

锅炉、压力容器的焊接裂纹与质量控制

GUOLU YALIRONGQI DE HANJIE LIEWEN

YU

ZHILIANG KONGZHI

张金昌主编

6

天津科学技术出版社

锅炉、压力容器的焊接裂纹与质量控制

张金昌 主编

责任编辑：李国常

★

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷二厂印刷

新华书店天津发行所发行

★

开本 787×1092毫米 1/16 印张 16 字数 375,000

一九八五年六月第一版

一九八五年六月第一次印刷

印数：1—11,700

书号：15212·131 定价：3.80 元

内 容 简 介

本书本着理论与实际并重的原则，把焊接裂纹的机理、防治和质量控制等问题融成一个完整体系，分九章阐述。

第一章到第四章主要介绍锅炉、压力容器焊接裂纹产生的机理、影响因素和防止措施。第五章重点介绍焊接材料的选择与使用，分别就焊条、焊丝、焊剂和保护气体等内容进行论述。第六章到第八章主要介绍锅炉、压力容器的焊接质量控制，分别从设计、选材、施工、检验和质量评定等方面作了论述。第九章主要介绍断裂力学在焊接结构中的应用，从焊接工程技术的角度作了较详细的论述。

本书适用于从事焊接技术和锅炉、压力容器质量检验与管理方面的广大工程技术人员学习，也可供有关科研人员阅读和作为高等院校教学方面的参考。

技术顾问

李 毅
孙 晋

孟广皓
柳曾典

主 审

张文钺

施林康

序 言

锅炉、压力容器是生产和生活中广泛使用的承压设备，有些是工厂中的关键设备。但这种装置具有爆炸危险，一旦爆炸不但给国家财产造成极大损失，还可能造成人身伤亡事故。因此，对锅炉、压力容器的制造和运行应严格质量控制与科学管理。

提高产品的制造质量是避免锅炉、压力容器事故的重要途径，而在制造质量中，焊接质量控制又是质量保证的核心。

这本书主要是针对焊接质量控制而撰写的。希望本书对提高锅炉、压力容器的焊接质量；对了解焊接裂纹产生的机理和预防措施；对加强锅炉、压力容器的安全技术管理等方面起到有益的作用。

本书内容在涉及到施工与管理方面，应以国家颁布的规程、规范及技术条件为准。

李 毅

前 言

锅炉、压力容器的质量控制具有很多方面的内容，然而，对质量影响最大的是焊接质量控制。因此，焊接质量控制就成为锅炉、压力容器质量保证的核心。

焊接裂纹对锅炉、压力容器的安全运行危害很大，因此必须针对焊接质量进行控制，以避免焊接裂纹的产生。

本书正是针对上述问题而编写的，在内容上比较深入而系统地论述了各种焊接裂纹产生的机理、影响因素以及在焊接施工中应采取的技术措施；另外也比较全面的分析了焊接质量控制的内容、方法及影响因素。本书还反映了近年来的有关国内外焊接裂纹和焊接质量控制等方面的研究成果，这些内容对生产实践、安全与技术管理将起到有益的作用。

