

压力容器

国外技术进展

出 版 说 明

遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，在批林整风运动的推动下，为了了解国外压力容器近年来技术发展概况，我们根据全国化工与炼油机械行业技术情报网会议的决定，由东方锅炉厂、上海锅炉厂、武汉锅炉厂、北京化工学院、太原工学院、南京化工机械厂、浙江化工学院、天津轻工业学院、南京化工学院、上海化工机修总厂、山东化工学院、贵阳化工机械厂、自贡高压容器厂等22个单位，于1973年初共同翻译了约一百篇文章。在此基础上，由上海化工学院、内蒙古工学院、天津大学、浙江大学、广东化工学院、华东石油学院、成都工学院、哈尔滨锅炉厂、河北工学院、甘肃工业大学、上海化工设计院及合肥通用机械研究所，于1973年5月至9月组织编写了这份“压力容器——国外技术进展”，内容涉及压力容器的选材、设计计算、制造、检验及事故分析等方面，共分十章。最后由哈尔滨锅炉厂及通用机械研究所加以整理。

应该指出：资本主义国家出版的一些技术资料，由其社会制度所决定，必然会反映资本主义社会的腐朽与黑暗。例如，资本主义国家的规范，其繁琐的条文成为对工人实行管、卡、压的阶级压迫的工具，这是由于它是为资本家榨取利润服务的本质所决定的。因此，我们必须遵循伟大领袖毛主席关于“批判地吸收外国文化”的有关教导，坚持“自力更生”、“艰苦奋斗”的方针，走自己工业发展道路。

由于我们学习马列主义和毛主席著作不够，水平有限，资料搜集不全，时间较短，未能进行深入分析批判，会有错误和不妥之处，希读者批评指正。

编 者

1974.1.

目 录

第八章 压力容器焊接的若干问题	(567)
引 言	(567)
8.1 压力容器有关焊接工艺概况	(567)
8.2 低合金高强度钢焊接接头中的冷裂纹问题	(579)
8.2.1 概述	(579)
8.2.2 氢对钢的焊接冷裂纹的影响	(581)
8.2.3 插棒 (Implant) 式焊接冷裂纹试验	(585)
8.2.4 TRC 和 RRC 试验	(588)
8.2.5 钢的焊接冷裂纹敏感性和防止冷裂的预热温度的确定	(603)
8.2.6 本节后记	(620)
附录: 局部预热时的焊接区的冷却过程	(621)
8.3 低合金钢的焊后消除应力裂纹问题	(633)
8.3.1 概述	(633)
8.3.2 消除应力裂纹的形成	(635)
8.3.3 消除应力裂纹试验方法简介	(637)
8.3.4 合金元素对消除应力裂纹敏感性的影响	(642)
8.3.5 产生消除应力裂纹的退火温度和时间的关系	(646)
8.3.6 防止消除应力裂纹的产生和减小消除应力裂纹敏感性的途径	(647)
8.4 厚板的窄间隙焊	(648)
8.4.1 概述	(648)
8.4.2 细丝窄间隙焊工艺及设备	(651)
8.4.3 粗丝窄间隙焊	(660)
8.4.4 中等直径焊丝的窄间隙焊	(663)
8.5 无翻转工序的自动焊简介	(664)
参考文献	(671)
第九章 压力容器无损检验	(675)
9.1 国外压力容器规范对无损检验的要求	(675)
9.1.1 原材料的检查	(675)
9.1.2 制造过程中的检查	(676)
9.1.3 水压试验中及水压试验后的检查	(680)
9.2 压力容器无损探伤方法	(680)
9.2.1 缺陷的种类和检查方法的适用范围	(680)
9.2.2 各种方法的探伤能力	(681)

9.2.3 超声波探伤对缺陷的判断	(686)
9.3 焊缝的无损探伤	(697)
9.3.1 焊缝的射线检查	(697)
9.3.2 焊缝的超声波探伤	(703)
9.3.3 焊缝的磁粉及液体浸透法探伤	(710)
9.3.4 综合探伤	(710)
9.3.5 各种方法对焊缝检查的允许标准	(711)
9.4 无损探伤方法发展概况	(713)
9.4.1 X射线探伤	(713)
9.4.2 超声波探伤	(719)
9.4.3 钢管及圆钢的自动磁力探伤	(734)
9.5 声发射无损探伤技术	(738)
9.5.1 声发射的基本原理	(738)
9.5.2 声发射技术的发展概况	(739)
9.5.3 声发射技术的应用	(741)
9.5.4 存在问题	(759)
参考文献	(759)
第十章 压力容器事故分析	(763)
10.1 事故简况及统计	(763)
10.1.1 压力容器事故简况	(763)
10.1.2 压力容器事故的调查统计	(764)
10.2 近期压力容器典型脆性破坏事例	(771)
10.3 压力容器发生事故的原因	(781)
10.3.1 压力容器产生脆性破坏的主要因素	(781)
10.3.2 设计方面	(786)
10.3.3 材料方面	(789)
10.3.4 焊接方面	(790)
10.3.5 热处理方面	(794)
10.3.6 蠕变方面	(795)
10.3.7 应力腐蚀方面	(796)
10.3.8 疲劳方面	(800)
10.3.9 操作使用方面	(801)
10.3.10 水压试验	(802)
10.3.11 其它	(803)
10.4 事故分析方法	(804)
10.4.1 断裂面的宏观检查	(804)
10.4.2 档案文件检查	(807)
10.4.3 化学成分和机械性能的复查	(807)
10.4.4 起爆点的微观组织检查	(809)

