

承压设备焊后热处理工艺

董家利¹ 房务农²

1.中石化南京工程有限公司,南京 210046;2.合肥通用机械研究院有限公司,合肥 230031)

摘要 焊后热处理具有整体性、一次性和终结性等特点,是承压设备制造的关键工艺,但也是最薄弱环节。目前承压设备焊后热处理不规范,大多数公司凭经验操作,热处理后总体效果无正确的评价方法,对承压设备安全已造成重大隐患。安全注册不仅能够解决上述问题,还能提升承压设备焊后热处理技术,推动国内装备制造业关键技术的自主创新。

关键词: 承压设备 焊后热处理 安全注册

中图分类号: TG454

0 前言

焊后热处理是承压设备制造的关键工艺,它不仅直接影响承压设备的制造质量,而且是保证承压设备安全运行的重要条件。

焊后热处理可以改善焊接接头的力学性能和蠕变性能,松弛焊接残余应力,稳定承压设备结构尺寸,软化淬硬区,改善热影响区组织,减少焊缝金属氢含量,提高焊接接头耐腐蚀性能等。如果焊后热处理不能达到设计要求,不仅可能降低承压设备的应用性能(如抗蠕变、耐腐蚀性能等),甚至能够促进裂纹扩展,造成灾难性事故^[1-6]。

由于承压设备焊后热处理涉及范围广、影响因素多、缺乏有效的技术标准,使得国内承压设备热处理实施过程、实施效果都存在很大的差异,因焊后热处理引发的质量事故时有发生,这一现状已经严重影响国内装备制造业的自主创新和技术水平的提升。为了规范焊后热处理过程、提高承压设备制造水平,全国锅炉压力容器委员会提出了GB/T 30583—2014《承压设备焊后热处理规程》,规定了承压设备焊后热处理技术要求。但由于监管不到位、重视程度不够等原因,该标准的实施效果不佳。

文中分析了国内承压设备焊后热处理存在的问题,介绍了安全注册制度实施的要点,提出了解决方案。

1 承压设备焊后热处理特点

1.1 焊后热处理特性^[7-9]

焊后热处理具有整体性、一次性和终结性等特点。无论是整体焊后热处理还是局部焊后热处理,其温度场、应力场和应变场都需从整个焊件考虑,局部分析存在很大的偏差;在焊后热处理执行过程中,部分关键因素不能进行局部调整与变更(如火焰的方向等);焊后热处理效果由整体来确定。

焊后热处理与焊接、无损检测等工艺不尽相同,焊后热处理一次连续完成,焊后热处理质量则也随之确定。某些由于焊后热处理工艺造成的不良后果,通过再次进行焊后热处理无法消除。

焊后热处理是承压设备建造过程中最后一道关键工艺。出现质量问题,补救的成本很高或只能报废。

1.2 评价方法的局限性

尽管评价焊后热处理效果的方法很多,但是这些方法用于评价承压设备焊后热处理的效果均存在不同程度的不足,难以准确评价焊后热处理的全部效果。

评价承压设备焊后热处理效果最直接的方法是产品焊接试件。产品焊接试件是采用与承压设备制造相同的材料、相同的焊接工艺、经历相同的热处理过程完成的试件,通过解剖检验,证明产品的焊接质量。由于承压设备在进行焊后热处理时,各部位经历的热处理时间有差异,而产品焊接试件只能经历一个热处理过程,不能代表承压设备的全部情况。以球罐为例,GB 12337《钢制球形储罐》规定:产品焊接试件布置在球壳热处理高温区外侧,并与球壳紧贴,与球罐一起进行热处理。由于标准没有规定产品焊接试件在焊后热处理时的摆放位置,实际执行过程中,产品焊接试件在球罐焊后热处理时的位置有很大的随

