

焊接缺陷分析与对策

HANJIE QUEXIAN FENXI YU DUICE

第3版

李亚江 王娟 等编著



化学工业出版社

焊接缺陷分析与对策

HANJIE QUEXIAN FENXI YU DUICE

第3版

李亚江 王娟 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接缺陷分析与对策/李亚江等编著.—3版.—北京:化学工业出版社,2018.6

ISBN 978-7-122-31919-7

I. ①焊… II. ①李… III. ①焊接缺陷-研究 IV. ①TG441.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 074129 号

责任编辑:周 红

文字编辑:张燕文

责任校对:宋 玮

装帧设计:王晓宇

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:三河市航远印刷有限公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张18½ 字数482千字 2018年7月北京第3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:88.00 元

版权所有 违者必究



焊接技术在结构制造和工程建设中越来越受到重视,为了保证焊接质量,焊接缺陷分析与对策受到人们的关注。特别是在石油化工、电力管道、锅炉及压力容器、石油天然气管线、船舶制造等领域,焊接缺陷往往是引发重大事故的隐患,涉及企业发展甚至社会的安全。目前有关焊接缺陷分析方面的书籍不多,而社会发展和工程建设迫切需求阐述简明、深入浅出的焊接缺陷分析与对策方面的技术书籍。《焊接缺陷分析与对策》第1版和第2版在焊接界有较好的社会影响。《焊接缺陷分析与对策》第3版除了突出工艺特点和实用性之外,删减、更新并补充了部分内容,使之更加适用于指导实际应用。

本书的特点是针对性强,突出实用性内容的阐述。除了阐明各类焊接缺陷(如气孔、夹杂物、冷裂纹、热裂纹、脆性断裂等)的特征、产生焊接缺陷的原因、如何进行缺陷分析和提出防止措施等,特别是结合现代焊接技术的发展,给出了很多来自生产实践的焊接缺陷分析与对策的示例,可以指导实际焊接生产。本书适用面广泛,主要供从事与焊接制造技术相关工作的工程技术人员及管理、设计和检验人员使用,也可供高等院校、科研院所、企事业单位的有关教学、科研和监察人员参考。

参加本书撰写的其他人员还有蒋庆磊、夏春智、马海军、刘鹏、刘如伟、沈孝芹、黄万群、李嘉宁、魏守征、孙建雄、吴娜、杜红燕、马群双、刘坤、胡效东、许红。

在此向援引文献的作者表示诚挚的谢意,这些文献充实了本书的内容,推动了我国焊接技术的发展和应用。

书中存在的疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编著者



Chapter 1

第 1 章 概述	1
1.1 缺欠与缺陷	1
1.1.1 焊接缺欠与焊接缺陷的关系	1
1.1.2 焊接缺欠对接头质量的影响	3
1.2 焊接缺欠分类与控制	5
1.2.1 焊接缺欠的分类	5
1.2.2 各种焊接缺陷的控制	8

Chapter 2

第 2 章 焊缝外观缺欠	11
2.1 焊缝外观缺欠及质量要求	11
2.1.1 常见的外观缺欠	11
2.1.2 接头外观质量要求及缺欠分级	14
2.1.3 焊接缺陷试样的制备	16
2.2 焊缝咬边	19
2.2.1 咬边的类型及特点	19
2.2.2 焊缝咬边对接头质量的影响	19
2.2.3 咬边的原因及防止措施	21
2.3 未熔合及未焊透	22
2.3.1 未熔合及未焊透的危害	22
2.3.2 未熔合及未焊透产生的原因	24
2.3.3 未熔合及未焊透的防止措施	26
2.4 焊缝外观缺欠分析示例	27
2.4.1 西气东输管道自动焊外观缺陷的防止	27
2.4.2 高速焊钢管焊缝凹陷和咬边分析	31
2.4.3 螺旋埋弧焊钢管的咬边及防止	33
2.4.4 高炉立缝管极电渣焊接头未熔合缺陷的防止	35
2.4.5 推土机油缸环焊缝未熔合缺陷的分析	36
2.4.6 CO ₂ 垂直固定焊未熔合的原因及防止措施	37
2.4.7 加热炉油管与弯头未焊透缺陷的控制	39
2.4.8 钛合金导弹舱体未焊透缺陷的分析	40

Chapter 3

第 3 章 焊缝成分偏析和夹杂物	44
3.1 焊缝中的成分偏析	44

3.1.1	焊缝中成分偏析的分类	44
3.1.2	偏析产生的原因及防止措施	45
3.1.3	钢中的杂质及含量控制	46
3.2	焊缝中的非金属夹杂物	55
3.2.1	焊缝中夹杂物的分类及特征	56
3.2.2	夹杂物的分析方法	58
3.2.3	焊缝中夹杂物的防止措施	62
3.3	焊缝中偏析和夹杂物分析实例	63
3.3.1	高强钢焊缝金属中的非金属夹杂物分析	63
3.3.2	螺旋焊管焊缝夹杂物分析及防止措施	70
3.3.3	微合金钢焊缝金属中夹杂物的分析	71
3.3.4	钢板中夹杂物对高频电阻焊管质量的影响	74
3.3.5	奥氏体不锈钢焊缝组织中的偏析分析	76
3.3.6	药芯焊丝焊缝夹杂物与气孔分析	78