10.4.5	用断裂分析图的方法进行分析.....	(810)
10.4.6	用断裂力学的方法进行分析.....	(811)
10.4.7	用电子显微镜分析.....	(812)
10.5	防止压力容器脆性破坏的主要措施	(813)
10.5.1	焊接结构及工艺.....	(814)
10.5.2	材料韧性评定指标及试验方法.....	(818)
10.5.3	消除应力处理.....	(823)
10.6	结语	(826)
	参考文献	(827)

第八章 压力容器焊接的若干问题

引言

焊接是压力容器制造的关键工艺,它直接影响压力容器的质量、生产率和生产成本。随着大型化的进展,也促使焊接技术和工艺向优质化、高效率化发展。由于新的高强度钢材的应用,低合金高强钢的焊接冷裂缝(亦即延迟裂缝)、焊后消除应力退火裂缝、接头的软化和冲击韧性的降低等问题显得较为突出。另一方面,也在寻求提高焊接熔敷率,提高焊接机械化、自动化程度的焊接方法,以利缩短制造周期,降低生产成本和加强质量管理。压力容器焊接技术问题涉及的内容较为广泛,在本章仅简要介绍以下几项内容:

- (1) 压力容器有关焊接工艺概况;
- (2) 低合金高强钢焊接接头中的冷裂缝问题;
- (3) 低合金结构钢焊后消除应力裂缝问题;
- (4) 厚板窄间隙焊;
- (5) 无翻转工序的自动焊(简介)。

8.1 压力容器有关焊接工艺概况

本节简述压力容器制造有关焊接工艺的一般现状与趋向,涉及的工艺装备可见第七章。

一、埋弧焊

埋弧焊相对来说是压力容器制造中成本低、效率高、质量较稳定的一种焊接方法。因此,应用也较为普遍。通常这种工艺对40mm以下的钢板的对接可两面各焊一层。12mm以下的钢板可不开坡口(或称“I”形剖口),12~16mm的钢板用“Y”形坡口,16mm以上者用“X”形坡口。

为提高焊接生产率,加大熔敷量,在采用单根焊丝进行埋弧焊时,专靠增加焊接电流和焊接速度是行不通的。因为这样容易产生咬边、焊缝裂缝和成型不好等缺陷^[1]。通常单根焊丝埋弧焊时,焊接电流在1500A以下,焊接速度在18~36m/h,熔敷率约6~9kg/h。提高埋弧焊生产率的方法有多电极埋弧焊、填加热丝(或冷丝)的埋弧焊,向坡口中填加金属粉末的埋弧焊和带状电极埋弧焊等等。

多电极埋弧焊目前已投产,一般可比单根电极提高效率2~3倍。在压力容器焊接中目前限于用两根电极埋弧焊(也称串联埋弧焊)。这种方法是焊接时用两根焊丝(也即两个电极)在坡口中沿焊接方向一前一后,相距一般约20~30mm(也有较大的)。前面的焊丝(或称前行电极)用大电流、低电压,以获得大的熔化深度。后面的焊丝(或称后行电极)用与前行电极相反的规范,即一般电流稍偏小些,电压稍高些,这样可修整焊道形状,避免产生

缺陷。两根焊丝都有各自的电源供电。两者的电源组合可以是交流-交流，直流-交流，直流-直流。用得较为普遍的是直流-交流。这种工艺所焊得的接头质量与单电极时相同，从低碳钢到200mm的2+Cr-1Mo钢都适用。这种方法可用来焊纵缝、环缝、封头瓣的拼焊、接管的焊接，而且可进行自动焊。这种方法将得到进一步普及〔2〕。日本的HIVAS法〔7〕是这种方法的一种，这种HIVAS法对12—25mm钢板可进行不开坡口的双面焊，其规范例可见表8.1.1。

表8.1.1 HIVAS 法 规 范 例

板 厚 (mm)	前 行 电 极		后 行 电 极	
	焊接电流 I_1 (A)	焊接电压 E_1 (V)	焊接电流 I_2 (A)	焊接电压 E_2 (V)
12	800	45	500	40
14	900	47		
16	1000	50		
18	1100	52	600	40
20	1200	55		
22	1400	58		
25	1600	60		

注：焊丝直径4mm，焊丝伸出长：前行35mm，后行40mm，前焊丝倾角+15°，后焊丝倾角-20°，二焊丝间距30mm，焊接速度70cm/min。

压力容器的纵、环缝埋弧自动焊的现状可从第七章图7.91说明其特征〔3〕。即采用双丝串联埋弧自动焊，焊机头的台架不是以往的固定悬臂装置，而是可移立柱式；焊接时有焊头跟踪装置使焊头沿焊缝移动，或焊环缝时使焊头自动位于坡口中；焊接规范和焊接过程的控制中央控制台实现远距离操纵；采用工业电视监视焊接过程。

