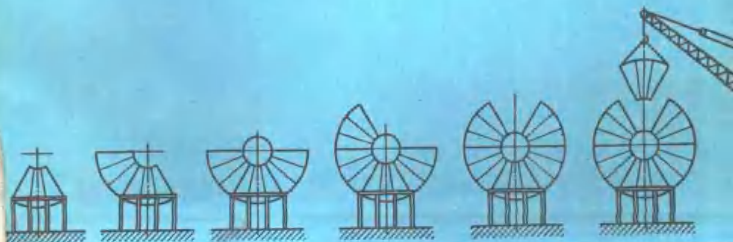


焊接结构工程强度

霍立兴 编著



机械工业出版社

焊接结构工程强度

霍立兴 编著

唐蕊尧 主审

(京)新登字054号

焊接结构广泛地应用于国民经济各部门中,正确处理焊接结构工程强度问题、防止焊接结构失效和失效分析,具有潜在的经济效益和社会效益。本书结合焊接结构设计和工艺特点,重点分析、介绍了焊接结构脆性破坏、延性破坏、疲劳失效和环境影响失效的特点以及影响因素、防止措施和抗断能力的不同评定方法;阐述了基于“合于使用”原则的安全评定的现行有关规范、评定技巧及典型结构的失效分析案例。本书内容选材先进,既有翔实的理论分析又有丰富的经验介绍。论述问题能够与结构断裂及安全评定的有关理论、方法、标准、测试技术紧密结合。全书附有插图400余幅。

本书可供焊接结构设计和研究人员参考,也可做为相关学科研究生及大专院校师生教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

焊接结构工程强度/霍立兴编著. —北京:机械工业出版社, 1995
ISBN 7-111-04354-5

I. 焊… II. 霍… III. 焊接结构-结构强度 IV. TG404

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第06338号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑: 方婉莹 版式设计: 张世琴 责任校对: 刘志文
封面设计: 方 芬 责任印制: 卢子祥
北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行
1995年4月第1版·1995年4月第1次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·23.75印张·580千字
0 001—3 000 册
定价: 28.00元

序 言

目前,焊接结构广泛地应用于国民经济的各有关领域中,可以说焊接结构的应用在一定程度上促进了现代工业的发展。很难设想,如果不是采用焊接结构,生产中可以制造出象高压锅炉、某些化工容器设备这样高参数、厚截面的金属结构。但是,在焊接结构广泛应用的同时,出现过一些事故,有些事故给人们的生命财产造成了巨大损失。开始有些人片面地认定这是焊接技术的固有缺欠,因此将产生事故的原因归罪于焊接结构而不进一步地研究和应用,其结果是一时地制约了焊接技术的发展和焊接结构的应用,这必然要影响和阻碍有关工业的进一步发展,这又促使有关专家、学者重新研究焊接技术和进一步认识焊接结构,以解决这一矛盾。

大量的研究表明,许多事故的发生与人们不了解焊接结构的特性有关。因此设计制造出的焊接结构不适应焊接结构的特性,从而导致结构的过早失效。

应当说,焊接接头和结构可供设计人员选用的方案很多,这本是焊接结构的优越性。即设计人员总可以设计出一种或几种结构形式来满足工况的需要。但是从另一方面说,这也为焊接设计人员带来一定的困难,即如何在众多的设计方案中选用一种最合理的结构形式满足工程需要则远非易事。再加上焊接结构尚是较新的学科,因而使得有关人员依然喜欢套用其他旧有的适用于其他工艺的结构形式来设计制造焊接结构,具体地讲有下述三种情况:

1)过分地依赖于整体应力计算而忽略局部形状的设计,这是不对的。例如大量的实际经验表明,一些承受循环应力的焊接接头,尽管在整体设计中考虑了疲劳强度的计算,但是由于局部设计的不合理而过早地使结构疲劳失效,从而达不到预期的寿命要求。再例如在一些容器标准中,由于考虑补偿焊缝缺陷的作用或接头焊缝热影响区的性能改变,规定了采用焊缝系数,即通过加大焊缝厚度来解决这一矛盾。事实证明,这种作法缺乏理论依据。因为首先焊缝缺陷的作用和热影响区的韧性改变靠增加焊缝厚度是解决不了的,相反增加焊缝厚度使得缺陷的作用往往更加不利,同时由于焊缝厚度增加,势必造成板厚增加,从经济角度考虑也是极其不利的,显然妥善的解决方法是提高焊缝质量,加强检验和应用“合于使用”原则对结构进行安全评定。