Chapter 4

第 4 章	焊缝中的气孔分析	82
4.1	焊缝中的气孔	82
4.1.1	焊缝中气孔的类型及特征	82
4.1.2	焊缝中气孔的形成及危害	84
4.2	焊缝中气孔分析方法	85
4.2.1	焊缝中气孔产生的原因	85
4.2.2	影响气孔产生的因素	86
4.2.3	防止焊缝中气孔的措施	92
4.3	焊缝中气孔分析实例	96
4.3.1	大型储罐 CO ₂ 气体保护立焊气孔缺陷分析	96
4.3.2	埋弧焊管焊缝夹珠型气孔的形成与防止措施	97
4.3.3	铝镁合金分馏塔及管道焊接气孔分析	99
4.3.4	镀锌钢板焊缝气孔的形成与防止	102
4.3.5	2A12 铝合金管件电子束焊的气孔缺陷分析	104
4.3.6	ZQ650-1 转轴焊接修复的气孔问题及解决措施	106
4.3.7	预涂底漆钢板 CO ₂ 立向下焊气孔的消除	108
4.3.8	吊车梁 T 形焊缝气孔产生原因及防止措施	110
4.3.9	小口径耐热合金钢管钨极氩弧焊气孔分析	112

Chapter 5

第 5 章	焊接热裂纹分析	114
5.1	焊接热裂纹的分类、特征及影响因素	114
5.1.1	焊接热裂纹的分类	114
5.1.2	焊接热裂纹的特征	116
5.1.3	焊接热裂纹的影响因素	117
5.2	焊接热裂纹分析方法及防止措施	120
5.2.1	焊接热裂纹分析方法	120
5.2.2	焊接热裂纹分析的依据	121
5.2.3	焊接热裂纹试验方法	122

5.2.4	焊接热裂纹试样的切取和制备	125
5.2.5	焊接热裂纹防止措施	126
5.3	焊接热裂纹分析实例	127
5.3.1	乙烯工程 9Ni 钢球罐焊接液化裂纹分析	127
5.3.2	核电站波动管对接焊缝微裂纹分析	131
5.3.3	东海大桥钢箱梁焊缝热裂纹的分析及解决措施	134
5.3.4	高锰钢与低合金钢焊接热裂纹的防止措施	136
5.3.5	奥氏体不锈钢管道焊接热裂纹缺陷的模拟	138
5.3.6	GH600 波纹管与 0Cr18Ni9 接管氩弧焊的热裂纹分析	141
5.3.7	双面螺旋埋弧焊裂纹产生原因及预防措施	144

Chapter 6

第 6 章	焊接冷裂纹分析	148
6.1	焊接冷裂纹的特点及影响因素	148
6.1.1	焊接冷裂纹的特点及分类	148
6.1.2	焊接冷裂纹的影响因素	150
6.2	焊接冷裂纹分析及防止措施	153
6.2.1	焊接冷裂纹试样的选取	153
6.2.2	焊接冷裂纹的宏观分析	154
6.2.3	焊接冷裂纹的微观分析	157
6.2.4	焊接熔合区裂纹起源与扩展分析	160
6.2.5	焊接冷裂纹的防止措施	165
6.3	焊接冷裂纹分析与防止的实例	168
6.3.1	大厚度异种钢焊接裂纹原因分析及防止措施	168
6.3.2	球罐类大型焊接容器裂纹和失效分析	173
6.3.3	船舶高强钢结构低温环境下焊接冷裂纹的防止	180
6.3.4	超高强钢鱼雷壳体焊接裂纹的防止	182
6.3.5	西气东输 X80 管线钢焊接冷裂纹分析	184
6.3.6	液压支架用 Q550 + Q690 高强钢焊接裂纹分析	187
6.3.7	汽轮机主蒸汽线 Cr5Mo 钢管焊接裂纹分析	191
6.3.8	龙滩水电站蜗壳排水阀阀座焊接裂纹分析及防止措施	193

Chapter 7

第 7 章	焊接结构断裂分析	197
7.1	焊接结构的断裂及强韧性匹配	197
7.1.1	焊接钢结构破断事故	197
7.1.2	高强钢焊缝的强韧性匹配	198
7.1.3	高强钢焊缝韧性的判据	200
7.1.4	焊接结构的应力集中与断裂特征	201
7.2	断裂分析的思路与方法	205
7.2.1	断裂分析的方法、步骤与内容	205
7.2.2	焊接结构失效分析的试验技术	208
7.3	焊接断口分析	209
7.3.1	焊接断口的分类及特征	209
7.3.2	焊接断口的分析方法	214

7.3.3	断口试样的选取和制备	215
7.3.4	焊接断口的宏观和微观分析	217
7.4	焊接结构断裂分析实例	223
7.4.1	高速列车运行条件下大跨度钢桥焊接断裂分析	223
7.4.2	水泥回转窑筒体脆性断裂失效分析	228
7.4.3	高强度管线钢焊接接头的断裂韧性分析	231
7.4.4	煤矿用钻杆断裂原因分析及防止措施	234
7.4.5	客车后桥壳断裂的分析和改进措施	236
7.4.6	汽车大梁(车架)断裂分析及修复措施	238
7.4.7	电铲斗杆断裂分析及修复工艺	241
7.4.8	大跨度钢桥焊接结构的疲劳损伤及防止措施	243

