

焊接疑难问题 分析与对策

HANJIE YINAN WENTI
FENXI YU DUICE 

李亚江 王娟 著



化学工业出版社

焊接疑难问题 分析与对策

HANJIE YINAN WENTI
FENXI YU DUICE 

李亚江 王娟 著



化学工业出版社

· 北京 ·

焊接疑难问题在工程结构制造中是一个重要的方面。本书的特点是针对性强,注重焊接工程实践中解决焊接疑难问题的阐述,给出一些解决焊接疑难问题的应用实例,例如,液化气罐爆裂事故分析与防止对策、大型钢结构裂纹、断裂分析等,能帮助读者了解产生焊接疑难问题的原因、一般规律和防止对策等,特别是给出了很多来自生产实际的焊接疑难问题分析的实例,可以为解决焊接疑难问题和保证焊接产品的质量提供重要的技术资料 and 参考数据。本书主要供从事与焊接技术相关的工程技术人员、管理和质量检验人员使用,也可供高等院校、科研院所、企事业单位的有关教学和监察人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

焊接疑难问题分析与对策/李亚江,王娟著. —北京:
化学工业出版社, 2014. 7
ISBN 978-7-122-20496-7

I. ①焊… II. ①李…②王… III. ①焊接工艺 IV.
①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 081223 号

责任编辑: 张兴辉
责任校对: 宋 玮

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: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 418 千字 2014 年 7 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: 78.00 元

版权所有 违者必究



前 言

在重大工程结构中，焊接技术越来越受到重视，如大型建筑（如“鸟巢”）、高速列车、西气东输管线建设等，但出现的焊接质量问题也很多，特别是一些焊接疑难问题受到人们的关注。例如，化工容器、电力管道、锅炉及压力容器、石油化工管线、船舶制造等，解决一些焊接疑难问题往往关系到整个工程的进度和安全，甚至涉及社会的安全。

解决焊接疑难问题是生产和工程建设中一个很重要的方面，近年来社会发展和工程建设迫切需求阐述简明、深入浅出地解决焊接疑难问题方面的综合性技术书籍。本书突出了新颖性、先进性和实用性的特点，结合现代焊接技术发展，使之更加适于指导实际应用。书中突出了对焊接工程结构建造中疑难问题的解决和分析方法，具有针对性和实用性，特别是结合焊接技术发展现状，给出一些解决焊接疑难问题的应用实例，适用于指导实际焊接生产。本书的出版对解决实际焊接疑难问题和保证焊接结构安全有重要的意义。

本书的特点是注重焊接工程实践中解决焊接疑难问题的阐述，给出一些解决焊接疑难问题的应用实例，例如，液化气球罐爆裂事故分析与防止对策、大型钢结构裂纹、断裂分析等，能帮助读者了解产生焊接疑难问题的原因、一般规律和防止对策等，特别是给出了很多来自生产实际的焊接疑难问题分析的实例，可以为解决焊接疑难问题和保证焊接产品的质量提供重要的技术资料 and 参考数据。

本书主要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，也可供大专院校师生、科研院所、企事业单位的有关教学和科研、监察人员参考。

