

HANJIE QUEXIAN FENXI
YU DUICE

焊接缺陷分析 与对策

李亚江 等编著

- ① 阐明了各类焊接缺陷（如气孔、夹杂物、冷裂纹、热裂纹、焊接变形、脆性断裂等）的特征
- ② 介绍了焊接缺陷的产生原因、分析方法和防止对策等
- ③ 结合现代焊接技术的发展，突出实用性内容的阐述，给出了很多来自生产实践的焊接缺陷分析实例，可以指导实际焊接生产



化学工业出版社

HANJIE QUEXIAN FENXI
YU DUICE

焊接缺陷分析与对策

李亚江 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. —北京: 化学工业出版社, 2011.5
ISBN 978-7-122-10451-9

I. 焊… II. 李… III. 焊接缺陷-研究 IV. TG441.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 011426 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 战河红

文字编辑: 陈 喆
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: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 22 字数 550 千字 2011 年 5 月北京第 1 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: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

Foreword

焊接在重大工程建设中越来越受到重视，如国家体育场“鸟巢”、大跨度钢桥、高速列车、西气东输管线、三峡工程、核电站等，为了保证焊接质量，焊接缺陷分析受到人们的关注。特别是化工容器、电力管道、锅炉及压力容器、石油天然气管线、船舶制造等，焊接缺陷往往是引发重大事故的隐患，涉及企业甚至社会的安全。

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方面的技术书籍。本书阐明了各类焊接缺陷（如气孔、夹杂物、冷裂纹、热裂纹、焊接变形、脆性断裂等）的特征，介绍了焊接缺陷的产生原因、分析方法和防止对策等，特别是结合现代焊接技术的发展，突出实用性和针对性，给出了很多来自生产实践的焊接缺陷分析实例，可以指导实际焊接生产。

本书适用面广，可供从事与焊接制造技术相关的工程技术人员，管理、设计和检验人员使用，也可供大专院校、科研院所、企事业单位的有关教学和科研、监察人员参考。

参加本书撰写的其他人员还有：王娟、蒋庆磊、夏春智、马海军、刘鹏、刘如伟、张永兰、张蕾、吴娜、沈孝芹、黄万群、许有肖、李嘉宁、张永喜、王平、杜红燕、刘强、张燕、何卓宁、石海玉、徐健等。本书还参考了相关文献，在此一并表示感谢。

书中存在的不足之处，恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

Contents

第 1 章 概述	1
1.1 焊接缺欠	1
1.1.1 焊接缺欠的定义	1
1.1.2 焊接缺欠与焊接缺陷的关系	1
1.1.3 焊接缺欠对结构的影响和防止对策	2
1.2 大型焊接工程结构缺欠和事故案例	6
1.2.1 奥运国家体育场“鸟巢”钢结构焊接缺陷的防止	6
1.2.2 液化石油气球罐爆炸事故案例及防止对策	10
1.2.3 大跨度钢桥焊接结构的疲劳损伤及防止	12
1.2.4 铁路钢轨断裂事故分析及防止	16
第 2 章 焊缝外观缺欠	20
2.1 焊缝外观缺欠及质量要求	20
2.1.1 常见的外观缺欠	20
2.1.2 接头外观质量要求及缺欠分级	22
2.1.3 不同焊接工艺的外观缺欠及防止	25
2.2 焊缝咬边	27
2.2.1 咬边的类型及特点	27
2.2.2 焊缝咬边对接头质量的影响	27
2.2.3 咬边的原因及防止对策	29
2.3 未熔合及未焊透	30
2.3.1 未熔合及未焊透的危害	30
2.3.2 未熔合及未焊透产生的原因	32
2.3.3 未熔合及未焊透的防止措施	34
2.4 焊缝外观缺欠分析实例	35
2.4.1 西气东输管道自动焊外观缺陷的防止	35
2.4.2 高速焊钢管焊缝凹陷和咬边分析	39
2.4.3 螺旋埋弧焊钢管的咬边及防止	40
2.4.4 高炉立缝管极电渣焊接头未熔合缺陷的防止	42
2.4.5 推土机油缸环焊缝未熔合缺陷的分析	44
2.4.6 加热炉油管与弯头未焊透缺陷的控制	45