2)不考虑焊接结构工作特点,往往把铆接结构的设计方案(如采用搭接接头、加盖板接头——这是铆接工艺要求的接头形式)原封不动地搬到焊接金属结构设计中来,这对于某些类型金属结构尚属合理的话,而对于某些类型的焊接结构,例如承受疲劳载荷的接头、有脆性破坏倾向结构的接头设计以及有应力腐蚀影响的接头设计,由于不顺应其工作特点,显然是不合理的。

3)焊接结构的设计与工艺制造相脱节,良好的设计和工艺相配合是提高焊接质量的可行方法,换句话说,设计中要考虑焊接工艺的实施,反过来工艺施工要考虑设计意图。可以说二者的密切配合是提高焊接结构质量的可靠方法,甚至是唯一的方法。

本书依据焊接学科的研究成果,详细阐述不同载荷条件下焊接结构、接头的工作性能、影响因素、试验和评定方法为焊接结构的选材、设计和制造提供参考见证。在焊接结构的脆

性和延性断裂一章里重点讲清材料韧性、结构中的缺陷和受力状态三个影响结构脆性破坏的主要因素。虽然研究表明,排除三者之一任何因素的影响,可有效地防止结构的脆性破坏,但是单从设计角度下手防止焊接结构脆性破坏的作法是难以实现的,因此合理地选择材料,成为防断设计的主要措施。本章从裂纹产生、扩展和止裂特性出发,结合不同的试验方法,重点介绍了焊接结构防断设计的选材原则。同时本书第五章重点讲清缺陷的作用和国际国内通用的以及最新的安全评定方法,可以说这是目前国际上焊接结构研究重要方向。

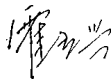
在焊接结构的疲劳强度一章中,在介绍了国内外重要的疲劳强度设计、计算方法的同时,主要着眼点着重于结构的局部设计,即突出了应力集中的作用影响;另外本书在阐述焊接残余应力及其分布对疲劳强度不利影响的同时,反过来也突出指明利用焊接残余应力提高焊接结构疲劳强度的措施,从中使读者辩证地了解焊接残余应力的作用,由于许多焊接结构在一定的环境介质下工作,因此本书第四章简要地介绍了应力腐蚀的研究方法及研究成果。对介质疲劳的最新成果予以介绍之外,还指明了今后的研究方向。

焊接结构失效分析是焊接结构强度设计的另一个侧面,即通过对破坏了的结构进行失效分析可以找出构件失效原因,为改善焊接结构设计提供有价值的参考性资料。在本书的最后一章中介绍了失效分析程序、焊接结构的不同焊接工艺方法的失效起源点,并辅以实例来说明问题。

