22
2.2.2 目视检测设备与仪器	22
2.2.3 目视检测操作	26
习题	26
第3章 射线检测	28
3.1 射线检测基本原理	28
3.1.1 射线的概念和种类	28
3.1.2 X射线和 γ 射线的产生	29
3.1.3 射线照相法的原理及特点	30
3.2 X射线检测设备及器材	32
3.2.1 X射线机	32
3.2.2 X射线检测使用的器材	36
3.3 射线照相质量的影响因素	42
3.4 射线透照工艺	45
3.4.1 射线透照参数的选择	45
3.4.2 透照方式的选择和一次透照长度的计算	49
3.4.3 曝光曲线的制作和应用	53
3.5 暗室处理技术	55
3.5.1 暗室基础知识	55
3.5.2 暗室处理程序和方法	57
3.6 射线照相底片的评定	60
3.6.1 评片基本要求	60
3.6.2 评片基础知识	62

3.6.3 评片工作的主要步骤	65
3.7 射线透照工艺(书面文件)和检测记录	66
3.8 射线检测辐射防护	69
习题	71
第4章 超声检测	73
4.1 超声检测的物理基础	73
4.1.1 超声波简介	73
4.1.2 超声波在介质中的传播	74
4.2 超声检测器材与设备	77
4.2.1 超声波探头	77
4.2.2 超声波检测仪	79
4.2.3 超声波检测仪和探头的主要性能及其组合性能	84
4.2.4 试块	86
4.2.5 耦合剂	89
4.3 超声检测技术	90
4.3.1 超声检测方法分类	90
4.3.2 检测条件的选择	95
4.4 纵波直探头检测技术	96
4.4.1 检测仪器的调整	96
4.4.2 扫查	99
4.4.3 缺陷的评定	100
4.5 横波斜探头检测技术	105
4.5.1 检测仪器的调节	105
4.5.2 扫查	109
4.5.3 缺陷的评定	110
4.6 缺陷的质量分级	112
4.7 超声检测通用工艺规程、工艺卡和操作记录	114
习题	116
第5章 表面检测	118
5.1 磁粉检测	119
5.1.1 磁粉检测原理、适用	

范围及特点	119	第 6 章 非常规无损检测技术	155
5.1.2 磁粉检测器材和设备	120	6.1 声发射检测技术	155
5.1.3 磁粉检测技术与工艺	127	6.2 红外检测技术	160
5.1.4 磁粉检测的基本步骤	132	6.3 激光全息检测技术	163
5.1.5 磁粉检测通用工艺流程 和工艺卡	135	6.4 其他射线检测技术	166
5.2 渗透检测	136	6.4.1 X 射线实时成像检测技 术	166
5.2.1 渗透检测原理及特点	136	6.4.2 高能 X 射线照相	167
5.2.2 渗透检测材料及设备	137	6.4.3 数字化射线成像技术	168
5.2.3 渗透检测方法	142	6.4.4 X 射线计算机层析成像 技术	170
5.2.4 渗透检测的基本步骤	144	6.4.5 中子射线照相	171
5.2.5 渗透检测通用工艺流程 和工艺卡	146	6.5 磁记忆检测	172
5.3 涡流检测	148	习题	174
5.3.1 涡流检测原理及特点	148	第 7 章 耐压试验和泄漏试验	175
5.3.2 涡流检测器材与设备	149	7.1 耐压试验	175
5.3.3 涡流检测的一般程序	151	7.2 泄漏试验	177
5.3.4 涡流检测通用工艺流程 和工艺卡	153	习题	181
习题	153	参考文献	182

第 1 章 焊接检测基础知识

【学习目标】

- 1) 掌握焊接检测方法的种类, 金属焊接各种工艺缺陷的类型及概念。
- 2) 了解各种缺陷产生的原因, 熟悉各种缺陷的预防措施。

1.1 焊接检测概述

20 世纪的最后十年, 焊接技术在我国国民经济建设各个领域的应用在广度和深度方面均发生了质的飞跃, 焊接结构作为焊接技术的载体, 在国民经济生产的各个领域, 如石油化工、船舶和海洋石油工程、军工、核设施、航空航天、冶金建筑、能源工业等, 都有了广泛应用。显然, 这些焊接结构必须是高质量的。现代化焊接结构生产要求实行全面质量管理, 即要求产品在设计、制造、安装与维修等所有环节都实行质量保证和质量控制, 对于生产过程中保证和控制质量的重要手段之一的质量检验, 则要求其贯穿于整个生产过程的始终。焊接结构生产的质量检测简称焊接检测, 可具体地认为是采用调查、检查、度量、试验和检验等方法, 对产品的焊接质量同其使用要求不断进行比较的过程。