串联埋弧焊目前的主要工作是在不降低这种方法的技术经济指标的同时，提高焊缝金属的冲击韧性。

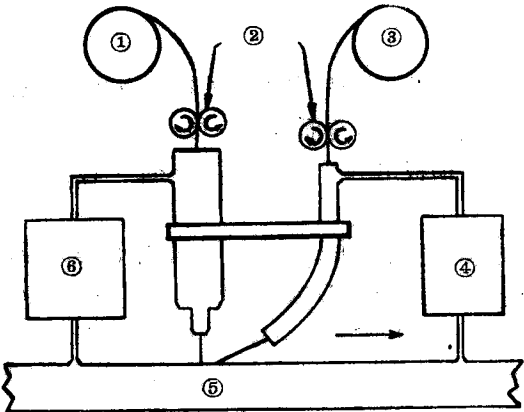


图8.1.1 加热焊丝的埋弧焊原理图

①电极焊丝；②送丝轮；③热丝；④交流；⑤工件；⑥交流或直流

这对焊接淬火加回火的钢是很有利的，因为这时必须控制输入热，以免热影响区软化。如焊HY-80钢，在输入热4610cal/cm时，电极焊丝（即产生电弧的焊丝）的熔敷率是8kg/h，当加热焊丝后熔敷率提高了4kg/h，而输入热只增加400cal/cm（小于10%）。随熔化热丝的

填充热丝的埋弧焊也是近来出现的一种提高效率的埋弧焊方法〔4、5〕，其原理可见图8.1.1。在通常的单丝埋弧焊时，向熔池前送进另一焊丝，这根焊丝与工件接在另一电源的回路中（通常用交流电源）。这根焊丝与工件短路，短路电流加热焊丝伸出长度部分（并不产生电弧），这时被加热的填充丝送到熔池前就很快熔化。加热丝的埋弧焊具有同单丝埋弧焊同样简单的特点，同时其熔敷率可提高50~100%，而附加的热量只增加10~20%。在接头装配良好，坡口很好清理的情况下，其输入热几乎等于单丝焊的输入热。

金属量的增加，接头的机械性能改变不大。如 A302B 钢，用中性熔炼焊剂和含 C 0.12%、Mn 1.8%、Mo 0.5% 的焊丝，焊出三个接头（焊接电流是 650 A，焊速 40.6 cm/min，熔敷率是 7.3 kg/h），焊后经 620°C，24 小时消除应力回火。送入热丝后熔敷生产率和焊缝长度增加一倍，而这时接头机械性能实际上没有变化（可见表 8.1.2）。

表8.1.2

机 械 性 能	焊 缝 金 属 中 热 丝 比 例 (%)		
	0	50	100
σ , kg/mm ²	53.2	53.4	52.6
σ_b , kg/mm ²	62	62.4	61.8
δ %	25	25	25
φ %	71.1	70.8	70.4
冲击功 kg-m			
室温	14.4	10.0	11.1
-12°C	18.8	10.0	13.3

有时为了控制向母材的输入热和接头机械性能，采用向熔池加入冷焊丝的办法。

在坡口中填加金属粉末的高效焊接工艺近来也有所研究和应用〔6〕。其原理可见图 8.1.2。焊前在坡口中填加金属粉末。焊接方法可用实芯焊丝的埋弧焊，或管状焊丝的有（或无）气体保护电弧焊。焊接设备与通常使用的一样。由于加入粉末，焊接电流比通常的要高。最好用直流反接电源。如用专门的焊剂，则用交流电也可获得较好的焊缝成型。金属粉末的化学成分大致是（%）：C ≤ 0.08、Mn 0.5~5.5、Si 0.2~1.2、Mo 0~5、Cr 0~5、S ≤ 0.015、Fe 85~95。另外还可加入强脱氧剂，如 Ti、Zr、Al、Mg 和 Ca。粉末的含碳量要低。对粉末的均匀性要注意混合阻力和防止发生成分偏析的倾向。粉末的大小有两种：标准粒度（80 目）的和粗粒度（35~10 目，粒度为 0.5~2 mm 大小）的。粉末的堆积比重是 2.7~3.9 g/cm³。加金属粉末和不加金属粉末的埋弧焊可用图 8.1.3 的坡口和表 8.1.3 所列规范进行比较。比较的结果列于表 8.1.4。