作者殷切希望本书能对从事焊接结构设计、施工和研究人員有所裨益。

最后应当说明的是西安交通大学唐暮尧教授在百忙中对全书进行了审阅,在技术和文字上都提出了许多有益的意见和建议,作者在此表示衷心感谢。

另外由于作者水平所限,书中难免会有缺点及不足之处,敬请读者批评指正。



于1994.4

目 录

序言

第一章 焊接接头及其特性1

第一节 焊接接头和焊缝的类型1

第二节 焊接接头的冶金和力学性能的非均质性5

一、热影响区5

(一) 晶粒长大及其微观组织5

(二) 热影响区的力学性能6

二、焊缝金属7

(一) 焊缝金属的结晶7

(二) 焊缝金属的成分及力学特性7

三、析出物及“冶金缺口效应”现象10

(一) 析出物、溶解和过度时效10

(二) 冶金缺口效应10

四、焊缝金属强度匹配10

第三节 接头的焊接残余应力与变形12

第四节 接头设计和计算18

一、焊缝布置18

二、接头形状细节19

三、接头处的工作应力分布19

(一) 对接接头的工作应力分布19

(二) 搭接接头的工作应力分布21

(三) 十字形接头的工作应力分布24

四、焊接接头的强度计算25

(一) 特点25

(二) 对接焊缝的计算28

(三) 角焊缝的强度计算28

(四) 不焊透对接焊缝的计算29

第二章 焊接结构的脆性和延性失效32

第一节 断裂分类32

一、断裂性质32

二、断裂机制33

(一) 解理断裂33

(二) 剪切断裂34

三、断口形貌35

第二节 影响金属脆性断裂和延性断

裂的主要因素36

一、温度的影响36

二、应变速率的影响37

三、应力状态的影响38

四、材质的影响40

(一) 厚度影响40

(二) 晶粒度影响41

(三) 化学成分的影响41

第三节 防断设计42

一、脆性断裂过程42

(一) 脆性断裂的能量理论42

(二) 脆性和延性断裂的裂纹产生和扩展45

二、防断设计准则及相关的试验方法46

(一) 焊接结构的设计准则46

(二) 抗开裂性能的测试方法47

(三) 止裂性能的测试方法93

(四) 焊接结构的防断设计实例111

第四节 焊接结构特点及影响结构断

裂失效的因素116

一、应力集中对焊接结构脆性破坏的影

响118

二、应变时效引起的局部脆化对结构断

裂强度的影响120

三、焊接残余应力对断裂强度的影响126

四、焊接接头非均质性的影响129

(一) 力学性能非均质性的影响129

(二) 金相组织非均质性的影响137

五、焊接缺陷对断裂行为的影响139

第五节 防止焊接结构脆性断裂的要

点142

一、选材142

二、设计150

三、工艺153

第三章 焊接接头和结构的疲劳强

度154

第一节 疲劳断裂过程和断口特征	154
第二节 疲劳断裂基本概念	157
一、疲劳强度和疲劳极限及相关特性	157
(一) $S-N$ 曲线	157
(二) 应力循环特性	158
二、焊接结构中疲劳强度的常用表示法	160
第三节 焊接接头的疲劳强度计算	163
一、我国钢结构标准	163
二、欧洲钢结构协会的钢结构疲劳设计规范	167
三、国际焊接学会的循环加载焊接钢结构的设计规范	173
(一) 疲劳强度评定程序	174
(二) 程序中主要内容	174
(三) 累积计算	174
四、前苏联的焊接接头疲劳强度计算方法	175
(一) 前苏联国家建筑委员会颁布的标准 $CH\P\P$	175
(二) 将静载下的许用应力乘以折减系数 η 方法	182
第四节 断裂力学在焊接结构中疲劳裂纹扩展研究中的应用	183
一、裂纹的亚临界扩展	183
二、疲劳裂纹扩展特性 $da/dN-\Delta K$ 曲线的一般关系	185
三、影响疲劳裂纹扩展速率的因素	187
四、疲劳裂纹扩展寿命的估算	189
五、裂纹闭合的影响	190
第五节 低周疲劳	192
第六节 影响焊接结构及接头疲劳强度的因素	195
一、应力集中的影响	195
(一) 由结构元件设计引起的应力集中及其对结构疲劳强度的影响	195
(二) 接头形式引起的应力集中影响	197
(三) 缺陷引起应力集中的影响	200
二、应力状态的影响	214
(一) 焊接残余应力对接头疲劳强度的影响	214

(二) 应力循环特征 r 的影响	219
(三) 双周载荷对焊接接头疲劳寿命的影响	220
(四) 变幅的影响——疲劳损伤的累积方法	223
三、材质的影响	224
(一) 材料强度的影响	224
(二) 焊缝金属和热影响区的影响	225
(三) 焊缝金属强度匹配的影响	228
四、尺寸因素的影响	229
五、板材边缘切割的影响	231
第七节 提高焊接接头和结构疲劳强度的措施	231
一、降低构件中的应力集中系数	231
(一) 采用合理的构件结构形式	231
(二) 合理地选择接头形式	232
二、考虑疲劳强度的其他设计措施及合理性	236
三、提高焊接结构疲劳强度的工艺措施	237
(一) TIG 焊接	237
(二) 预加载法	237
(三) 局部加热及挤压法	239
(四) Guntert's 方法	240
(五) 锤击法	240
四、保护措施——塑料涂层	243
五、补救措施	243

第四章 焊接结构的应力腐蚀和腐蚀疲劳

第一节 应力腐蚀	245
一、概述	245
(一) 拉伸应力的存在	245
(二) 在特定的合金和介质组合条件下产生应力腐蚀开裂	245
(三) 应力腐蚀开裂多呈脆性状态	245
二、分类	246
三、应力腐蚀三要素	247
(一) 应力	247
(二) 材质	248
(三) 介质	252
四、断裂力学在应力腐蚀研究中的应用	252
(一) 悬臂梁试验	254
(二) 楔加载的 WOL 试验	256

