

普通高等教育材料成型及控制工程  
系列规划教材

# 焊接结构

王文先 王东坡 齐芳娟 主编  
霍立兴 主审



化学工业出版社



普通高等教育材料成型及控制工程  
系列规划教材

# 焊接结构

王文先 王东坡 齐芳娟 主编  
霍立兴 主审



化学工业出版社

·北京·

本书主要在介绍焊接结构的基本知识,焊接变形与应力的产生机理、影响因素和调控措施的基础上,对焊接接头及结构在各种类型载荷作用下的力学行为进行分析和讨论,进一步分析典型焊接结构的力学特征及设计要点,并对焊接结构可靠性分析方法进行了介绍。

全书共分8章,分别为焊接接头静载力学行为,焊接变形和应力,焊接结构断裂性能,焊接结构疲劳性能,焊接结构应力腐蚀破坏,焊接结构高温力学性能,焊接结构力学特征及结构设计,焊接结构可靠性分析。本书理论联系实际,突出焊接结构的基本特点和力学问题,并适当反映国内外的最新研究成果和发展趋势。针对焊接结构在腐蚀环境和高温环境应用增多的情况,增加了焊接结构应力腐蚀破坏、高温力学性能以及焊接结构可靠性分析方法等内容。

本书可作为材料成型及控制工程专业、焊接技术与工程专业及材料热加工专业的本科生或研究生教材,也可供从事焊接专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

焊接结构/王文先,王东坡,齐芳娟主编. —北京:化学工业出版社,2012.6

ISBN 978-7-122-14117-0

I. 焊… II. ①王…②王…③齐… III. 焊接结构  
IV. TG404

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第078698号

---

责任编辑:彭喜英

文字编辑:冯国庆

责任校对:蒋宇

装帧设计:杨北

---

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:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15 $\frac{3}{4}$  字数390千字 2012年8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:29.80元

版权所有 违者必究

普通高等教育材料成型及控制工程系列规划教材  
编审委员会

主任 李春峰  
委员 (按姓氏笔画排序)

王文先	王东坡	王成文	王志华	王惜宝
韦红余	龙文元	卢百平	田文彤	毕大森
刘 峰	刘雪梅	刘翠荣	齐芳娟	池成忠
许春香	杨立军	李 日	李云涛	李志勇
李金富	李春峰	李海鹏	吴志生	沈洪雷
张金山	张学宾	张柯柯	张彦敏	陈茂爱
陈翠欣	林小婷	孟庆森	胡绳荪	秦国梁
高 军	郭俊卿	黄卫东	焦永树	

# 序

材料成型及控制工程专业是1998年国家教育部进行专业调整时，在原铸造专业、焊接专业、锻压专业及热处理专业基础上新设立的一个专业，其目的是为了改变原来老专业口径过窄、适应性不强的状况。新专业强调“厚基础、宽专业”，以拓宽专业面，加强学科基础，培养出适合经济快速发展需要的人才。

但是由于各院校原有的专业基础、专业定位、培养目标不同，也导致在人才培养模式上存在较大差异。例如，一些研究型大学担负着精英教育的责任，以培养科学研究型和科学研究与工程技术复合型人才为主，学生毕业以后大部分攻读研究生，继续深造，因此大多是以通识教育为主。而大多数教学研究型和教学型大学担负着大众化教育的责任，以培养工程技术型、应用复合型人才为主，学生毕业以后大部分走向工作岗位，因此大多数是进行通识与专业并重的教育。而且目前我国社会和工厂企业的专业人才培养体系没有完全建立起来；从人才市场来看，许多工厂企业仍按照行业特征来招聘人才。如果学生在校期间的专业课学得少，而毕业后又不能接受继续教育，就很难承担用人单位的工作。因此许多学校在拓宽了专业面的同时也设置了专业方向。

针对上述情况，教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会于2008年制定了《材料成型及控制工程专业分类指导性培养计划》，共分四个大类。其中第三类为按照材料成型及控制工程专业分专业方向的培养计划，按这种人才培养模式培养学生的学校占被调查学校的大多数。其目标是培养掌握材料成形及控制工程领域的基础理论和专业基础知识，具备解决材料成形及控制工程问题的实践能力和一定的科学研究能力，具有创新精神，能在铸造、焊接、模具或塑性成形领域从事设计、制造、技术开发、科学研究和管理等工作，综合素质高的应用型高级工程技术人才。其突出特色是设置专业方向，强化专业基础，具有较鲜明的行业特色。

由化学工业出版社组织编写和出版的这套“材料成型及控制工程系列规划教材”，针对第三类培养方案，按照焊接、铸造、塑性成形、模具四个方向来组织教材内容和编写方向。教材内容与时俱进，在传统知识的基础上，注重新知识、新理论、新技术、新工艺、新成果的补充。根据教学内容，学时，教学大纲的要求，突出重点、难点、力争在教材中体现工程实践思想。体现建设“立体化”精品教材的宗旨，提倡为主干课程配套电子教案、学习指导、习题解答的指导。

希望本套教材的出版能够为培养理论基础和专业扎实、工程实践能力和创新能力强、综合素质高的材料成形及加工的专业性人才提供重要的教学支持。

教育部高等学校材料成型及控制工程专业教学指导分委员会主任

李春峰

2010年4月

# 前 言

本教材内容作为焊接专业方向主干课程之一，是焊接理论教学课程体系的重要组成部分，是根据教育部材料成型及控制工程专业教学指导委员会的“材料成型及控制工程（焊接专业方向）培养方案”和“焊接技术与工程专业培养方案”，结合各类本科院校材料加工学科的课程设置要求以及“卓越工程师教育培养计划”的培养目标而编写的。