机性。事实上球罐各测温点的保温时间都不相同,如笔者检查某球罐整体热处理时发现,最长保温时间为4 h 55 min,最短则为2 h,那么用产品焊接试件焊后热处理效果代表球罐所有部位的热处理效果就存在了局限性。

硬度也是衡量焊后热处理的指标之一。但是,现行锅炉压力容器标准中既没有规定硬度的合格指标,也没有明确测点位置;某些管道标准参照ASME B31.3规定了硬度测量合格指标,但没有规定测量条件和测量位置,结果的随意性很大。因此,用硬度评价承压设备焊后热处理效果也存在很大的局限性。

焊接残余应力是评价焊后热处理效果的直接方法。但在承压设备上难以有效实施。一方面,尽管焊接残余应力测量方法很多,但对检测环境均有较高的要求,承压设备作为工业产品,难以提供良好的检测条件,降低了检测结果有效性;另一方面,焊接结构中残余应力分布与变动规律难掌握,尤其难以确定厚度方向残余应力的分布规律与极值位置^[10-12],可用于承压设备残余应力的检测方法只能检测表面残余应力,不能提供焊后热处理后残余应力的整体情况,检测结果存在很大的局限性。

此外,由于焊后热处理影响因素很多、影响规律复杂,到目前为止,焊后热处理还是一种实践性极强的制造工艺,许多关键工艺参数仍需要依赖经验确定,没有形成科学的方法,如局部焊后热处理加热宽度、有害的温度梯度、异种类别钢材焊接接头的组织应力等等。编制、审定、批准的焊后热处理工艺,在实施前大多不能准确评价其效果,需要通过具体实施来验证,焊后热处理工艺仍停留在“感性”阶段,急待上升为“理性”阶段。

2 承压设备焊后热处理存在的主要问题

尽管国内承压设备制造技术不断发展,水平不断提高,但承压设备焊后热处理还存在很多问题。这种现状已经成为了承压设备制造技术的发展瓶颈,甚至影响了国内装备制造业的自主创新。这些问题既有设备、工艺问题,也有管理、意识问题,需要引起各方面的重视。国内承压设备焊后热处理主要存在如下几方面的问题。

2.1 焊后热处理设备

热处理炉是整体热处理的常用设备,其质量参数直接影响焊后热处理的效果。目前,国内还没有焊后热处理炉专用标准,大都将加热炉当作焊后热处理炉

使用,也有不少单位使用自制炉或快装炉,这些设备难以按照承压设备的要求获得规定的热处理参数,焊后热处理效果难以保证。

燃烧器是炉外焊后热处理常用装置。目前尚无专用的炉外热处理用燃烧器产品,国内各专业热处理公司大多将锅炉用燃烧器组配成承压设备炉外焊后热处理用燃烧器,由于缺乏相关标准,这些装置能否满足承压设备焊后热处理的产品要求,存在很大不确定性。

陶瓷电阻加热器也是焊后热处理的常用设备,尽管应用很多,却没有有正式标准。行业标准DL/T 819—2010《火力发电厂焊接热处理技术规程》在附录中提出了《柔性陶瓷电阻加热器技术要求》,但仅在电力系统中得到应用,范围有限。据笔者调查,承压设备焊后热处理用柔性陶瓷电阻加热器绝大部分由各家各户组装完成,没有统一的制造标准。

2.2 有效加热区

有效加热区是焊后热处理炉的关键参数,直接影响承压设备焊后热处理效果。GB/T 9452—2012《热处理炉有效加热区测定方法》对有效加热区的定义为:“在加热炉中,经温度检测而确定的满足热处理工艺规定温度及温度均匀性的工作空间”。尽管有效加热区对焊后热处理的影响至关重要,测定方法也有标准,但是仍有约80%的在用焊后热处理炉没有测定有效加热区,部分标明有效加热区的焊后热处理炉的测定方法不符合标准。焊件放入没有测定有效加热区的炉中进行焊后热处理,其温度及均匀性难以保证,用于现场焊后热处理的快装炉更是如此。