Chapter 8

第 8 章	焊接缺陷检验方法	248
8.1	焊接缺陷检验的依据与方法	248
8.1.1	产品质量检验的依据	248
8.1.2	焊接检验方法分类	249
8.2	外部(宏观)焊接缺陷的检验	250
8.2.1	几何偏差缺欠	250
8.2.2	不连续性缺欠	252
8.3	焊接内在缺陷的检验方法	253
8.3.1	射线检测(RT)	254
8.3.2	超声波检测(UT)	259
8.3.3	磁粉及渗透检测	261
8.3.4	焊接接头金相和电镜检测	267
8.4	工程中焊接缺陷检验示例	274
8.4.1	50000m ³ 液化天然气储罐 9%Ni 钢的焊接质量检验	274
8.4.2	天然气长输管线钢的焊接质量检验	277
8.4.3	锅炉压力容器换热器的射线检测	279
8.4.4	核反应堆容器的超声波检测	280
8.4.5	双相不锈钢的焊接性能检验	282

参考文献	286
------------	-----



第1章

Chapter 1

概 述

焊接缺欠直接影响焊接接头的质量，而焊接接头质量又影响到整体焊接结构的安全运行。阐明焊接缺欠与焊接缺陷的关系对保证焊接质量和焊接结构的安全运行是很重要的，特别是依据相关标准，判定焊接缺欠容限、产生的原因等，给出在材料、工艺、结构等方面采取的防止措施，可以保证焊接结构的质量和运行安全。

1.1 缺欠与缺陷

1.1.1 焊接缺欠与焊接缺陷的关系

焊接缺欠与焊接缺陷，均表征产品不完整或有缺损。但对于焊接结构而言，基于合于使用准则，有必要对缺欠与缺陷赋予不同的含义。

在焊接接头中的不连续性、不均匀性以及其它不健全等的缺欠，统称为焊接缺欠 (weld imperfection)。不符合焊接产品使用性能要求的焊接缺欠，称为焊接缺陷 (weld defect)。也就是说，焊接缺陷是属于焊接缺欠中不可接受的那一种缺欠，焊接缺陷必须经过修复处理后，焊接产品才能使用。换句话说，广义的焊接缺陷是指焊接接头中的不连续性、不均匀性以及其它各种不完整性，正确的专业术语为焊接缺欠。焊接缺欠的存在使焊接接头的质量下降、性能变差。

不同的焊接产品对焊接缺欠有不同的容限标准，国际焊接学会 (IIW) 第 V 委员会从质量管理角度提出的焊接缺欠的容限标准如图 1.1 所示。

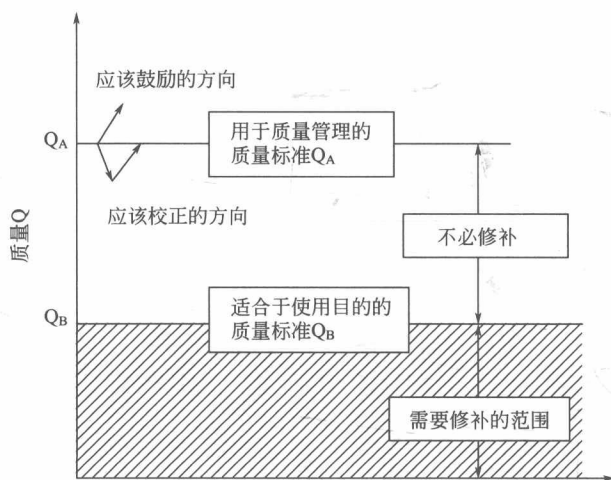


图 1.1 焊接缺欠的容限标准示意图

图 1.1 中用于正常质量管理的质量标准为 Q_A ，它是生产厂家努力的目标（也是用户的期望标准），必须按 Q_A 进行管理生产。 Q_B 是根据合于使用准则确定的反映缺欠容限的最低质量水平，只要产品质量不低于 Q_A 水平，该产品即使有缺欠，也能满足使用要求。也就是说，使具体焊接产品不符合其使用性能要求的焊接缺欠，即不符合 Q_B 水平要求的缺欠，称为焊接缺陷。

焊接结构在制作过程中，由于受到设计、工艺、材料、环境等各种因素影响，生产出的每一件产品不可能完美无缺，不可避免地会有一些焊接缺欠，缺欠的存在不同程度地影响到产品的质量和安全使用。存在焊接缺欠，即便使焊接接头的质量和性能下降，但不超过容限标准，不影响设备的运行，是可以允许的，对焊接结构的运行不致产生危害。

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容限，是不允许的，存在焊接缺陷的产品应被判废或必须进行返修。因为焊接缺陷的存在将直接影响焊接结构的安全使用。

在图 1.1 中，达不到 Q_A 标准的焊接产品便是有焊接缺欠的产品，达不到 Q_B 标准的焊接产品为有焊接缺陷的产品；处于 Q_A 和 Q_B 标准之间的产品就属于虽有缺欠但可使用的一般质量的产品。这里 Q_B 的质量水平便成为产品验收的最低标准。

由于各类焊接缺陷的分布形态不同，所产生的应力集中程度也不同，对结构的危害程度各不一样，亦即焊接缺陷对每一结构，甚至每一结构中的每一构件都不相同。

例如，锅炉和压力容器制造中，对焊接质量提出了相当严格的要求。如果焊接接头中存在某种缺陷，就可能在焊接应力和工作应力或其他环境条件（如腐蚀介质）的联合作用下逐渐扩展，深入到母材并最终导致整台容器的提前失效或破断。严重的危险性缺陷甚至会导致灾难性的事故。