本书的编写工作是在李毅高级工程师（劳动人事部锅炉安全监察局）亲自组织下完成的，在整个编写过程中对本书内容提出了许多宝贵意见，对此表示诚挚的谢意。

本书技术顾问：李毅高级工程师、孟广喆教授、孙鲁高级工程师、柳曾典高级工程师。他们对本书的编写给予多方面指导，特此致谢。

参加编写人员：第1、3章张文钺、第2章杜则裕、第4章秦伯雄、第5章张炳范、第6章孙鲁、第7章柳曾典、第8章张金昌、第9章王元良。

全书由张金昌主编，张文钺、施林康主审。

由于水平所限，可能存在不妥或错误，恳请读者指教。

编 者

1984.1月于天津大学

目 录

第一章 锅炉、压力容器的焊接冷裂纹	(1)
一、概述	(1)
1. 裂纹的危害性	(1)
2. 裂纹的种类	(1)
二、焊接冷裂纹	(4)
1. 冷裂的危害性及一般特征	(4)
2. 延迟裂纹的分类	(5)
三、高强钢焊接延迟裂纹的机理	(5)
1. 钢种的淬硬倾向	(5)
2. 氢的作用	(7)
3. 焊接接头的拘束应力	(13)
四、延迟裂纹的影响因素及其防治	(17)
1. 钢种化学成分的影响	(17)
2. 结构形式对拘束应力的影响	(18)
3. 氢的有害影响	(23)
4. 焊接工艺过程对冷裂纹的影响	(27)
5. 防止冷裂纹的措施	(34)
五、高强钢焊接冷裂纹的测试方法	(35)
1. 定性的方法	(35)
2. 冷裂倾向的定量试验方法	(40)
参考文献	(46)
第二章 锅炉、压力容器焊接时的结晶裂纹	(48)
一、概述	(48)
1. 结晶裂纹	(48)
2. 高温液化裂纹	(48)
3. 多边化裂纹	(48)
二、结晶裂纹产生的机理	(49)
1. 熔池结晶过程的三个阶段	(49)
2. 应力的作用	(51)
3. 结晶裂纹的产生条件	(52)
三、影响结晶裂纹的因素	(53)
1. 冶金因素	(53)
2. 应力因素	(59)
四、防止结晶裂纹的措施	(60)
1. 冶金方面	(60)
2. 接头形式	(60)
3. 焊接工艺和规范	(61)

4. 焊接顺序	(61)
五、试验方法介绍	(63)
1. T字形热裂纹试验	(64)
2. I.I.W.T字形热裂纹试验	(65)
3. Fisco试验	(65)
4. 铬镍不锈钢试验	(66)
5. Прохоров裂纹试验	(67)
6. 十字搭接裂纹试验	(67)
参考文献	(68)
第三章 焊接锅炉、压力容器中的再热裂纹	(69)
一、概况	(69)
二、再热裂纹的主要特征	(69)
1. 在焊接热影响区过热粗晶组织中开裂	(69)
2. 受再热温度和时间的影响	(69)
3. 受内应力的影响	(70)
4. 受沉淀强化的影响	(70)
三、再热裂纹产生的机理	(70)
1. 晶界杂质析集弱化作用	(71)
2. 晶内沉淀强化作用	(72)
3. 蠕变断裂理论	(73)
四、影响再热裂纹的因素及其防治	(74)
1. 冶金因素	(74)
2. 焊接工艺因素	(76)
3. 降低残余应力避免应力集中	(79)
五、再热裂纹的测试方法	(79)
1. 自拘束方法	(79)
2. 外载方法	(82)
3. 热模拟法	(83)
参考文献	(86)
第四章 锅炉、压力容器焊接结构的层状撕裂	(88)
一、概述	(88)
二、现象描述	(88)
三、层状撕裂的因素	(89)
1. 层状撕裂机理	(89)
2. 影响层状撕裂的因素	(90)
3. 层状撕裂与焊接冷裂缝	(97)
四、层状撕裂敏感性的评定法	(98)
1. 钢材抗层状撕裂的评定试验	(98)
2. 研究层状撕裂成因的评定试验	(99)
3. 对实际结构中焊接接头抗层状撕裂的评定方法	(103)
五、防止层状撕裂的措施	(105)

1. 钢材的选用.....	(105)
2. 设计及工艺措施.....	(107)
六、前途展望	(108)
参考文献.....	(108)
第五章 锅炉、压力容器焊接材料的选择与使用	(110)
一、概述.....	(110)
二、焊条.....	(110)
1. 焊条的组成和种类.....	(110)
2. 结构钢焊条.....	(113)
3. 不锈钢焊条.....	(121)
4. 钼和铬钼耐热钢焊条.....	(124)
三、钢焊丝.....	(125)
1. 钢焊丝的分类及表示方法.....	(125)
2. 气体保护焊用焊丝.....	(125)
3. 埋弧焊和电渣焊焊丝.....	(131)
四、焊剂	(133)
1. 焊剂的分类.....	(133)
2. 焊剂的性能.....	(135)
3. 焊剂的选择.....	(141)
五、焊接用保护气体	(143)
1. 对保护气体的要求及其分类.....	(143)
2. 各种保护气体的特性及应用范围.....	(145)
3. 保护气体与焊丝的匹配.....	(153)
参考文献	(154)
第六章 锅炉制造中的焊接质量保证	(156)
一、概述	(156)
二、从技术上保证锅炉的焊接质量	(156)
1. 汽包纵缝的焊接.....	(156)
2. 汽包环缝的焊接.....	(157)
3. 大口径下降管的焊接.....	(157)
4. 汽包管座焊接.....	(157)
5. 汽包内部装置预埋件焊接.....	(158)
6. 集箱焊接.....	(158)
7. 膜式水冷壁焊接.....	(158)
8. 管件焊接.....	(158)
三、通过质量管理来保证锅炉的焊接质量	(159)
1. 焊接技术标准的研究.....	(160)
2. 焊接工艺的评定和规范制定.....	(160)
3. 加强一些关键性环节的质量管理工作.....	(160)
第七章 压力容器制造中的焊接质量保证.....	(162)
一、概述	(162)