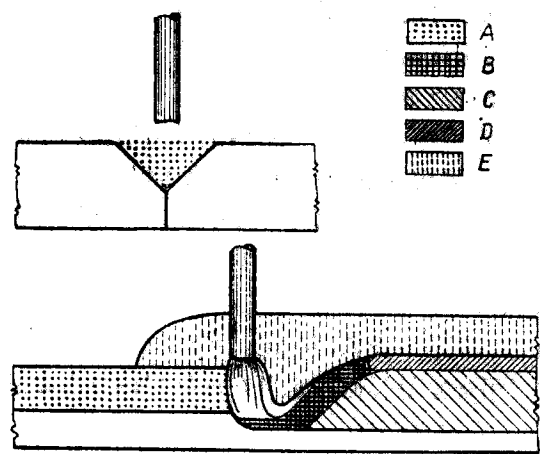


图8.1.2 填充金属粉末焊原理图

A——金属粉末，B——熔化金属，C——焊缝金属，
D——熔渣；E——焊剂

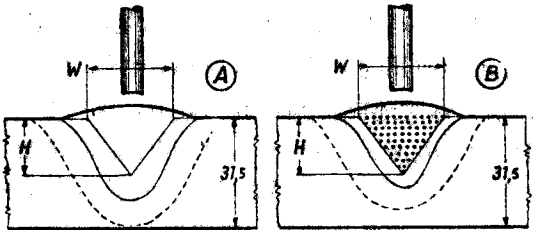


图8.1.3 加粉末和不加粉末焊接坡口的比较

㉔——不加粉末的焊接坡口，㉕——加粉末的焊接坡口。

表8.1.3

比较试验的焊接规范

№	坡口 (宽/深mm)	金属粉末	电 流 (A)	电 压 (V)	焊 速 cm/min	注
1	17/10	不加	880	35	30	焊丝 $\phi 4.8\text{mm}$, 填充粉末80目,
2	17/17	加	885	35	30	比重 3.6g/cm^3 , 直流反接, 母材
3	17/17	不加	1150	38	30	$\sigma_b = 52.1\text{kg/mm}^2$ 。

表8.1.4

按表 8.1.3 试验所得的结果

	表8.1.3的序号№		
	1	2	3
熔化1公斤金属用的焊剂 (kg)	1.367	0.823	1.183
消耗的焊丝 (kg/h)	11.06	11.22	16.14
总的熔敷金属量 (kg/h)	11.12	18.36	16.30
稀释度 (熔化母材的重量与焊接熔池重量比)	69.2	48.0	74.5
热影响区面积对熔化区面积之比	0.605	0.555	0.808
热影响区面积对焊缝坡口面积之比	1.947	1.044	2.798

加金属粉末焊接的优点为 (1) 可提高熔敷生产率, 减少焊剂消耗, 在填充深坡口时, 用大电流熔敷, 其生产率可达 21.6kg/h ; (2) 可通过变化填充粉末的合金成分改善接头机械性能, 尤其是冲击韧性, 采用标准粉末配合相应焊剂可焊接 σ_b 为 $52\text{—}62\text{kg/mm}^2$ 的钢, 并得到三级的接头 (劳埃德最高级别); (3) 用细粉末作垫可不必打底焊而得到较好的焊缝成型; (4) 保证熔化均匀, 减少母材的熔合比, 热影响区窄, 这对低合金高强钢的焊接较为有利; (5) 对坡口的加工和装配公差的要求不高, 减少焊道数目, 因而较为经济。

在坡口中加金属粉末的新的高效焊接工艺在欧洲、日本、加拿大和美国都有采用, 但目前主要看到在造船方面应用的报导。

为了提高焊接电流, 增加焊接生产率, 且又得到较好的焊缝成型, 最近日本和民主德国报导用矩形截面的带状电极进行埋弧焊〔8、9〕。它与圆截面的焊丝埋弧焊相比, 具有可进行高速、高电流焊接的特点。这种焊接工艺方法的具体特点是:

(1) 可进行大电流、大熔敷量的焊接, 焊接生产率高。图8.1.4示出圆截面焊丝和带状电极可能使用的电流比较, 在同一截面积下, 带状电极采用的电流可以是圆截面焊丝的1.2—1.8倍, 这时还能得到良好的焊道。图8.1.5是带极与圆截面电极熔化速度的比较。在同样使用 1500A 电流时, 用 $\phi 6.4\text{mm}$ 焊丝的熔化速度是 350g/min , 而用 $1.2 \times 15\text{mm}$ 带极的熔化速度是 600g/min , 这时后者的熔化速度为前者的1.6倍。

(2) 电弧热量是沿带极宽度方向分布, 图8.1.6是带极燃烧状况。可改变带极宽度方向与焊接方向的夹角, 从而改变焊道成型。这样可用来修整焊道, 也可在深坡口内进行多道焊。