本书的编写力求简洁明了、通俗易懂，理论联系实际，强调焊接结构的基本概念和理论知识，突出焊接结构的基本力学问题，并适当反映国内外的最新研究成果和发展趋势，其中部分内容是编者在近年来科学研究工作中取得的研究成果。

全书共分8章。第1章介绍了焊接接头基本知识和静载力学性能，第2章介绍了焊接变形与焊接应力的产生原因、影响因素和调控措施，第3~6章介绍了焊接接头及结构在各种类型载荷作用下的力学性能，第7章介绍了典型焊接结构的力学特征和设计要点，第8章介绍了焊接结构可靠性分析方法。为便于对各章内容的理解、掌握、复习和巩固，每章正文之前设置本章学习要点，正文之后附有习题与思考题。同时为了便于读者查阅相关文献和拓展学习，书中最后附有参考文献。

第1章由太原科技大学葛亚琼编写，第2章由石家庄铁道大学齐芳娟和太原理工大学王文先编写，第3、5章由天津大学邓彩艳编写，第4章由天津大学王东坡编写，第6章由天津大学徐连勇编写，第7章由太原理工大学王文先编写，第8章由太原理工大学崔泽琴编写，由王文先负责本书的统稿工作。

全书由我国著名焊接结构力学专家、焊接教育专家、天津大学霍立兴教授审阅。霍立兴先生以其严谨的治学态度和博学的专业知识，为本书的编写提出了许多宝贵意见和建议，在此向霍先生表示深深的谢意。在编写过程中参阅了大量的国内外文献资料，在此向援引的参考文献作者表示衷心的感谢。

本书是各位编者在多年的教学经验和科学研究的基础上编写的，部分内容属于科学技术前沿发展和尚待深入探讨的技术问题。由于作者水平有限，书中的疏漏之处在所难免，恳请使用本教材的师生与读者批评指正。

编 者

2012年3月

# 目 录

<b>第 1 章 焊接接头静载力学行为</b> .....	1	2.2.5 波浪变形	56
1.1 焊接接头的基本概念 .....	1	2.2.6 错边变形	57
1.1.1 焊接接头的组成 .....	1	2.2.7 扭曲变形	58
1.1.2 焊接接头的特点 .....	2	2.3 焊接残余应力	59
1.1.3 焊缝及焊接接头的基本形式 .....	3	2.3.1 焊接残余应力的分布	59
1.1.4 焊缝及接头形式的表示方法 .....	6	2.3.2 焊接残余应力对焊接结构性能的影响	66
1.2 焊接接头的均匀性及其力学行为 .....	8	2.4 焊接变形与残余应力的调控措施	71
1.2.1 焊接接头宏观力学性能的一般特征 .....	9	2.4.1 焊前预防措施	71
1.2.2 焊缝金属的力学性能 .....	9	2.4.2 焊中控制措施	73
1.2.3 热影响区金属的力学性能 .....	10	2.4.3 焊后调节措施	77
1.2.4 焊接接头的力学性能 .....	11	2.5 焊接残余应力的测量方法	80
1.3 焊接接头的工作应力分布和工作性能 .....	14	2.5.1 测量方法的分类	80
1.3.1 焊缝性质和应力集中概念 .....	14	2.5.2 常用测量方法	81
1.3.2 熔化焊接头的工作应力分布 .....	15	2.6 焊接变形与应力数值模拟计算	82
1.3.3 电阻焊接头的工作应力分布 .....	20	2.6.1 数值模拟计算的作用和意义	82
1.3.4 应力集中对工作性能的影响 .....	22	2.6.2 数值模拟案例分析	83
1.4 焊接接头静载强度计算 .....	22	习题与思考题	86
1.4.1 静载强度计算的方法和假设条件 .....	22	<b>第 3 章 焊接结构断裂性能</b> .....	88
1.4.2 熔化焊接头的静载强度计算 .....	24	3.1 脆性断裂的特征	88
1.4.3 电阻焊接头的静载强度计算 .....	32	3.2 金属材料的断裂及其影响因素	89
习题与思考题	33	3.2.1 金属材料断裂的机制和形态	89
<b>第 2 章 焊接变形和应力</b> .....	37	3.2.2 影响金属脆断的主要因素	91
2.1 焊接变形与应力的产生机理 .....	37	3.3 焊接结构的脆性断裂	93
2.1.1 自由变形、外观变形和内部变形 .....	38	3.3.1 焊接结构的特点对脆断的影响	93
2.1.2 焊接内应力的种类和产生 .....	39	3.3.2 焊接制造工艺对脆断的影响	94
2.1.3 不均匀温度场作用下的变形和应力 .....	40	3.4 焊接结构抗开裂性能与止裂性能	97
2.1.4 焊接引起的变形和应力 .....	43	3.4.1 焊接结构设计准则	97
2.1.5 焊接热应变循环 .....	46	3.4.2 焊接接头抗开裂性能试验	98
2.2 焊接残余变形 .....	47	3.4.3 焊接接头止裂性能试验	103
2.2.1 纵向收缩变形 .....	47	3.5 预防焊接结构脆性断裂的措施	106
2.2.2 横向收缩变形 .....	49	3.5.1 正确选用材料	106
2.2.3 弯曲变形 .....	52	3.5.2 合理设计焊接结构	109
2.2.4 角变形 .....	55	3.6 用断裂力学方法评定结构安全性	111
		3.6.1 “合于使用”的原则	111
		3.6.2 面型缺陷的评定	113
		3.6.3 体型型缺陷的评定	116
		习题与思考题	118