(三) 应力腐蚀裂纹长大速率.....	257	(五) KTA 规则.....	306
五、减少和防止焊接元件应力腐蚀的措施.....	259	二、宽板拉伸试验在焊接结构的“合于使用”原则评定中的应用.....	308
(一) 设计因素.....	259	三、局部法.....	316
(二) 工艺措施.....	260	(一) 概念.....	316
(三) 涂层保护.....	260	(二) 处理理解断裂的 Beremin 模型的理论基础.....	316
第二节 腐蚀疲劳.....	260	(三) 方法概述.....	317
一、概述.....	260	四、体积型缺陷的评定.....	319
二、腐蚀疲劳裂纹产生与扩展的特点.....	261	第四节 疲劳断裂评定.....	320
(一) 腐蚀疲劳裂纹产生特性.....	261	一、结构中平面缺陷的疲劳评定.....	320
(二) 腐蚀疲劳裂纹扩展特性.....	262	(一) 断裂力学方法.....	320
三、影响因素.....	263	(二) 简化的评定程序.....	331
(一) 材料成分和组织结构对腐蚀疲劳的影响.....	263	二、结构中体积缺陷的疲劳安全评定.....	339
(二) 腐蚀介质的影响.....	263	三、形状不完整性的评定.....	340
(三) 应力循环特性与频率的影响.....	265	四、咬肉评定.....	340
(四) 阴极保护的影响.....	269	五、疲劳评定的步骤概况.....	341
(五) 应力集中的影响.....	270	(一) 说明.....	341
(六) 尺寸因素的影响.....	270	(二) 步骤.....	341
(七) 含氧量等的影响.....	271	六、中国、日本等国有关标准的疲劳评定要点.....	342
四、提高腐蚀疲劳强度的措施.....	271	(一) CVDA—84 标准.....	342
(一) TIG 焊缝.....	271	(二) 日本 WES-2805K 标准.....	344
(二) 其他措施.....	272	(三) ASME 锅炉及压力容器规范第 XI 篇附录 A.....	345
第五章 基于“合于使用”原则的焊接结构安全评定.....	274	第五节 对环境助长裂纹的评定.....	345
第一节 “合于使用”原则(Fitness for Purpose)及其发展.....	274	一、应力腐蚀开裂的评定.....	346
第二节 “合于使用”评定标准的基本参量.....	275	二、腐蚀疲劳的评定.....	347
一、应力参量.....	275	第六章 焊接结构的失效分析.....	348
二、缺陷.....	276	第一节 焊接结构的失效分类.....	348
(一) 分类.....	276	一、拒收的原因.....	348
(二) 缺陷的处理方法.....	282	二、服役中失效的原因.....	348
三、断裂韧度.....	283	第二节 失效分析的程序、步骤和内容.....	348
第三节 瞬时断裂(弹性、弹塑性和延性断裂)的评定.....	287	一、分析程序.....	348
一、以断裂力学为基础的评定方法.....	287	二、失效分析一般步骤.....	349
(一) COD 设计曲线.....	287	三、内容.....	349
(二) 考虑屈服流动影响的几种断裂力学评定方法.....	290	(一) 原始资料的收集和样品选择.....	349
(三) 以 J 积分参量为主的评定方法.....	303	(二) 失效构件的初步检查.....	351
(四) ASME 锅炉及压力容器规范第		(三) 无损检测.....	351
		(四) 力学性能试验.....	352

(五)选择、保存和清洗断裂表面.....	352	(八)未焊透和未熔合.....	357
(六)断口分析.....	353	(九)夹渣.....	357
(七)金相检查.....	354	(十)随意引弧和火焰挖眼、开孔.....	357
(八)化学分析.....	354	二、电渣焊缝的失效根源.....	357
(九)断裂力学试验和模拟试验.....	354	三、气电焊失效根源.....	358
(十)分析所有的物证、写出结论和报 告.....	354	第四节 事故分析举例.....	358
第三节 焊接结构失效根源的论述...	355	一、脆性破坏事故.....	358
一、电弧焊件的失效根源.....	355	(一)某容器经焊接修理后的脆性破坏...	358
(一)气孔.....	355	(二)电动机转子的失效.....	360
(二)氧化.....	355	二、疲劳破坏事故.....	361
(三)化合物.....	355	(一)桥梁失效示例.....	361
(四)热裂纹.....	355	(二)装载车辆部件的疲劳裂纹.....	364
(五)冷裂纹.....	356	三、应力腐蚀失效举例.....	364
(六)焊缝外形不良.....	356	四、腐蚀疲劳失效事故.....	365
(七)脆性.....	357	参考文献.....	367

第一章 焊接接头及其特性

第一节 焊接接头和焊缝的类型〔1〕〔2〕

在焊接结构中可采用不同形式的焊接接头。应当说明的是，有些接头是焊接工艺所特有的形式，有些则是由铆接或螺栓接头套用到焊接结构中来。一般说来前者可更好地符合焊接结构工作性能的要求。

具体地说，对接接头，T形接头、角接头和搭接接头是焊接接头的基本类型。在不同的结构标准中，对不同接头形式均有具体规定，本节所引用的是其通用形式。

对接接头：不同板厚的对接接头如图1-1所示。薄板对接接头($B \leq 3 \text{ mm}$)可采用卷边接头或采用不开坡口单面焊缝形式($B < 6 \text{ mm}$)，板厚增加，可采用带垫板的不开坡口的单面焊缝接头，但推荐采用不带垫板的双面焊缝对接接头(图1-1d)。为了保证焊透，对接接头可在单面开坡口或双面开坡口后焊接，具体的坡口形状可以是V形、U形、X形和K形等(图1-1e~h)。