焊接检测是保证焊接质量的前提。焊接检测的目的是以预防为主, 积极做好施焊前的各项准备工作, 最大限度地避免或减少焊接缺陷的产生。焊接过程中进行检测的目的是预防和及时发现焊接缺陷, 对已发生的焊接缺陷进行有效的修复, 保证焊接结构(件)在制造过程中的质量。由于条件限制, 焊前和焊接过程中有些检测项目无法进行, 所以应在焊后对焊接结构(件)进行质量检验, 以确保焊接结构(件)质量完全符合技术要求。

焊接检测按检测方法不同, 可分为破坏性检测、非破坏性检测和工艺性检验。

1. 破坏性检测

破坏性检测是指直接从产品的焊接接头上取样, 对其进行各种理化性能的检测。焊接接头理化性能检测项目包括力学性能试验、化学分析与试验和金相与断口的分析试验。

- (1) 力学性能试验 包括拉伸、弯曲及压扁、冲击、硬度、疲劳、韧性等试验。
- (2) 化学分析与试验 包括化学成分分析、晶间腐蚀试验和铁素体含量测定试验。
- (3) 金相与断口的分析试验 包括宏观组织分析、微观组织分析和断口检验与分析。

2. 非破坏性检测

非破坏性检测是采用各种物理手段检测焊接接头的致密性, 而不破坏焊接结构完整性的检测方法。焊接结构的非破坏性检测包括以下内容。

(1) 外观检测 包括母材、焊材、坡口、焊缝等表面质量检验, 成品或半成品的外观几何形状和尺寸的检验。

(2) 无损检测 无损检测方法很多, 实际应用中比较常见的有以下几种:

1) 常规无损检测。包括超声检测 (UT, Ultrasonic Testing)、射线检测 (RT, Radiographic Testing)、磁粉检测 (MT, Magnetic Particle Testing)、渗透检验 (PT, Penetrant Tes-

ting) 和涡流检测 (ET, Eddy Current Testing)。

2) 非常规无损检测。包括声发射 (AE, Acoustic Emission) 检测、红外检测、激光全息检测和磁记忆检测等。

(3) 耐压试验和泄漏试验 承压设备的容器、管道和其他某些受压部件, 按相应技术监督规程的要求应做压力试验, 以检验结构和焊接接头的整体强度和密封性。压力试验包括耐压试验和泄漏试验。

1) 耐压试验。主要用于强度检验, 包括液压试验 (主要是水压试验) 和气压试验。

2) 泄漏试验。主要用于结构上可拆连接部位和焊接接头的密封性检验, 包括气密性试验、吹气试验、载水试验、水冲试验、沉水试验、煤油试验、氨渗透试验、氨检漏试验、卤素检漏试验等。

3. 工艺性检验

工艺性检验是指在产品制造过程中, 为了保证工艺的正确性而进行的检验, 包括材料焊接性试验、焊接工艺评定试验、焊接电源检验、工艺装备检验、辅机及工具检验、结构的装配及质量检验、焊接参数检验、焊接热参数 (预热、后热及焊后热处理) 检验等。

1.2 金属焊接工艺缺陷

焊接缺欠是指在焊接接头中因焊接产生的金属不连续、不致密或连接不良的现象, 简称缺欠。焊接缺欠的存在将影响焊接接头的质量, 而焊接接头的质量又直接影响着焊接结构 (件) 的安全使用。焊接缺欠和焊接缺陷的区别是: 存在焊接缺欠时, 虽然焊接接头的质量和性能下降, 但只要不超过规定限值, 不影响设备的运行, 就是允许的, 不致对焊接结构的运行产生危害; 焊接缺陷是焊接过程中或焊后, 在接头中产生的不符合标准要求的缺欠, 或者说焊接缺陷超出了焊接缺欠的规定限值, 是不允许的。存在焊接缺陷的产品应被判废或进行返修, 因为焊接缺陷的存在将直接影响焊接结构件的安全使用。

之所以要对焊接缺陷进行分析, 一方面是为了找出缺陷产生的原因, 进而在材料、工艺、结构、设备等方面采取有效措施, 以防止缺陷产生; 另一方面是为了在焊接结构 (件) 的制造或使用过程中, 能够正确地选择焊接检测的技术手段, 及时发现缺陷, 从而定性或定量地评价焊接结构 (件) 的质量, 使焊接检测达到预期的目的。

根据 GB/T 6417.1—2005 (《金属熔化焊接头缺欠分类及说明》), 金属熔化焊接头焊接缺欠可根据其性质、特征分为以下 6 个种类 (大类): 裂纹、孔穴、固体夹杂、未熔合及未焊透、形状和尺寸不良及其他缺欠。每种缺欠又可根据位置和状态进行分类。