二、国外压力容器制造中的质量保证.....	(162)
三、压力容器焊接的质量保证	(163)
1. 压力容器的焊接标准.....	(163)
2. 质量保证组织.....	(164)
3. 设计的要求.....	(164)
4. 焊工与有关技术人员的培训与考核.....	(164)
5. 焊接管理.....	(165)
6. 试验与检验的管理.....	(166)
参考文献	(167)

第八章 锅炉、压力容器的焊接质量控制..... (168)

一、什么是锅炉、压力容器的焊接质量控制	(168)
1. 焊接质量控制的内容及其相互关系.....	(168)
2. 压力容器的制造为什么要考虑焊接质量控制.....	(169)
3. 焊接质量控制的现状.....	(170)
4. 压力容器焊接质量控制的标准.....	(170)
二、结构设计对焊接质量控制的影响	(172)
1. 结构与焊接接头性能的关系.....	(172)
2. 焊接结构的设计原则.....	(172)
3. 结构形式对材质和焊接接头性能的影响.....	(173)
4. 焊接结构设计中应考虑的工艺条件.....	(177)
三、材料对焊接质量控制的影响	(181)
1. 材料性能与焊接接头性能的关系.....	(181)
2. 不同材料的可焊性.....	(188)
3. 选择材料的原则.....	(191)
四、工艺对焊接质量控制的影响	(191)
1. 焊接工艺评定.....	(191)
2. 影响焊接工艺评定的因素.....	(201)
3. 焊接工艺评定方面的技术措施.....	(205)
五、施工对焊接质量控制的影响	(206)
1. 焊接材料的管理.....	(206)
2. 焊接施工因素的控制.....	(206)
六、检验对焊接质量控制的影响	(207)
七、质量评定对焊接质量控制的影响	(207)
1. 无损探伤的准则.....	(207)
2. IIW建议的准则.....	(207)
3. 缺陷容限准则.....	(208)
八、在役压力容器的质量控制	(210)
1. 立足于安全.....	(210)
2. 着眼于监督.....	(210)
3. 加强管理.....	(210)
九、球形容器的质量控制.....	(210)

1. 球罐质量控制的内容	(210)
2. 球罐质量控制的准则	(211)
3. 球罐产生脆性开裂的种类	(211)
4. 对球罐开罐检查所存在裂纹的分析	(212)
5. 产生“在用脆性裂纹”的原因	(216)
6. 球罐质量的控制	(216)
参考文献	(218)
第九章 断裂力学在焊接结构中的应用	(219)
一、焊接结构与断裂力学分析	(219)
1. 带裂纹构件的力学行为	(219)
2. 带裂纹试板拉伸时的应力强度因子	(219)
3. K_{Ic} 的塑性区修正	(220)
4. 裂纹张开位移	(221)
5. J积分	(223)
二、焊接接头的断裂韧性	(223)
1. 断裂韧性概念	(223)
2. 测试方法	(224)
3. 焊接接头各区的韧性评定	(225)
4. 宽板试验的应用	(225)
三、影响焊接接头及结构断裂韧性的因素	(226)
1. 温度对断裂韧性的影响	(226)
2. 焊接接头断裂韧性不均匀的影响	(227)
3. 母材可焊性及焊接工艺的影响	(227)
4. 错边及角变形的影响	(228)
5. 板厚对断裂韧性的影响	(229)
6. 焊接残余应力的影响	(230)
7. 结构不连续性的影响	(231)
四、关于裂纹扩展的分析	(231)
五、关于焊接缺陷的评定	(233)
1. I.I.W. 评定方法	(233)
2. 日本WES—2805K标准评定方法	(234)
参考文献	(240)