2.4.7	钛合金导弹舱体未焊透缺陷的分析	46
2.4.8	安装膜式壁打底焊道未焊透的原因及防止	49
第3章	焊缝成分偏析和夹杂物	51
3.1	焊缝中的成分偏析	51
3.1.1	焊缝中成分偏析的分类	51
3.1.2	偏析产生的原因及防止措施	52
3.1.3	钢中的杂质及含量控制	53
3.2	焊缝中的非金属夹杂物	56
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	62
3.3	焊缝中偏析和夹杂物分析实例	62
3.3.1	高强钢焊缝金属中的非金属夹杂物分析	62
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	72
3.3.4	钢板中夹杂物对高频电阻焊管质量的影响	75
3.3.5	奥氏体不锈钢焊缝组织中的偏析分析	77
3.3.6	药芯焊丝焊缝夹杂物与气孔分析	80
3.3.7	V-Ti 微合金钢热影响区晶内铁素体与夹杂物分析	82
第4章	焊缝中的气孔分析	85
4.1	焊缝中的气孔	85
4.1.1	焊缝中气孔的类型及特征	85
4.1.2	焊缝中气孔的形成及危害	87
4.2	焊缝气孔分析方法	89
4.2.1	焊缝气孔产生的原因	89
4.2.2	影响气孔产生的因素	90
4.2.3	防止焊缝中气孔的对策	93
4.3	焊缝气孔分析实例	97
4.3.1	大型储罐气电立焊气孔缺陷分析	97
4.3.2	埋弧焊管焊缝夹珠型气孔的形成与消除	99
4.3.3	铝镁合金分馏塔及管道焊接气孔分析	100
4.3.4	镀锌钢板气孔的形成与防止	103
4.3.5	2A12 铝合金管件电子束焊的气孔缺陷分析	105
4.3.6	ZQ650-1 转轴焊修的气孔问题及解决措施	107
4.3.7	预涂底漆钢板 CO ₂ 立向下焊气孔的消除	109
4.3.8	吊车梁 T 形焊缝气孔的产生原因及防止对策	111
4.3.9	小口径耐热合金钢管钨极氩弧焊气孔分析	113

第5章 焊接应力与变形分析..... 116

5.1 焊接应力分析	116
5.1.1 由应力集中引发的重大事故	116
5.1.2 影响焊接应力集中的因素	117
5.1.3 防止焊接应力的对策	121
5.2 焊接变形分析	123
5.2.1 焊接变形的特点及分类	123
5.2.2 影响焊接变形的因素	124
5.2.3 防止焊接变形的对策	132
5.3 防止焊接应力与变形的实例	136
5.3.1 大型油罐焊接变形的控制	136
5.3.2 三峡电站 700MW 转子圆盘支架焊接变形的控制	140
5.3.3 国家体育场“鸟巢”焊接应力和变形的控制	143
5.3.4 船用薄板焊接变形的控制	147
5.3.5 大型复杂结构铝筒焊接变形的控制	149
5.3.6 地铁构架侧梁焊接变形的控制	151
5.3.7 电站锅炉大板梁焊接变形的控制	153

第6章 焊接热裂纹分析..... 155

6.1 焊接热裂纹的分类、特征及影响因素	155
6.1.1 焊接热裂纹的分类	155
6.1.2 焊接热裂纹的特征	156
6.1.3 焊接热裂纹的影响因素	157
6.2 焊接热裂纹分析方法及防止措施	160
6.2.1 焊接热裂纹分析方法	160
6.2.2 焊接热裂纹分析的依据	162
6.2.3 焊接热裂纹和再热裂纹试验方法	163
6.2.4 焊接热裂纹试样的切取和制备	167
6.2.5 焊接热裂纹和再热裂纹防止对策	169
6.3 焊接热裂纹分析实例	171
6.3.1 大庆 30 万吨乙烯工程 9Ni 钢球罐焊接液化裂纹分析	171
6.3.2 核电站波动管对接焊缝微裂纹分析	175
6.3.3 东海大桥钢箱梁焊缝热裂纹的分析及解决措施	177
6.3.4 高锰钢与低合金钢焊接热裂纹的防止对策	179
6.3.5 奥氏体不锈钢管道焊接热裂纹缺陷的模拟	182
6.3.6 GH600 波纹管与 0Cr18Ni9 接管氩弧焊的热裂纹分析	184
6.3.7 双面螺旋埋弧焊裂纹产生原因及预防对策	187
6.3.8 珠光体耐热钢焊接再热裂纹的防止对策	190