根据 GB/T 6417.2—2005 (《金属压力焊接头缺欠分类及说明》), 金属压力焊接头焊接缺欠可根据其性质、特征分为以下 6 个种类 (大类): 裂纹、孔穴、固体夹杂、未熔合、形状和尺寸不良及其他缺欠。每种缺欠又可根据位置和状态进行分类。

1. 裂纹

裂纹就是在应力作用下, 接头中局部区域的金属原子结合力遭到破坏所产生的缝隙。裂纹不仅会给生产带来许多困难, 而且可能带来灾难性的事故。据统计, 在世界上焊接结构所出现的各种事故中, 除少数是由于设计不当、选材不合理和运行操作上有问题外, 绝大多数是由裂纹引起的脆性破坏。因此, 裂纹是导致焊接结构发生破坏的主要原因。

在焊接生产中,由于钢种和结构类型的不同,可能出现各种裂纹,如图1-1所示。裂纹按其产生的本质不同,大体上可以分为以下五大类:热裂纹、再热裂纹、冷裂纹、层状撕裂和应力腐蚀开裂裂纹。

(1) 热裂纹 热裂纹是焊接生产中比较常见的一种缺陷,从常用的低碳钢、低合金钢到奥氏体不锈钢、铝合金和镍基合金等都有产生热裂纹的可能。热裂纹可分为结晶裂纹、液化裂纹和多边化裂纹三类。

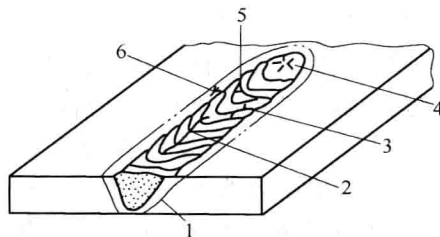


图 1-1 各种裂纹的外观

1—热影响区 2—纵向裂纹 3—间断裂纹
4—弧坑裂纹 5—横向裂纹 6—枝状裂纹

1) 结晶裂纹。结晶裂纹是指在焊缝金属凝固后期,低熔点共晶(如碳钢和低合金高强度结构钢中的磷、硅、镍,不锈钢、耐热钢中的硫、磷、硼、锆等)被排挤在与柱状晶相遇的中心部位,形成液态薄膜,此时在由收缩产生的拉伸应力的作用下,这个液态薄膜的薄弱地带将开裂而形成结晶裂纹,也称为凝固裂纹。

结晶裂纹的特征是沿奥氏体晶界开裂,其敏感的温度区间是固相线温度以上稍高的温度(固液状态)。结晶裂纹的形态和分布如图1-2所示,这种裂纹易产生在含硫、磷杂质较多的碳钢、单相奥氏体钢、镍基合金和某些铝合金的焊缝中。

2) 液化裂纹。在焊接热循环峰值温度的作用下,由于近缝区或多层焊层间部位的被焊金属含有较多的低熔点共晶而被重新熔化,在拉伸应力的作用下沿奥氏体晶界发生开裂的裂纹称为液化裂纹。

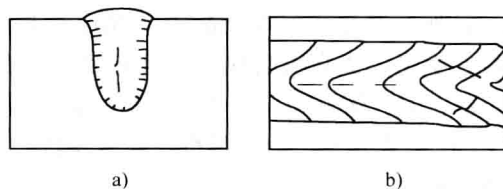


图 1-2 结晶裂纹的形态和分布

a) 沿焊缝中心线分布 b) 斜向分布

液化裂纹主要发生在含有铬、镍的高强度钢、奥氏体钢,以及某些镍基合金的近缝区或多层焊的层间部位。当母材和焊丝中的硫、磷、碳、硅含量偏高时,液化裂纹的倾向将显著提高,其形态和分布如图1-3所示。

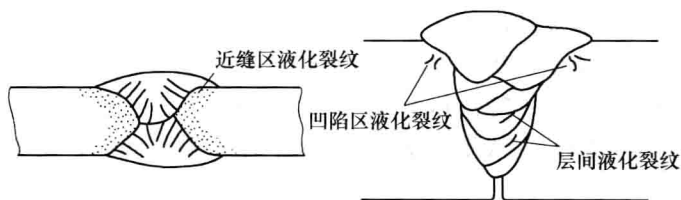


图 1-3 液化裂纹的形态和分布

3) 多边化裂纹。多边化裂纹多数产生于焊缝中,它是在形成多边化(已经凝固的晶粒中,在一定的温度和应力下形成二次边界)的过程中,由于焊接材料在高温下的塑性很低而造成的,故又称高温低塑性裂纹。多边化裂纹多发生在纯金属或单相奥氏体合金的焊缝中和热影响区处或多层焊的前层焊缝中,其发生部位比液化裂纹距熔合线更远一点。

