

组焊式电阻炉用于压力容器 焊后热处理的实践

李树茂¹ 任志峰² 李 巍²

(1.北京燕山扬威装配炉技术研究所有限公司 北京 102502)

(2.中石化北京燕山分公司研究院 北京 102500)

大型压力容器焊后整体焊后热处理分成炉内、外两大类。炉内焊后热处理要有大型炉窑,在组焊式电阻炉前,所有大型炉窑的位置、形状、尺寸、容积、功率都是固定不变的,它不能搬到工程的施工现场进行热处理服务,还经常碰到炉膛容积和容器大小不相适应的难题;炉外整体焊后热处理的基本原理是将容器本身当成1台“炉子”或“烟囱”,对容器外壳进行保温,在容器的内部进行加热以达到消除壳体残余应力之目的,有“热风法”、“内部燃烧法”及“内部电热法”等,这些方法可解决一些大型压力容器现场热处理的难题,但却存在着保温材料价格贵、强度低、施工中损耗大、成本高、保温工作艰苦,影响操作人员的健康和不利环保等诸多问

题,而且仅适用于无内件的空壳容器,钢制压力容器的焊后热处理应优先采用在炉内加热的方法。大型压力容器的制造急需一种技术上先进、质量上稳定、用起来方便、应用范围广泛而成本又相对较低的热处理装备。

1 组焊式电阻炉的应用和发展

组焊式电阻炉一面世,就成功地用于按美国ASME规范制造的出口压力容器的焊后热处理^[4]。1998年利用该技术对高80m、重800t、内径6.8m的天津石化聚酯二甲苯塔的锥体过渡段施以焊后炉内整体热处理;2000年对重500t、最大内径8.9m的催化裂化装置再生器进行分段炉内焊后热处理。在大量实

参考文献

- 1 SIEUR IN H, SANDSTROM R. Austenite Reformation in the Heat2affected Zone of Dup lex Stainless Steel 2205. Materials Science and Engineering, 2006, 418 (1) : 250~256
- 2 URENA A, OTERO E, UTR ILLA M V, et al. Weldability of a 2205 Dup lex Stainless Steel Using Plasma Arc Welding. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182 (3) : 624~631
- 3 E.F. Rybicki, R.B. Stonesifer, Computation of residual stresses due to multipass welds in piping systems. Trans ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 1979, 101: 149~154
- 4 王宽福. 压力容器焊接结构工程分析. 化学工业出版社, 1998
- 5 谢大吉. 磁测法测定焊缝残余应力. 工程力学, 1999, 11 (9): 68~71
- 6 陈芙蓉, 霍立兴, 张玉凤. 非破坏性测量焊接残余应力方法的应用现状. 焊接技术, 2001, 3: 24~27
- 7 Ueda Y. Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding. Japan Welding Soc, 1971, 2(2): 90~100
- 8 汪建华. 管板接头三维焊接变形的有限元模拟. 焊接学报, 1995, 16(3): 66~70
- 9 蒋文春, 巩建鸣, 陈虎, 涂善东. SS304半管夹套焊接部位残余应力三维有限元模拟. 焊接学报, 2006, 27(10): 77~80
- 10 孔详谦. 有限单元法在传热学中的应用. 北京: 科学出版社, 1998
- 11 杨世铭. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1980
- 12 鹿安理, 史清宇, 等. 厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟. 中国机械工程, 2001, 12(2): 183~187
- 13 金晓军, 霍立兴, 张玉凤, 等. 双相不锈钢管道全位置焊接残余应力三维有限元数值模拟. 焊接学报, 2004, 25(2): 52~55

(收稿日期2009-03-11)

际应用中^[5],组装式电阻炉技术得到完善、成熟并和大型化发展。

2001年4月5日由原国家质量技术监督局和全国压力容器标准化技术委员会主持,专家评审委员会对组装式电阻炉热处理技术给予了肯定的评价。

下面就以除氧器为例说明组装式电阻炉的结构特点及在压力容器焊后热处理的实际应用。

2 组装式电阻炉的结构特点

用于除氧器焊后热处理炉(见图1)的主要结构特点如下:

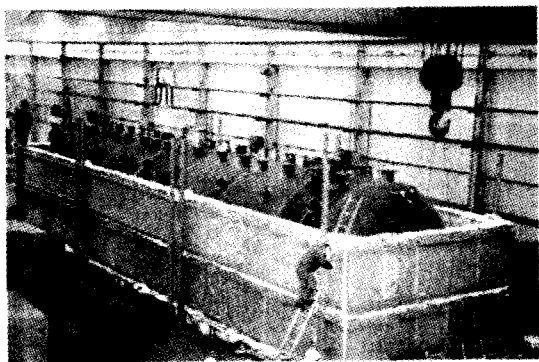


图1 组装中的除氧器热处理炉

1)结构简单、造价低廉:该炉没有一般大型炉窑的台车和炉门。它以大地为炉底,在地面铺上轻质耐火保温材料。炉体四周的炉墙和炉盖都是用炉体板组装拼接而成。不需为炉子建造专用的厂房,配备专用的起吊运输工具,故建炉周期短、投资省、见效快。

2)炉体和电热体均由独立存在的单元构件—炉体板和框架加热器构成。用这些构件可在需要的地点组装成不同形状、大小和功率的热处理炉。为大型容器的现场热处理提供了方便条件。

3)炉体的主要构件—炉体板是采用耐火、保温性能优良的硅酸铝耐火纤维毡压制而成,外面用特制的角钢框加以固定,用它搭建的炉体重量轻、保温好、密封严、热损失小、更易于节电,而且轻便、灵活、强度好、抗热震、耐冲击、可反复拆装,经久耐用,清洁环保。

4)炉子的电热体采用框架加热器可以根据所加热工件的形状、尺寸和质量分布的不同,按需要进行灵活的安装和布置,有利于炉内工件的均匀受

热,提高了炉子的加热质量和热处理效果。

5)炉子的供电和控温系统根据炉子的功率配备1台或多台电脑温控仪,采用多支热电偶控温,功率采用PID调节,利用计算机进行高精度的自动化控制,能很好地满足高标准、严规范热处理加热的需要。

3 除氧器的焊后热处理

3.1 除氧器简介

除氧器是电站中重要设备。该设备长19m,外径4.06m,壁厚30mm,单台重约75t,用16MnR钢制造。

3.2 焊后热处理工艺

除氧器上焊有人孔、法兰和大量的接管,结构、应力复杂,炉内整体焊后热处理工艺按JB/T 4709—2000执行。详见表1。

表1 实际退火结果与JB/T 4709—2000规定的比较

热处理工艺	JB/T 4709—2000 规定	实际退火参数
入炉温度	$\leq 400^{\circ}\text{C}$	室温
400℃以上升温速度	$\leq 5000/8(30)=166^{\circ}\text{C/h}$	52℃/h
升温温差	任意 5000mm 内 $\leq 120^{\circ}\text{C}$	全炉 $<30^{\circ}\text{C}$
退火温度	600~640℃	610~620℃
保温温差	加热区内 $\leq 65^{\circ}\text{C}$	$<10^{\circ}\text{C}$
保温时间	$h \geq 8(30)/(25)h=1.2h$	1.5h
400℃以上降温速度	$\leq 6500/8(30)=216^{\circ}\text{C}$	$\leq 30^{\circ}\text{C}$

3.3 除氧器焊后热处理炉的构造

该炉主要由炉体、电热体和供电控温系统3部分组成。这3部分都是由独立存在的单元体—炉体板、框式电加热器和电脑温控仪构成,相互间用连接件或连接导线连接。

3.3.1 焊后热处理炉的炉体

炉体采用组装式结构,包括炉底、炉墙底座、炉墙、炉盖和炉墙立柱等5部分组成。

炉底是用多层硅酸铝耐火纤维针刺毯或超细玻璃棉被铺成,使用方便、灵活。

炉墙底座是炉墙的基础,是用型钢组焊围成的边框,兼有调整炉墙高度的作用。

炉墙和炉盖是用炉墙板或炉盖板组装而成的,2种板的结构基本相同,都是按炉体结构的要求利用10#工字钢及各种连接件将中间夹有硅酸铝耐火密封材料的多块炉体板拼装成的大块炉墙板或炉盖板。

炉墙立柱是用钢管或型钢组焊成的位于炉墙外侧的立柱,它是炉墙的骨架和支撑,是炉体连接的主要构件。

根据除氧器的大小和实际的装炉方法,此次设计炉体的外形尺寸为:长20.02m,宽4.7m,高4.86m。

3.3.2 电热体

电热体是炉子的热源,由每块功率10kW的框式电加热器组成,其数量由热平衡计算确定,用挂钩挂于炉墙内侧的炉壁上,根据加热工件的形状、尺寸和质量分布的不同按需要进行灵活的布置,以利于炉内工件的均匀受热,提高炉子的加热质量和热处理效果。

3.3.3 供电控温系统

供电控温系统采用电脑温控仪来实现,每台电脑温控仪可控制360kW功率,可配备多支热电偶控温,功率采用PID调节,利用计算机进行自动化控制。其数量由炉子的总功率来确定。