第7章 焊接冷裂纹分析 194

7.1 焊接裂纹的分析方法	194
7.1.1 焊接裂纹的特点及分类	194
7.1.2 焊接裂纹试样的选取	197
7.1.3 焊接裂纹的宏观分析	198
7.1.4 焊接裂纹的微观分析	203
7.2 焊接冷裂纹的影响因素及防止对策	205
7.2.1 焊接冷裂纹的形态及影响因素	205
7.2.2 焊接熔合区裂纹的起源与扩展	207
7.2.3 焊接冷裂纹的防止对策	214
7.3 焊接冷裂纹分析与防止的实例	217
7.3.1 大厚度异种钢焊接裂纹原因分析及对策	217
7.3.2 球罐类大型焊接容器裂纹和失效分析	222
7.3.3 船舶高强钢结构低温环境下焊接冷裂纹的防止	230
7.3.4 超高强钢鱼雷壳体焊接裂纹的防止	232
7.3.5 西气东输 X80 管线钢的焊接冷裂纹分析	234
7.3.6 液压支架用 Q550+Q690 高强钢焊接裂纹分析	237
7.3.7 汽轮机主蒸汽线 Cr5Mo 钢管焊接裂纹分析	242
7.3.8 龙滩电站蜗壳排水阀阀座焊接裂纹分析及对策	244
7.3.9 三峡工程泄洪深孔流道钢衬裂纹分析及处理	248

第8章 焊接结构断裂分析 251

8.1 焊接结构的断裂及强韧性匹配	251
8.1.1 焊接钢结构破断事故	251
8.1.2 高强钢焊缝的强韧性匹配	252
8.1.3 焊接结构的应力集中与断裂	255
8.2 断裂分析的思路与方法	256
8.2.1 断裂分析的方法、步骤与内容	256
8.2.2 焊接结构失效分析的实验技术	259
8.3 焊接断口分析	261
8.3.1 焊接断口的分类及特征	262
8.3.2 焊接断口的分析方法	268
8.3.3 断口试样的选取和制备	269
8.3.4 焊接断口的宏观和微观分析	271
8.4 焊接结构断裂分析实例	280
8.4.1 高速列车运行条件下大跨度钢桥焊接断裂分析	280
8.4.2 厚壁压力容器断裂事故分析（焊接工艺不当造成的失效）	286
8.4.3 水泥回转窑筒体脆性断裂失效分析	287
8.4.4 高强度管线钢焊接接头的断裂韧性分析	290

8.4.5	煤矿用钻杆断裂原因分析及防止措施	293
8.4.6	客车后桥壳断裂的分析和改进措施	295
8.4.7	汽车大梁(车架)断裂分析及修复措施	298
8.4.8	电铲斗杆断裂分析及修复工艺	300
8.4.9	环境加速奥氏体钢焊接结构失效的例子	303
第9章	焊接缺陷的检验	305
9.1	宏观焊接缺陷的检验方法	305
9.1.1	几何偏差缺欠	305
9.1.2	不连续性缺欠	307
9.2	微观焊接缺陷的检验方法	309
9.2.1	射线探伤检测(RT)	310
9.2.2	超声波检测(UT)	314
9.2.3	磁粉及渗透检验	316
9.2.4	焊接接头金相和电镜检测	322
9.3	工程中焊接缺陷检验实例	330
9.3.1	5万立方米液化天然气储罐9%Ni钢的焊接质量检验	330
9.3.2	天然气长输管线钢的焊接质量检验	332
9.3.3	锅炉压力容器换热器的射线检测	335
9.3.4	核反应堆容器的超声波检测	336
9.3.5	双相不锈钢的焊接性能检验	338
参考文献		343

第1章

概述

焊接缺欠直接影响焊接接头的质量，而接头质量又影响到结构件的安全使用。阐明焊接缺欠与焊接缺陷的关系对保证焊接质量是很重要的，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，从而可以保证焊接结构件的质量和运行安全。

1.1 焊接缺欠

1.1.1 焊接缺欠的定义

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）提出的焊接缺欠的容限标准如图 1.1 所示。图中用于质量管理的质量标准为 Q_A ，适合于使用目的的质量标准为 Q_B 。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。

焊接缺欠，按其尺寸可分为宏观缺欠和显微缺欠。宏观缺欠是指那些肉眼可以辨认的焊接缺欠，如裂纹、气孔、夹杂和焊缝几何形状偏差等；显微缺欠主要是焊缝金属中的元素偏析、非金属夹杂物和晶间微裂纹等。