(2) 再热裂纹 采用含有某些沉淀强化合金元素钢材的厚板焊接结构,在进行消除应力热处理或在一定温度下工作的过程中,在焊接热影响区粗晶部位产生的裂纹称为再热裂纹。由于这种裂纹是在再次加热过程中产生的,故称为再热裂纹,又称为消除应力处理裂纹,简称SR裂纹,如图1-4所示。

再热裂纹多发生在低合金高强度结构钢、珠光体耐热钢、奥氏体不锈钢和某些镍基合金焊接热影响区的粗晶部位，并沿粗大奥氏体晶粒边界扩展，且多半发生在咬边等应力集中处。可形成沿熔合线的纵向裂纹，也可形成粗晶区中垂直于熔合线的网状裂纹，其断口呈被氧化的颜色。

热裂纹和再热裂纹的预防措施简述如下：

1) 冶金方面。焊接低碳钢、低合金钢时，有害元素 S、P、C 不仅能形成低熔共晶，还能促进偏析，从而增大结晶裂纹的敏感性。为了消除它们的有害作用，应尽量限制母材和焊接材料中 S、P、C 的含量；同时，可在焊接材料中加入适量的 Mn、Ti、Zr 等合金元素，以克服 S、P 的不良作用，提高焊缝抗热裂纹的能力。重要的焊接结构应采用碱性焊条或焊剂。

另外，通过改善焊缝凝固结晶形态和细化晶粒，也可以提高抗裂性，广泛采用的办法是向焊缝中加入细化晶粒元素，如 Mo、V、Ti、Ni、Zr、Al、稀土等。对于不锈钢，希望得到铁素体相低于 5% 的双相组织焊缝。

2) 工艺方面。主要是指在焊接参数、预热、材质、接头设计和焊接顺序等方面预防焊接热裂纹。

① 焊接参数。提高焊缝成形系数可以提高焊缝的抗裂性能，而为了控制成形系数，必须合理调整焊接参数。平焊时，焊缝成形系数随焊接电流的增大而减小，随焊接电压的增大而增大；焊接速度提高时，不仅焊缝成形系数会减小，而且由于熔池形状改变，焊缝的柱状晶将呈直线状，从熔池边缘垂直地向焊缝中心生长，最后在焊缝中心线上形成明显的偏析层，从而增大了产生结晶裂纹的倾向。

② 预热。一般冷却速度加快，焊缝金属的应变速率也随之增大，容易产生热裂纹。为此，应采取缓冷措施。预热对于降低热裂纹倾向比较有效，因为预热能减慢冷却速度；但预热温度过高将提高焊接热输入，从而促使晶粒长大，增加偏析倾向，使防裂效果不明显，甚至适得其反。

③ 材质。采用碱性焊条和焊剂，其熔渣具有较强的脱硫能力，因此具有较高的抗热裂能力。

④ 接头设计和焊接顺序。焊接接头的形式不同，将影响接头的受力状态、结晶条件和热量分布等，因而热裂纹的倾向也不同。表面堆焊和熔深较浅的对接焊缝的抗裂性较好；熔深较大的对接焊缝和角焊缝的抗裂性能较差，因为这些焊缝的收缩应力方向基本垂直于杂质聚集的结晶面，故其产生热裂纹的倾向较大。

为了减小结晶过程中的收缩应力，在接头设计和焊接顺序安排方面应尽量降低接头的刚度和拘束度。例如：在设计上减小焊接结构的板厚，合理布置焊缝；在施工上合理安排焊件的装配顺序和每条焊缝的先后顺序，避免在焊缝处于刚性拘束状态下进行焊接，设法让每条

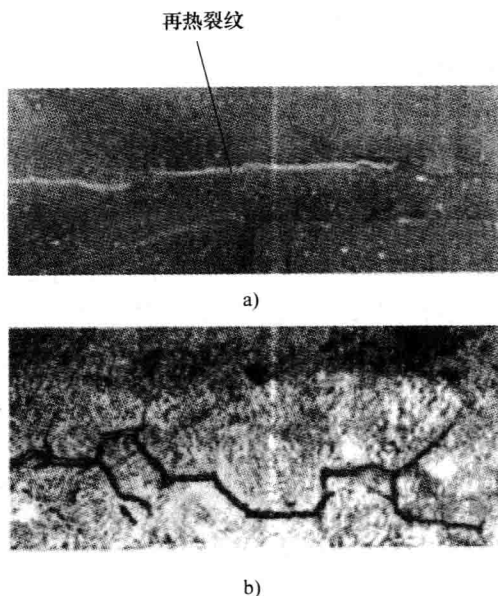


图 1-4 再热裂纹（位于下熔合线附近）

a) 缺陷全貌 b) 局部放大 (200 ×)