2.3 焊后热处理方式

焊后热处理主要包括整体焊后热处理、分段焊后热处理和局部焊后热处理。整体分段焊后热处理与分段整体焊后热处理不同,前者属于局部焊后热处理,而后者属于整体焊后热处理^[13]。

GB 150规定了局部焊后热处理的均温区宽度,没有给出加热区宽度要求。由于影响均温区与加热区关系的因素很多,包括加热方法、加热工艺、被处理焊件结构、保温条件和环境等诸多因素,局部焊后热处理时的加热区宽度只有依靠经验或试验确定,无法在标准中作出规定。曾有单位对于壁厚164 mm厚的容器进行双面加热宽度为1 980 mm局部电加热处理时,均热区的温差才能基本能满足要求^[14]。实际上,很多局部焊后热处理过程中的温度监测不符合标准要求,如果加热宽度不够,难以保证均温区宽度符

合标准要求。

2.4 焊后热处理厚度

焊接过程不仅产生焊接残余应力,也使热影响区的组织与性能发生了变化。焊接残余应力主要由焊缝和局部拘束决定,焊接热影响区大小也与焊缝厚度密切相关,可以说焊缝金属厚度决定了焊接作用的范围与力度,所以焊后热处理厚度是焊缝金属厚度,而不是母材厚度或焊接接头厚度。有些单位将母材厚度或接头厚度当做热处理厚度,结果延长了热处理保温时间,不仅增加了成本,还可能降低被处理焊件性能,甚至可能诱发裂纹造成质量事故。

2.5 焊后热处理工艺参数

焊后热处理工艺参数主要包括:保温温度、保温时间、升温速度和降温速度。

NB/T 47015—2011 规定了各类钢材的焊后热处理规范参数,其实各国标准(欧盟、国际标准中 Fe-1,

Fe-3 可低 50 ℃)规定基本相同,主要从消除残余应力角度考虑,规定了不同类别钢材的最低保温温度和最短保温时间,但这只是焊后热处理的通用性基本要求,并没有考虑焊接接头的使用性能与工艺性能^[15],国内的绝大多数单位将这一要求作为焊后热处理工艺卡上的规定值,这是对标准的误解。

实际上,对于具体材料和性能指标(如强度、韧性、蠕变、消除应力、高温性能、变形等等)都有一个最佳的工艺参数,这个工艺参数需要通过实践经验或试验确定。照抄标准中最低保温温度与最低保温时间,作为产品热处理工艺卡的规定实施数值,很难取得预想的结果^[16]。

以 15CrMoR 钢为例,标准规定最低保温温度为 650 ℃,焊接接头经不同焊后热处理温度试验结果见表 1,以 690 ℃×2 h 为最好;焊后热处理保温时间对焊缝金属冲击韧性影响见表 2,以 690 ℃×4 h 为优^[7],两者并不相同。

表 1 焊后热处理温度对 15CrMoR 焊接接头力学性能和硬度的影响^{①②}

PWHT /(℃×h)	母材		接头	(−20 ℃)冲击吸收能量 KV/J			硬度(HB)		
	R_m /MPa	R_{el} /MPa	R_m /MPa	BM	WM	HAZ	BM	WM	HAZ
技术条件	450~590	≥295	≥295	≥54(平均值);≥47(单个最低值)			≤225		
675×2	480	315~330	540~630	185~235	47~125	90~170	138~143	195~207	170~180
690×2	475	320~325	520~600	185~240	140~230	160~220	135~140	175~185	160~178
705×2	465	315~325	510~570	170~260	130~240	140~240	130~135	165~180	150~170

注:①BM 为母材;WM 为焊缝;HAZ 为热影响区; R_{el} 为屈服强度;②试件厚度为 34 mm,冲击试验取样位置在 1/4T 处。

表 2 焊后热处理时间对焊缝金属(−20 ℃)KV₂的影响^{① J}

PWHT /(℃×h)	SA387Gr11Cl1	A387Gr11Cl2
690×2	41,53,88/61	56,74,96/75
690×4	89,170,227/162	112,194,243/183
690×6	52,60,139/84	51,106,153/103