按我国现行的锅炉和压力容器制造标准和规程的规定，在各种承压容器焊接接头中，不允许存在裂纹、未焊透和未熔合之类的平面缺陷。气孔、夹杂和咬边等缺陷的容限尺寸也应控制在较严格的范围内。在锅炉、压力容器、石化（石油、天然气、炼油）管线、电力管道等焊接生产中，防止各种焊接缺陷是一项很重要的任务。

1. 1. 2 焊接缺欠对接头质量的影响

(1) 外部缺欠和内部缺欠

根据焊接缺欠在焊缝中的位置，可将焊接缺欠分为外部缺欠和内部缺欠两大类。

1) 外部缺欠 也称宏观缺欠，是位于焊缝金属外表面的缺欠，是指用肉眼能够观察到的明显缺陷或用低倍放大镜和检测尺等能够检测出来的缺欠。外部缺欠大多是由于操作工艺不当引起的，易造成应力集中、设备泄漏，影响焊接结构的使用寿命。因此，一旦产生外部焊接缺陷要及时铲除、修补，把焊接缺欠控制在技术要求规定的容限范围内。

外部缺欠包括焊缝余高过高或过低、焊缝宽度差过大、接头过高或脱节，外部气孔、裂纹、未熔合、咬边、未焊透、烧穿、焊瘤、电弧擦伤和成形不良等。

2) 内部缺欠 也称微观缺欠，位于焊缝金属的内部，用肉眼看不见，与被焊构件的材质、结构形状、焊接材料及工艺等有关。焊接内部缺陷包括裂纹、气孔、夹渣、未熔合等。其中危险性最大的内部缺陷是裂纹。内部缺欠需要用探伤方法或破坏性试验来检验。

焊接接头常见缺欠的分类见表 1.1。

表 1.1 焊接接头常见缺欠的分类

缺欠名称	根据产生原因分类	根据形状分类
裂纹	热裂纹、冷裂纹、再热裂纹、应力腐蚀裂纹等	横向裂纹、纵向裂纹、弧坑裂纹、放射状裂纹等
气孔	氢气孔、CO 气孔、氮气孔	球形气孔、虫形气孔、条形气孔等
偏析	显微偏析、区域偏析和层状偏析	
夹杂	非金属夹杂、焊剂或熔剂夹杂、氧化物夹杂等	
其他	未熔合、未焊透、咬边、焊瘤、烧穿等	

(2) 缺欠对接头质量的影响

随着焊接结构强度、韧性、耐热和耐腐蚀性等性能的提高，对焊接质量提出了更高的要求，控制焊接缺欠和防止焊接缺陷是提高焊接产品质量的关键。据统计，世界上各种焊接结构的失效事故中，除属于设计不合理、选材不当和操作上的问题之外，绝大多数焊接事故是由焊接缺陷，特别是焊接裂纹所引起的。

焊接缺欠的影响因素：人员——关键要素；母材和焊材——决定要素；焊接设备状况——重要要素；标准、规范的执行状况——施工管理要素；环境管理状况——施工管理要求。

焊接缺陷不仅给生产带来许多困难，而且可能给装备运行带来灾难性的事故。由于焊接缺陷的存在减小了结构承载的有效截面积，更重要的是在缺陷周围产生了应力集中。因此，焊接缺陷对结构的承载强度、疲劳强度、脆性断裂以及应力腐蚀开裂都有重要的影响。

1) 对结构承载强度的影响 焊缝中出现成串或密集气孔缺陷时，由于气孔的截面较大，同时还可能伴随着焊缝力学性能的下降（如氧化等），使承载强度明显地降低。因此，成串气孔要比单个气孔危险性大。夹杂对强度的影响与其形状和尺寸有关。单个的间断小球状夹杂物并不比同样尺寸和形状的气孔危害大。直线排列的、细条状且排列方向垂直于受力方向的连续夹杂物是比较危险的。

焊接缺陷对结构的静载破坏和疲劳强度有不同程度的影响。在一般情况下，材料的破坏形式多属于塑性断裂，这时缺陷所引起的强度降低，大致与它所造成承载截面积的减少成比

例。焊接缺陷对疲劳强度的影响要比静载强度大得多。例如,焊缝内部的裂纹由于应力集中系数较大,对疲劳强度的影响较大;气孔引起的承载截面积减小10%时,疲劳强度的下降可达50%。焊缝内部的球状夹杂物当其面积较小、数量较少时,对疲劳强度的影响不大;但当夹杂物形成尖锐的边缘时,对疲劳强度的影响十分明显。

咬边对疲劳强度的影响比气孔、夹杂大得多。带咬边接头在 10^6 次循环条件下的疲劳强度大约仅为致密接头的40%,其影响程度也与负载方向有关。此外,焊缝成形不良,焊趾区及焊根处的未焊透、错边和角变形等外部缺陷都会引起应力集中,易产生疲劳裂纹而造成疲劳破坏。

夹渣或夹杂物根据其截面积的大小成比例地降低材料的抗拉强度,但对屈服强度的影响较小。几何形状造成的不连续性缺陷,如咬边、焊缝成形不良或焊穿等不仅降低了构件的有效截面积,而且会产生应力集中。当这些缺陷与结构中的残余应力或热影响区脆化晶粒区相重叠时,会引发脆性不稳定扩展裂纹。