(3) 带极的可挠性比圆截面焊丝好。

(4) 焊出的焊道较宽, 不易产生收缩裂缝。

(5) 可以用带极与圆截面焊丝或带极与带极组合进行多电极焊。

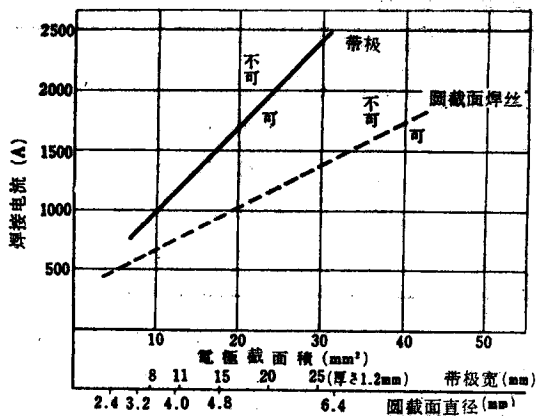


图8.1.4 单电极焊许可的焊接电流

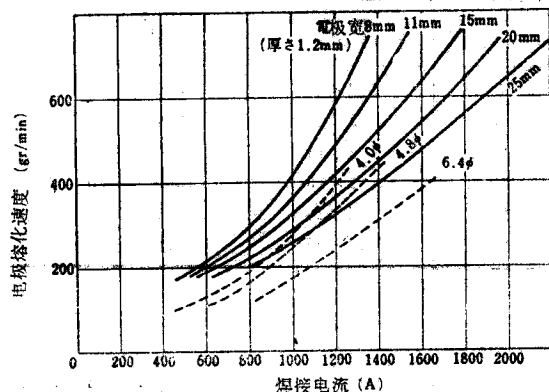


图8.1.5 焊接电流与电极熔化速度的关系

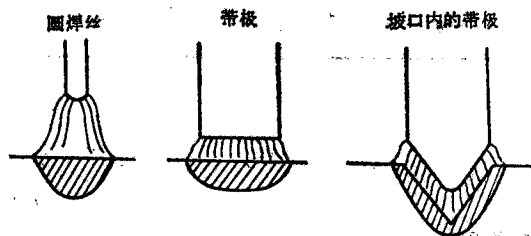


图8.1.6 电极燃烧状况

带极经轧制，切条等加工成卷。尺寸为厚1.2mm，宽度有8、11、15、20和25mm 五种。材质有用于软钢的 UH-40（相当 US-43）和 UH-45（相当 US-29），用于高强钢的 UH-50（相当 US-49）。

带极焊专用焊剂有两种，MF-47（熔炼型）用于水平角焊缝的高速焊，可得到光滑的焊缝。PF-41H（烧结型）用于平板开坡口的焊接，焊接电流大于 1500 A，并能得到良好的焊缝。

焊机有日本大阪变压器株式会社的 SWR-41型和 SWR-24型两种，其具体规格可见前章介绍。

用带极可焊角缝，对接焊缝。带极焊角缝的特点是：熔深不大，焊道稍比电极宽，焊接速度快时也能得到表面光滑过渡的焊道；焊速是圆截面焊丝的 1.7 倍；单层俯焊时能得到很大焊脚尺寸；水平角焊时可得到 10mm 的焊脚。各种角焊的焊接规范见表 8.1.5, 8.1.6, 8.1.7, 8.1.8。

表8.1.5 向下角焊的焊接规范（交流）

焊 脚 (mm)	带 极 尺 寸 (mm)	电 流 (A)	电 压 (V)	速 度 (cm/min)	注
6	1.2×8	630	30	120	焊剂G60 带极UH-45
8	1.2×11	830	33	90	
10	1.2×11	980	35	80	
12	1.2×15	1260	40	65	
20	1.2×20	1620	44	30	
25	1.2×25	1900	45	22	

表8.1.6 水平角焊时的规范（交流）

焊 脚 (mm)	带 极 尺 寸 (mm)	电 流 (A)	电 压 (V)	速 度 (cm/min)	注
6	1.2×8	600	31	100	带极UH-45 焊剂MF-47
8	1.2×8	710	32	80	
10	1.2×11	820	32	60	

表8.1.7 开坡口的角焊规范（交流）

带 极	焊 剂	电流(A)	电压(V)	速 度 (cm/min)	伸出长(mm)
UH-45 1.2×15mm	MF-47 12×150	1200	38	35	60

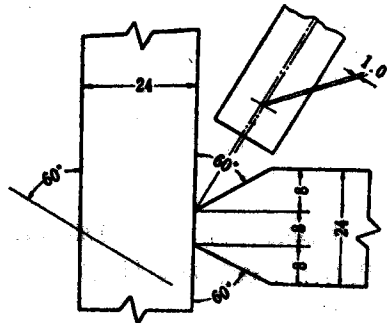
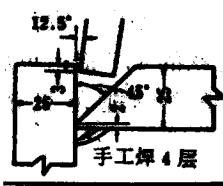


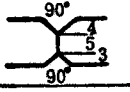
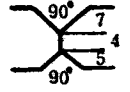
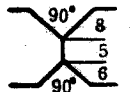
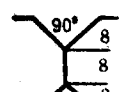
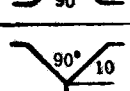
表8.1.8 角接头的焊接条件（交流）

坡 口 形 状	带极尺寸	电流(A)	电压(V)	速 度 (cm/min)
	1.2×15	1600	40	25

带极焊对接接头的两面各焊一道规范见表8.1.9。焊接速率是圆截面焊丝的1.7~2倍。

表8.1.9

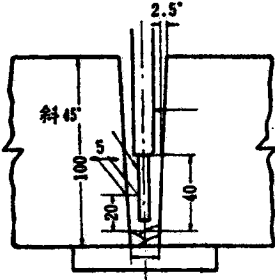
两面I层焊接条件 (交流)

板 厚 (mm)	坡 口 形 状	焊接侧	带极尺寸 (mm)	电 流 (A)	电 压 (V)	速 度 (cm/min)	伸 出 长 (mm)
12		正	1.2×8	900	35	60	45
		反		670	33	60	45
16		正	1.2×15	1200	32	50	55
		反		1040	31	55	55
19		正	1.2×15	1300	32	50	55
		反		1040	31	50	55
24		正	1.2×15	1400	33	50	55
		反		1300	32	50	55
32		正	1.2×15	1520	34	42	55
		反		1500	35	42	55