书中存在的不足和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

李亚江

目 录

第 1 章 绪论	1	3.3 热裂纹和冷裂纹的试验方法	64
1.1 何为焊接疑难问题	1	3.3.1 焊接热裂纹试验方法	65
1.2 焊接疑难问题与焊接缺陷的关系	2	3.3.2 焊接冷裂纹试验方法	72
1.3 焊接疑难问题与焊接应力的关系	3	第 4 章 焊接性分析中的疑难问题	82
1.4 焊接疑难问题对焊接结构质量的影响	4	4.1 关于焊接性评定的几个问题	82
第 2 章 焊接缺欠分析中的问题	6	4.1.1 冶金技术进步对焊接冶金的影响	82
2.1 焊接缺欠、缺陷及焊缝质量要求	6	4.1.2 对焊接性评定的影响	84
2.1.1 焊接缺欠与缺陷	6	4.1.3 关于控轧控冷钢的焊接性	85
2.1.2 关于焊接缺欠的评定	7	4.2 焊接 CCT 图评价焊接性的可靠性	87
2.1.3 焊缝外观缺欠及质量要求	8	4.2.1 焊缝组织图及其应用	87
2.2 焊接缺欠的评级	12	4.2.2 焊接热影响区 CCT 图及其应用	91
2.2.1 熔焊接头的缺欠评级	12	4.2.3 焊接热模拟试验及局限性	93
2.2.2 压焊接头的缺欠评级	13	4.3 一些焊接技术术语的混用问题	98
2.2.3 钎焊接头的缺欠评级	15	4.3.1 焊接接头与焊缝的本质区别	98
2.2.4 超标缺欠的返修	16	4.3.2 焊脚、焊脚尺寸及焊缝厚度、焊缝成形系数	101
2.3 焊缝咬边及未熔合、未焊透	16	4.3.3 焊条型号与牌号的问题	103
2.3.1 焊缝咬边对接头质量的影响	16	4.3.4 “等强匹配”与等强度组别及名义强度的关系	104
2.3.2 咬边的原因及防止对策	18	4.3.5 等离子弧焊与“等离子焊”	104
2.3.3 未熔合及未焊透产生的原因	19	4.3.6 异种材料激光焊以及接头性能	104
2.3.4 未熔合及未焊透的防止对策	22	第 5 章 焊接熔合区及异相界面问题	106
2.4 焊缝中的偏析与夹杂物	23	5.1 焊接熔合区、熔合线和熔合比问题	106
2.4.1 焊缝中的偏析、产生原因及防止对策	23	5.1.1 熔合区结晶形态及液-固界面的成分分布	106
2.4.2 焊缝中夹杂物及分析方法	25	5.1.2 熔合线、熔合区和熔合比、稀释率	110
2.4.3 焊缝中夹杂物的防止对策	29	5.1.3 熔合区凝固过渡层（脆性层和扩散层）	113
2.5 焊缝气孔分析中的问题	30	5.1.4 焊缝合金化、合金过渡及过渡系数	116
2.5.1 气孔的类型、形成及危害	30	5.2 焊接（连接）固-液界面的问题	119
2.5.2 焊缝气孔产生的原因及影响因素	33	5.2.1 钎焊液-固异相界面的冶金行为	119
2.5.3 焊缝中气孔的防止对策	40	5.2.2 熔融钎料对固态母材的润湿问题	120
第 3 章 焊接裂纹分析中的问题	44	5.2.3 液态钎料在连接界面的毛细填缝过程	121
3.1 焊接热裂纹	44	5.2.4 钎料、钎剂与母材的相互作用	122
3.1.1 焊接热裂纹的分类与特征	44		
3.1.2 热裂纹的间接评定	46		
3.1.3 焊接热裂纹的影响因素	47		
3.1.4 焊接热裂纹的防止对策	49		
3.2 焊接冷裂纹	50		
3.2.1 焊接冷裂纹与结构安全	50		
3.2.2 焊接冷裂纹的分类与特点	53		
3.2.3 影响焊接冷裂纹的三大因素	55		
3.2.4 焊接冷裂纹的防止对策	61		

5.3 固相焊接(连接)的界面问题	123
5.3.1 固相连接中的界面行为	123
5.3.2 扩散连接与界面相关的三个阶段	125
5.3.3 扩散连接的工艺参数及中间过渡层	126
5.4 陶瓷与金属焊接(连接)的异相界面分析	130
5.4.1 热胀冷缩、焊接应力及裂纹问题	130
5.4.2 扩散界面反应产物和析出相(或脆性相)	131
5.4.3 扩散界面的结合强度	133
第6章 焊接工艺中的疑难问题	136
6.1 脉冲气体保护焊中的技术问题	136
6.1.1 脉冲钨极氩弧焊(脉冲TIG焊)	136
6.1.2 脉冲熔化极气体保护焊(脉冲MIG/MAG焊)	140
6.1.3 热丝和双电极钨极氩弧焊	147
6.1.4 活性焊剂钨极氩弧焊	149
6.2 窄间隙焊接中的疑难问题	151
6.2.1 窄间隙焊对焊接设备、焊接参数的要求	151
6.2.2 窄间隙熔化极气体保护焊	152
6.3 气体保护焊中的疑难技术问题	155
6.3.1 激光-TIG/MIG复合焊接技术	155
6.3.2 富氩混合气体保护焊与CO ₂ 气保焊在工艺上的差别	163
6.3.3 低碳调质钢的药芯焊丝CO ₂ 气体保护焊	168
6.3.4 低碳调质钢球罐的SMAW和TIG+SMAW焊接	169
6.4 长输管线焊接中的技术问题	170
6.4.1 长输管线对接接头野外施工中的SMAW+FCAW焊接	170
6.4.2 X80管线钢的现场自动焊	173
6.4.3 超低碳22Cr铁素体-奥氏体双相不锈钢天然气集输管道的焊接	174
第7章 焊接应力与变形分析中的问题	177
7.1 焊接应力分析与防止对策	177
7.1.1 载荷条件下接头失效与焊接应力	177
7.1.2 焊接应力集中与缺口效应	178
7.1.3 影响焊接应力集中的因素	180
7.1.4 焊接接头的极限应力及影响	