未熔合和未焊透比气孔和夹渣更有害。虽然当焊缝有增高量或用优于母材的焊条制成焊接接头时,未熔合和未焊透的影响可能不十分明显,事实上许多焊接结构已经工作多年,焊缝内部的未熔合和未焊透并没有造成严重事故,但是这类缺欠在一定条件下可能成为脆性断裂的引发点。

裂纹被认为是危险的焊接缺陷,易造成结构的断裂。裂纹一般产生在拉应力较大和热影响区粗晶组织区,在静载非脆性破坏条件下,如果塑性流动发生于裂纹失稳扩展之前,则结构中的残余应力将没有很大的影响,而且也不会产生脆性断裂,但是一旦裂纹失稳扩展,对焊接结构的影响就很严重了。

2) 应力集中 焊接接头中的裂纹、未熔合和未焊透比气孔和夹渣的危害大,它们不仅降低了结构的有效承载截面积,而且更重要的是产生了应力集中,有诱发脆性断裂的可能。尤其是裂纹,在其尖端存在着缺口效应,容易诱发出三向应力状态,导致裂纹的失稳和扩展,以致造成整个结构的断裂,所以裂纹(特别是延迟裂纹)是焊接结构中最危险的缺陷。

焊接接头中的裂纹常常呈扁平状,如果加载方向垂直于裂纹的平面,则裂纹两端会引起严重的应力集中。焊缝中的气孔一般呈单个球状或条虫形,因此气孔周围应力集中并不严重。焊缝中的单一夹杂具有不同的形状,其周围的应力集中也不严重。但如果焊缝中存在密集气孔或夹杂时,在负载作用下,如果出现气孔间或夹杂间的联通,则将导致应力区的扩大和应力值的急剧上升。

焊缝的形状不良、角焊缝的凸度过大及错边、角变形等焊接接头的外部缺陷,也都会引起应力集中或产生附加应力。

焊缝增高、错边和角变形等几何不连续缺欠,有些虽然为现行规范所允许,但都会在焊接接头区产生应力集中。接头形式的差别也会出现应力集中,在焊接结构常用的接头形式中,对接接头的应力集中程度最小,角接头、T形接头和正面搭接接头的应力集中程度相差不多。重要结构中的T形接头,如动载下工作的H形板梁,可采用开坡口的方法使接头处应力集中程度降低;但搭接接头不能做到这一点,侧面搭接焊缝沿整个焊缝长度上的应力分布很不均匀,而且焊缝越长,不均匀度越严重,故一般钢结构设计规范规定侧面搭接焊缝的计算长度不得大于60倍焊脚尺寸。超过此限定值后即使增加侧面搭接焊缝的长度,也不会降低焊缝两端的应力集中峰值。

含裂纹的焊接结构与占同样面积的气孔的结构相比,前者的疲劳强度比后者降低15%。对未焊透来说,随着其面积和应力集中的增加疲劳强度明显下降。而且,这类平面形缺陷对疲劳强度的影响与负载方向有关。

3) 对结构脆性断裂的影响 脆性断裂是一种低应力下的破坏,而且具有突发性,事先难以发现,因此危害性较大。焊接结构经常会在有缺陷处或结构不连续处引发脆性断裂,造成灾难性的破坏。一般认为,结构中缺陷造成的应力集中越严重,脆性断裂的危险性越大。由于裂纹尖端的尖锐度比未焊透、未熔合、咬边和气孔等缺陷要严重得多,所以裂纹对脆性断裂的影响最大,其影响程度不仅与裂纹的尺寸、形状有关,而且与其所在的位置有关。如果裂纹位于拉应力高值区就容易引起低应力破坏;若位于结构的应力集中区,则更危险。如果焊缝表面有缺陷,则裂纹很快在缺陷处形核。因此,焊缝的表面成形和粗糙度,以及焊接结构上的拐角、缺口、缝隙等都对裂纹形成和脆性断裂有很大的影响。

气孔和夹渣等体积类缺陷低于5%时,如果结构的工作温度不低于材料的塑性-脆性转变温度,对结构安全影响较小。带裂纹构件的临界温度要比含夹渣构件高得多。除用转变温度来衡量各种缺陷对脆性断裂的影响外,许多重要焊接结构都采用断裂力学作为评价的依据,因为用断裂力学可以确定断裂应力和裂纹尺寸与断裂韧性之间的关系。许多焊接结构的脆性断裂是由微裂纹引发的,在一般情况下,由于微裂纹未达到临界尺寸,结构不会在运行后立即发生断裂。但是微裂纹在装备运行期间会逐渐扩展,最后达到临界值,导致发生脆性断裂。

所以在结构使用期间要进行定期检查,及时发现和监测接近临界条件的缺欠,是防止焊接结构脆性断裂的有效措施。当焊接结构承受冲击或局部发生高应变和恶劣环境影响,容易使焊接缺陷引发脆性断裂。例如,疲劳载荷和应力腐蚀环境都能使裂纹等缺陷变得更严重,使裂纹的尺寸增大,加速达到临界值。

4) 应力腐蚀开裂 焊接缺陷的存在也会导致接头出现应力腐蚀疲劳断裂,应力腐蚀开裂通常总是从表面开始,向纵深发展。如果焊缝表面有缺陷,则裂纹很快在缺陷处形核。因此,焊缝的表面粗糙度,以及焊接结构上的拐角、缺口、缝隙等都对应力腐蚀有很大的影响。这些外部缺陷使介质局部浓缩,加快了微区电化学过程的进行和阳极的溶解,为应力腐蚀裂纹的扩展成长提供了条件。