进行坡口的多层焊时, 可使带极与焊接方向成45°方向。其规范见表8.1.10。

表8.1.10

窄坡口多层焊焊接条件 (交流)

坡口形状与电极位置	层 数	电 流 (A)	电 压 (V)	速 度 (cm/min)
	1—6	600	34	50
	7—20	700	35	50
	21—30	750	38	50
	31—38	720	38	50
	39	650	38	50

带极UH—45 (1.2×8)

焊剂G60 (12×150)

带状电极的多电极焊一次可焊38mm厚的板, 其规范可见表8.1.11。最近还进行了80mm厚板的两面各一层的多电极焊, 其规范见表8.1.12。焊得的焊道良好。

表8.1.11

对接多电极焊接条件

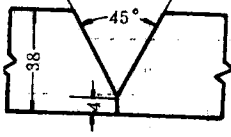
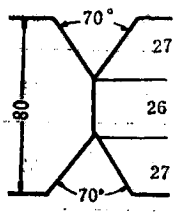
坡口形状	电极	带极尺寸	极性	电 流 (A)	电 压 (V)	速 度 (cm/min)	极间距 (mm)
	前	1.2×8	直流反接	1200	31	38	190
	后	1.2×20	交流	2200	43		

表8.1.12

板厚80mm两面焊接规范

坡口形状	焊接侧	电极	电极尺寸	电 流 (A)	电 压 (V)	速 度 (cm/min)	伸出长 (mm)	极间距 (mm)
	正 面	前	1.2×15	2280	38	30	40	210
		后	1.2×25	2000	40		60	
	反 面	前	1.2×15	2200	38	30	40	210
		后	1.2×25	2000	40		60	

二、堆焊[4、10~12]

堆焊是化工、石油和原子能容器获得耐腐蚀衬里的重要工艺方法之一。全面评价堆焊衬里的重要参数有三个：稀释率、堆焊生产率 and 堆焊层厚度。最低的稀释率是最重要的因素，它决定堆焊层的金相组织和抗腐蚀性能，而堆焊层的厚度和生产率影响成本。

各种堆焊方法的熔敷率、稀释率和堆焊层厚度可见表8.1.13。

表8.1.13

各种堆焊方法的熔敷率、稀释率和堆焊层厚度

堆 焊 方 法	熔 敷 量 公斤/小时	最低稀释率 %	最小堆焊厚度 (毫米)	电 极 形 状
涂料焊条手工堆焊	2	20	2.4	涂 料 棒
钨极惰性气体保护焊	3.2	10	2.4	棒 丝
钨极惰性气体保护焊加热焊丝	7	25	2.4	焊 丝
金属极惰性气体保护焊	5.5	30	3.2	焊 丝
金属极惰性气体保护振动焊加冷丝	11.5	10	4	焊 丝
埋弧振动焊	6.8	20	3.2	焊 丝
串联电弧焊	12	15	4	焊 丝
串联电弧焊加冷焊丝	15	15	4.8	焊 丝
埋弧自动焊	9	30	4	焊 丝
加热丝的埋弧焊	13.5	15	—	焊 丝
带极埋弧焊	36	10	3	钢 带
管状焊丝的无气体保护焊	6	25	4	管 焊 丝
粉末等离子堆焊	3.2	5	0.3	粉 末
热丝等离子弧堆焊	27	2—10	—	焊 丝

化工、石油和原子能容器中常用的几种堆焊方法的比较列于表8.1.14。

表8.1.14

几种堆焊方法的比较

参 数		I 三丝法	I 带极法	II 振动T ² R法	IV 加冷丝振动法	V 手工焊法	VI 热丝等离子法	备 注
堆焊层形状	堆焊层厚度(mm)	347—一层 8 _{max}	374—一层 7 _{max}	374—一层 8 _{max}	347—一层 6 _{max}	第1~2层 309 打底 第3~4层 347	堆焊一层 3.2~4.8	I 易产生咬边
	平滑度	平	平	凸	平滑, 波形粗	凹凸较多	小 (2~10%)	
堆焊层质量	稀释率	小	小	大	稍大	大		
	裂缝敏感性	—	—	比I、II稍大	小	小	小	V 有少量增Si
堆焊层成分	—	—	—	—	cb/c收得率高	第二层后合格	堆 一 层 合 格	裂缝敏感性小
	对母材影响	小	大	大	小	极 小	小	
焊 接 效 率	—	C	B	D	E	F	A	A(最好) > B > C
	—	C	B	D	E	F	A	> D > F(最劣)
经 济 性	—	—	—	—	—	—	—	对 I 为保证圆度, 内壁必须机加工
	—	—	—	—	—	—	—	—
适用 范围	筒 体	直径700mm以上	直径700mm以上	小 筒 体	小 筒 体	小 筒 体	760mm直径以上	
	封 头	直径700mm以上	不适用于小封头	小型半球和碟型	小型半球和碟型	小型半球和碟型	小型半球和碟型封头	
其 它	接管	接管的堆焊层	—	狭 处	狭 处	全 位 置 焊	—	
	母 材 状 态	NT+QT	NT	NT	NT+QT	NT+QT	NT+QT	