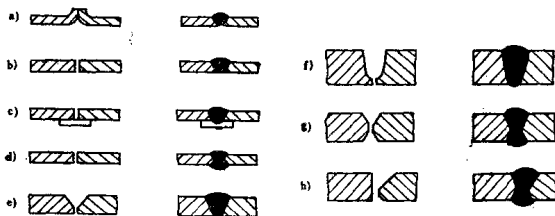


图1-1 对接接头的类型

对于埋弧自动焊工艺，可以采用与手弧焊相同的对接接头形式，但坡口的具体尺寸参数则有一定的变化，如图1-2所示。

应当指出，虽然对于熔化极气体保护焊，对接接头坡口形状及尺寸变化不大；但是对于非熔化极氩弧焊来说，其坡口形状要作较大变动，如图1-3所示，即此时为了有效地获得所要求的焊缝形状，要求坡口有较大的钝边，藉以调整焊缝熔池的尺寸，进而调整焊缝上、下表面的形状。因为此时熔融金属熔池需靠其表面张力来支持，改变焊接规范，也就改变了液态金属熔池的体积，它将对焊缝根部下表面形状产生显著影响。当液态金属熔池较大时，其重量由相应的平衡力来支持，因此可以得到下凹的下表面(图1-3b)。当熔池金属体积减少时，其重量由作用在其上表面处的表面张力来支持，因此下表面将变成平面型(1-3c)。最后，当液态熔池的体积更小时，其重量已不能与其上表面的表面张力相平衡，因此下表面将成为上凹形。

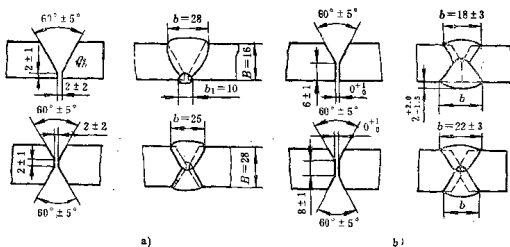


图1-2 对接焊缝坡口类型

a)手弧焊 b)自动焊

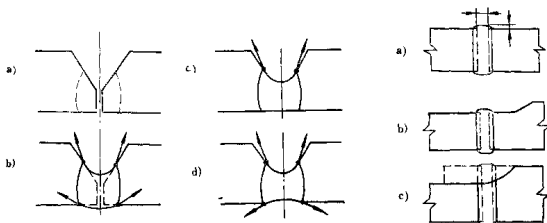


图1-3 非熔化极电弧焊对接焊缝的形式

图1-4 电流焊对接接头

电流焊时的对接接头坡口形状也是与电弧焊时的坡口形式不一样的,图1-4示出相同和不同厚度基本金属时电流焊对接接头及坡口形式。两板间的间隙尺寸与板厚有关,它在18~30mm之间变化。

T形接头:它同样有开坡口和不开坡口等形式,图1-5a示出典型的手弧焊时T形接头坡口形式及焊缝外形。b图示出自动焊时T形接头坡口有关尺寸和焊缝外形。在该类接头中,采用不开坡口角焊缝施焊类型应用的最为广泛,此时可采用等脚尺寸角焊缝,也可采用不同焊脚尺寸的角焊缝。

电流焊时的T形接头如图1-6c、d所示,该接头腹板的最小厚度为20mm,而最大尺寸厚度不限。

角接头:其特性介于对接接头和T形接头之间。同样接头中焊缝可接近于对接焊缝(图1-7a),也可以接近于角焊缝(图1-7c)或为角焊缝(图1-7b)。

图1-8a为手弧焊时角接头坡口制备情况,b图为自动焊时角接头坡口制备情况,图1-6a、

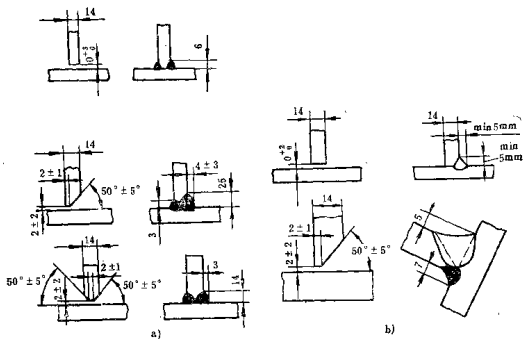


图1-5 典型的T形接头
a)手弧焊情况 b)自动焊情况

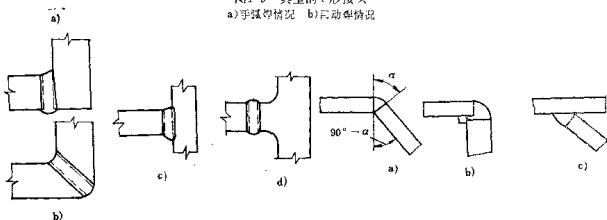


图1-6 电焊时的T形接头及角接头
a)、b)角接头情况 c)、d)T形接头情况

图1-7 角接头的焊缝类型

b) 为电焊焊工艺时的角接头类型。

搭接头：它广泛地用于焊接结构中，可以说它是由铆接头转化而来。搭接头中一般采用角焊缝施焊，它可以是侧面焊缝，端面焊缝或是联合焊缝。塞焊也是焊接搭接头方法。典型的搭接头如图1-9所示。