第一章 锅炉、压力容器的 焊接冷裂纹

一、概 述

近年来随着钢铁、电力和石油化工等工业的发展，压力容器日益向大型化、大容量和高参数的方向发展。因此，各种低合金高强钢，中合金高强钢，以及某些超高强钢的应用日益广泛。但是随着这些钢种在压力容器制造方面的应用，在焊接生产中出现了不少新问题，其中较普遍而又十分严重的就是焊接裂纹。

1. 裂纹的危害性

裂纹不仅给生产带来许多麻烦，而且有可能带来灾难性的事故，造成巨大损失^{〔1, 2〕}。据统计，世界上出现的各种压力容器事故中除少数是由于设计、选材不合理或操作使用不当之外，绝大多数是由裂纹而引起的脆性破坏。

早在1944年10月美国俄亥俄州煤气公司液化天然气球形贮罐发生连锁式爆炸，造成大火，死亡133人，损失680万美元。1965年英国统计，在使用期间发生破坏的压力容器共132台，其中由于裂纹而引起的破坏就有118台，占破坏总数的89.3%。日本神奈川县1978年调查，1958~1978年共生产各种球罐210台，经检查有152台发生裂纹，占破坏总数的73%。1968年4月，日本德山县一台2226m³的球形贮罐，水压试验时发生了脆断，整个球罐断塌。经检查是由于补焊用了较大的焊接线能量（80000J/cm）加上焊后扩散氢未逸出，在水压试验时氢发生析集，在焊根处造成了氢致裂纹。

我国近年来也有压力容器的各类事故发生。仅在1979年就发生了三次球罐断裂事故，破坏球罐8台，尤其是79年12月18日某地液化石油气罐站发生的球罐爆炸事故，造成了巨大的损失。根据上述可见，压力容器的焊接裂纹问题危害甚大，已成为世界各国的重要研究课题之一。

2. 裂纹的种类

在焊接生产中由于采用的钢种和结构的类型不同，可能产生各种各样的裂纹（如图1-1所示）。有焊缝表面裂纹、内部裂纹、热影响区（HAZ）裂纹、横向裂纹、纵向裂纹，也有出现在弧坑的所谓弧坑裂纹。

值得注意的是，裂纹有时出现在焊接过程中，也有时是在放置或运行过程中出现的（即所谓延迟裂纹），而后者的危害性就更为严重。

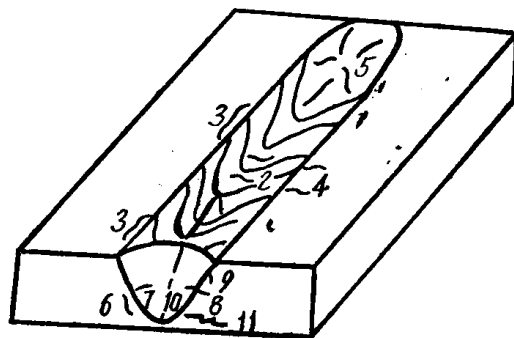


图 1-1 各种裂纹的分布

1. 焊缝纵向裂纹 2. 焊缝横向裂纹 3. HAZ 纵向裂纹 4. HAZ 横向裂纹 5. 弧坑裂纹 6. 焊道下裂纹 7. 焊缝的结晶裂纹 8. HAZ 焊缝贯穿裂纹 9. 焊趾裂纹 10. 焊缝根部裂纹 11. 焊道下热影响区裂纹

如果按产生裂纹的原因来分，裂纹大体上可分以下四大类。

(1) 热裂纹

热裂纹是在高温下产生的，而且都是沿原奥氏体晶界开裂。因为所用钢材不同所以产生热裂纹的形态、温度区间和主要原因也各有不同。热裂纹又可分为：结晶裂纹、液化裂纹和多边化裂纹三类。

①结晶裂纹 熔池在结晶过程中，在固相线附近由于凝固金属的收缩，残余液相不足，致使沿晶界开裂，故称结晶裂纹。这种裂纹具有晶间破坏的特征，多数情况下在焊缝的断面上发现有氧化的色彩，说明这种裂纹是在高温下产生的。结晶裂纹的形态如图1-2所示。

结晶裂纹主要产生在含杂质较多的碳钢焊缝中（特别是含硫、磷、碳、硅较多的钢种）和单相奥氏体钢、镍基合金，以及某些铝及铝合金焊缝中。个别情况下，结晶裂纹产生在焊接热影响区(HAZ)。