注: NT—正火+回火, QT—淬火+回火。

目前大面积堆焊用带极埋弧焊工艺最为普遍。因为其生产率高,可达36kg/h,质量较好,也较稳定,易操作,较经济。带极一般厚0.4~0.5mm,宽50~75mm,最厚可达1.5mm,最宽可达120~150mm。在带极堆焊中美国有采用填加冷带的方法,可以提高熔敷率达45kg/h,稀释率低,达13%。

近来推荐加热丝的等离子弧堆焊。用等离子热源,热量大,强度集中,从焊炬到工件距离可相当大,这样有足够空间引进填充焊丝和在弧区对其操作。故其特点是焊缝稀释率小,甚至可控制在2%,堆焊铜合金时稀释率可低于2%。另外,可以在同一稀释率下堆焊出薄的和厚的焊层,在平板上堆焊层厚4.8mm时,堆焊生产率是27kg/h,如堆焊层厚3.2mm,则生产率是15.9kg/h,而稀释率小于10%。大多数压力容器的堆焊中保证必要的化学成分的厚度是3.2mm,大于这个厚度是不必要的,只能提高加工成本。这样加热丝的等离子堆焊就显出其优越性。

堆焊材料与相应的堆焊方法可见表8.1.15。

表8.1.15

材 料	方 法	应 用
308L, 316, 316L, 347	带极、串联、多丝、摆动埋弧焊, 手工焊, TIG, 热丝等离子堆焊。	原子能, 石油精炼反应器, 换热器及其它化学装置
铁素体不锈钢 13Cr-Nb	手 工 焊	石油精炼反应器
铜和铜合金 (铝青铜, 脱氧铜)	MIG 振动堆焊, TIG 堆焊, 加热丝等离子弧堆焊。	用海水的换热器和其它化学装置
镍和高镍合金 (镍, 蒙乃尔, 因科镍, 哈斯特罗依)	MIG, TIG 振动堆焊, TIG 摆动堆焊, 手工焊, 丝极、带极埋弧焊, 加热丝等离子堆焊	原子能、火电厂用给水加热器, 石油分离器, 闪蒸罐, 其它化学装置

在不锈钢堆焊时,一般焊层中铁素体相即 α 相控制在10~15%,低了易产生裂纹,高了在高温使用时易产生脆性的 σ 相。

三、电渣焊^[2,13]

电渣焊是现今厚壁压力容器纵缝焊接的重要工艺,用得很普遍。其最大特点就是效率高,一根焊丝相当于埋弧焊的20—30倍。为了提高电渣焊效率,减小输入热,改善接头性能,采用板极电渣焊、熔嘴电渣焊以及用向熔池加金属粉末的电渣焊。熔嘴电渣焊工艺没有多大变化,比起丝极电渣焊来有效率高、工艺装备和过程较简单的特点,已有实用例。据文献^[13]介绍,向熔池加金属粉末的电渣焊方法,其原理可见图8.1.7。加入金属粉末的粒度是0.2~1.6mm,小了布散困难,大了使生产率降低。送入熔池的粉末与焊丝重量比是1~1.2,据此选择的焊接规范见表8.1.16。这种方法与通常方法比较,输入热小,约只有一半,而焊接速度提高一倍,同时改善了接头性能。这种方法在高炉制造上试用过,还待进一步扩大应用。

电渣焊虽有生产率高的优点,但由于熔深大,要调整熔敷金属化学成分,焊接量大,要考虑变形问题。对于这两个问题比较好解决。然而由于焊接热量大,冷却速度极小,焊接区的韧性恶化。这在厚壁压力容器生产中,目前除了焊后热处理(正火,正火加回火或调质)外,还没有其它好办法。所以在压力容器主要用于焊纵缝。

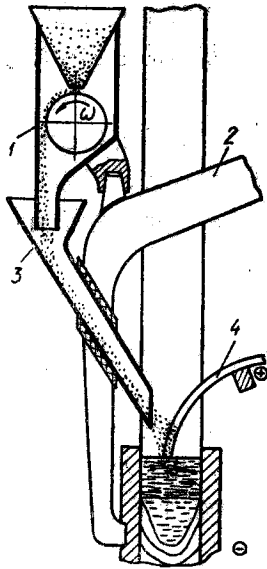


表8.1.16 加金属粉末电渣焊的规范

板 厚 (mm)	间 隙 (mm)	送 丝 速 度 (m/h)	焊 接 电 流 (A)	焊 接 电 压 (V)	平 均 速 度 (m/h)
25	25	292	750~800	42~44	7
30	25	292	800~850	43~45	6
40	25	382	900~1000	50~55	5
50	26	382	900~1000	50~55	4.5
60	26	382	900~1000	50~55	4