应力集中对腐蚀疲劳也有很大的影响。焊接接头应力腐蚀裂纹的扩展和腐蚀疲劳破坏,大都是从焊趾处开始,然后扩展穿透整个截面导致结构的破坏。因此,改善焊趾处的应力集中也能大大提高接头的抗腐蚀疲劳的能力。错边和角变形等焊接缺陷也能引起附加的弯曲应力,对结构的脆性破坏也有影响,并且角变形越大,破坏应力越低。

综上所述,焊接结构中存在焊接缺陷会明显降低结构的承载能力。焊接缺陷的存在,减小了焊接接头的有效承载截面积,造成了局部应力集中。非裂纹类的应力集中源在焊接产品的工作过程中也极有可能演变成裂纹源,导致裂纹的萌生和扩展。焊接缺陷的存在甚至还会降低焊接结构的耐蚀性和疲劳寿命。所以,在焊接产品的制造过程中应采取措施,防止产生焊接缺陷,在焊接产品的使用过程中应进行定期检验,以及及时发现缺陷,采取修补措施,避免事故的发生。

1.2 焊接缺欠分类与控制

1.2.1 焊接缺欠的分类

根据焊接缺欠的性质、特征可分为不连续性缺欠(如裂纹、夹渣、气孔和未熔合等)和几何偏差缺欠两大类。国家标准 GB/T 6417.1—2005《金属熔化焊接头缺欠分类及说明》和 GB/T 6417.2—2005《金属压力焊接头缺欠分类及说明》根据缺欠的性质和特征将焊接



缺欠分为6大类：第1类，裂纹；第2类，孔穴；第3类，固体夹杂；第4类，未熔合及未焊透；第5类，形状及尺寸不良；第6类，其他缺欠。每一大类中又按缺欠存在的位置及状态分为若干小类。为了方便使用和管理，标准采用缺欠代号表示各种焊接缺欠。

(1) 熔焊接头的缺欠分类

GB/T 6417.1—2005《金属熔化焊接头缺欠分类及说明》对于熔焊接头焊接缺欠按其性质进行了分类，共有6类。

1) 裂纹 一种在固态下由局部断裂产生的缺欠，它可能源于冷却或应力效果。在显微镜下才能观察到的裂纹称为微裂纹。裂纹缺欠有以下几种。

① 纵向裂纹 基本与焊缝轴线相平行的裂纹，它可能位于焊缝金属、熔合区、热影响区及母材等区域。

② 横向裂纹 基本与焊缝轴线相垂直的裂纹。

③ 放射状裂纹 具有某一公共点的放射状裂纹，这种类型的小裂纹称为星形裂纹。

④ 弧坑裂纹 在焊缝弧坑处的裂纹，它可能是纵向的、横向的或放射状的。

⑤ 间断裂纹群 一群在任意方向间断分布的裂纹。

⑥ 枝状裂纹 源于同一裂纹并且连在一起的裂纹群。

横向裂纹、放射状裂纹、间断裂纹群及枝状裂纹都可能位于焊缝金属、热影响区及母材的区域。

2) 孔穴 包括气孔、缩孔、微型缩孔等。

① 气孔 残留气体形成的孔穴，有以下几种。

a. 球形气孔：球形的气孔。

b. 均布气孔：均匀分布在焊缝金属中的一些气孔。

c. 局部密集气孔：呈任意几何分布的一群气孔。

d. 链状气孔：与焊缝轴线平行的一串气孔。

e. 条状气孔：长度方向与焊缝轴线平行的非球形气孔。

f. 虫形气孔：因气体逸出而在焊缝金属中产生的一种管状气孔穴，其形状和位置由凝固方式和气体的来源所决定。通常该气孔成串聚集，并呈鲐骨形状。有些虫形气孔可能暴露在焊缝表面上。

g. 表面气孔：暴露在焊缝表面的气孔。

② 缩孔 由于凝固时收缩造成的孔穴，可以分为以下几种。

a. 结晶缩孔：冷却过程中在树枝晶之间形成的长形缩孔，可能残留有气体。这种缺欠通常可在焊缝表面垂直处发现。

b. 弧坑缩孔：焊道末端的凹陷孔穴，未被后续焊道消除。

c. 末端弧坑缩孔：在焊道末端，减少焊缝横截面处的外露缩孔。

③ 微型缩孔 仅在显微镜下可以观察到的缩孔等，有以下两种。

a. 微型结晶缩孔：冷却过程中，沿晶界在树枝晶之间形成的长形缩孔。

b. 微型穿晶缩孔：凝固时，穿过晶界形成的长形缩孔。

3) 固体夹杂 是在焊缝金属中残留的固体夹杂物，包含以下几种。

① 夹渣 残留在焊缝中的熔渣。

② 焊剂夹渣 残留在焊缝中的焊剂渣。

③ 氧化物夹杂 凝固时残留在焊缝中的金属氧化物。在某些情况下，特别是铝合金焊接时，因焊接熔池保护不良和紊流的双重影响而产生大量的氧化膜，称为皱褶缺欠。

④ 金属夹杂 残留在焊缝金属中的外来金属颗粒。这些颗粒可能是钨、铜或其他金属。

夹渣、焊剂夹渣、氧化物夹杂等可能是线状的、孤立的或成簇的。

4) 未熔合及未焊透

① 未熔合 焊缝金属和母材或焊缝金属各焊层之间未结合的部分称为未熔合。它可以分为侧壁未熔合、焊道间未熔合及根部未熔合等几种形式。

② 未焊透 实际熔深与公称熔深之间的差异称为未焊透。在焊缝根部的一个或两个熔合面未熔化就是根部未焊透缺欠。

5) 形状和尺寸不良 焊缝的外表面形状或接头的几何形状不良, 包括以下各项, 以及焊缝超高、角度偏差、焊脚不对称、焊缝宽度不齐、根部收缩、根部气孔、变形过大等各种缺欠。