焊缝有较大的自由度。起弧时用引弧板慢速起弧，断弧时用引出板逐渐断弧，以减少弧坑裂纹的产生。对于厚板焊接结构，常采用多层焊，其裂纹倾向比单层焊有所缓和，但应注意控制各层的熔深。在焊接接头处避免应力集中（如错边、咬肉、未焊透等），也是降低裂纹倾向的有效方法。

（3）冷裂纹 冷裂纹是焊接过程中最为普遍的一种裂纹，它是焊后冷却至较低温度时产生的。对于低合金高强度结构钢，冷裂纹大约出现在钢的马氏体转变温度 M_s 附近，是由拘束应力、淬硬组织和扩散氢的作用产生的。冷裂纹主要发生在低、中合金钢和中、高碳钢的焊接热影响区，如图 1-5a、b 所示；个别情况下，如焊接超高强度钢或某些钛合金时，冷裂纹也出现在焊缝金属上，如图 1-5c 所示。

1) 淬火裂纹（淬硬脆化裂纹）。一些淬硬倾向很大的钢种，其焊接时即使没有氢的诱发，仅在应力的作用下也能导致开裂。焊接含碳量较高的 Ni-Cr-Mo 钢、马氏体不锈钢、工具钢及异种钢等时，都有可能出现这种裂纹。淬火裂纹完全是由于冷却时发生马氏体相变而脆化造成的，焊后常立即出现，在热影响区和焊缝上都可能发生。

2) 氢致裂纹。氢致裂纹是具有延迟特征，即焊后经过数小时、数日甚至更长时间才出现的冷裂纹，因此也称为延迟裂纹。氢致裂纹按分布情况可分为焊趾裂纹、焊道下裂纹和焊根裂纹，如图 1-5 所示。普通低合金钢的氢致裂纹在焊后 24h 内产生（一般情况下，焊趾裂纹发生在焊后数分钟内，焊道下裂纹发生在焊后数小时），高合金钢则在焊后 10 天内产生。氢致裂纹产生时，有时可察觉到断裂的响声。

焊趾裂纹起源于焊缝与母材交叉处有明显应力集中的部位，一般由焊趾表面开始向母材深处延伸，可能沿粗晶区扩展，也可能向垂直于拘束方向的细晶区或母材扩展，裂纹的取向经常与焊缝纵向平行。另外，对于焊接结构中 X 形坡口的对接接头及 K 形坡口的 T 形接头，在咬边或其他形状缺陷的影响下，易产生焊趾裂纹。

一般情况下，焊道下裂纹的

取向与熔合线平行，经常发生在淬硬倾向大的材料中，位于热影响区的粗晶内。当钢中沿轧制方向有较多和较长的 MnS 系夹杂物时，焊道下裂纹也可按沿轧制方向分布的硫化物呈阶梯状扩展。

焊根裂纹起源于焊缝根部最大应力处，随后在拘束应力的作用下向焊缝内或热影响区扩展。裂纹出现的部位取决于焊缝金属及热影响区的强度、伸长率和根部形状。

3) 低塑性脆化裂纹。某些塑性较低的材料冷却至低温时，由于收缩而引起的应变超过了材料本身所具有的塑性储备或材质变脆而产生的裂纹，称为低塑性脆化裂纹。例如，补焊铸铁、堆焊硬质合金和焊接高铬合金时，就容易出现这类裂纹。低塑性脆化裂纹通常是在焊后立即产生，无延迟现象。

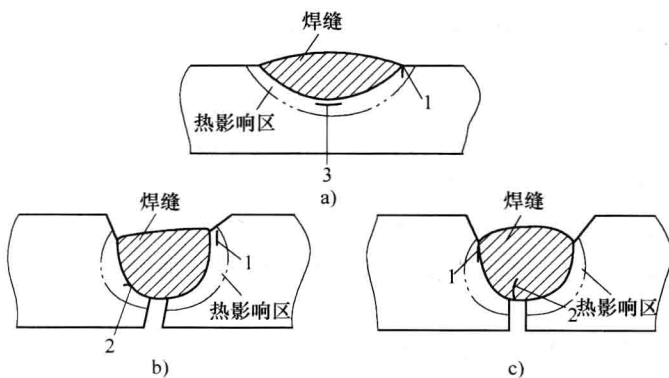


图 1-5 焊接接头区的冷裂纹分布形态

1—焊趾裂纹 2—焊根裂纹 3—焊道下裂纹

4) 冷裂纹的预防措施。钢种的淬硬倾向、焊缝中的氢含量及其分布、焊接接头的拘束应力状态是影响冷裂纹形成的三大要素。

焊接时, 钢种的淬硬倾向越大, 越容易产生冷裂纹。

当焊接热影响区中氢的含量足够高时, 能使具有马氏体组织的热影响区进一步脆化, 形成焊道下裂纹; 当氢的含量稍低时, 仅在有应力集中的部位出现裂纹, 容易形成焊趾裂纹和焊根裂纹。