因素	183
7.1.5 防止焊接应力的对策	185
7.2 焊接变形分析与控制对策	187
7.2.1 焊接变形的特点	187
7.2.2 影响焊接变形的因素	188
7.2.3 防止焊接变形的对策	195
7.3 控制焊接应力与变形的措施示例	198
7.3.1 薄板静态低应力无变形焊接法	198
7.3.2 动态控制低应力无变形焊接法	200
第8章 焊接结构断裂分析中的问题	202
8.1 焊接结构的断裂及强韧性匹配	202
8.1.1 焊接钢结构破坏事故	202
8.1.2 高强钢焊缝的强韧性匹配问题	203
8.1.3 高强钢焊缝韧性的判据	205
8.2 焊接结构的脆性断裂及评定	206
8.2.1 焊接结构的应力集中与断裂特征	206
8.2.2 焊接接头脆性断裂的准则	209
8.2.3 焊接结构抗脆断性能的试验评定	212
8.3 焊接断口分析	213
8.3.1 焊接断口的分类及特征	213
8.3.2 焊接断口的宏观分析	218
8.3.3 焊接断口的微观分析	222
第9章 焊接生产管理中的问题	226
9.1 质量管理中几个基本概念的区别	226
9.1.1 质量管理的定义和控制环节	226
9.1.2 质量体系结构与质量环	228
9.1.3 质量管理与焊接检验的关系	229
9.2 焊接质量保证和工艺评定	230
9.2.1 焊接质量保证及控制标准	230
9.2.2 PQR与WPS的重要作用	234
9.2.3 焊接工艺评定的目的和影响因素	235
9.2.4 焊接工艺评定规则、程序及注意事项	239
9.3 质量体系建立和运行中的问题	249
9.3.1 关于焊接质量控制的问题	249
9.3.2 质量体系的建立和文件编制	250
9.3.3 焊接质量体系的控制要素及运行	253
9.3.4 如何通过质量管理保证焊接质量	257
9.3.5 焊接工艺规程及有效性	259
参考文献	262

第 1 章 绪 论

在重大工程结构中，焊接技术越来越受到重视，特别是一些焊接疑难问题更受到人们的关注。解决焊接疑难问题是焊接结构制造中一个重要的方面。焊接疑难问题与焊接缺欠与缺陷、应力集中和缺口效应、焊接结构断裂、环境因素、焊接质量与安全等密切相关，对焊接疑难问题进行深入分析并提出解决对策，对整体焊接结构质量和使用安全是非常重要的，已日益受到人们的关注。

1.1 何为焊接疑难问题

焊接发展对新型工程结构广泛应用起着至关重要的作用，解决焊接疑难问题是焊接结构制造中一个重要的方面，涉及国民经济和国防建设的各个领域。所谓焊接疑难问题，是指焊接生产、产品制造和工程建设中遇到的焊接难题，或阻碍焊接施工进程的重点问题。这些焊接疑难问题不解决，会影响焊接产品生产的进度，甚至阻碍整个焊接工程或成套装备的进展，日益引起世界各国科学工作者的高度重视。

焊接疑难问题是一个相对的概念。由于厂矿企业之间装备、人员和技术水平的差异，不同的企业对焊接疑难问题或生产中焊接问题的理解有很大的差别。本书涉及的焊接疑难问题针对的是我国众多厂矿企业的焊接生产情况，以解决实际问题为出发点。为保持内容的完整性，也包括对一些易混淆焊接问题的阐述。

传统意义上焊接的概念，是指通过物理或化学方法和适当的手段（加热、加压或两者并用），使两个分离的物体（同种材料或异种材料）产生原子间或分子间的永久结合，形成具有一定性能要求的整体。焊接技术的应用涉及机械、交通（船舶、车辆等）、航空航天、能源、石油化工、电气工程、微电子等几乎所有工业领域。近年来，随着计算机与自动化技术的应用，焊接技术已经发展成为具有一定规模的机械化、自动化和智能化焊接的独立加工领域。

从 19 世纪末出现碳弧焊到 20 世纪末出现微波焊的发展来看，历史上每一种热源的出现，都伴随着新的焊接方法的出现，并推动了科学技术的发展，焊接技术是多学科相互渗透的结果。焊接涉及众多的学科领域，如机械、冶金学、力学、电子学、金属物理、计算机与控制工程等，从广义上说，焊接疑难问题与上述学科有密切的联系。仅从焊接技术领域考虑，焊接疑难问题也会涉及焊接冶金及焊接性、焊接方法与工艺、焊接结构及断裂、应力与变形、焊接设备与自动控制等各个方面。本书所涉及的焊接疑难问题仅仅是众多焊接生产与结构制造中很有限的几个方面。

例如，焊接性以物理化学、材料科学原理为基础，研究材料在焊接条件下有关化学冶金和物理冶金方面的规律，如焊接缺陷（裂纹、气孔、夹杂等）、焊接应力与断裂、焊接结构质量控制等，为制定合理的焊接工艺、探索高质量焊接产品的新途径提供理论依据。特别是从焊接性角度研究材料的基本特性（包括焊接性、焊接工艺、焊接材料等），分析不同材质的焊接性特点和工艺要点。

在大量的工程结构中，金属材料（特别是钢铁材料）目前仍处于主导地位，而且一直在不断地发展和更新，如超高强度钢、双相不锈钢、新型耐热钢等。合金结构钢综合性能优异，经济效益显著，是焊接结构中用量最大的一类工程材料，焊接问题是经常遇到的。钢结