<b>第 4 章 焊接结构疲劳性能</b> .....	119	5.1.2 应力腐蚀发生的条件	160
4.1 焊接结构疲劳问题的研究背景	119	5.1.3 焊接结构的应力腐蚀	161
4.1.1 焊接结构疲劳失效的原因	119	5.2 应力腐蚀开裂机制及其断口特征	162
4.1.2 焊接结构疲劳断裂事例	120	5.2.1 应力腐蚀开裂的过程	162
4.2 金属材料疲劳表征和疲劳类型	122	5.2.2 应力腐蚀开裂的机制	162
4.2.1 疲劳载荷及其表示方法	122	5.2.3 应力腐蚀开裂的断口特征	164
4.2.2 基础疲劳试验及疲劳曲线	122	5.3 断裂力学在应力腐蚀中的应用	164
4.2.3 疲劳强度的常用表示法	123	5.3.1 断裂力学在应力腐蚀中的适 用性	164
4.2.4 疲劳强度的影响因素	124	5.3.2 断裂力学在应力腐蚀中的评定 指标	165
4.2.5 金属材料的疲劳分类	126	5.3.3 $K_{ISCC}$ 和 $da/dt$ 在结构设计中的 应用	170
4.2.6 应变疲劳简介	127	5.4 焊接结构应力腐蚀的预防措施	170
4.3 金属材料疲劳断裂过程和断口 特征	128	5.4.1 正确选择材料	171
4.3.1 金属材料疲劳断裂的过程	128	5.4.2 合理设计结构	171
4.3.2 疲劳断口的特征	129	5.4.3 调控焊接残余应力	172
4.4 断裂力学在疲劳裂纹扩展研究中的 应用	131	5.4.4 构件表面防护措施	172
4.4.1 裂纹和亚临界扩展	131	5.5 焊接结构应力腐蚀的安全评定	172
4.4.2 疲劳裂纹扩展速率 $da/dN-\Delta K$ 曲线	133	5.5.1 采用 $K$ 准则的缺陷评定方法	172
4.4.3 疲劳裂纹扩展寿命的估算	133	5.5.2 应力腐蚀裂纹扩展速率评定 方法	173
4.5 影响焊接接头疲劳强度的因素	134	习题与思考题	173
4.5.1 应力集中的影响	134	<b>第 6 章 焊接结构高温力学性能</b> .....	174
4.5.2 近缝区金属性能变化的影响	135	6.1 材料高温力学性能	174
4.5.3 焊接残余应力的影响	135	6.1.1 力学性能的变化	174
4.5.4 焊接缺陷的影响	136	6.1.2 蠕变及蠕变机理	175
4.5.5 外载应力循环比的影响	136	6.1.3 蠕变性能指标	177
4.5.6 构件尺寸的影响	138	6.1.4 蠕变寿命预测方法	178
4.5.7 服役温度的影响	138	6.2 蠕变损伤和蠕变裂纹扩展	178
4.6 提高焊接结构疲劳强度的措施	139	6.2.1 蠕变损伤	178
4.6.1 提高焊接接头疲劳强度的途径 分析	139	6.2.2 蠕变断裂	179
4.6.2 提高疲劳强度的工艺措施	140	6.3 焊接接头的蠕变性能	180
4.6.3 提高疲劳强度几种工艺方法的 定量分析与比较	146	6.3.1 焊接接头蠕变特性	180
4.7 焊接接头疲劳设计与评价方法	147	6.3.2 焊接接头蠕变断裂类型	181
4.7.1 焊接结构疲劳强度设计概述	147	6.3.3 显微组织对高温蠕变的影响	182
4.7.2 焊接接头疲劳数据的统计方法	147	6.3.4 焊接残余应力对高温失效的 影响	183
4.7.3 焊接结构疲劳强度设计与评价 方法	148	6.4 焊接接头高温性能的研究与试验 方法	183
习题与思考题	159	6.4.1 焊接接头高温性能的研究方法	183
<b>第 5 章 焊接结构应力腐蚀破坏</b> .....	160	6.4.2 焊接接头高温性能的试验方法	184
5.1 应力腐蚀及其发生条件	160	6.4.3 焊接结构高温完整性评定方法	186
5.1.1 应力腐蚀破坏	160	习题与思考题	188



## 第7章 焊接结构力学特征及结构

设计	189
7.1 焊接结构的特点及分类	189
7.1.1 焊接结构的特点	189
7.1.2 焊接结构的分类	190
7.1.3 焊接结构涉及的力学性能	191
7.2 焊接结构力学特征	191
7.2.1 桁架结构及其力学特征	191
7.2.2 板壳结构及其力学特征	195
7.2.3 实体结构及其力学特征	196
7.3 焊接结构设计	197
7.3.1 焊接结构的设计方法	197
7.3.2 焊接结构设计的合理性分析	199
7.3.3 焊接结构设计中应注意的问题	205
7.4 焊接结构实例分析	205
7.4.1 压力容器	205
7.4.2 桥式起重机主梁	210
7.4.3 焊接机床机身	213
7.4.4 焊接旋转体	216
7.4.5 薄板结构	218
习题与思考题	222
第8章 焊接结构可靠性分析	223
8.1 结构可靠性分析的概念	223