① 咬边 母材(或前一道熔敷金属)在焊趾处因焊接而产生的不规则缺口, 可分为连续咬边、间断咬边、缩沟、焊道间咬边、局部交错咬边等缺欠。

② 凸度过大 角焊缝表面上焊缝金属过高。

③ 下塌 过多的焊缝金属伸到了焊缝的根部。

④ 焊缝形面不良 母材金属表面与靠近焊趾处焊缝表面的切面之间的夹角过小。

⑤ 焊瘤 覆盖在母材金属表面, 但未与其熔合的过多熔敷金属, 可分为焊趾焊瘤及根部焊瘤等。

⑥ 错边 两个焊件表面应平行对齐时, 未达到规定的平行对齐要求而产生的偏差, 包括板材的错边及管材的错边等。

⑦ 下垂 由于重力而导致焊缝金属塌落。

⑧ 烧穿 焊接熔池塌落导致焊缝内形成的孔洞。

⑨ 未焊满 因焊接填充金属堆敷不充分, 在焊缝表面产生纵向连续或间断的沟槽。

⑩ 表面不规则 焊缝表面粗糙过度。

⑪ 焊接接头不良 焊缝再引弧处局部表面不规则, 可能发生在盖面焊道及打底焊道。

⑫ 焊缝尺寸不正确 是指与预先规定的焊缝尺寸产生的偏差, 包括焊缝厚度过大、焊缝宽度过大、焊缝有效厚度不足或过大等缺欠。

6) 其他缺欠 是指以上5类缺欠未包含的所有其他缺欠。例如电弧擦伤、飞溅(包括钨飞溅)、表面撕裂、磨痕、凿痕、打磨过量、定位焊缺欠(例如焊道破裂或熔合, 定位未达到要求就施焊等)、双面焊道错开、回火色(不锈钢焊接区产生的轻微氧化表面)、表面鳞片(焊接区严重的氧化表面)、焊剂残留物、残渣、角焊缝的根部间隙不良, 以及由于凝固阶段保温时间加长使轻金属接头发热而造成的膨胀缺欠等。

(2) 压焊接头的缺欠分类

GB/T 6417.2—2005《金属压力焊接头缺欠分类及说明》对于压焊接头焊接缺欠按其性质进行了分类, 共有6类。

1) 裂纹 一种在固态下由局部断裂产生的缺欠, 通常源于冷却或应力。裂纹缺欠包括纵向裂纹、横向裂纹、星形裂纹、熔核边缘裂纹、结合面裂纹、热影响区裂纹、母材裂纹、焊缝区的表面裂纹以及钩状裂纹(例如对焊试件飞边区域内的裂纹, 通常始于夹杂物)等。纵向裂纹及横向裂纹可能位于焊缝、热影响区、未受影响的母材区域中。

2) 孔穴 包括气孔、缩孔、锻孔等。

3) 固体夹杂 包括夹渣、氧化物夹杂、金属夹杂及铸造金属夹杂等缺欠。夹渣、氧化物夹杂缺欠, 可能是孤立或成簇分布。

4) 未熔合 接头未完全熔合包括未焊上、熔合不足、箔片未焊合等缺欠。

5) 形状和尺寸不良 形状缺欠是指与要求的接头形状有偏差。形状和尺寸不良包括咬

边、飞边超限、组对不良、错边、角度偏差、变形、熔核或焊缝尺寸的缺欠，熔核熔深不足、单面烧穿、熔核或焊缝烧穿、热影响区过大、薄板间隙过大、表面缺欠、熔核不连续、焊缝错位、箔片错位及弯曲接头等缺欠。

6) 其他缺欠 是指以上 5 类缺欠未包含的缺欠。例如飞溅、回火色（电焊或缝焊区域的氧化表面）、材料挤出物（从焊接区域挤出的熔化金属，包括飞溅或焊接喷溅）等缺欠。

(3) 钎焊接头的缺欠分类

根据 GB/T 33219—2016《硬钎焊接头缺欠》的规定，在硬钎焊接头中产生的金属不连续、不致密、不规则、连接不良及形状或尺寸偏差的现象，称为缺欠。硬钎焊接头的缺欠有以下几类。

1) 裂纹 硬钎焊接头的裂纹是指材料的有限分离。在应力及其他致脆因素作用下，形成新界面而产生的缝隙，具有尖锐的缺口和长宽比大的特征，主要沿二维方向扩展。裂纹可以是纵向的或横向的。裂纹可能存在于钎缝金属、钎焊界面、扩散区、热影响区以及未受影响的母材区中。