注:①试件厚度为 34 mm,冲击试验取样位置在 1/4T 处。

GB/T 30583《钢丝绳吊环索》中 4.4.9 对焊后热处理的升温速度、降温速度及温度差都规定了“通用限值”,现在绝大部分焊后热处理工艺卡中都将“通用限值”当成“规定值”来使用。焊后热处理的升温速度与降温速度要考虑温度均匀性、焊件变形、再热裂纹、残余应力、金属间化合物析出等等因素,需依靠试验与实

践来摸索。图 1 表明,加热速度不同,再热裂纹倾向有所不同,加热曲线 2 可以防止合金 B 不裂,但不能防止合金 A 开裂;而曲线 1^[17-19]是提高加热速度,则可同时防止合金 A 和 B 产生再热裂纹,这是因为对于一定

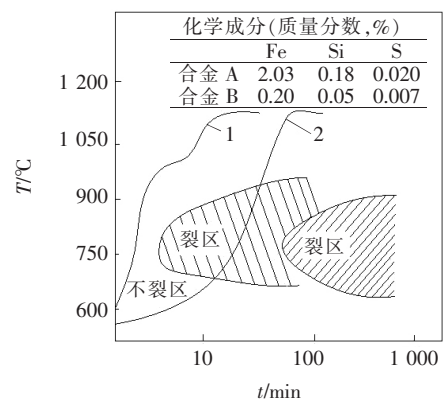


图 1 加热速度与再热裂纹的关系

合金其析出强化速度一定,提高加热速度超过其析出强化速度(或时效硬化速度),就不致形成再热裂纹。

2.6 焊后热处理工艺规程与焊后热处理报告

现行焊后热处理工艺规程和焊后热处理报告也存在很多不足。图 2 是典型的焊后热处理工艺卡,全国承压设备制造、安装企业普遍使用的焊后热处理工艺卡与此基本相同。存在的问题如下:①没有焊后热处理最大厚度;②没有焊后热处理热工计算;③没有焊件热变形预防及控制措施;④没有说明热源及加热方式:油、气、电;⑤没有说明热处理设备或加热器的布置、名称、规格、数量;⑥没有说明测温点数量、布置图、连接焊件方法;⑦没有说明隔热方法、绝热材料及其铺设方法;⑧没有说明控温仪表及测温仪表名称、型号及数量;⑨没有说明工艺程序及技术要求。

产品名称		材料牌号		产品规格		产品编号		工艺过程	
零件名称		重量		零件规格		制造编号		卡 编 号	
热处理后	R _m /MPa	R _e /MPa	A%	Ψ%	KV ₂ J	硬度	冷变形		
性 质									
热处理类别	设备		热处理规范					随炉试板	
☐ 炉内 PWHT			入炉出炉	加热速	保温温	冷却速	冷却方式	☐ 有 ☐ 无 尺寸: __ ×	
☐ 炉外 PWHT			度℃	度℃/h	度℃×时	度℃/h			
☐ 局部 PWHT					间				
☐ 分段 PWHT									
附 图 及 工 艺 说 明									

图 2 热处理工艺卡

图 3 为某厂焊后热处理检验报告,对照上述焊后热处理工艺卡的要求所缺少的条款外,还缺少下列资料:①缺少焊后热处理工艺规程编号;②缺少焊后热处理合同号或委托书编号;③缺少焊后热处理加热方式、加热方法及辅助装置;④缺少焊后热处理炉名称及编号、控温仪表和测温仪表(含热电偶及补偿导线)名称型号及编号;⑤缺少测温点数量及布置;⑥热处理曲线不能分清每个测温点的时间与温度,保温时间显然不对;⑦没有焊后热处理时间、地点及气象环境;⑧没有热处理责任工程师签字。