焊缝：如上所述，焊缝主要分为对接焊缝和角焊缝。

按外表面形状焊缝可以是上凸形、平面形，而角焊缝除上述两种外形而外，还可采用下凹焊缝。应当说明上凸焊缝从表面上看似乎是加强了焊缝，加大了焊缝的截面积，实际上上凸焊缝对接头的工作是不利的。由于传力线的歪扭，在焊缝向基本金属过渡处产生应力集中。在许多情况下，为了提高对接焊缝的工作性能，可以采用图1-10c所示的焊缝外形，它有利于力线的均匀传递，减少了应力集中。对于角焊缝，下凹焊缝（图1-10b）由于其外形形成了焊缝向基本金属的平滑过渡，减少了应力集中，因而对提高焊接接头的工作性能在许多情

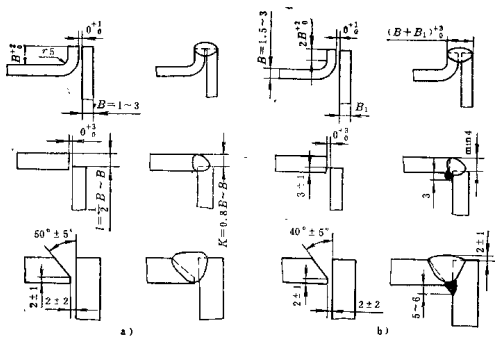


图1-8 角接头坡口的制备

a) 手弧焊情况 b) 自动焊情况

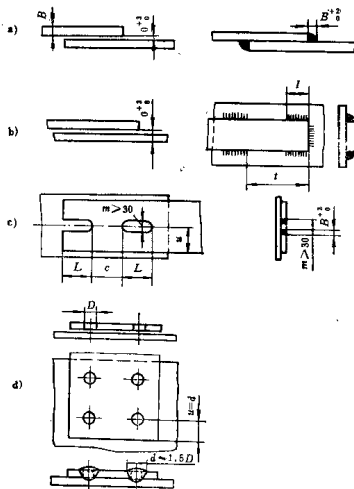


图1-9 典型的搭接接头情况示例

况下是有利的。

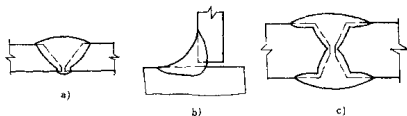


图1-10 焊缝的外表面外形

焊缝按照方向有纵向焊缝和横向焊缝之分。在大多数情况下，横向焊缝，即与载荷垂直的焊缝，其职能是将力从一块板材上传递到另一块板材上去。焊缝破坏将导致接头失效，因此这种焊缝称为工作焊缝。而纵向焊缝，即与载荷平行的焊缝，只起联系作用，接头受力时，它将与板材一起变形。如果熔敷金属的弹性模量与基本金属相差不多，则在弹性变形范围内焊缝和基本金属将产生相同的应力，可以说焊缝中的应力是由于基本金属变形的结果。在许多情况下该焊缝对结构强度不造成影响，因而称作联系焊缝，而勿须计算。典型的工作焊缝与联系焊缝如图1-11所示。

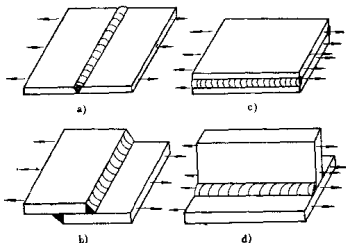


图1-11 工作焊缝(a、b)与联系焊缝(c、d)示例

第二节 焊接接头的冶金和力学性能的非均质性〔1〕〔8〕〔4〕〔5〕

一、热影响区

(一)晶粒长大及其微观组织

晶粒状况与材料相变图上的温度关系如图1-12所示。显然当温度达到奥氏体区上部温度区间时，由于发生晶界迁移和聚合，冷却后将得到粗大晶粒。在热影响区内该区称为粗晶区，其结果是材质的断裂韧度下降。该粗大晶粒区的宽度依赖于焊接方法和焊接规范参数。特别应当指出，在电渣焊方法中，由于采用了高线能量〔(25~75kJ)/mm〕，热影响区的宽度是很大的。它经常大于12mm，并且在焊缝和热影响区中均形成粗大晶粒。为了改善这种状态，焊后需进行正火处理，即将构件均匀加热到 T_1 点（图1-12）以上，并随后在空气中自然冷却，以降低晶粒尺寸（注意正火与应力消除退火处理的区别在于：前者要求炉温为950℃而不是650℃，在这样的高温下结构本身强度不足以支持结构本身的重量）。