构的焊接应用范围广泛，在今后很长一个历史时期内仍将作为一种主要的工程材料发挥其重要作用。

近年来，在重大工程结构中，焊接技术越来越受到重视，如“鸟巢”、高速列车、西气东输管线建设等，但出现的焊接质量问题也很多，特别是一些焊接疑难问题更受到人们的关注。例如，化工压力容器、炼油管线的焊接等，解决这些焊接疑难问题往往关系到整个工程的进度和安全。本书通过对一些焊接疑难问题的探索与分析，为厂矿企业的焊接工作者提供分析的思路和方法，抛砖引玉，不断推进焊接技术的发展。

解决焊接疑难问题是某些重要焊接结构生产中一个很重要的方面，特别是锅炉及压力容器、电力管道、石油化工、长输管线、船舶制造等，保证装备正常运行涉及社会和企业的的社会安全。焊接结构和装备不断向大型化、重型化和高参数方向发展，对焊接质量提出了越来越严格的要求，并以设计规范、制造法规或规程等形式，对生产企业的焊接质量控制和管理做出科学的强制性规定。解决焊接工艺、焊接质量控制、焊接质保体系等方面的疑难问题对保证焊接结构和工程质量是十分必要的。

1.2 焊接疑难问题与焊接缺陷的关系

焊接缺陷和缺欠直接影响焊接结构的质量和使用安全，一些重大的焊接事故追根溯源大多是由焊接缺陷引起的。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。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，具体焊接产品不符合其使用性能要求的焊接缺欠，称为焊接缺陷。

焊接缺陷是焊接过程中或焊后在接头中产生的不符合质量标准要求的缺欠，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。因为焊接缺陷直接影响焊接工程结构的使用安全，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，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，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（热裂纹、冷裂纹、层状撕裂等）、气孔、夹杂和焊缝几何形状（错边、咬边、焊缝尺寸不足等）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、脆性相和晶间微裂纹等。焊接生产或焊接结构制造中遇到的焊接疑难问题很多与各类焊接缺陷有关，日益引起人们的关注。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，对焊接结构的危害程度各不一样。深入了解焊接缺陷对整体焊接结构质量和使用安全的内在联系是非常重要的。

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（如微裂纹、未焊透等），就可能在局部焊接应力集中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焊接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解决焊接疑难问题中一项很重要的任务。

几何形状造成的不连续性缺陷，如咬边、焊缝成形不良或未焊透、焊穿等不仅降低构件的有效截面积，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组织区重叠时，会引发不稳定的扩展裂纹并导致破坏。未熔合和未焊透比气孔和夹渣更有害。虽

然许多焊接结构已经工作多年,焊缝内部的未熔合和未焊透没有造成严重事故,但是这类缺欠在一定条件下可能成为脆性断裂的引发点。

焊接缺陷对产品质量的影响不仅给焊接生产带来许多困难,而且可能隐藏下灾难性事故的根源。焊接结构中存在焊接缺陷会明显降低工程结构的承载能力。焊接缺陷的存在,减小了焊接接头的有效承载面积,在缺陷周围产生了局部应力集中。非裂纹类缺欠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、扩展和断裂。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。焊接产品的制造过程中应采取措施控制焊接缺陷,在焊接产品的使用过程中应进行定期检验,及时发现缺陷,采取防护措施,避免事故的发生。

1.3 焊接疑难问题与焊接应力的关系

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,它们不仅降低了焊接结构的有效承载截面积,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,所以由缺口效应和应力集中引发的裂纹(特别是延迟裂纹)是焊接结构中最危险的缺陷,更应引起人们的重视。

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如裂纹那样严重。焊缝中的单一夹杂物具有不同的形状,其周围的应力集中一般也不严重。但如果焊缝中存在密集气孔或尖角状夹杂物时,在外加载荷作用下,如果出现气孔间或夹杂物之间的连通,则将导致应力集中区的扩大和应力峰值的急剧上升,诱发裂纹扩展和断裂,在焊接事故分析和解决措施方面也是棘手的难题。

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,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形接头和搭接接头的应力集中程度相差不多。重要焊接结构中的T形接头,如动载条件下工作的H形梁,可采用开坡口的方法使接头处应力集中程度降低;但搭接接头难以做到这一点,侧面搭接焊缝沿整个焊缝长度上的应力分布不均匀,而且焊缝越长,不均匀度越严重。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。

存在微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约15%。对未焊透的焊缝来说,随着未焊透面积的增加,疲劳强度明显下降。这类平面形缺陷引起的应力集中对疲劳强度和抗断裂性能的影响与载荷方向有关,分析难度增大。

焊接缺陷和焊接应力的存在也会导致接头区域出现应力腐蚀疲劳断裂,应力腐蚀开裂通常是从表面开始。如果焊缝表面有缺陷,则微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。这些外部缺陷使侵入的介质局部浓缩,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和破断提供了条件。