3.4 热平衡计算和加热器数量的确定

组装式电阻炉属周期作业炉,在升温过程中所功率最大,为热平衡计算的根据以确定炉子的总功率,决定安装加热器的数量。

3.4.1 单位时间内最大耗热量的计算

估计炉子的升温时间为10.5h,保温时间为1.5h。

1) 加热工件吸收的热量 $Q_{\text{件}}$

$$Q_{\text{件}} = G_{\text{件}}(C_2 \cdot t_2 - C_1 \cdot t_1) / \tau = 2570071.43 \text{ kJ/h}$$

式中: $G_{\text{件}}$ ——工作的质量(75000kg);

G_2 ——工件在退火温度下的平均比热(0.602kJ/kg·℃);

C_1 ——工件在入炉温度下的平均比热(0.494kJ/kg·℃);

t_2, t_1 ——工件的退火温度(610℃)和入炉温度(15℃);

τ ——工件的升温时间(10.5h)。

2) 加热工装及加热器所吸收的热量 $Q_{\text{工}}$

$$Q_{\text{工}} = G_{\text{工}}(C_2 \cdot t_2 - C_1 \cdot t_1) / \tau = 137070.48 \text{ kJ/h}$$

式中: $G_{\text{工}}$ ——工装及加热器的总质量(约4000kg);

C_2, C_1, t_2, t_1, τ ——取同 $Q_{\text{件}}$ 中相同的数据。

3) 炉衬散失的热量 $Q_{\text{衬}}$ 包括炉墙、炉盖散热和炉底散热2部分,即:

$$Q_{\text{衬}} = Q_{\text{墙盖}} + Q_{\text{底}}$$

$$Q_{\text{墙盖}} = (t_{\text{炉}} - t_{\text{空}}) \cdot S / (\delta / \lambda + 0.0159) = 485762 \text{ kJ/h}$$

式中: $t_{\text{炉}}$ ——炉子的退火温度(610℃);

$t_{\text{空}}$ ——炉外空气温度(15℃);

S ——炉墙和炉盖表面积的和(334.4m²);

δ ——炉体保温层的厚度(0.1m);

λ ——炉体板材料的平均导热系数(0.254kJ/m·h·℃);

0.0159——炉墙外壁的热阻(m²·h·℃/kJ)。

$$Q_{\text{底}} = 2090 \cdot S_{\text{底}} = 2090 \cdot 94 = 196656 \text{ kJ/h}$$

式中:2090——炉底热流强度的近似值(kJ/m²·h);

$S_{\text{底}}$ ——炉底面积(94m²)。

$$\text{则 } Q_{\text{衬}} = Q_{\text{墙盖}} + Q_{\text{底}} = 682418 \text{ kJ/h}$$

4) 炉体积蓄的热量 $Q_{\text{蓄}}$ (设炉墙外表面温度为70℃)

$$Q_{\text{蓄}} = V \cdot \rho \cdot \Delta t \cdot C / \tau = 516601 \text{ kJ/h}$$

式中: V ——炉体体积(包括炉墙、炉盖和炉底)(42.85m³);

ρ ——炉体材料的平均密度(507kg/m³);

Δt ——炉体材料的平均温升(325℃);

C ——炉体材料的平均比热(0.878kJ/kg·℃);

τ ——炉子的升温 and 保温时间之和(12h)。

5) 短路热损失 $Q_{\text{短}}$

$$Q_{\text{短}} = k \cdot Q_{\text{蓄}} = 682418 \text{ kJ/h}$$

式中: k ——热短路系数(取1)。

$$\text{则 } Q_{\text{总}} = Q_{\text{件}} + Q_{\text{工}} + Q_{\text{散}} + Q_{\text{蓄}} + Q_{\text{短}} = 44588578.91 \text{ kJ/h}$$

3.4.2 框式加热器数量的确定

1) 炉子的计算功率 $W_{\text{计}}$

$$W_{\text{计}} = Q_{\text{总}} / 3600 = 1275 \text{ kW}$$

2) 炉子的实际功率 $W_{\text{实}}$

炉子在加热的过程中,为了控制炉温的整体均匀性,各加热区的功率均需要进行PID调节,电脑温控仪能自动调节输出功率比例 P_b 值进行输出。取 $P_b = 0.9$ 。则:

$$W_{\text{实}} = W_{\text{计}} / P_b = 1417 \text{ kW}$$

3) 框架加热器的数量 n 按每块加热器10kW计算,则共需142块。取144块(为三项电网平衡须取三的倍数)