焊接时材质加热至奥氏体区间下半部温度时，（图1-12 $T_1 \sim T_2$ 温度区间），冷却后得到细小晶粒，该区称为细晶粒区。需要说明的是 T_2 温度主要受控于晶粒细化元素如铝、铌、

钒和氮。因为它们有助于形成碳化物、氮化物，因而能有效地阻止晶界迁移（钉扎效应）。当然它们的作用与温度有关，随着温度的增高作用下降，这是因为它们也被溶解之故。

在热影响区的剩余部分，即在 $T_1 \sim T_0$ 区间内它对应于不完全相变区。即基本金属的珠光体开始发生相变并开始形成奥氏体。假如焊后的冷却速度很快，且材料的含碳量或冶金元素含量很高，在此区间内可以形成马氏体。

图1-12示出一般情况下热影响区的组成与温度关系，即从不受影响的基本金属（当温度低于 T_0 时）起，通过不完全相变区、细晶粒区到粗晶粒区的情况。

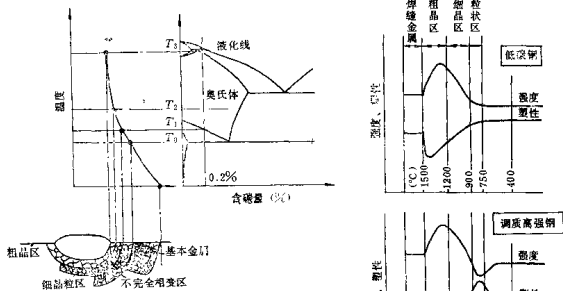


图1-12 低碳钢材焊接热影响区组织

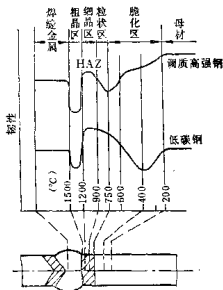


图1-14 钢材焊接区的韧性分布

有使韧性恶化的趋向，而韧性的变化取决于该区在焊接热循环后所产生的组织结构。例如焊接热输入的线能量越大，冷却速度越慢，所产生的铁素体+珠光体的晶粒越粗大，其韧性下

图1-13 钢材焊接区的强度和塑性分布
(二)热影响区的力学性能

低碳结构钢和调质高强度钢焊接接头区域的强度、塑性和韧性分布趋向，如图1-13、1-14所示。其特点是：与基本金属相比，钢材热影响区的强度上升，塑性下降。有关研究表明，性能的改变与焊接冷却速度有关。冷却速度越快，这一趋向越明显。同时也与钢材的含碳量有关，含碳量越高，塑性下降越大。对于高强结构钢，这一点更值得注意。如上述粗晶粒区也

降得越多。对于某些钢材,尤其是非铝镇静的低碳钢,在靠近热影响区,一般称为亚热影响区的部位,虽然焊接后其材质组织晶粒无显著变化,但是韧性下降,该区称为蓝脆区。特别是多层焊时,虽然后道对前道焊缝产生退火作用,细化了晶粒,但是如果前道焊缝中存有某种缺陷,形成了应力集中源,此时后道焊缝的加热循环会在该缺陷尖端形成热状态下的应力应变集中,换句话说在缺陷尖端产生很大的塑性变形过程。致使在焊后的冷却过程中蓝脆区材质的韧性下降十分明显,这种现象称为热应变时效、动应变时效、热应变脆化等。它往往是材料脆性破坏的起源处。

在热影响区的高温侧,即在基本金属和焊缝的边界,即焊接熔合区处,由于是魏氏体的粗大晶粒组织,因而也有韧性恶化的倾向。再加上焊趾处经常存在应力应变集中,往往也是焊接接头破坏的起源点。尤其是高强度钢,在采用高热输入的线能量时,熔合区的韧性会更急剧下降,因此这类钢材在焊接施工时,应严格限制热输入线能量。

二、焊缝金属

(一)焊缝金属的结晶

在焊后的冷却过程中,焊缝从接近基本金属的部位开始逐渐凝固,形成如图1-15所示的结晶状态。单道焊的组织为典型的柱状结晶且其晶粒通常是与等温曲线成法向方向(即最大温度梯度方向)长大。由于凝固是从纯度较高的高熔点物质开始,所以在最后凝固部分及柱状结晶的间隙处便会留下低熔点不纯物质。在多层焊时,对前一道焊缝要重新加热,加热超过 900°C 的部分可以消除柱状结晶并使晶粒细化。因此多层焊接焊缝金属的力学性能通常比单层焊时要好。