应力集中对腐蚀疲劳有很大的影响。焊接接头应力腐蚀裂纹的扩展和腐蚀疲劳破坏,都是从焊趾处开始,然后扩展穿透整个焊缝或熔合区截面导致结构的破坏。因此,改善焊趾

处的应力集中能大大提高焊接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,越易引发结构断裂。这些问题在焊接疑难问题分析中都应给予关注。

1.4 焊接疑难问题对焊接结构质量的影响

随着对焊接结构强度、韧性、耐热性和耐腐蚀性等技术性能要求的提高,人们更加认识到提高焊接接头性能是保证焊接产品质量的关键。所谓“性能”是指材料在焊接条件下的综合表现,除了对焊接接头使用性能的要求外,还包括环境因素、结构力学、焊接应力、整体结构寿命的评价等。

焊接结构是指以焊接作为主要连接手段的工程结构。焊接结构具有强韧性匹配好、接头密封性好等优点,广泛用于建筑、船舶、车辆及压力容器等钢结构制造中。由于焊接温度场的不均匀性,焊接结构不可避免地存在应力、应变和变形问题。焊接力学是研究焊接结构接头区的焊接应力与变形、焊接结构刚度、强韧性和稳定性、断裂等力学行为的理论基础。焊接结构力学已成为焊接结构设计、焊接工艺制定、接头应力消除、结构变形控制的理论基础,为保证焊接结构的安全运行提供科学依据。保证焊接结构质量与解决焊接疑难问题有密切的联系。

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。焊接缺陷所引起的结构强度降低,与其所造成承载截面积的减少成比例。焊缝中出现成串或密集气孔缺陷时,可能伴随着焊缝力学性能的下降,或使承载强度明显地降低。成串气孔比单个气孔危险性大。焊缝中的夹杂物对焊接强度的影响与其形状和尺寸有关,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较危险的。

焊接缺陷和应力集中对疲劳强度的影响比静载强度大得多。例如,焊缝内部的裂纹由于应力集中,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%。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-脆性转变温度,对结构安全影响较小。焊缝内部的球状夹杂物当其面积较小、数量较少时,对疲劳强度影响不大,但当夹杂物形成尖锐形状时,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。带咬边焊接接头在 10^6 次循环条件下的疲劳强度大约仅为致密接头的40%,其影响程度还与载荷方向有关。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焊接结构的疲劳破坏。

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,但对屈服强度影响较小。裂纹被认为是易造成结构断裂的最危险的焊接缺陷。裂纹一般产生在拉伸应力较大的熔合区或热影响区粗晶区,在静载非脆性破坏条件下,如果塑性流变发生于裂纹失稳扩展之前,结构中的残余拉应力可能没有很大的影响,但是一旦裂纹失稳扩展,对焊接结构的影响就很严重了,甚至会导致脆性断裂。

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,因此危害性很大。焊接结构经常会在有缺陷处、结构不连续处或应力集中处引发脆性断裂,造成灾难性的破坏。焊接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、形态有关,还与其所在的位置有关。裂纹位于拉应力峰值区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,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。

带裂纹构件的临界温度比含夹渣构件高得多。除用韧-脆转变温度来评价各种缺陷对脆性断裂的影响外,许多重要焊接结构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,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。但是微裂纹在焊接结构或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。

焊接结构承受冲击或局部发生高应变和恶劣环境影响时,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。因此在焊接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。

第 2 章 焊接缺欠分析中的问题

焊接缺陷直接影响焊接接头的质量，而接头质量又影响到整体焊接结构件的安全运行。焊接缺欠和缺陷分析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、产生原因、防治措施等，阐明焊接缺陷分析中的疑难问题，可以保证整体焊接结构的质量和运行安全。

2.1 焊接缺欠、缺陷及焊缝质量要求

2.1.1 焊接缺欠与缺陷

(1) 焊接缺欠与缺陷的定义

焊接缺欠与缺陷，均表征产品不完整或有缺损。焊接缺欠的存在使焊接接头的质量下降、性能变差。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，该缺陷必须经过修复处理才能使用。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。

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 2.1 所示。图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），生产厂必须按 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。

(2) 焊接缺欠与焊接缺陷的关系

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

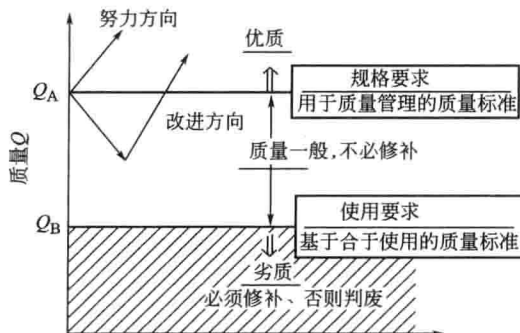


图 2.1 焊接缺欠的容限标准示意图

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。

在图 2.1 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，也就是按“合用性”准则提出的最低合用验收标准。不低于 Q_B 水平，表明尚能满足使用要求，只是质量一般，而且不必进行修复处理就可以投入使用。如果连 Q_B 水平也达不到，那就只能修复处理或报废。