拘束应力主要由不均匀加热和冷却过程中产生的温度应力、金属相变时由于体积变化引起的组织应力和焊接结构在拘束条件(如结构形式、焊接位置、施焊顺序及方向、构件刚性等)下产生的应力三部分组成。

三大影响因素对冷裂纹产生的影响既有各自的内在规律, 又相互联系、相互依赖。焊接冷裂纹的预防措施就是对三大影响因素进行控制:

① 控制母材的化学成分, 尽量选择碳当量低或对冷裂纹敏感度小的钢材, 使钢种的淬硬倾向减小, 从而使产生冷裂纹的可能性减小。

② 减少氢的来源, 改善焊缝金属的塑性和韧性。例如: 焊前严格烘干焊条和焊剂; 选用优质的低氢和超低氢焊接材料; 选用强度级别比母材略低的焊条, 以减小焊接应力, 降低冷裂倾向; 选用奥氏体焊条焊接淬硬倾向较大的低、中合金高强度钢; 向焊接材料中加入某些合金元素, 如 Mo、V、Ti、Nb、B、稀土等细化焊缝。

③ 正确选择焊接工艺。包括合理选定焊接热输入、预热、层间温度、后热、焊后热处理方法和施焊顺序等。目的是改善热影响区和焊缝组织, 促使氢的逸出及减小焊接拘束应力。

预热是指焊前对焊件整体或局部进行加热, 它是防止厚板、低合金和中合金钢接头产生焊接冷裂纹的有效措施之一。焊接强度级别较高、有淬硬倾向、导热性能良好或厚度较大的焊件时, 以及当焊接区域周围的环境温度太低时, 焊前往往需要对焊件进行预热。预热可以降低焊接接头的冷却速度, 减少或避免淬硬组织的产生; 减小焊接区的温度梯度, 降低焊接接头的应力; 延长焊接区(500 ~ 800℃)的冷却时间, 有利于氢的逸出, 从而可防止冷裂纹产生。

后热是焊后将焊件或整条焊缝加热到一定温度, 并保温一段时间后空冷的措施, 包括低温后热处理和消氢处理。强度等级高于 650MPa 或合金的总质量分数大于 3% 的低合金钢和中合金钢的厚壁多层焊缝中, 经常产生相对于焊缝横向分布的延迟冷裂纹。为了避免氢在焊缝表层下富集, 防止横向延迟裂纹产生, 可进行消氢处理。消氢处理的温度为 300 ~ 400℃, 时间为 1 ~ 2h, 必须在焊接结束后立即进行。

消除应力退火是一种重要的焊后热处理方法。消除应力退火是指将焊件以一定速度均匀地加热到 A_{c1} 以下足够高的温度(530 ~ 620℃), 保温一段时间后随炉冷却到 300 ~ 400℃, 最后空冷。消除应力退火有以下作用: 减小焊接接头中的残余应力, 消除冷作硬化, 提高焊接接头抗脆性断裂和耐应力腐蚀的能力; 改善焊接接头的金相组织, 提高其塑性; 消除焊缝中的氢气, 提高焊接接头的抗裂性和韧性。

④ 加强工艺管理。许多焊接裂纹缺陷并不是由选材不当或设计不合理造成的, 而是由施工质量差造成的。因此施工时应注意以下问题:

- 仔细清理焊接坡口及其两侧 30mm 的区域, 以去除铁锈、油污和水分等, 并防止已清

理过的坡口被再次污染。不得使用未经烘干的焊条或焊剂，若条件允许，每位焊接操作者都应配备焊条保温筒，保证使用前焊条处于干燥状态。

- 提高装配质量，避免因出现过大的错边或装配间隙而造成未焊透、夹渣或焊缝成形不良等缺陷。尽量不使用夹具进行强制装配，以免造成过大的装配应力和拘束应力，这些都会增加冷裂倾向。

- 对于重要结构，如压力容器等，严格要求操作者遵守持证上岗制度，按工艺规程操作，防止产生气孔、夹渣、未焊透、咬边等工艺缺陷，因为这些缺陷将构成局部应力集中，成为氢的富集场所，从而增加了冷裂倾向。

- 注意施工环境，避免在阴雨潮湿天气下施工；冬天在室外焊接时，要采取防风雪措施，以免焊缝过快地冷却。

(4) 层状撕裂 大型厚壁结构在焊接过程中，会沿钢板的厚度方向出现较大的拉伸应力，如果钢中有较多的夹杂物，则会沿钢板轧制方向出现一种台阶状的裂纹，一般称其为层状撕裂。层状撕裂属于低温开裂，一般低合金钢的撕裂温度不超过 400℃。层状撕裂易发生在低合金高强度钢厚壁结构的 T 形接头、十字接头和角接头处，如图 1-6 所示。