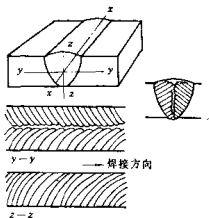


图1-15 单层焊缝金属的凝固

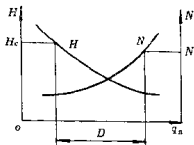


图1-16 焊丝金属的硬度与其晶粒尺寸与线能量的关系

(二)焊缝金属的成分及力学特性

实际焊接接头中的焊缝,其力学性能往往与材质原始规定值有一定差导。这是因为焊缝的力学性能受焊接层数、焊接方法和焊接热输入线能量的影响。例如较低热输入线能量的单道焊缝金属,由于冷却速度快,强度有所上升;增加焊接热输入线能量,提高预热和层间温度,会导致冷却速度降低、晶粒更加粗大,其结果是使焊缝金属特别是高强度焊缝金属强度和韧性下降。所以对于高强度钢出于提高强度和韧性的考虑,有必要限制焊缝的最低冷却速度。但是从另一方面讲,过快的冷却速度,往往又会造成淬硬组织和产生冷裂纹。因此对于高强度焊缝合理的确定焊接冷却速度,对于提高焊缝质量具有突出的重要作用。图1-16示意

性地示出焊缝金属硬度 H 和其晶粒尺寸 N 与热输入线能量的关系。即为了使焊缝金属硬度不超过规定值 HRC 和晶粒尺寸不大于相关标准规定的尺寸 N_c ，所采用焊接规范的热输入线能量应限制在图示的范围 D 内。由图可以看出，这一极限线能量范围 D 越宽，该焊接材料越适用于焊接结构。

在焊接接头设计中，首先是焊条的选择，以保证焊后焊缝金属具有所要求的强度。但是应当注意，由于部分基本金属也要熔融进而对焊接材料进行稀释，其结果是基本金属要对焊缝金属的性能发生一定的影响。因此不应把表征在焊剂或气体保护下焊丝或焊条的熔融金属即熔敷金属与焊缝金属相混淆，后者是熔敷金属与熔融的基本金属混合物。

在焊缝金属中基本金属所占的比例取决于焊缝类型和焊接规范。例如，在基本金属表面上堆焊，焊道中基本金属成分比例非常之大（常规堆焊方法可占50%）。如堆焊两道焊道，则在第二层焊道中基本金属的比例要显著减少，约至25%。以此类推，在第三层焊道中基本金属成分约占12%，第四道焊道约占6%等。

在开坡口的对接焊缝或角焊缝中，基本金属比例成分的变化不如堆焊时显著。在图1-17所示的焊缝中，稀释率可用下式表示，据此可以求出焊缝金属的成分：

$$W = KF + D_A(A - KF) + D_B(B - KF) \quad (1-1)$$

式中 W ——焊缝中某给定元素的最终百分比值；

F ——填充金属中该给定元素的初始百分比值；

K ——通过电弧进入熔池的填充金属比例；

D_A ——基本金属 A 的稀释分量；

D_B ——基本金属 B 的稀释分量；

A ——基本金属 A 中给定元素的初始百分比；

B ——基本金属 B 中给定元素的初始百分比。

在对接接头中，不开坡口单道焊缝的稀释率最高，特别在采用高输入能量的焊接方法时，更是如此。表1-1给出了一些有关数据，可供参考比较。应当指出，多层焊时各层焊道的稀释率是不一样的，最大的稀释率发生在缺口根部处，熔合区处次之，而在焊缝中心靠近表面处可认为稀释率为零。

图1-18示出对接焊缝中基本金属成分比例与焊道次序的关系。可见在坡口角度较大时，它与表面堆焊时的变化规律相似；此时，基本金属所占的份额略高于堆焊情况。而在坡口较窄时，每层的基本金属成分比例均较大。同时可以看出，堆焊焊道上下部分化学成分的不均匀性很大，而对接焊缝中不均匀性的差别较小。这一因素应当考虑，因为它们将对焊缝的工作性能产生影响。

例如，某一低合金钢对接焊缝，如果施焊焊条的熔敷金属的抗拉强度与基本金属相同，施焊时由于基本金属强烈渗合金作用，与基本金属相比焊缝根部处的抗拉强度将急剧增

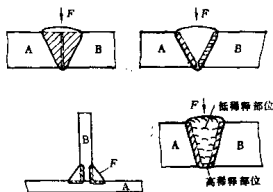


图1-17 几种情况的基本金属稀释

$$\text{稀释率} = \frac{\text{影线部分面积}}{\text{焊缝整体面积}}$$