3.5 除氧器退火炉的组装和焊后热处理操作

除氧器退火炉的组装和被加热的除氧器的入炉方式及现场的起吊能力等诸多因素有关。在起吊能力允许的情况下可采取先搭好炉墙,让工件从炉顶装入的“顶装法”;当起重能力允许而起吊高度受限

制的情况下可采取先搭好3面炉墙留下1面炉墙让容器进炉的“端装法”或“侧装法”;而起重能力根本无法满足的情况下则只好采取容器先就位然后围着工件建炉的办法来解决。除氧器退火炉就是按这第3种办法搭建的,所搭建的炉子可以紧凑些。

3.5.1 除氧器退火炉的搭建过程

- 1) 选址、铺炉底、容器就位;
- 2) 组装炉墙板及炉盖板;
- 3) 组焊炉墙底座、立炉墙立柱;
- 4) 搭炉墙、挂框式加热器。

3.5.2 焊后热处理操作

1) 炉子的供电和热电偶的设置

炉子的供电和控温由DWK-A型电脑温控仪来实现。为保证供电和控温安全可靠,本炉共用5台电脑温控仪。

根据除氧器的外型尺寸,设置8个控温点和1个测温点,共用9支K型热电偶(见图2),热电偶热端直接固定在除氧器外壳的表面。在容器两侧各设3点,2端各设1点(R1~R8),所有控温点之间距均不超过5m,为解除对除氧器底部是否存在有低温区的担心,还在其壳体的最下部(腹部)增设1支测温热电偶R9,该热电偶只记录不控温。

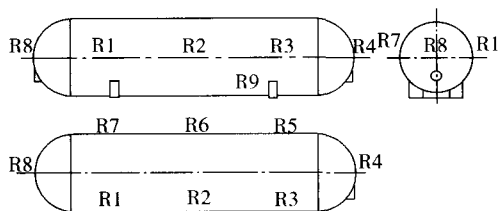


图2 除氧器热电偶布置图

2) 接线、试炉

按规定接好电源到电脑温控仪的1次电缆及电脑温控仪至加热炉的2次电缆,固定好热电偶,接好热电偶补偿导线,做好接线后的自检和互检,确保热电偶与所控制的加热区的互相对应。

待接线工作完成后,即可合上电脑温控仪上的电源空气开关开机试炉。试炉在没有盖上炉盖的状态下区分步进行,目的在于发现问题、查找原因、纠正错误,确保正常开炉后退火工作的顺利进行。

3) 封盖、开炉

接线试炉工作完成后,盖上所有的炉盖板并做

好炉盖的密封,即合上所有的电脑温控仪的空气开关进行正式的开炉。开炉后要按工艺要求设定计划工艺温曲线,设定报警超限值、输出功率比例值,打开温度自动记录仪,炉子即进入自动控制状态。根据经验,在设定工艺温工曲线时,低温时其升温速度可以快一些,以利于缩短总的工艺时间提高生产率;高温特别是接近退火温度时要慢一些,以利炉温均匀,获得更加满意的消除应力效果。

4) 停炉

保温结束后可拆除二次电缆,只保留热电偶和温度自动记录仪使其记录下炉子的降温曲线,待炉温降至400℃以下,即可打开炉盖让除氧器自由降温,全部退火过程即告结束。从搭炉到完成全部退火工作约需2~3天时间。

3.6 退火效果

表1是实际焊后热处理结果同行业标准JB/T 4709—2000的对比。结果表明所有比较项目均符合规定并优于标准。除氧器退火后表面颜色正常,无过热和欠热痕迹。尺寸检查未见变形,未发现任何热处理缺陷。

4 结束语

除氧器焊后热处理的实践表明:组装式电阻炉是一种结构简单、造价低廉、建炉迅速、拆装容易、搬运方便、高效节能、有利环保、加热均匀、工艺性好,并可根据不同容器焊后消除应力退火的实际需要来改变其位置、形状、大小和功率,使用灵活、方便的退火加热炉,它为大型压力容器的现场处理提供了强有力的技术保证。

参考文献

- 1 南京化工机械厂.压力容器现场安装后整体退火.金属热处理,1979(6):38~44
- 2 GB 150—1998 钢制压力容器
- 3 李扬.ZL93 2 20370.1,1994
- 4 杨扬.李树茂研制成功装配式电阻炉.中国专利报1993-10-06
- 5 李树茂,任志峰,李巍.组装式电阻炉的发展和应用.金属热处理,2008(11):17~21

(收稿日期2009-03-02)