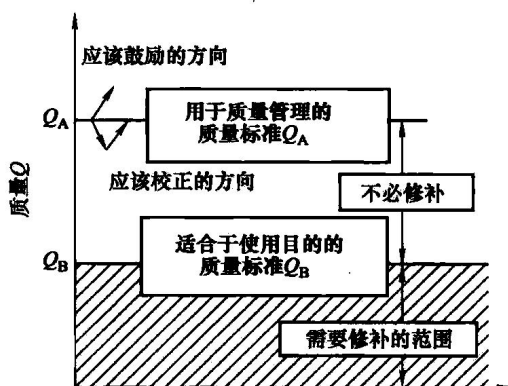


图 1.1 焊接缺欠的容限标准示意图

1.1.2 焊接缺欠与焊接缺陷的关系

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，是可以容许的，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，是不容许的，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件的安全使用。

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。

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。

1.1.3 焊接缺欠对结构的影响和防止对策

1.1.3.1 焊接缺欠的分类

根据其性质、特征,焊接缺欠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 将焊接缺欠分为六大类:裂纹、孔穴、固体夹杂、未熔合及未焊透、形状及尺寸不良、其他缺欠。

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

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之内。

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

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,焊接裂纹又可分为热裂纹、冷裂纹、再热裂纹和层状撕裂等。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	

1.1.3.2 焊接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。

焊接缺欠对工程结构制造与生产的影响因素包括:

① 人员——关键要素;

- ② 母材和焊材——决定要素；
- ③ 焊接设备状况——重要要素；
- ④ 标准/规范的执行状况——施工管理要素；
- ⑤ 环境管理状况——施工管理要求。

焊接缺陷对产品质量的影响不仅给生产带来许多困难，而且可能带来灾难性的事故。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、脆性断裂以及抗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。裂纹一般产生在拉伸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，则结构中的残余拉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连通,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。

焊缝增高量、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。由于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峰值。

含裂纹的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尖锐得多,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、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-脆转变温度,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度之间的关系。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尖锐,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。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、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。这些外部缺陷使浸入的介质局部浓缩,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。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,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,以及时发现缺陷,采取修补措施,避免事故的发生。

1.1.3.3 各种焊接缺欠的防止措施

(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;严禁焊接场所所有穿堂风,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,焊前按要求烘干焊条。

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 选择设备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 按焊接工艺卡要求,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、阀门与管道尺寸接口等方面存在问题。

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给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。

1.2 大型焊接工程结构缺欠和事故案例

全世界结构钢的年消耗量为 3.5 亿~5.5 亿吨，并以每年 5%~8% 的速度增长；我国发展的速度更为迅速，近几年每年钢产量增长超过 15%。随着合金结构钢的使用范围不断扩大，焊接问题也日益突出，引起人们的高度重视。

1.2.1 奥运国家体育场“鸟巢”钢结构焊接缺陷的防止

近年来，随着制造水平的不断提高，诞生了越来越多的世界级大规模焊接结构。2006 年 9 月 17 日，奥运国家体育场“鸟巢”钢结构支撑塔架卸载，标志着世界上最复杂的钢结构建筑工程顺利建成，极大地推动了我国焊接施工技术的发展。表 1.2 是大型建筑钢结构焊接工程的典型示例，表明钢结构焊接已经步入快速发展期，随之而来的是为了保证结构安全而对焊接缺欠的严格控制。