②高温液化裂纹 近缝区或多层焊缝的层间金属在焊接热循环峰值温度的作用下，由于含有低熔点共晶而被重新熔化，在收缩应力的作用下，沿奥氏体晶间发生开裂。

液化裂纹主要发生在含有铬镍的高强钢、奥氏体钢，以及某些镍基合金的连锁区或多层焊层间的部位。如果母材及焊丝中的硫、磷、硅、碳的含量偏高时，液化裂纹的倾向将显著增高。

③多边化裂纹 焊接时焊缝或近缝区在固相线以下的高温区间，由于刚凝固的金属存在很多晶间缺陷（主要是位错和空位）及严重的物理和化学的不均匀性，在一定的温度和应力作用下，由于晶格缺陷的迁移和聚集，便形成了二次边界，即所谓“多边化边界”。在这个“边界”上堆积了大量的晶格缺陷，所以它的组织脆弱，高温时的强度和塑性都很低，只要存在大量的拉伸变形，就会沿着多边化的边界开裂，形成所谓多边化裂纹，有的书上也称“高温低塑性裂纹”〔3〕。多边化裂纹，多发生在纯金属或单相奥氏体合金的焊缝中或近缝区。

(2) 再热裂纹

厚板结构焊后要进行消除应力热处理对于某些含有沉淀强化元素的钢种，在进行消除应力热处理的过程中，在焊接热影响区的粗晶部位产生裂纹（见图1-3）。这种裂纹是在再次加热（热处理）过程中产生的，故称“再热裂纹”，又称“消除应力处理裂纹”，简称“SR裂纹”（即Stress Relief Cracking）。

产生再热裂纹的机理是：含有沉淀强化元素的钢种，焊后如存在较大的残余应力，并带有不同程度的应力集中时，在热处理温度的作用下，由于应力松弛而引起较大的附加变形。与此同时，在焊接热影响区的粗晶部位析出沉淀强化相（钒、钼、铬、钛、铌、硼等元素的碳化物），如果粗晶部位的蠕变塑性不足以适应应力松弛时所产生的附加变形时，则沿晶界发生开裂。

再热裂纹与热裂纹虽然都是沿晶开裂，但是再热裂纹产生的原因与热裂纹有根本的不同。

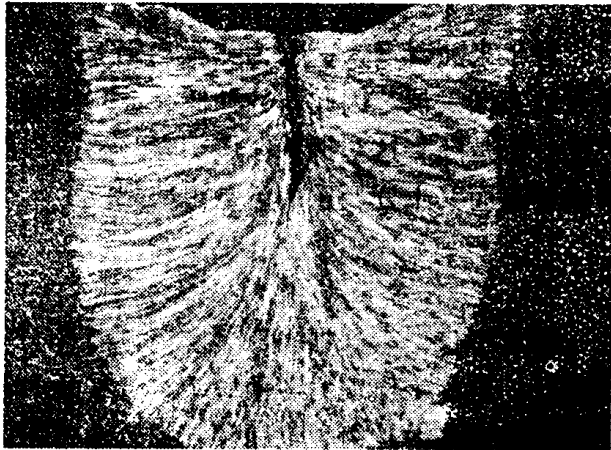


图 1-2 结晶裂纹的形态
自动焊15MnVN, 焊丝06MnMo

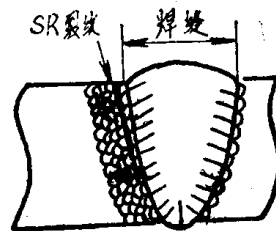


图 1-3 再热裂纹产生的部位

再热裂纹只在较低温度下一定温度范围内（约550~650°C）敏感，而热裂纹是在结晶过程中的固相线附近发生。

再热裂纹多发生在低合金高强钢、珠光体耐热钢，奥氏体不锈钢，以及镍基合金的焊接接头粗晶段。高强钢厚壁压力容器经常出现这种缺陷。低合金高强钢焊接接头的再热裂纹如图1-4所示。裂纹是沿HAZ的粗晶部位发生的。



图 1-4 焊接接头再热裂纹

a) 18MnMoNb钢焊趾处裂纹×4 b) 裂纹放大100倍

(3) 冷裂纹

焊接接头冷至较低的温度以下，大约在钢的马氏体转变温度（即 M_s ）附近，由于拘束应力、淬硬组织和氢的作用下产生的裂纹即属冷裂纹。冷裂纹主要发生在低合金钢、中合金钢和高碳钢的热影响区。个别情况下，如焊接超高强钢或某些钛合金时，冷裂纹有时也出现在焊缝上。