注：焊丝 $\phi 3$ 毫米，粉末350克/分，直流反接，焊剂AH-8。

图8.1.7 向熔池加入金属粉末的电渣焊原理图

1—计量给料器；2—成形滑块；3—导向管；4—焊丝

四、气——电焊

这种方法是与电渣焊相仿的立向自动焊，焊接在 CO_2 气保护下进行。焊缝通过铜质成型滑块强迫成型。可以采用复合焊丝。因为是立向焊，焊接速度取决于剖口断面。由于断面大，焊接速度迟缓，输入热在 $100\sim 300\text{KJ/cm}$ ，所以热影响区组织粗大，韧性显著降低。最近选用图 8.1.8 那样的 V 形、X 形坡口进行多道焊。虽焊道数增加，但可抑制焊接热量在 $70\sim 90\text{KJ/cm}$ ，能保证热影响区冲击值。这种方法多用于容器的现场立焊，如大直径薄壁容器的纵缝，球形容器的纵缝的焊接。所焊的材质可扩大到 60 公斤级高强度钢，今后可能作为效率高的现场自动焊被广泛采用。

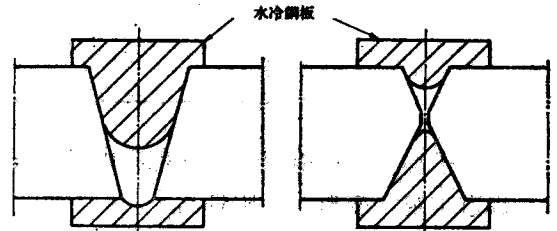


图8.1.8 气-电多层立焊图

五、 CO_2 气保护焊

这种工艺分用实芯焊丝和复合焊丝两种。近来用实芯焊丝的 CO_2 气保护半自动焊迅速普及以尽可能取代手工焊。对 50 和 60 公斤级高强度钢、低温钢以及 0.5Mo 钢都适用。但用纯 CO_2 气时，对机械性能，尤其熔敷金属的韧性有所限制。根据所焊钢种不同，可采用与氩气的混合气，因此用途有所扩大。在 CO_2 中混入氧气能提高效率。如电流密度小，采用短路过渡方式就可进行全位置焊。最近采用脉冲方式，发明了全位置焊机。

由于 CO_2 气保护焊时产生的烟尘很大，影响操作者的健康，所以近来研究在焊炬上附加吸烟尘的系统，据称效果较好，可用于生产（可见前章）。

六、惰性气体保护电弧焊

金属极惰性气保护焊亦即 MIG 焊是在氩或氦的保护下进行的，可进行自动或半自动焊，

焊接的材料相当广泛。但氩气昂贵，故成本高，只有在不能采用埋弧焊时才采用此法。有色金属的焊接，衬里和堆焊中还少不了这种方法。这种方法中目前研究得多的是加脉冲电流的焊接，以改善焊接金属的过渡，稳定电弧以及有利于全位置焊。

钨极惰性气保护焊，亦即 TIG 焊主要用在管子与管板的焊接，并且焊接过程已实现数控自动化，取代手工焊。另外，TIG 法的重要用途是容器或管子接缝的打底焊，因为它能很好调节焊接热量得到必要熔深，又是低氢焊接过程，故对防止高强钢焊缝根部裂缝很有用。

七、等离子弧焊

等离子弧首先用于切割，1965年后才开始用于焊接。起先是焊薄的金属，而后用于焊接较厚的金属，近来又研究用于焊高强和超高强钢^[15]。

等离子弧焊按电流可分为两大类：一是小电流（0.5~50 A），用于焊接0.05~2mm 厚的金属，通常称微弧或针型弧等离子焊；另一是大电流（50—500 A），用“小孔效应”成形法单道焊接2—13mm 厚板材。其焊接界限厚度见表8.1.17。在目前条件下，超过这个界限厚度时，作用在熔池上的力不能保证熔池不下漏。

表8.1.17 目前等离子焊的板厚度

材 料	稳定的焊接范围 (mm)	界 限 厚 度 (mm)
Ti和Ti合金	2—8	13
Ni合金	3—6	—
不锈钢	3—8	13
软 钢	4—7	10
低合金钢	2—7	—

等离子焊在其所能焊的厚度范围内可不开坡口，不加填充金属，不用垫板，一次焊接成形，焊道美观，变形小，质量高。

厚板焊接中可用等离子焊封底，而后用其它焊接方法填满坡口。等离子焊打底可以从坡口一侧进行，也可从坡口背面进行。

八、电子束焊^[16]

电子束焊能保证得到很窄的焊缝，熔深与熔宽之比为10：1。焊接75~125mm 厚的板可一道焊成。焊接速度130~150mm/min。由于线能量小、变形小、生产率高，所以电子束焊在厚壁工件焊接中是有前途的工艺之一。但另一方面，设备复杂、成本高、要求真空，所以妨碍了它在大型结构焊接中的应用。电子束焊接是机械化的焊接方法，而聚焦的电子束直径很小（0.2~1mm）。因此对接头的机械加工要求和对接头装配质量要求很高。

虽然已有了大尺寸部件的电子束焊接试验，但目前主要用于航空结构。对这些贵重工件采用电子束焊是有效的。这种方法用于厚壁压力容器的焊接主要问题是难以达到焊前的优质装配。很难进行高精度的机加工。因此，必须研究在不降低焊缝质量的前提下增加间隙进行焊接的可能性。

英国焊接协会进行了一系列试验后认为，电子束焊用于压力容器的焊接前，需要解决