品名	设备图号	热处理方式	炉次号	热处理工艺参数								
液化石油气脱硫油提塔	70-209/01	电加热整体热处理	1	项目	400℃以上 升温速度 (℃/h)	升温过 程中最 大温差	保温 温度 (℃)	保温 时间 (h)	400℃以上 降温速度 (℃/h)	降温过 程中最 大温差	冷却 方式	
				要求	≤180	≤120	620±20	0.8	≤180	≤120	自然冷却	
				实际	61	110	605-640	1	60	35	自然冷却	
热处理类别	设备		热处理规范					随炉试板				
设备规格: Φ1400×Φ1000×32004×18												
材 质: Q245R												
附: 热处理温度—时间自动记录温度曲线图、热电偶布置图												
结论: ☒ 合格 ☐ 不合格												

图 3 某公司焊后热处理报告

3 承压设备焊后热处理安全注册

安全注册制度是规范制造行为,保证产品质量,提升企业技术与管理水平的有效手段,属于一种行业监管行为或管理体系,这种行业监管体系已经在国内外工业产品制造管理中获得了许多成功应用。安全注册制度依据标准或法规在建立管理体系、规范制造过程、完善产品记录、保证工艺正确实施等方面,对企业或产品进行考核和认证,具备条件的办法证书,不具备条件的不允许从事相关生产活动。GB/T 30583—2014《承压设备焊后热处理规程》提出了承压设备焊后热处理通用性基本技术要求,为规范承压设备焊后热处理行为、保证产品质量提供了技术基础,但由于缺乏有效的监管机制,标准颁布几年来,实施效果不佳,实行承压设备焊后热处理安全注册制度是解决这一问题的有效方法^[19]。为此,全国锅炉压力容器标准化委员会按法规、标准及承压设备行业的需要,发布了《承压设备焊后热处理安全注册管理办法》,并正式开展了承压设备焊后热处理安全注册工作。

承压设备焊后热处理安全注册主要包含以下内容。

3.1 基本条件

- (1)具有独立法人资格,取得企业法人营业执照、组织机构代码证。
- (2)组织机构健全,具有固定的办公场地(所)。
- (3)具有维护保养车间、库房及温度测量校准间。
- (4)建立承压设备焊后热处理工程档案库。
- (5)具有相关的法规和标准,以及相应的技术文件。
- (6)具有承压设备焊后热处理的业绩及相应的档案资料。

3.2 设备、装置

- (1)自备可自动调控加热设备及装置。
- (2)温度测量校准装置。
- (3)温度自动记录装置(含无纸记录仪)。

3.3 人员资格

焊后热处理质量保证工程师及质量控制系统责任人员齐备。

- (1)焊后热处理质量保证工程师(经综合技术考核)。
- (2)控温控制系统责任人员(经加热设备操作考核)。
- (3)测温控制系统责任人员(经现场热电偶布置及确定试验考核)。