目前在压力容器的焊接生产制造中，冷裂纹是常见且影响较大的一种缺陷，往往由此而引起灾难性的事故。由于钢种和结构的不同，冷裂纹也有不同的类别，大体上可分为以下三类：

①延迟裂纹 这是冷裂纹中一种比较普遍的形态，它的主要特点是在焊后并不立即出现，而是有一段孕育期，产生延迟现象，故称延迟裂纹。裂纹的成生与扩展决定于材料的淬硬倾向、焊接接头的应力状态及焊缝金属扩散氢的含量等三个因素交互作用的结果。

②淬硬脆化裂纹（淬火裂纹） 有些钢种由于淬硬倾向较大，即使在没有氢的诱发条件下，仅由拘束应力的作用也能导致开裂。例如，焊接含碳量较高的Ni-Cr-Mo钢时，当快速冷到50°C以下的温度就会出现焊趾裂纹。它完全是由于冷却时马氏体相变而产生的脆性相造成的，一般认为与氢的作用关系不大。另外，焊接马氏体类不锈钢，工具钢，以及异种钢等均可能出现这种淬硬脆化裂纹。

这种裂纹出现的部位，除热影响区外，有时还出现在焊缝上。图1-5是F11钢（20Cr-12NiMoVW）热影响区出现的淬硬脆化裂纹。

这种裂纹主要是由淬硬组织引起的，故又称淬火裂纹，这种裂纹基本没有延迟现象，焊后可以立即发现。

③低塑性脆化裂纹 某些材料焊接时，在比较低的温度下，由于收缩力而产生的变形超过了材料本身所具有的塑性储备而产生的裂纹称为低塑性脆化裂纹。例如，铸铁焊补时，在热影响区有时出现边焊边裂的现象，堆焊硬质合金和切割某些淬硬倾向较大的高强钢时，也常出现这种低塑性脆化裂纹。

低塑性脆化裂纹也是在较低温度下产生的，无延迟现象。但从裂纹的形态来看，与前两种冷裂纹不同，这种裂纹的前端圆钝，裂纹本身具有一定的宽度，走向平直，具有脆断的特征。

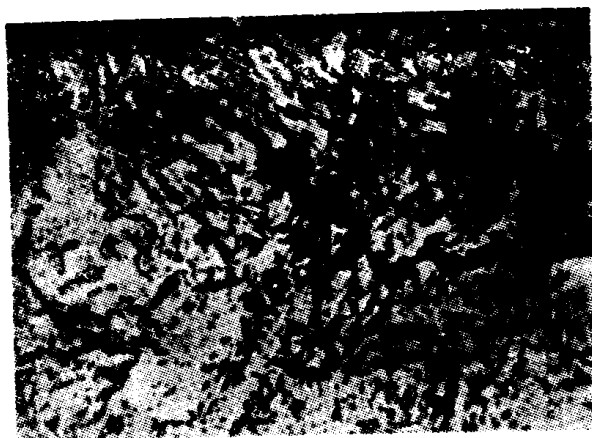


图 1-5 F11钢HAZ淬硬脆化裂纹×200
(基地为马氏体和奥氏体)

④层状撕裂 近年来厚壁压力容器和大型采油平台的制造中常遇到呈梯形开裂的缺陷，即所谓层状撕裂。这种层状撕裂属低温开裂，常用的低合金高强钢，撕裂的温度不超过 400°C 。它与一般的冷裂纹不同，层状撕裂主要是由于轧制钢材的内部存在有分层的夹杂物（特别是硫化物夹杂）和在焊接时产生的垂直于轧制方向的应力，致使焊接热影响区附近或稍远的地方产生呈“台阶”形的层状开裂，并可穿晶发展。由于层状撕裂常发生在施工过程中或完工之后，大型结构一般难以修复，甚至造成灾难性事故。因此，近年来这种开裂引起了国际性的重视。

层状撕裂主要发生在屈服强度高，且含有不同程度夹杂物的高强钢，如厚壁容器、采油平台和潜艇等大型结构。在T型接头、十字接头和角接头上比较易于发生层状撕裂。影响产生层状撕裂的因素很多，与钢板材质、拘束应力、焊接接头的含氢量、接头型式、焊接施工工艺和整体结构的形状等都有关系。

