

李占文 李树立 编著

HANJIE JIEGOU BIANXING
KONGZHI YU JIAOZHENG

焊 接 结 构 变形控制与矫正



化学工业出版社

李占文 李树立 编著

HANJIE JIEGOU BIANXING

KONGZHI YU JIAOZHENG

焊 接 结 构 变 形 控 制 与 矫 正



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接结构变形控制与矫正/李占文, 李树立编著. —北京: 化学工业出版社, 2008. 4
ISBN 978-7-122-02362-9

I. 焊… II. ①李…②李… III. 焊接结构-焊接工艺
IV. TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 036758 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 吴 静

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 张 辉

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 装: 北京云浩印刷有限责任公司
850mm×1168mm 1/32 印张 10½ 字数 282 千字
2008 年 6 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: 28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

由于焊接连接具有其他连接方法无法具备的结构特点，并且操作实施灵活，经济效益好，因此焊接连接的工艺技术方法得到人们的高度重视，焊接连接已成为现代金属连接技术领域发展中迅猛的一种金属加工工艺技术。但是焊接连接的工艺技术特点，又使得焊接结构容易发生变形问题。在焊接结构中，这是一种不可避免的缺陷。

控制、减少和矫正焊接结构在生产、制造和安装施工中产生变形，是保证焊接变形程度符合一定的技术要求的最基本、最主要的工艺手段和途径；也是从事焊接结构生产、制造和安装施工的广大参与者，尤其是工程技术人员，对焊接结构的制造、施工工艺技术文件设计、编制中的一项不可缺少的基本构成部分；还是焊接结构生产、制造和安装、施工的管理者工作中不可或缺的基本工作任务。

本书是编者通过 40 余年的生产实践，根据同行业的研究成果和经验总结，将理论与实践结合归纳整理而成的。并且从焊接结构设计的结束阶段开始，按生产中发生的顺序进行写作。

本书的第 1~9 章由李占文编写，第 10 章由李树立编写。全书由中石油吉林化工集团职业技能鉴定中心刘勃安统稿。

由于编者水平有限，书中不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

欢迎订阅我社焊接图书

书名	定价/元
氩弧焊技术入门与提高	20
焊工操作技巧集锦 100 例	25
气焊工工作手册	20
焊工工艺入门	16
焊工上岗速成	14
实用压力容器焊工读本	19
焊工上岗技能读本——气体保护焊	19
焊工上岗技能读本——手工电弧焊	29
焊工上岗技能读本——切割	19
焊工入门	15
焊接修复技术	35
电焊工工作手册	25
特殊及难焊材料的焊接	48
低合金钢焊接及工程应用	50
焊接材料实用基础知识	32
焊接材料、工艺及设备手册	130
电焊条选用指南 (三版)	44
焊丝选用指南	37
焊接与切割操作技能	42
有色金属焊接技术	38
焊接质量控制与检验	37
实用焊接技术丛书——钎焊技术及应用	23
实用焊接技术丛书——气体保护焊工艺及应用	38
实用焊接技术丛书——焊接材料的选用	44
实用焊接技术丛书——异种难焊材料的焊接及应用	42
实用焊接技术丛书——表面堆焊与热喷涂技术	39
实用焊接技术丛书——切割技术及应用	38
实用焊接技术丛书——特种焊接技术及应用	38
实用焊接技术丛书——复合材料的焊接	28

化学工业出版社出版机械、电气、化学、化工、环境、安全、生物、医药、材料工程、腐蚀和表面技术等专业科技图书。如要出版新著,请与编辑联系。如要以上图书的内容简介和详细目录,或要更多的科技图书信息,请登录 www.cip.com.cn。

地址: (100011) 北京市东城区青年湖南街 13 号化学工业出版社

编辑: 010-64519273

目 录

第 1 章 变形的来源与危害	1
1.1 变形及其来源	5
1.1.1 变形	5
1.1.2 变形的来源与表现形式	6
1.2 变形的种类与危害	7
1.2.1 尺寸变化	7
1.2.2 形位变化	9
1.2.3 失稳变形	13
1.2.4 裂纹与断裂	15
1.2.5 痕迹	15
1.2.6 自重引起的变形	18
1.2.7 应力的影响	19
1.2.8 工艺与生产周期的影响	20
1.2.9 成本增加	22
1.2.10 美学效果的影响	22
1.2.11 增加了成型模具设计的复杂程度	23
1.2.12 报废	23
第 2 章 材料性能对变形的影响与控制	25
2.1 材料对冷作的影响	25
2.1.1 材料的力学性能对成型条件的影响	25
2.1.2 冷作硬化	29
2.1.3 材料的轧制性能对变形的影响	29
2.1.4 材料的化学成分对变形的影响	33
2.1.5 材料定尺对变形的影响	33
2.1.6 材料断面几何形状对变形的影响	34