8.1.1 结构设计中的不确定性	223
8.1.2 结构使用中的风险性	224
8.1.3 工程结构的可靠性	225
8.1.4 可靠性、安全性与完整性的 关系	226
8.2 焊接结构的焊接性分析	227
8.2.1 构件焊接性	227
8.2.2 影响构件焊接性的因素	227
8.2.3 热-力-组织的交互关系	228
8.3 焊接结构的完整性评定	230
8.3.1 焊接结构完整性概念	230
8.3.2 含缺陷焊接结构评定原理和 程序	231
8.3.3 焊接结构“合于使用”评定 方法	233
8.4 焊接结构失效分析	234
8.4.1 失效分析的思路	234
8.4.2 失效分析的步骤和内容	235
8.4.3 焊接结构失效原因分析	237
8.4.4 焊接结构失效案例分析	238
习题与思考题	242
参考文献	243

# 第 1 章 焊接接头静载力学行为

## 本章学习要点

知识要点	掌握程度	相关内容
焊接接头基本概念	熟悉焊接接头的组成、特点,掌握焊缝形式和焊接接头形式,了解焊缝和焊接接头的表达方法	焊接接头的作用、组成、特点;对接焊缝、角焊缝;对接接头、搭接接头、T形接头、角接接头;焊缝符号
焊接接头不均匀性	了解焊接接头的不均匀性,熟悉焊接接头的力学行为	焊缝金属、热影响区和焊接接头的力学性能;低强组配焊接接头的力学行为
工作应力分布和工作性能	掌握和熟练绘制四种熔化焊焊接接头的工作应力分布,了解应力集中对工作性能的影响规律	应力集中;工作焊缝、联系焊缝;工作应力分布;应力集中与工作性能的关系
静载强度计算方法	掌握各种焊接接头静载强度的计算方法,焊缝许用应力的确定方法,能够灵活应用这些方法计算和校核实际焊接接头的静载强度	静载强度计算的作用、假设条件;许用应力;熔化焊、电阻焊接头静载强度计算方法和公式

在材料需要连接的部位,用焊接方法加工制造而成的接合部位称为焊接接头。在焊接结构中,焊接接头通常起两方面的作用:一是连接作用,即把被焊材料连接成一个整体,形成一个构件;二是传力作用,即传递被焊材料所承受的载荷,使构件能够应用。焊接接头是焊接结构中最薄弱的环节,一旦失效,就会使相互紧密联系成一体的构件局部分离、扩展和断裂,造成焊接结构的损坏。

## 1.1 焊接接头的基本概念

### 1.1.1 焊接接头的组成

一般所指的焊接接头区域包括焊缝金属、熔合区、热影响区和部分母材,熔化焊焊接接头的组成如图 1-1 所示。

焊缝金属是由焊接填充材料和局部母材共同熔化并凝固后而形成的铸造组织区域,焊缝金属的性能取决于这两部分材料熔化后的成分和组织。熔合区是焊缝金属边界上固、液两相交错共存并随后凝固的部分,是焊缝金属与热影响区相互过渡的区域。熔合区很窄,因此宏观上又称为熔合线,但它却是焊接接头中最薄弱的地带,经常出现由于该处的某些缺陷而引起焊接结构破坏的现象。热影响区是紧邻焊缝金属的母材受热作用影响而发生显微组织和力学性能变化的区域,其宽度与焊接方法及热输入量大小有关。热影响区组织和性能的变化又与母材的化学成分、焊前热处理状态及焊接热循环等因素有关。部分母材区主要是指受焊接

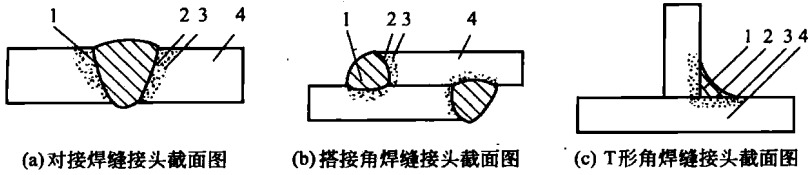


图 1-1 熔化焊接接头的组成

1—焊缝金属；2—熔合区；3—热影响区；4—部分母材

热循环和热塑性变形作用而具有较大残余应力的区域。有时将焊接热影响区和部分母材区统称为近缝区。

### 1.1.2 焊接接头的特点

与其他连接方法相比，焊接结构具有许多优势，但焊接接头却是焊接结构中最复杂的区域，既有许多优点，也存在较多的突出问题。

#### (1) 焊接接头的优点

① 承载的多向性 特别是焊透的熔化焊对接接头，能很好地承受各个方向的载荷。

② 结构的多样性 能很好地适应不同几何形状、结构尺寸、材料类型的连接要求，材料的利用率高，焊接接头所占空间小。

③ 连接的可靠性 现代焊接和检验技术可以保证获得高品质、高可靠性的焊接接头，是各种金属结构（特别是大型结构）理想的、甚至不可替代的连接方法。

④ 加工的经济性 施工难度较低，可实现自动化，检查维护简单，制造成本相对较低，成品率高。

#### (2) 焊接接头存在的问题

① 几何不连续性 由于焊缝余高的存在，焊接接头位于几何形状和尺寸发生变化的部位，同时焊接接头中可能存在着各种焊接缺陷，这就使焊接接头成为一个几何不连续体。工作时它传递着复杂的应力，引起应力集中，导致裂纹源的萌生。