此外，当焊接接头中存在有其他类型的缺陷时，如微气孔、微裂纹、咬肉、未焊透等尖角效应都有可能在应力作用下发展为层状撕裂。

以上介绍了各种裂纹的大致分类，实际上裂纹的种类还有很多，例如低合金高强钢的苛性脆化裂纹、某些钢种的应力腐蚀裂纹、某些耐热钢或合金的应变时效裂纹等，这些都是在特殊情况下发生的，涉及的因素较多，后面将分别进行介绍。

二、焊接冷裂纹

1. 冷裂的危害性及一般特征

(1) 冷裂纹的危害性

锅炉、压力容器的生产由于冷裂纹而带来的危害性十分严重，1965年美国制造一台大型合成塔，内径1.7m，壁厚150mm，长18.3m，重164吨，工作压力为 $360\text{kg}/\text{cm}^2$ ，材料为Mn—Cr—Mo—V低合金钢。进行水压试验时发生了破坏事故，有四块1~2吨的碎片飞出。

日本某厂在1959~1969年共制造了144个球形容器（HT60~HT80），其中有45个发生了不同程度的裂纹，共检验出1471条裂纹，属于延迟裂纹的有1248条。

国内某厂制造的14MnMoV钢多层高压容器和18MnMoNb钢单层厚壁容器也都相继发生过冷裂纹，事故带来的不仅是个别设备的损失，而且直接威胁人的生命安全。

(2) 冷裂纹的一般特征

高强钢的焊接冷裂纹一般都是在焊后冷却过程中，在 M_s 点附近或 $200\sim 300^\circ\text{C}$ 的温度区间产生的。冷裂纹的起源多发生在具有缺口效应的焊接热影响区或有物理或化学不均匀的氢聚集的局部地带。冷裂纹的断裂有时沿晶界扩展，有时穿晶前进，这要看焊接接头当时所处的应力状态和金相组织，以及氢的含量等而定。这一点不象热裂纹那样，都是沿晶开裂。

冷裂纹可以在焊后立即出现，也有时要经过一段时间（几小时、几天、甚至更长的时间）才出现。开始少量出现，随时间而逐渐增多或扩展，对于这些不是在焊后立即出现的冷裂纹，称为延迟裂纹，它是冷裂纹中比较普遍的一种裂纹。

2. 延迟裂纹的分类

焊接时根据钢种材料、应力状态和含氢量的不同，可在焊接接头的不同部位产生不同的延迟裂纹，常见的有三种形态。

(1) 焊趾裂纹

这种裂纹起源于母材和焊缝的交界处，并有明显应力集中的部位（如咬肉处）。裂纹的取向经常与焊道相平行，一般由焊趾表面开始向母材的深处扩展。

(2) 焊道下裂纹

这种裂纹经常发生在淬硬倾向较大，含氢量较高的焊接热影响区。一般情况下裂纹的取向与熔合线平行，但也有垂直于熔合线的。

(3) 根部裂纹

这种裂纹是延迟裂纹中比较常见的一种形态，主要发生在使用含氢量较高的焊条和预热温度不足的情况下。这种裂纹与焊趾裂纹相似，起源于焊缝根部的最大应力集中处。根部裂纹可能出现在焊接热影响区（粗晶区），也可能发生在焊缝金属内，这决定于母材和焊缝的强韧程度，以及根部的形状。

实际生产中出现的裂纹当然要复杂得多，例如，某超高强钢的筒形容器焊接后，在焊缝或母材热影响区出现许多横向或纵向的微裂纹，它本身具有延迟裂纹的特征，经过一定时间之后，有的扩展为宏观裂纹。又如，多层焊时，由于预热温度较低或没有及时进行后热，在焊缝层间出现许多横向裂纹，也是属于延迟裂纹的一种。

三、高强钢焊接延迟裂纹的机理

大量的生产实践和理论研究证明：钢种的淬硬倾向、焊接接头的含氢量及其分布，以及焊接接头的拘束应力状态是高强钢焊接时产生延迟裂纹的三大因素〔4, 5, 6〕。

1. 钢种的淬硬倾向

焊接接头的淬硬倾向主要决定于钢种的化学成分，其次是结构的板厚、焊接工艺和冷却条件等。焊接时，钢种的淬硬倾向越大，越易产生裂纹，因此，用强度级别较高的钢种来制造压力容器就受到了限制。为什么钢淬硬之后会引起开裂呢？主要有两方面的原因。