2.1.7	材料的运输与保管对变形的影响	34
2.2	材料性能对焊接变形的影响	34
2.2.1	材料的物理特性对焊接变形的影响	34
2.2.2	材料化学成分对焊接裂纹与变形的影响	37
2.2.3	合金元素对焊接性能影响的评定	40
2.2.4	材料的轧制特点对焊接的影响	40
2.2.5	有色金属与合金的焊接变形特点	42
第3章	设计对变形的影响与控制	43
3.1	对失稳变形的控制	43
3.1.1	加强筋的增设	43
3.1.2	加强筋的焊接要求	45
3.2	拱度变形的控制	46
3.2.1	标准规定梁的跨中上拱值	46
3.2.2	上拱的预制	48
3.2.3	预留变形量	50
3.3	开孔的补强、变形与应力控制	51
3.4	材料的选用	52
3.4.1	合理选用相应等级的材料	52
3.4.2	材料尺寸的选用	52
3.5	焊缝的改变	52
3.5.1	减少焊接量	52
3.5.2	坡口的加工方法	55
3.5.3	焊缝区域结构的改变	56
3.5.4	改变焊缝的位置	56
3.5.5	避免焊缝的几何不连续性和应力集中	59
3.5.6	增加焊缝	59
3.5.7	改变焊接结构的形式	62
3.5.8	焊接接头形式的正确选择	63
3.6	工艺方案的设计	64
3.6.1	冷作工艺设计	64

3.6.2 焊接工艺设计	65
--------------------	----

第4章 剪切与切割对变形的影响与控制

4.1 剪切与冲裁的变形与控制	67
-----------------------	----

4.1.1 剪切的变形	67
-------------------	----

4.1.2 冲裁中的变形	71
--------------------	----

4.2 切割变形	72
----------------	----

4.2.1 气割热对变形的影响	72
-----------------------	----

4.2.2 气割热对焊接变形的影响	78
-------------------------	----

4.2.3 其他切割方法对变形的影响	78
--------------------------	----

第5章 冷作中的变形与控制

5.1 变形对展开尺寸的影响	81
----------------------	----

5.1.1 板的弯曲成型对下料尺寸的影响	81
----------------------------	----

5.1.2 变形对筒节下料的影响	84
------------------------	----

5.1.3 材质的不均匀性对变形的影响	88
---------------------------	----

5.1.4 锥体、相贯体构件变形对展开尺寸的影响与处理	89
-----------------------------------	----

5.1.5 型钢弯曲成型的变形对展开尺寸的影响	91
-------------------------------	----

5.1.6 反变形参数的估算与选择	95
-------------------------	----

5.2 板弯曲成型中变形的控制	106
-----------------------	-----

5.2.1 弯曲成型中变形的控制	106
------------------------	-----

5.2.2 素线不等长的板料弯曲变形的控制	108
-----------------------------	-----

5.2.3 卷曲中变形的控制	108
----------------------	-----

5.3 冲压成型中变形的控制	120
----------------------	-----

5.3.1 封头成型中的变形特点与控制	120
---------------------------	-----

5.3.2 模具结构对变形的控制	129
------------------------	-----

5.3.3 瓦片的冲压	132
-------------------	-----

5.3.4 封头成型的质量检验	134
-----------------------	-----

5.3.5 旋压	135
----------------	-----

5.4 管成型中变形的控制	136
---------------------	-----

5.4.1 管成型的特点与检验项目	136
-------------------------	-----

5.4.2	管的手工成型	137
5.4.3	弯管机成型中变形的控制	140
5.4.4	加热圈弯管	149
5.4.5	弯管质量分析	149
5.4.6	半管成型	151
5.4.7	管端的缩口加工	152
5.4.8	波纹管	153
5.5	型钢成型中变形的控制	156
5.5.1	型钢成型中的变形特点	156
5.5.2	型钢成型中的变形控制	156
5.5.3	拉弯成型	158
5.6	组装中的变形与控制	159
5.6.1	错边量的控制	159
5.6.2	分部组合法	159
5.6.3	反变形组合法	162
5.6.4	刚性固定法对焊接变形的控制	168
5.6.5	预拉伸加热法控制壁板焊接失稳变形	179
5.6.6	光照与温差对组装变形的影响与控制	180
5.6.7	定位焊与焊后加固	180
5.6.8	吊装中变形的控制	186
5.7	检修中的变形与控制	188
第6章	焊接应力、变形与控制	190
6.1	焊接应力与影响	190
6.1.1	焊接残余应力的影响	190
6.1.2	焊接残余应力与变形的产生机理	192
6.1.3	焊接残余应力的消除	194
6.2	焊接变形	205
6.2.1	各种焊接变形及特点	206
6.2.2	影响焊接变形的主要因素与作用	222
6.3	焊接变形的控制	223