表 1.2 大跨度建筑钢结构工程示例

序号	工程项目	总体尺寸/m	结构特点
1	北京国家体育场“鸟巢”	332×296	2008 年奥运会主会场，地面以上的平面呈椭圆形，建筑屋盖顶面为双向圆弧构成的鞍形曲面，最高点 68.5m，最低点 42.8m；屋盖中部的洞口长度为 190m，宽度为 124m；其放射状混凝土框架结构与环绕它们并形成主屋盖的空间钢结构完全分离。空间钢结构与顶面和立面交织形成体育场整体的“鸟巢”造型，可容纳观众 9.1 万人，用钢 4.19 万吨，钢结构工程采用 Q460E-Z35 厚板，厚度可达 110m，在国内建筑钢结构工程中应用属首例
2	北京国家大剧院	212×143	主体建筑由外部围护结构与内部各大厅和配套用房组成。外部围护结构为钢结构壳体，呈半椭球形，总高度约为 46.3m，地下最深处为 -32.5m，用钢 6950t，总建筑面积约为 16.5 万平方米，是世界上最大的穹顶建筑。椭球形屋面主要采用钛合金板，中部为渐开式玻璃幕墙，网壳面积为 3.5 万平方米，没有立柱，全靠 148 根弧形钢承重，主桁架由厚度 60mm 钢板组焊而成
3	北京国家游泳中心“水立方”	176×176	总体为正方形，建筑外立面由新型多面体空间钢结构和 ETFE 充气膜组成，就像一个晶莹剔透的水晶体。建筑高度约 31m，钢屋盖最大跨度为 130m，可容纳观众 1.7 万人。该工程结构相当复杂，连杆、节点种类和数量繁多，全部采用焊接连接，钢材为 Q345 和 Q420C，总用量约 7200t

1.2.1.1 焊接新工艺示例

奥运国家体育场“鸟巢”全焊钢结构可称世界之最，在建造中采用了很多焊接新工艺、

新技术,取得了很好的应用效果。例如:

(1) 组合焊接工艺

在高强钢厚板焊接中,常规焊接是从打底焊、填充焊到盖面焊全部采用一两种焊接方法完成的,这种方式由于管理简便而大面积使用。然而,不可避免,这种焊接方式有它的局限性。以气体保护焊为例,在厚板打底焊接中,由于坡口小,焊丝伸出过长,气体保护不好而使焊缝金属产生不应有的缺陷造成返工,产生直接经济损失。组合焊接工艺能够解决这一难题,例如,奥运国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程采用组合焊接工艺取得了良好的效果。

① 打底焊 采用焊条电弧焊,主要有两个目的:一是解决气体保护焊焊丝伸出过长影响焊接质量的矛盾,提高打底焊缝成形质量;二是与气体保护焊相比,焊条电弧焊的焊缝稀释率相对较低,这对于提高焊缝金属的综合性能有利。

② 填充焊 采用实心焊丝 CO_2 气体保护焊,主要目的是利用气体保护焊的高效及熔深相对较大的优点,提高焊接质量和效率。

③ 盖面焊 采用药芯焊丝 CO_2 气体保护焊,主要是提高焊缝的表面质量,获得良好的表面效果。

从焊缝成形和内在质量看,打底焊和盖面焊是最重要的。如果厚板焊接中缺陷出在打底焊缝(例如在箱体结构中),那么返工时间是整条焊缝正常焊接时间的3倍以上。奥运国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程中,提出了厚板焊缝一次合格率100%的指标,引起各级管理人员和焊工的高度重视,保证了组合焊接工艺的有效实施,收到了良好的效果。

(2) 多层多道错位焊接工艺

在高强钢焊接中,多层焊的焊缝质量比单层焊好,多层多道焊的焊缝质量比多层焊好,特别是板厚超过25mm时效果最明显。因此,在厚板焊接中,首选多层多道焊技术。

多层焊技术,不是一次成形,而是多层成形,焊条运条手法允许摆动,焊接熔敷金属厚度一般不控制,适合强度较低的厚钢板结构的焊接。

多层多道焊是在多层焊的基础上,焊接手法上不允许摆动,焊接厚度有明确规定,以限制每道焊缝的热输入。一般规定,实心焊丝或药芯焊丝气体保护焊每一焊道厚度不超过5mm(通常是3~5mm);焊条电弧焊用 A_v 值来确定每一焊道的厚度(A_v = 一根焊条所焊焊缝的长度/一根焊条除焊条头外的长度),通常 $A_v \geq 0.6$;在立焊位置允许摆动,但限制摆幅,焊条电弧焊焊缝允许宽度为焊条直径的3倍。实心焊丝和药芯焊丝气体保护焊允许摆动15~20mm。

多层多道错位焊接技术是在多层多道焊技术的基础上,加入焊接接头每一道次错位连接,即:接头不在一个平面内,通常错位50mm以上。这种技术特别适合于高强钢厚板结构的焊接。