(4)电容储能热电偶焊接人员(经现场热点偶焊接操作考核)。

(5)温度测量仪表(含热电偶)校准工(已经省市有关部门培训考核)。

3.4 焊后热处理质量保证体系

依据焊后热处理特点和本单位的实际情况,按照安全技术规范、标准的要求,建立焊后热处理质量保证体系,制定焊后热处理控制的范围、程序、内容。

任命焊后热处理责任工程师,以及控温、测温 and 隔热责任人员,规定相关职责。

焊后热处理炉、加热器、控温仪表、测温仪表(含热电偶及补偿导线等)应编号,确保可追溯。

根据企业实际情况,编制下列焊后热处理规程或规定,以规范焊后热处理的操作与管理^[20]。

(1)承压设备焊后热处理工艺通用规程。

(2)承压设备焊后热处理准备及交验程序规定。

(3)计量仪表、热电偶校准操作规程。

(4)测量仪表操作规程。

(5)测量系统定期交验规程。

(6)热电偶电容储能焊接规程。

(7)承压设备隔热层包覆规程。

(8)焊后热处理用加热设备操作规程。

(9)承压设备焊后热处理控温规程。

(10)承压设备焊后热处理热电偶布置及确认试验规程。

(11)热变形无害处置操作规程。

(12)焊后热处理安全规程。

(13)承压设备焊后热处理工程资料存档规定。

4 结论

承压设备焊后热处理具有整体性、一次性和终结性的特点,既是其制造过程中重要工艺,也是最薄弱环节。针对目前大家对焊后处理的概念理解不深,单位和个人均缺少相关资质,因此给设备埋下了较大的隐患,急需进行规范。

承压设备热处理单位安全注册是解决上述问题的有效方法,且非常必要。安全注册不仅能够解决焊后热处理存在的问题,还能使国内承压设备焊后热处理技术从“感性”阶段上升到“理性”阶段,进而推动国内装备制造业关键技术的自主创新。

参考文献

[1] 日本高压技术协会 SR 委员会. 压力容器焊后热处理

[M]. 北京:机械工业出版社,1987:3-4.

[2] 王笑梅. 压力容器先进技术[C]. 合肥:第八届全国压力容器学术会议论文集,2013:8.

[3] 汪建华,陆皓,魏良武,等. 局部焊后热处理两类评定准则的研究[J]. 机械工程学报,2001(6):24-28.

[4] 陆皓,汪建华,村川英一. 基于粘弹塑性理论局部焊后热处理评定准则[J]. 上海交通大学学报,2001(3):427-430.

[5] 汪建华,陆皓. 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论[J]. 焊接学报,2002(3):75-79.

[6] 陈志华,涂善东,王正东. 大型球罐整体热处理改进方法与数值模拟[J]. 金属热处理,2004(3):43-45.

[7] 戈兆文. 10 000 m³ 球罐焊后热处理工艺验证与实施[J]. 压力容器,2016,33(9):2-4.

[8] 刘超锋,刘亚莉,许培媛,等. 国内球罐焊后热处理技术[J]. 压力容器,2006(09):38-43.

[9] 汪建华,陆皓. 局部焊后热处理最佳加热条件的研究(二)——临界加热宽度的确定准则[J]. 压力容器,1999(2):10-13.

[10] 王宽福. 压力容器焊接结构工程分析[M]. 北京:化学工业出版社,1998:34-35.

[11] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. NB/T 47015—2011 压力容器焊接工艺规程[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

[12] 戈兆文. NB/T 47015《压力容器焊接规程》的技术基础[J]. 中国特种设备安全,2013,29(1):53-55.

[13] 李世玉. 压力容器设计工程师培训教程[M]. 北京:新华出版社,2005,325-326.

[14] 赵沛雄. 大型厚壁局部热处理参数研究[C]. 合肥:第八届全国压力容器学术会议论文集,2013,803-805.

[15] 禹小伟. 铬钼钢承压设备焊后热处理工艺的探讨[J]. 压力容器,2007,24(9):49-51.

[16] 中国机械学会焊接学会 焊接手册第2卷[M]. 北京:机械工业出版社,2001:142-143.

[17] 王泽军. 球形储罐局部消应力热处理的机理与效果评价研究[D]. 天津:天津大学博士学位论文,2007.

[18] 吕宵宵,赵毅红,陆华峰,等. 10 000 m³ 球罐整体热处理温度场三维模拟及实验验证[J]. 机械工程与自动化,2015(4):63-64.

[19] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB/T 30583—2014,承压设备焊后热处理规程[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

[20] 戈兆文,高驰. 对“压力容器焊接规程”标准的思考[J]. 压力容器,2006(8):1-6.

作者简介:董家利,1976年出生,高级工程师。主要从事石油化工储运工程技术工作。