6.3.1	焊接方法的选择	223
6.3.2	焊接材料的选择	225
6.3.3	焊接电参数的选择	226
6.3.4	操作方法	226
6.4	变形控制的措施与效果	228
第7章	其他连接的变形与控制	229
7.1	螺栓连接中的变形与控制	229
7.1.1	斜垫圈的应用	229
7.1.2	螺栓的拧紧顺序	230
7.2	铆钉连接中的变形与控制	233
7.3	胀接变形的控制	234
第8章	检验中的变形与控制	236
8.1	变形对检验的影响	236
8.2	压力试验对容器变形的影响	237
8.2.1	温度影响	237
8.2.2	放水的影响	237
8.2.3	水压试验的支撑基础	237
8.2.4	气压试验和气密性试验	238
8.2.5	压力试验的操作安全	238
第9章	矫形	239
9.1	机械矫形	239
9.1.1	产生变形的基础	239
9.1.2	板的机械矫正	240
9.1.3	过载矫形	245
9.1.4	刮板矫正	245
9.1.5	通球矫形	246
9.2	手工锤击矫形	246
9.2.1	手工锤击的矫形	247

9.2.2	焊缝的矫形	248
9.2.3	堆焊焊缝的风动工具矫形	249
9.3	整体加热矫形	249
9.4	水火矫形	250
9.4.1	水火矫形的特点	250
9.4.2	火焰矫形的原理	251
9.4.3	火焰矫形的条件	252
9.4.4	加热参数对火焰矫形的影响	253
9.4.5	火焰矫形的操作方法	261
9.4.6	检验	267
9.4.7	常见热矫形中容易出现的错误	267
9.5	框架结构扭曲的牵引矫正	268
9.6	其他矫形方法	269
9.6.1	蠕变矫形	269
9.6.2	强电磁脉冲矫形	270
9.7	矫形允差	271
9.7.1	矫正伸长量的控制	271
9.7.2	冷矫正温度	271
9.7.3	矫形、冷弯曲的最小曲率半径和最大弯曲矢高的 允许值	271
9.7.4	变形的允许值	273
9.7.5	焊接后的最大变形允许值	278
第10章 变形的控制与矫正示例		279
10.1	焊接顺序与方向对变形的影响与控制	279
10.1.1	普遍应用的板列焊接顺序种类	279
10.1.2	管列焊接的跳跃焊顺序	280
10.1.3	桥式起重机主梁腹板与盖板拼接焊接方向与变形的 控制	281
10.1.4	焊接 H 钢与箱形梁的焊接顺序	282
10.1.5	厚板的拼接与焊接顺序	282

10.1.6	船舶壳体的焊接顺序	283
10.2	分部组装	288
10.2.1	切削加工件的组装	288
10.2.2	桥式起重机小车行走轮支撑弯板焊接变形的 控制	289
10.2.3	T形梁焊接变形的控制	290
10.3	反变形组装	291
10.3.1	花纹板类组装的工艺	291
10.3.2	奥氏体不锈钢阀门体焊接收缩的反变形处理	291
10.3.3	桥梁中构件的反变形	292
10.3.4	容器接管座的反变形组装	292
10.4	刚性固定焊接	293
10.4.1	泵塔基座底板变形的刚性固定控制	293
10.4.2	T形梁焊接变形的刚性固定控制	293
10.5	组装对变形的综合控制	293
10.5.1	大型桥梁箱形梁焊接变形的控制	293
10.5.2	环形蒸汽管路的组装工艺	296
10.5.3	三辊柱导缆器框架变形控制综合工艺	300
10.5.4	平板型防水闸门焊接变形的控制	300
10.5.5	锅炉水冷壁中的集箱管焊接变形的控制	301
10.5.6	控制桁架吊装变形的稳定性验算	302
10.6	变形的矫正	306
10.6.1	杆状构件不同矫形方法与特点	306
10.6.2	锥形板弯曲的矫形	307
10.6.3	施加外力时的火焰加热矫形	307
10.6.4	腹板弯曲的千斤顶矫形	308
10.6.5	角钢两向弯曲的矫正	308
10.6.6	钢板弯曲的压机矫形	308
10.6.7	薄板的多孔板镇压矫形	309
10.6.8	栏杆类的矫形	309
10.6.9	梁焊接变形的矫正	310

10.6.10	角变形的机械矫形	311
10.6.11	底座类变形的矫正	312
10.6.12	焊接加强筋的壁板波浪形矫形	313
10.6.13	波浪变形的边缘去除法	313
10.6.14	焊接 H 钢扭曲变形的矫正	314
10.6.15	箱形梁扭曲的变形与矫形	314
10.6.16	梯子扭曲的矫形	316
10.6.17	螺旋状弯曲的矫正	316
10.6.18	吊臂支撑套的焊后矫正	318
10.6.19	花键套的矫正	318
10.7	船舶焊接的变形与控制	319
参考文献		323