(1) 形成脆性的马氏体组织

钢种的淬硬倾向越大,就意味着出现更多的马氏体组织,马氏体是碳在 α 铁中的过饱和固溶体,碳原子以间隙原子存在,使铁原子偏离平衡位置,晶格发生较大的畸变,致使组织处于硬化状态。特别是在焊接条件下,近缝区的加热温度很高(可达1350°C),使近缝区的奥氏体晶粒发生严重的长大,在加速冷却时,粗大的奥氏体将变成粗大的马氏体。

马氏体是一种脆硬的组织,在一定应力作用下,将发生脆性断裂(或解理断裂),从金属的强度理论可以知道,脆性断裂或解理断裂总是比塑性断裂消耗较低的能量^[9, 10],因此,裂纹易于形成和扩展。

应当指出,同属马氏体组织,由于成分和形态上的不同而具有不同的裂纹敏感性。例如,高碳钢经淬火形成的马氏体与低碳低合金钢经淬火所形成的马氏体,在形态上和性能上都有很大的不同。用高倍的电子显微镜进行观察和分析时发现,马氏体的形态与含碳量和合金元素有关,低碳马氏体(通常小于0.3%C)呈条形,由于它的 M_s 点较高,在转变后能起到自行回火的作用,因此这种马氏体具有相当的强度和良好的塑性及韧性相结合的组织。

当钢中的含碳量较高时,就形成了呈片状的马氏体,而且在片内存在平行状的孪晶,又称孪晶式马氏体^[11]。这种孪晶马氏体的硬度很高,组织很脆,对裂纹和氢脆的敏感性特别强。

根据对大量材料的研究,一般组织对裂纹和氢脆的敏感程度大致按下列顺序增加:

铁素体或珠光体——贝氏体——低碳条状马氏体——马氏体贝氏体混合组织——高碳孪晶马氏体。

有些国家,为了防止某些低合金高强钢焊接热影响区产生根部延迟裂纹,在金相组织方面,对于不同强度级别的钢种马氏体的限界含量作了如下的规定^[12]:

HT60——马氏体在60%以下, H_{max} 400以下;

HT70——马氏体在75%以下, H_{max} 410以下;

HT80——马氏体在90%以下, H_{max} 415以下;

这一规定亦可作为延迟裂纹在金相组织方面的判据。

能反映焊接接头淬硬倾向的另一判据就是高强钢焊接条件下连续冷却组织转变时,在800~500°C析出铁素体的临界冷却时间 C_f 。也就是利用SH-CCT图(即模拟焊接热影响区连续冷却组织转变图)上的 C_f 来评定各种高强钢对冷裂纹的敏感性。

图1-6是抗拉强度为52kg/mm²的高强钢连续冷却组织转变图和用CTS裂纹试验方法测定热影响区冷裂纹的试验结果。由图可知,如果熔合区焊后800~500°C冷却时间小于 C_f 就会出现裂纹,也就是说可以利用出现铁素体的临界冷却时间 C_f 作为焊接接头裂纹倾向的判据。实践证明,这一结论对其他钢种也是正确的。

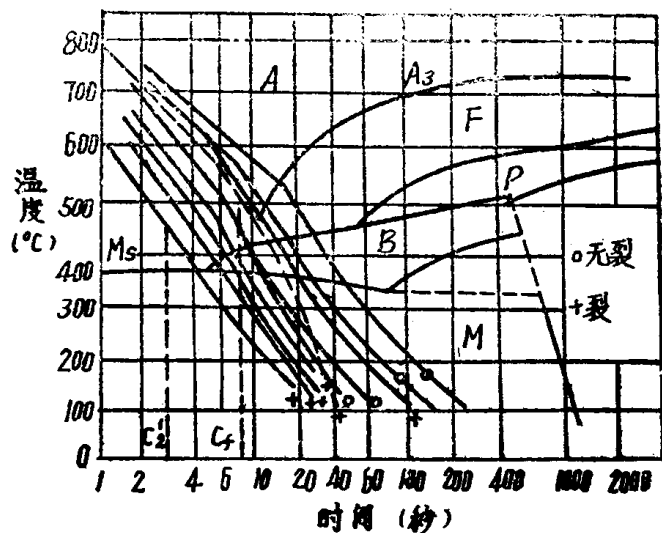


图1-6 高强钢SH-CCT图与CTS裂纹试验的关系