② 性能不均匀性 焊接接头在成分、组织、性能上都是一个不均匀体。影响焊接接头性能的因素较多，如图 1-2 所示。这些影响因素可以归纳为两个方面：一个是材质方面的影

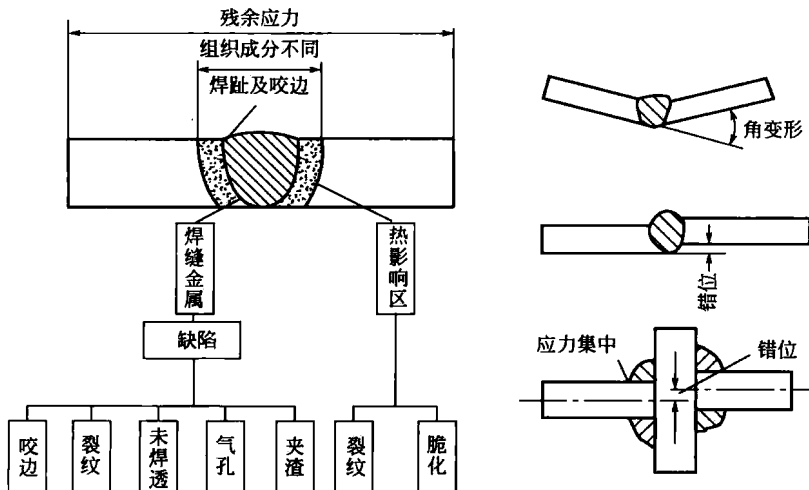


图 1-2 影响焊接接头性能的主要因素

响因素；另一个是力学方面的影响因素。

材质方面的影响因素主要有：焊接材料引起的焊缝金属化学成分的变化，焊接热循环引起的热影响区的组织变化，焊接过程中的热塑性变形循环所产生的材质变化，焊后热处理引起的组织变化以及矫正变形引起的加工硬化等，都会影响焊接接头的性能。

力学方面的影响因素主要有：焊接缺陷和外部形状的不连续性等。焊接缺陷包括裂纹、未熔合、未焊透、夹渣、气孔和咬边等，常常是接头的裂纹源；外部形状的不连续性包括焊缝的余高和错边等。

③ 焊接变形和残余应力 在焊接过程中，不均匀温度场会产生较大的焊接变形和较大的残余应力，使接头区域过早地达到屈服极限，同时也会影响结构的刚度、尺寸稳定性及结构的其他使用性能。

### 1.1.3 焊缝及焊接接头的基本形式

#### 1.1.3.1 焊缝的基本形式

焊缝的基本形式有对接焊缝和角焊缝两种。

(1) 对接焊缝 对接焊缝是焊接结构中使用最为广泛的一种焊缝形式，如图 1-3 所示，焊缝宽度、余高、熔深和焊趾过渡半径是对接焊缝主要的几何形状参数。

为保证焊缝焊透，常将焊件的待焊部位加工成具有一定几何形状的沟槽，称为坡口。其尺寸及符号的表示如图 1-4 所示，坡口角度  $\alpha$ 、根部间隙  $b$ 、钝边  $p$  称为“坡口三要素”。按照焊件的厚度、焊接方法、焊接工艺过程等，焊接坡口可分为多种形式，如图 1-5 所示。

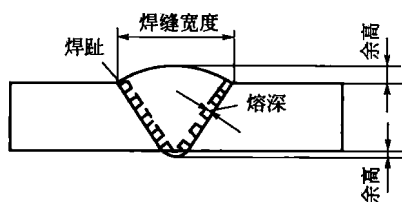


图 1-3 对接焊缝示意图

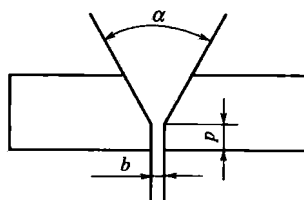


图 1-4 坡口的三要素

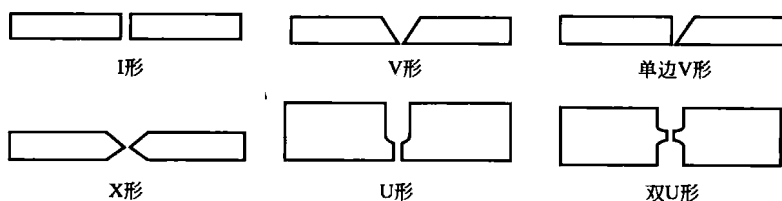


图 1-5 坡口的基本形式

各种坡口尺寸可根据国家标准 GB/T 985.1—2008《气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口》或具体情况而确定。坡口的选择一般要考虑以下几个方面。

① 焊接材料的消耗 例如焊接同样厚度的板材，从消耗焊接材料的角度考虑，双 U 形 < 单边 V 形 < X 形 < V 形。

② 可焊到性 焊接坡口形式常要根据构件是否翻转，翻转难易，或内外侧的焊接条件而定，一般尽可能采用双面坡口。但对于不能翻转的平板和内径较小的容器，为了避免大量

的仰焊或不便从内侧施焊，易采用单面施焊的 V 形或 U 形坡口。

③ 坡口加工成本 V 形和 X 形坡口面为平面，可用气割或等离子弧切割加工，也可用机械切削加工，成本较低。而 U 形和双 U 形坡口面为曲面，一般要用刨边机加工，成本较高。