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。也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。

缺欠是否容许，由具体技术标准规定，例如焊缝“余高”，对于静载结构是容许的。但对于动载结构，就应按技术标准来限定。对于超标的缺欠，是否判废，要根据合用性准则来判断，如果不能满足具体产品的具体使用要求，则应判定为“缺陷”，否则便不应看作“缺陷”，而是缺欠。

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。

2.1.2 关于焊接缺欠的评定

焊接缺欠的重要性可以根据“合用性”准则做出评价。“合用性”准则是一个评价焊接产品质量、可靠性和经济性的综合概念。“合用性”并非绝对概念，而是与具体结构的使用条件和使用要求有关。必须联系具体焊接产品的使用要求，按“合用性”准则来判断存在的缺欠是否已是构成危害该产品使用适应性的缺陷。一旦对缺欠存在的部位、特征、尺寸和方位做出判断之后，可以分析是否合于使用要求，如果合用就不应判废，否则自然是判废或修复处理。

对焊接缺欠的定性评定要求评定人员对材料、焊接性有较深刻的综合性理解。当一条焊缝中存在许多同一类型或不同类型的缺欠时，评定它们的相互作用比较困难。

在对焊接缺欠进行评定之前，应先了解焊接接头的失效模式，如过载屈服、脆性断裂、疲劳失效、泄漏、应力腐蚀开裂、蠕变等。焊接接头抗拉强度的降低幅度与承载截面上存在的缺欠成正比。疲劳失效破坏占有失效模式的 70% 以上，其次是脆性断裂，焊接缺欠对这两种失效有显著的影响。在焊接缺欠部位引发的不稳定破坏发生率，主要决定于材质的韧性、拉应力、加载速率以及缺欠处的应力集中程度（缺口效应）。能增大缺口效应的缺欠，对疲劳强度的影响可以通过与不含缺欠的完好的接头的疲劳强度相比较，来做出评价。承受静载荷的构件中，如果有缺欠，由于缺欠附近的材质能发生塑性变形，而减轻缺欠处的应力集中，因此对静载荷的断裂不会产生多少影响。

平面缺欠是引发脆性断裂的主要缺欠，所以要对平面缺欠给予更多的关注。对于一般的屈服、蠕变和腐蚀失效情况，焊接缺欠并不是很有影响。

IIW-V 委员会提出的对焊接平面缺欠和外形缺欠的允许尺寸见表 2.1。这是以无损探伤为依据的合格基准，显然，探伤技术水平将影响对合格与否的判定。

表 2.1 对焊接平面缺欠和外形缺欠的允许尺寸

项目	缺欠形式	允许最大值
平面缺欠	根部熔合不良 侧面熔合不良 层间熔合不良	不允许
	根部未熔透(或熔透不良)	不允许
	裂纹与层状撕裂	不允许
外形缺欠	咬边	稍有不连续的咬边,如果不形成尖锐的缺口,则允许存在,但深度不得超过 0.4mm
	收缩引起的沟槽和根部凹陷	咬边深度不超过 1.2mm
	烧穿或熔透	熔透深度 $d \leq 3\text{mm}$,允许有局部过熔化
	焊缝余高	焊缝金属须与母材光滑过渡,因而规定焊缝形状不致造成无损检验技术的障碍时,一般不要求修整
	焊瘤	不允许
	线状错边	熔透深度 $d \leq \text{板厚 } \delta/10$,最大 2mm

在焊接结构中，特别是在焊接结构件制造期间是不应容许裂纹存在的。但是，在结构使用期间如果发现焊接结构件中存在裂纹，就要用断裂力学进行具体分析，按“合用性”准则来确定该缺欠是否容许及其处理措施。微裂纹的影响与被焊钢材的韧-脆转变温度有密切联系，当材质处于韧-脆转变温度以下时，这类缺欠（包括未熔合、未焊透）会引发脆性断裂；若在被焊钢材的韧-脆转变温度以上，这类缺欠的影响不比气孔缺欠更为有害，可能会稍加有害一点。

ISO 5817 对焊接缺欠容限的规定分为三个管理水平，即容限分为三级：D 级（一般要求）、C 级（中等要求）、B 级（严格要求）。

对有焊接产品设计规程或法定验收规则的产品，焊接缺陷应按这些规定，确定相应的级别。对无产品设计规程或法定验收规则的产品，可根据表 2.2 所列因素来确定焊接缺陷的级别。