多层多道错位焊接技术的显著优点是上一层次焊道对下一层次焊道进行了有效的热处理,如图1.2所示。

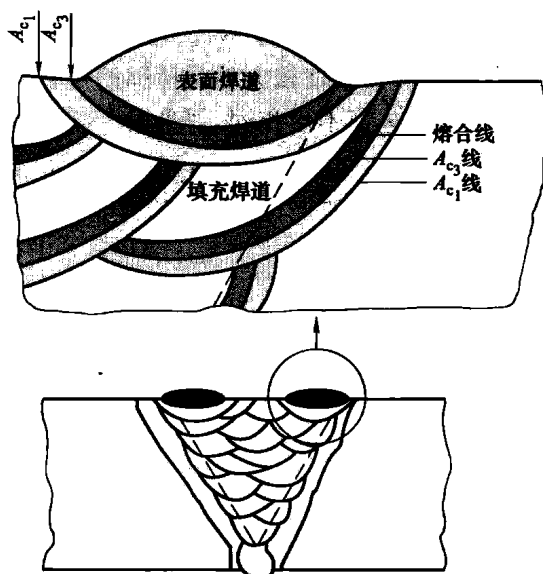


图 1.2 多层多道错位焊接技术

奥运国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程采用了多层多道错位焊接技术，焊接质量好，证明这项技术有很强的实用价值，值得推广应用。

1.2.1.2 焊接缺陷控制和典型焊接工艺

奥运国家主体育场“鸟巢”钢结构较为复杂，精度和焊接质量要求较高。焊接建造中在质量控制环节上形成了科学严密的质量保证体系，确定了防止焊接缺陷产生的具体方法，并采取了相应对策（见表 1.3）。

表 1.3 施工中防止焊接缺陷的对策

工艺情况	夹渣和未熔合	未焊透	咬边	气孔
坡口	焊前仔细清理	钝边过大或根部间隙过小	—	防止污染、清理表面
焊材 (焊条、焊丝)	正确选用焊条(丝)型号和焊条(丝)直径	焊条直径须适应坡口	直径须适当,小直径较好	防潮,烘干,勿过烘干
运条操作	①热输入足够大 ②短弧焊接 ③运条适当 ④防止熔渣赶前 ⑤电弧保持正确位置 ⑥焊接参数适应施焊位置	①保证电流和热输入 ②短弧焊接 ③运条正常 ④防止熔渣赶前 ⑤对准电弧 ⑥焊接电流及速度适应施焊位置	①电流不可过大 ②短弧焊接 ③运条正常 ④控制焊接速度 ⑤电弧保持正确位置 ⑥改变施焊位置	①防止电流过大或热输入过小 ②短弧焊接 ③不可跳焊
多层焊前层焊道	除渣良好 成形正常	—	—	—
焊前预热	有时有效	—	—	有效

国家体育场“鸟巢”工程采用厚板（最大厚度 110mm）、高强钢（Q460E-Z35）、全位置焊接（重点是仰焊）和特殊结构，控制焊接缺陷更为重要。施焊中采用了远红外电加热预热，与氧-乙炔火焰预热相比，这项技术能够使整条焊缝受热均匀，而且温度可控，减少了不均匀的加热和冷却产生的附加应力，特别是在焊接 Q345GJD、Q460E-Z35 钢材时，对防止冷裂纹起到了重要的作用。

(1) 柱脚 Q460E-Z35 钢焊接工艺

“鸟巢”焊接难度较大的是柱脚的拼装焊接，并且立柱柱脚在旋转对称的范围内，每个柱脚的焊接工艺都不尽相同。“鸟巢”施工现场柱脚 Q460E-Z35 钢焊接的主要形式见表 1.4。

表 1.4 柱脚 Q460E-Z35 钢焊接的主要形式

母 材	板厚 /mm	接头 形式	焊接方法	焊接材料	坡口 形式
Q460E-Z35+Q345GJD	100+100	T 形	焊条电弧焊打底、 CO ₂ 焊填充,药芯焊丝 CO ₂ 焊盖面	E5015-G、ER50-G 和 E501T-1	V 形坡口
Q460E-Z35+Q345GJD	100+60	对接			
Q460E-Z35+Q345GJD	100+50	T 形			
Q460E-Z35	100、110	对接	焊条电弧焊打底、 CO ₂ 焊填充,药芯焊丝 CO ₂ 焊盖面	E5015-G、ER50-G 和 E501T-1	
Q460E-Z35+GS20Mn5V	100+130	对接			

1) 焊前准备

Q460E-Z35 钢具有淬硬倾向，焊接前需对热切割面用角向磨光机进行打磨处理，打磨