④ 焊接变形的调控 为了减小焊接变形，尽可能采用双面坡口，不合适的坡口形式很容易产生较大的焊接变形。

综上所述，这些坡口形式中，V 形坡口加工方便，但焊件焊后焊接变形较大，焊接材料消耗较多；X 形坡口焊缝对称，焊接变形小，焊接材料消耗少，是较好的坡口形式，但需两面焊接；U 形与 V 形坡口相似，焊接材料消耗比后者小，但坡口加工较困难，成本较高；双 U 形坡口焊接材料消耗最少，焊接变形也最小，但由于 U 形坡口的加工比 V 形、X 形坡口复杂得多，一般仅用于较重要、壁厚较大的构件。因此在选择坡口形式时，需要根据具体情况综合考虑。

(2) 角焊缝 按照截面形状，角焊缝可分为平角焊缝、凹角焊缝、凸角焊缝和不等腰角焊缝四种类型，如图 1-6 所示。应用最多的是截面为等腰直角形的平角焊缝，一般用腰长  $K$  表示角焊缝的大小，称  $K$  为焊脚尺寸； $a$  为角焊缝截面上的最小尺寸，称为计算厚度。焊脚尺寸和计算厚度是角焊缝的几何形状参数。

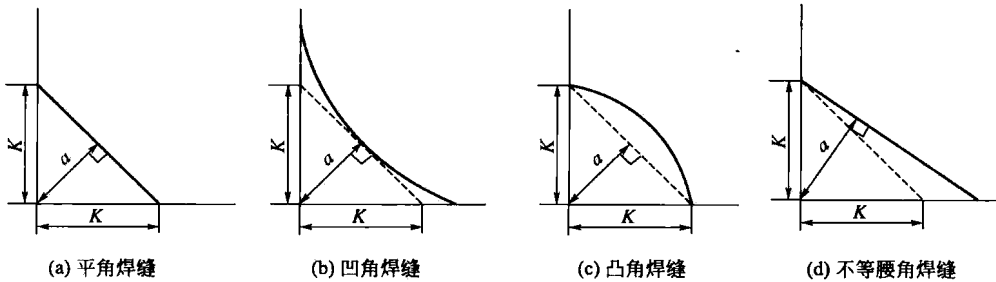


图 1-6 角焊缝类型及其截面形状

1.1.3.2 焊接接头的基本形式

常用焊接接头的基本形式有对接接头、搭接接头、T 形接头和角接头四种。

(1) 对接接头 由两板件相对端面焊接而成的接头称为对接接头，对接接头中的焊缝是对接焊缝。对接接头是最常用的焊接接头形式，从力学角度看也是比较理想的焊接接头形式。在焊接结构中，常见的对接接头是焊缝长度方向与载荷方向垂直 [图 1-7 (a)]，也有与载荷方向成一定角度的斜缝对接接头 [图 1-7 (b)]。斜缝对接接头的焊缝承受较低的正应力，安全性较高，但由于浪费材料和工时，除螺旋焊管焊缝外，一般已不再采用。

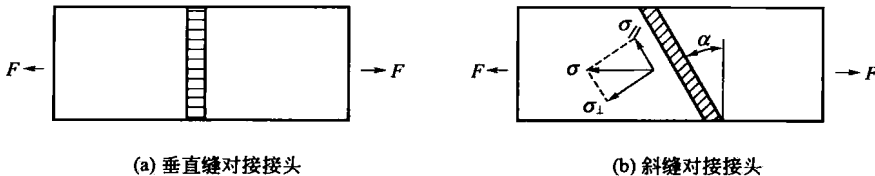


图 1-7 对接接头形式

(2) 搭接接头 两块板件重叠，在重叠部分板的顶端、侧边或中部用角焊缝连接的焊接接头

称为搭接接头。根据结构形式和强度的要求不同，一般有如图 1-8 所示的几种搭接接头形式。

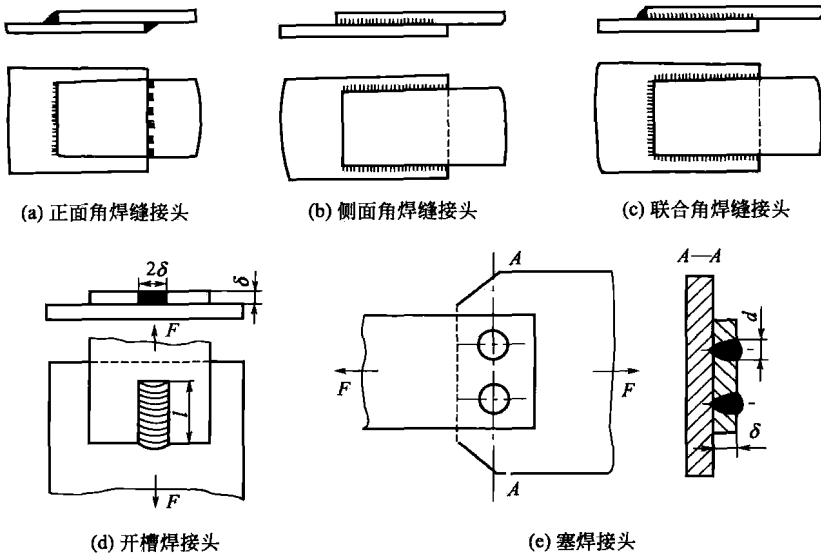


图 1-8 搭接接头形式

搭接接头的优点是焊前准备工作量较少，装配较容易，且横向收缩量也比对接接头小，故在焊接结构中仍得到广泛应用。缺点是母材和焊材消耗量较大，动载强度较低。为了提高搭接接头的性能，尽可能采用正反面都焊接的方法。