表 2.2 确定焊接缺陷级别应考虑的因素

因 素	内 容
载荷性质	静载荷;动载荷;非强度设计
服役环境	温度;湿度;介质;磨损
产品失效后的影响	能引起爆炸或因泄漏而引起严重人身伤亡并造成产品报废;造成产品损伤且由于停机造成重大经济损失;造成产品损伤,但仍可运行
选用材料	相对产品要求有良好的强度及韧性裕度;强度裕度不大但韧性裕度充足;高强度低韧性;焊接材料的相配性
制造条件	焊接工艺方法;企业质量管理制度;构件设计中的焊接可行性;检验条件

实际焊接结构件不可能“完美无缺”，总会“有所欠缺”。按“合于使用”原则来评价含缺欠的焊接产品结构的合用性，已经制定出数种标准，并且经过实践检验是可行的。受到普遍重视的几种“缺欠评定”规范如下。

2.1.3 焊缝外观缺欠及质量要求

焊缝外观缺欠是指不用借助于仪器，从工件表面可以发现的缺陷。常见的外观缺欠有咬边、未熔合、焊瘤、凹陷及焊接变形等，有时还包括表面气孔和裂纹、单面焊根部未焊透等。这些缺陷的存在直接影响焊接结构的安全使用，尤其是在锅炉压力容器和管道运行中带

来的隐患和危害更为突出。

(1) 焊缝外观缺欠

① 未熔合和未焊透 未熔合是焊接时焊道与母材之间或焊道与焊道之间未能完全熔化结合的部分。由于未熔合本身就是一种虚焊,在交变载荷的作用下,应力高度集中,极易开裂,是焊缝最危险的缺陷之一。JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》射线检测标准规定,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级焊缝中不允许存在未熔合。

未焊透是焊接接头根部未完全熔透的现象。未焊透在焊缝中的存在,不但大大降低焊缝的强度,同时容易延伸为裂纹性缺陷,导致构件破坏,尤其是连续性未焊透,更是一种危险的缺陷。由于未焊透的危害大,JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》射线检测标准规定,所有Ⅰ级焊缝以及双面焊和加垫板的单面焊Ⅱ、Ⅲ级焊缝不允许存在未焊透,只是对于管子环向对接接头的单面焊,在所规定的未焊透深度前提下,可以允许存在。

② 形状缺欠 形状缺欠是由于焊接工艺参数选择不当,或操作不合理而产生的焊缝外观缺欠。形状缺欠主要包括咬边、焊瘤、烧穿、下塌、凹坑、弧坑、疏松等。

咬边:是由于焊接参数选择不当或操作工艺不正确引起的沿焊趾的母材部位产生的沟槽或凹陷。在立焊及仰焊位置容易发生咬边,在角焊缝上部边缘也容易产生咬边。

焊瘤:是焊接过程中熔化金属流淌到焊缝之外未熔化的母材上所形成的金属瘤。焊瘤存在于焊缝表面,焊瘤下面往往伴随着未熔合、未焊透等缺陷,由于焊瘤的堆积,使焊缝的几何形状发生变化容易造成应力集中。

烧穿:是焊接过程中熔化金属自坡口背面流出形成的穿孔缺陷。烧穿易发生在第一焊道及薄板对接焊缝或管子对接焊缝中。烧穿的周围常有气孔、夹渣、焊瘤及未焊透等缺陷。单层焊缝根部或在多层焊接接头中穿过前道熔敷金属塌落的过量焊缝金属称为下塌。

错边和角变形、焊缝尺寸形状不符合要求等也是常见的焊缝外观缺欠。

③ 其他表面缺欠 焊接时由于空间位置和操作不便所限制易产生电弧擦伤。电弧擦伤多属于人为不注意产生的,不慎使焊条与施焊部位表面接触引起电弧会造成表面擦伤。焊接时熔滴爆裂后的液体颗粒溅落到工件表面形成的附着颗粒,严重时会导致形成飞溅缺陷。对于不锈钢焊接结构件,飞溅会降低抗晶间腐蚀的能力。为避免飞溅的产生,焊接时须选用质量合格的焊条,并按规定进行烘干处理。采用碱性焊条时应尽量使用短弧,选用适当的焊接电流。对于不允许有飞溅的不锈钢件焊接时,可在焊缝两侧覆盖一层厚涂料。

表面撕裂、磨痕、打磨过量及层间错位等外观缺欠的特点见表2.3。

表 2.3 表面撕裂、磨痕、打磨过量及层间错位等外观缺欠的特点

外观缺欠	特 点
表面撕裂	拆除临时焊接附件时在母材表面上产生的损伤
磨痕	打磨引起的局部表面损伤
凿痕	使用扁铲或其他工具铲凿金属而产生的局部损伤
打磨过量	打磨引起的工件或焊缝不允许的减薄
层间错位	不按规定操作熔敷的焊道

(2) 对焊接接头外观质量要求

焊缝外观缺欠的存在不仅影响焊接件的形状尺寸,降低接头的力学性能,甚至能引起接头漏水、漏气,严重影响构件的正常使用。尤其以未熔合、未焊透、咬边、焊瘤等缺欠对结构件的危害较大。