第1章

变形的来源与危害

现代成套的化工、炼油、冶金设备，各种钢构桥梁、船舶等，都是采用金属材料经焊接而成的。

目前，通过焊接连接消耗的钢材在钢总产量中，工业发达国家已经超过70%。随着焊接技术的进步与发展，这个比例还将继续上升。

焊接结构是以焊接为基本连接方式。不同的焊接方法，都存在着不同程度的焊接变形。电弧熔化焊产生的变形是所有焊接方法中最突出的，而电弧熔化焊的应用在所有焊接的应用中又是最为广泛的。焊接变形是焊接结构中必须处理的问题。但是，焊接结构变形不是仅存在于焊接工序生产中，而是广泛存在于焊接结构生产与使用的所有环节之中，即从所应用材料的研发开始，生产、调运与保管；设计与制造、施工安装；服役运行与维护等的全过程，都有变形发生。因此，解决变形，在焊接结构的生产、制造和安装施工中，是一个从材料的选用、管理直到交付使用前检验的全过程控制问题。

根据日本1960年统计的焊接结构破坏事故分析（表1-1）统计表明，应力、变形、硬化、脆化、裂纹等因素在破坏事故中所占的比重是相当大的。而这些，与变形和影响变形的因素有直接的关系。

随着焊接结构应用范围的日益扩大，焊接结构出现了向成套类的大型化、超大型化的石化、冶金，大型桥梁、建筑等单项小批生产和产品相对单一的汽车、铁道车辆、摩托车类大批量的工序化生产，以及品种相对单一，但是型号多变的定型产品及非标类的批量

表 1-1 焊接结构破坏事故分析

失效原因																			
		外载算错	局部应力算错	接头形式错误	形状不连续	选材错误	忽视材料各向异性	使用条件认识不足	退火的确定不当	焊接工艺错误	焊接技术不良	拘束度过大	材料加工不当	自由端处理不当	热处理错误	材质不良	焊接性不良	材料管理有误	
设计		○	◎	○	○	○												○	
				○	○													○	
				○															
					◎														
							◎											○	◎
																		○	○
施工				◎															
				◎															
材料																			

续表

后果影响	表现特征	裂纹	变形	精度	泄漏	工艺缺陷	剥离	应力集中	剩余应力	脆化	腐蚀	硬化	氢脆	时效
	疲劳破坏	◎				○		◎		◎		◎		
	低周疲劳破坏	◎				○		◎		◎		◎		
	延性断裂	◎				○		○	○					
	脆性断裂	◎				○		◎	○	◎		◎	○	
表现类型	蠕变断裂	◎				○							○	○
	压曲失稳		◎											
	凹损		◎											
	腐蚀	◎												
	应力腐蚀开裂	◎							◎					
	泄漏	◎				○								○

注：◎表示有很大关系；○表示有关系。

生产的多元化生产方向发展。不同的生产模式决定了对焊接结构变形控制成本投入方式和要求是各不相同的。在单项小批生产中,变形的控制多数是从工艺技术和操作技能方面进行解决。而工序化生产则多是从专用工、卡、模具及生产线的性能与结构方面进行解决。这是由产品的产量来决定的。具体见表 1-2。

表 1-2 生产规模对解决变形方法的要求及各自特点

变形存在的不同条件	各自特点
生产线上的工序化生产	①产品批量大,变形的重复性是其主要特点 ②解决变形的对象具体、明确 ③变形的种类相对单一 ④专用变形的控制措施,一次投入成本高,但是,综合经济成本低。操作技能的掌握多是一个熟练过程
单项小批生产	①变形的种类广泛,解决变形的方法与措施具有广泛的多样性和普遍性 ②对变形的控制与矫正操作,通过技能实现的。要求操作技能熟练精通,对变形的控制和矫形要求具有全面、丰富的操作经验 ③对变形控制与矫正投入的工装等费用不明显

虽然矫形是变形发生的一种不得不进行的补救措施,但是如果采取控制变形的措施所发生的成本高于矫形的成本,就要通过“技术经济与价值分析”的手段进行剖析,考虑是否舍弃变形的控制,而在矫形的工序上采取措施,以降低成本。

虽然对焊接结构变形的控制在理论上进行了大量的研究,揭示了焊接结构的变形机理与规律,但是,在焊接结构变形的控制与矫正中,对经验的依赖仍然是主要的。由于产品的多样化,生产条件的不一致,都在不同程度上制约着经验的运用与发挥。也就是说,已有的经验对新的变形的控制与矫正的实用性未必都能行得通。因此,已有的经验必须根据现实的状况结合起来,灵活运用,绝不可生搬硬套,尤其是参数的选择确定更应如此。