2) 孔穴 包括气穴、气孔、大气窝、表面气孔、表面气泡、填充缺欠及未焊透等，这些缺欠经常伴随产生。

3) 固体夹杂 是钎焊金属中残留的外部金属或非金属颗粒固体夹杂物，可以分为氧化物夹杂、金属夹杂以及钎剂夹杂等。

4) 结合缺欠 是指硬钎缝金属与母材之间没有结合或没有充分结合的部位，可分为填充缺欠和未钎透。填充缺欠是指钎缝间隙没有完全被填充，未钎透是指熔融钎料未能填满要求的接头长度区域。

5) 形状和尺寸缺欠 包括焊瘤、形态不良、错边、角度偏差、变形、局部熔化（或熔穿）、咬边、填充金属溶蚀、凹形钎缝、表面粗糙、不完整或不规则钎角等。

6) 其他缺欠 是指不属于以上 5 类的缺欠，包括钎剂渗漏、飞溅、变色或氧化、母材及填充材料的过度合金化、钎剂残余物、钎焊金属过度流淌及蚀刻等。

1.2.2 各种焊接缺陷的控制

焊接产品在制造过程中，不可避免地会出现不同类型的缺欠。分析焊接缺欠的产生原因，是为了有针对性地采取相应的技术措施，减少或消除焊接缺陷，以提高焊接产品的质量。同时，还要对已经出现的缺欠进行分析，研究解决办法及补救措施，并且明确指出缺欠达到什么程度时，就应当判定为缺陷，也就是要通过理论分析与计算确定缺欠的容限。结合具体的焊接产品，确定 Q_A 、 Q_B 的质量标准，这是非常重要的工作。

(1) 焊接缺欠的控制

1) 气孔的控制

① 按国家标准要求，加强施工环境控制，现场建立合理的施工清洁区；严禁焊接场所穿堂风，采取端部封堵等措施。

② 按焊接施工方案要求进行坡口清理，严格控制坡口两侧的清洁度；加强现场通风条件，控制空气湿度不大于 90%。

③ 加强焊工基本技能的培训，严格执行工艺规程，控制焊接电弧的合适长度。

④ 焊条电弧焊采用低氢型焊条，焊前按要求烘干。

⑤ 氩弧焊控制氩气纯度 ($Ar \geq 99.99\%$)；按工艺评定要求，控制氩气流量，避免出现紊流。

⑥ 选择性能稳定且标定合格的焊接设备。

2) 夹渣的控制

① 加强焊工基本技能的培训，操作中控制铁水与熔渣分离。

② 按焊接工艺文件要求，控制焊接电流。

③ 使用合适规格的焊条，加强焊接过程的层道间清理。

④ 焊接接地线应在工件中合理牢固接地，控制电弧偏吹。

3) 未熔合的控制

① 加强焊工基本技能的培训，从操作上消除根部未熔合缺陷的产生。

② 注意焊层之间的修整，避免出现沟槽及运条不当而导致未熔合。

③ 严格按焊接工艺文件要求，采用合理的焊接电流（或焊接热输入）。

④ 正确处理钨极的打磨角度和焊接停留时间。

4) 未焊透的控制

① 加强焊接坡口质量检查，控制合理的钝边量。

② 加强装配质量检查，严把装配质量关，控制合理的装配间隙和错边量。

③ 加强焊工基本技能的培训，避免内部缺陷的错判。

④ 按焊接工艺文件要求采用合理的焊接电流（或焊接热输入）。

⑤ 使用合适规格的焊材（焊条、焊丝）。

⑥ 正确处理钨极的打磨角度。

5) 错边的控制

① 加强焊接坡口的检验，控制两部件的壁厚差达到标准要求。

② 加强质量检验人员在现场对装配质量的检查，严把焊接装配质量关，控制合理的错边量。

③ 加强操作者自检，按要求进行点固焊，确保装配质量。

④ 加强装配图纸的审查，避免设计在设备、阀门与管道接口尺寸存在问题。

当产品焊接缺陷被检出后，除对它进行评定并作出处理外，还有一项更为重要的工作，即对产生的焊接缺陷进行原因分析。找出产生焊接缺陷的内、外原因，才能“对症下药”，根治焊接缺陷，特别是防止缺陷的再次发生。

了解各种焊接缺陷对结构质量的影响，对控制焊接结构的安全是十分必要的。应明确哪些焊接缺陷可能对焊接结构带来灾难性的后果，哪些焊接缺欠不会对焊接结构安全运行有大的影响。通过严格控制缺欠，可确保优质焊接工程的实现。

(2) 超标缺欠的返修

① 在焊接接头或焊接产品中出现的缺欠，如果不能满足“合于使用”的最低验收标准 Q_B ，就应当考虑返修。否则，就判定为废品。

② 对于影响焊接接头使用安全性的缺欠，必须进行认真的、细致的返修工作；对于符合产品安全使用要求的产品缺欠，可以不必返修。对于缺欠是否应当进行返修进行决策时，必须认真进行技术论证，并经总工程师批准。

③ 缺欠应当区分为表层缺欠与内部缺欠。表层缺欠应当根据缺欠的形状、尺寸及范围，采用机械加工方法，有时还应配合焊接方法或表面工程技术进行返修。内部缺欠的返修，在机械加工等方式将缺欠清除干净后，主要由焊接方法修复。

④ 返修工作前应当认真制定返修工艺方案，经过返修焊接工艺评定试验及技术论证后，由该工程项目的总工程师批准。返修工作的原则是要确保产品质量、便于施工、注意节约能源及材料。