层状撕裂的主要类型及产生原因和预防措施见表 1-1。

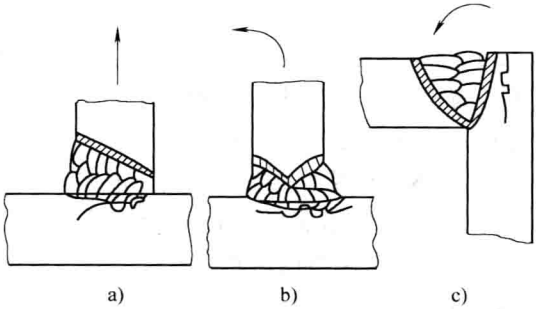


图 1-6 层状撕裂的类型

a) 由焊根裂纹引起 b) 由夹杂物开裂后沿热影响区扩展 c) 产生在母材厚度中心附近

表 1-1 层状撕裂的主要类型及产生原因和预防措施

主要类型	产生原因	预防措施
焊根或焊趾处，由冷裂等引起的层状撕裂	1) 由冷裂引起（淬硬及拘束应力） 2) 轧制成条、片状的 MnS 夹杂 3) 由角变形引起的弯曲拘束应力或由缺口引起的应力、应变集中 4) 氢脆	1) 降低钢材的焊接冷裂敏感性 2) 降低钢材中的含硫量，选用精炼的抗层状撕裂用钢 3) 防止角变形，改善接头形式及坡口形状，从而防止应力、应变集中 4) 降低焊缝中的含氢量
以夹杂物为裂纹源并沿热影响区扩展的层状撕裂	1) MnS、SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 等夹杂物 2) 存在 Z 向拉伸拘束应力 3) 氢脆	1) 降低钢中硫、磷、硅、铝等的含量，并在钢中加入适量稀土元素 2) 改善钢材的轧制条件和热处理工艺 3) 缓和外部的 Z 向拘束 4) 提高焊接金属的塑性并降低含氢量
远离热影响区，在板厚中央部位出现的层状撕裂	1) MnS、SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 等夹杂物 2) 弯曲拘束产生的残留应力 3) 应变失效	1) 选用耐层状撕裂用钢 2) 对轧制钢板端面进行机械加工并仔细进行装配 3) 改善接头形式和坡口形状 4) 预热堆焊层

(5) 应力腐蚀开裂裂纹 应力腐蚀开裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC) 是在拉应力和腐蚀介质的共同作用下产生裂纹的一种现象, 图 1-7 所示是典型的应力腐蚀开裂裂纹。

形成应力腐蚀开裂裂纹的基本条件是:

1) 材质必须是合金, 也包括含微量元素的合金; 纯金属一般不会发生应力腐蚀开裂裂纹。

2) 材质与介质相匹配。金属材料并非与任何介质作用都会产生应力腐蚀开裂裂纹, 而是有一定的匹配关系。例如: 低碳钢与氢氧化钠水溶液 (沸腾)、硝酸盐水溶液、海水等; 奥氏体不锈钢与氯化铵水溶液、海洋气氛、海水、硫酸 + 氯化物水溶液等。

3) 必须存在拉应力。拉应力可以是工作应力或残余应力, 焊接残余应力在焊缝及近缝区通常为拉应力, 有时高达材料的屈服点。所以, 即使焊接结构不承受载荷, 只要有腐蚀介质存在, 就有可能产生 SCC。

影响 SCC 的因素是多方面的, 因此其预防途径也是多方面的:

1) 选用抗应力腐蚀性好的母材是防止 SCC 的根本措施之一。当前, 高铬铁素体不锈钢、双相钢、高镍不锈钢和高镍合金有较好的耐应力腐蚀性能。

2) 焊缝金属必须具有与母材相同的抗应力腐蚀能力, 因此焊缝的化学成分应尽可能与母材一致。许多试验表明, 在高温下工作的 18-8 型不锈钢, 其抗应力腐蚀性能随着含碳量的增加而降低, 所以选用焊接材料时以低碳或超低碳为好。

3) 零部件从成形加工到组装都可能引起残余应力, 而残余应力是引起应力腐蚀开裂裂纹的原因之一。因此, 必须严格控制组装质量, 如保证各零部件下料尺寸准确、避免进行强力组装等。

4) 在焊接工艺方面, 主要是防止产生焊接热影响区硬化和应力集中, 可以通过调节焊接热输入和焊接顺序等来进行控制。对于奥氏体钢, 因无淬硬问题, 因此主要是防止晶粒粗大, 焊接时适当采用小的焊接热输入; 对于易淬硬的钢, 则应适当增大焊接热输入。另外, 应根据结构特点制订出使焊接应力最小的焊接顺序。