(3) T 形（十字）接头 将相互垂直的两块板件用角焊缝连接起来的接头，称为 T 形（十字）接头，如图 1-9 所示。为了加工方便，一般 T 形（十字）接头不开坡口，但为了提高接头性能、降低焊材消耗和减小焊接变形，可以开 K 形、单边 V 形、单 J 形和双 J 形坡口。T 形（十字）接头应避免采用不开坡口的单面焊，因为其根部相当于有较深的未焊透，会产生严重的应力集中，容易产生裂纹，引起结构破坏，如图 1-10 所示。

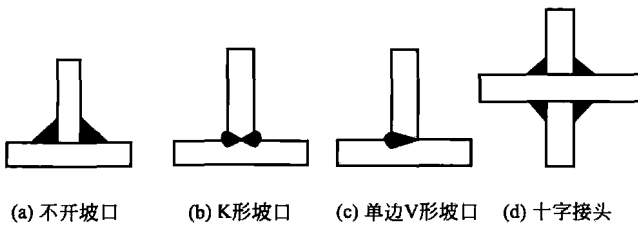


图 1-9 常见的 T 形（十字）接头

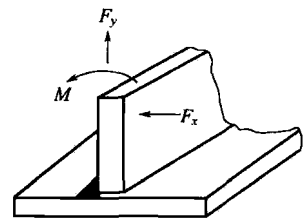


图 1-10 T 形接头不开坡口单面焊

(4) 角接接头 两板件端面构成直角的焊接接头称为角接接头，多用于箱形结构。常用的角接接头形式如图 1-11 所示。图 1-11 (a) 是最简单的角接接头，但其承载能力差；图 1-11 (b) 是采用两面焊缝从内部加强的角接接头，承载能力较大；图 1-11 (c) 和 (d) 开坡口易焊透，强度较高，但对于图 1-11 (d) 的接头形式应注意层状撕裂问题；图 1-11 (e) 和 (f) 易装配，省工时，是较经济的角接接头；图 1-11 (g) 是可以保证具有直角的角接接头，并且刚性大，但角钢厚度应大于板厚；图 1-11 (h) 是不合理的角接接头，焊缝多而且不易施焊，结构的总重量也较大。

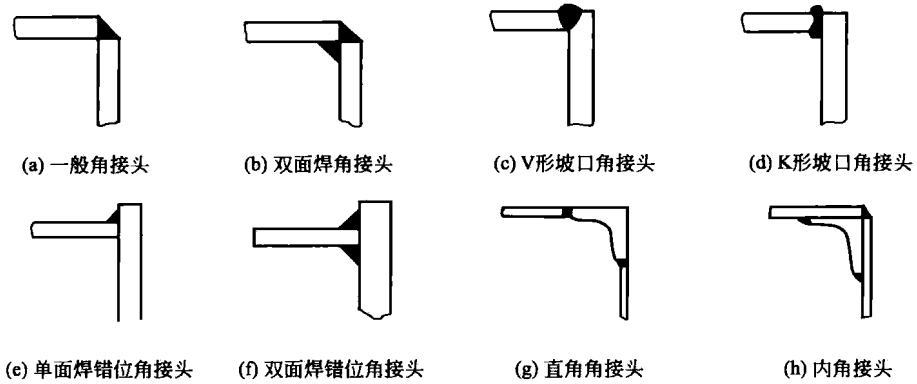


图 1-11 角接头形式

1.1.4 焊缝及接头形式的表示方法

在工程图纸上，焊缝及接头形式通常是用焊缝符号来表示的，焊缝符号起着传递设计要求和工艺要求等焊接相关信息的作用。详细内容见 GB/T 324—2008《焊缝符号表示方法》。

1.1.4.1 焊缝符号组成

焊缝符号包括基本符号、补充符号、尺寸符号、焊接方法代号及指引线等。

(1) 基本符号 基本符号是表示焊缝截面基本形状或特征的符号，表 1-1 列出了焊缝的基本符号。

表 1-1 焊缝的基本符号

序号	焊缝名称	示意图	符号	序号	焊缝名称	示意图	符号
1	卷边焊缝 (卷边完全熔化)			6	钝边单边 V 形焊缝		
2	I 形焊缝			7	钝边 U 形焊缝		
3	V 形焊缝			8	钝边 J 形焊缝		
4	单边 V 形焊缝			9	封底焊缝		
5	钝边 V 形焊缝			10	角焊缝		


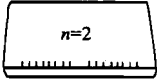
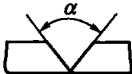
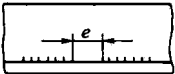
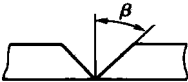
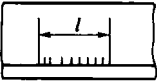
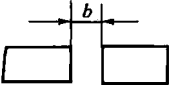
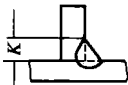
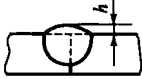
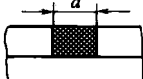