焊缝弧坑缺陷对焊接接头的强度和应力有不利影响。焊瘤不仅影响焊缝外观,还掩盖了

焊瘤处焊趾的质量状况，会在这个部位出现未熔合缺陷。咬边是一种危险性较大的外观缺陷。它不但减少焊缝的承压面积，而且在咬边根部往往形成尖锐的缺口，造成应力集中，容易形成应力腐蚀裂纹和应力集中裂纹。为保证接头质量，应对接头咬边有严格的限制。

JB/T 7949—1999《钢结构焊缝外形尺寸》对钢结构熔化焊对接和角接接头的外形尺寸做了规定。焊缝外形应均匀，焊道与焊道、焊道与基体金属之间应平滑过渡。I形坡口对接焊缝（包括I形带垫板对接焊缝）如图 2.2(a) 所示，焊缝宽度 $c=b+2a$ ，余高 h 值 0~3mm；V形坡口对接焊缝如图 2.2(b) 所示，焊缝宽度 $c=g+2a$ ，其中 V 形坡口： $g=2\beta(\delta-p)+b$ [见图 2.3(a)]，U 形坡口： $g=2\beta(\delta-R-p)+2R+b$ [见图 2.3(b)]。焊缝最大宽度和最小宽度的差值，在任意 50mm 焊缝长度范围内不得大于 4mm，整个焊缝长度范围内不得大于 5mm。

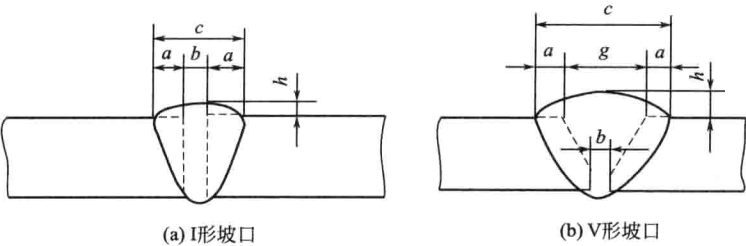


图 2.2 接头的尺寸要求

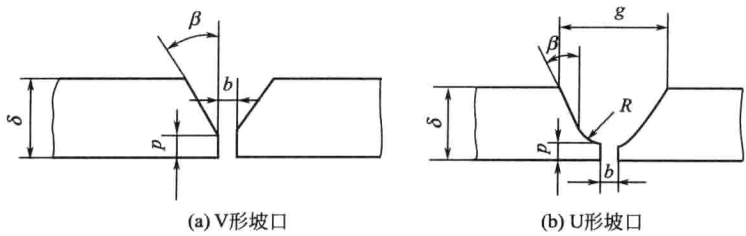


图 2.3 V 形和 U 形坡口接头的尺寸要求

在任意 300mm 连续焊缝长度内，焊缝边缘沿焊缝轴向的直线度 f （如图 2.4 所示），其值应符合表 2.4 的规定。焊缝表面凹凸，在焊缝任意 25mm 长度范围内焊缝余高最大值与最小值之差不得大于 2mm。

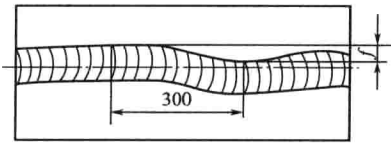


图 2.4 焊缝边缘直线度

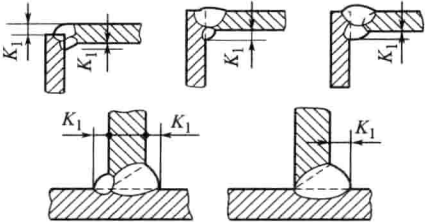
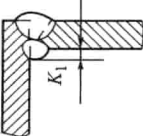
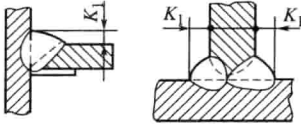
角焊缝的焊脚尺寸由设计或有关技术文件注明，其焊脚尺寸值的偏差应符合表 2.5 的规定。

表 2.4 焊缝边缘直线度

焊接方法	焊缝边缘直线度 f/mm	测量条件
埋弧焊	≤ 4	任意 300mm 长度的连续焊缝
焊条电弧焊及气体保护焊	≤ 3	

表 2.5 CO₂ 气体保护焊角焊缝的焊脚尺寸要求

mm

焊缝形式	K_1	δ	$K_{\min}$
	$0.25\delta < K_1 \leq 10$	5~12 12~25 25~40 40~50	3 4 6 8
	—	3~4.5 4.5~12	2 3
	$0.25\delta < K_1 \leq 10$	—	—

注： δ 为较薄板的厚度。

焊缝外形尺寸经检验超出上述规定时应进行修磨或进行局部补焊。返修后应符合标准中规定，且补焊的焊缝应与原焊缝间保持圆滑过渡。特殊要求的焊缝外形尺寸可参照有关标准和技术条件执行。

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。

焊接结构中存在焊接缺陷会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。