5) 焊后消除应力不仅可降低冷裂、脆断的倾向, 还可以防止产生 SCC 和改善焊接接头的组织, 因此对一些重要的焊接结构 (包括在腐蚀介质条件下工作的) 都要进行消除应力处理。

6) 采用表面工程技术。近年来, 表面工程的应用范围日益扩大, 并在预防应力腐蚀开裂裂纹方面取得了令人满意的效果。其做法是在与腐蚀介质接触的一侧喷涂耐腐蚀层、塑料涂层, 或在表面堆焊不锈钢等。

2. 气孔和夹杂

气孔和夹杂是焊接生产中经常出现的一种缺陷, 它们不仅会削弱焊缝的有效工作截面, 还会造成应力集中, 从而显著降低焊缝金属的强度和韧性, 对动载强度和疲劳强度更为不利。在个别情况下, 气孔和夹杂还会引起裂纹。

(1) 气孔 焊接熔池在结晶过程中, 由于某些气体来不及逸出而残存在焊缝中形成气孔。气孔是焊接接头中常见的缺陷, 碳钢、高合金钢、有色金属焊接接头中都可能产生气

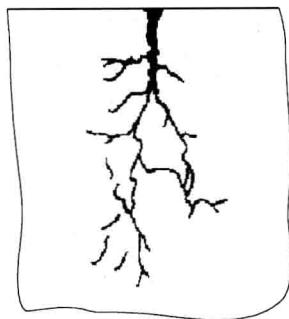


图 1-7 典型的应力腐蚀开裂裂纹

孔。

根据分布形态不同,气孔可分为均布气孔、密集气孔和链状气孔。均布气孔在焊缝中分布均匀,密集气孔则是许多气孔聚集在一起形成气孔带,链状气孔与焊缝轴线平行呈串状。

根据形状不同,气孔又分为球形气孔、长条形气孔和虫形气孔等。不同形状的气孔在焊缝中的分布形态如图1-8所示。球形气孔在焊缝中的形态近似于球形的孔穴;长条形气孔是在长度方向与焊缝轴线近似平行的非球形长气孔;虫形气孔是由于气孔在焊缝金属中上浮而引起的管状孔穴,其位置和形状取决于焊缝金属的凝固形式和气体的来源,通常成群出现并呈“人”字形分布。

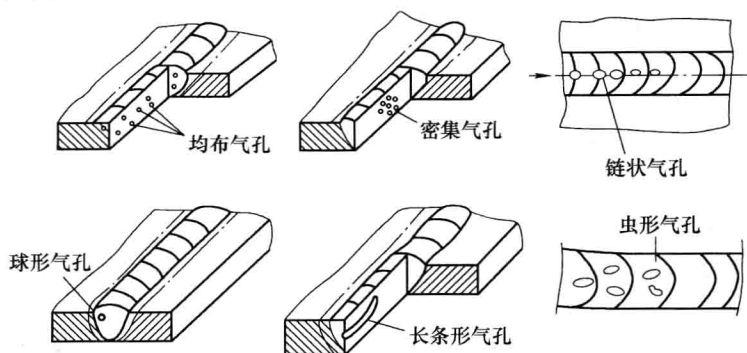


图1-8 不同形状的气孔在焊缝中的分布形态

根据产生气孔的气体种类,焊缝中的气孔主要有氢气孔、氮气孔和CO气孔,其特征与分布情况见表1-2。

表1-2 气孔的特征与分布情况

名称	特 征	分 布
氢气孔	断面形状多为螺纹形,从焊缝表面看呈喇叭形,其四周有光滑的内壁	焊缝表面
氮气孔	与蜂窝相似,常成堆出现	焊缝表面
CO气孔	表面光滑,呈虫形	多产生于焊缝内部,沿其结晶方向分布
鱼眼气孔	在含氢量较高的焊缝金属中出现的鱼眼状缺陷。实际上是圆形或椭圆形气孔,在其周围分布有脆性解理扩展的裂纹,形成围绕气孔的白色环脆断区,形貌如鱼眼	横焊时,常出现在坡口上部边缘;仰焊时,常分布在焊缝底部或焊层中,有时也出现在焊道的接头部位及弧坑处

防止焊缝中出现气孔的措施如下:

1) 焊前必须对焊丝表面、坡口及其附近20~30mm的范围进行清理,去除表面锈蚀、氧化膜、油污和水分等杂质,露出金属光泽。焊条、焊剂必须防潮,烘干后放在专用烘干箱或保温筒中保管,随用随取。一般碱性焊条的烘干温度为350~450℃,酸性焊条为200℃左右。

2) 空气侵入熔池是产生气孔的原因之一,如进行焊条电弧焊时,若电弧电压太高,会使空气中的氮侵入熔池,从而出现氮气孔。

3) 进行气体保护焊时,保护气体的纯度、流量对焊接质量有较大影响。如氩气中所含