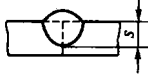
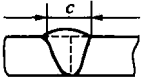


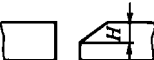
(2) 补充符号 补充符号用来补充说明有关焊缝或接头的某些特征，如表面形状、衬垫、焊缝分布、施焊地点等，见表 1-2。

表 1-2 焊缝的补充符号

序号	名称	符号	说 明	序号	名称	符号	说 明
1	平面	—	焊缝表面经过加工后平整	5	周围焊缝	○	表示环绕工件周围焊接
2	凹面	∪	焊缝表面凹陷				
3	凸面	∩	焊缝表面凸起				
4	圆滑过渡	∩	焊趾处过渡圆滑	6	现场符号	⚡	表示在现场或工地上进行焊接
				7	尾部符号	<	标注焊接工艺方法等内容

(3) 尺寸符号 尺寸符号是表示焊缝相关尺寸的符号，见表 1-3。

表 1-3 焊缝的尺寸符号

序号	符号	名称	示意图	序号	符号	名称	示意图
1	$\delta$	工件厚度		9	$n$	焊缝段数	
2	$\alpha$	坡口角度		10	$e$	焊缝间距	
3	$\beta$	坡口面角度		11	$l$	焊缝长度	
4	$b$	根部间隙		12	$K$	焊脚尺寸	
5	$h$	余高		13	$d$	熔核直径	
6	$p$	钝边		14	$S$	焊缝有效厚度	
7	$c$	焊缝宽度		15	$N$	相同焊缝数量符号	
8	$R$	根部半径		16	$H$	坡口深度	

(4) 焊接方法代号 焊接方法代号是为了简化焊接方法的标注和文字说明。焊接方法可用文字在技术要求中注明，也可用数字代号或英文缩写直接注写在指引线的尾部。常用焊接方法的代号见表 1-4。



表 1-4 常用焊接方法的代号

焊接方法名称	焊接方法代号		焊接方法名称	焊接方法代号	
	数字代号	英文简写		数字代号	英文简写
焊条电弧焊	111	SMAW	熔化极活性气体保护焊	135	MAG
埋弧焊	12	SAW	钨极惰性气体保护焊	141	TIG
熔化极惰性气体保护焊	131	MIG	等离子弧焊	15	PAW

1.1.4.2 焊缝的表示方法

焊缝尺寸符号及数据的标注原则如图 1-12 所示。在焊缝符号中，基本符号和指引线为基本要素，指引线由箭头线和基准线组成，基准线有一条实线和一条虚线，虚线可以画在实线上侧或下侧。如果焊缝和箭头线在接头的同一侧，则将焊缝基本符号标注在基准线的实线侧；相反，如果焊缝和箭头线不在接头的同一侧，则将焊缝基本符号标注在基准线的虚线侧；标对称焊缝及双面焊缝时，可不加虚线。需要时，可在横线的末端加一个尾部，作其他说明之用（如焊接方法或相同焊缝数目等）。

如图 1-13 所示是焊缝符号的标注实例。图 1-13 (a) 依次表示双面角焊缝，焊脚尺寸均为 5mm，焊缝段数为 35 段，每段焊缝长度为 50mm，交错断续焊，相邻焊缝的间距为 30mm。图 1-13 (b) 依次表示周围施焊，由埋弧焊焊成的 V 形焊缝在箭头一侧，要求焊缝表面平齐，由焊条电弧焊焊成的封底焊缝在另一侧，也要求焊缝表面平齐。

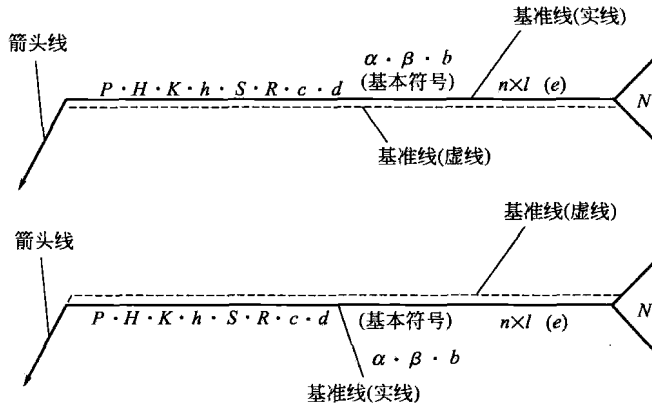


图 1-12 焊缝尺寸符号及数据的标注原则

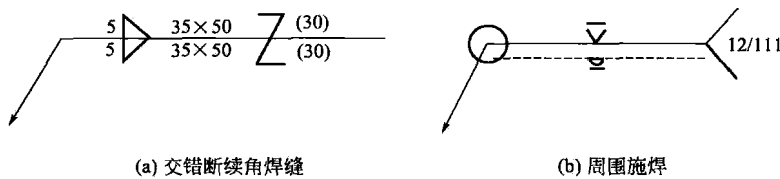


图 1-13 焊缝符号的标注实例

1.2 焊接接头的不均匀性及其力学行为

为了确保焊接结构的安全性，焊接接头应该具有足够的强度、塑性和韧性。但是，焊接接头的力学性能不均匀，特别是塑性和韧性的不均匀，会影响焊接结构的综合性能。