

药芯焊丝电弧焊在核电工程中的应用

马迎兵, 李哲

中国核电工程有限公司 北京 100840

摘要: 在核电建设过程中, 焊材用量十分巨大, 核电现场的焊接施工中以焊条电弧焊为主, 焊接效率较低, 在一定程度上制约了核电建设的进度。近年来, 随着药芯焊丝电弧焊在其他行业应用的逐渐推广, 该方法在核电工程的应用也越来越多, 但与国际先进水平相比, 药芯焊丝电弧焊的应用还存在多方面的限制。通过对诸多限制因素的阐述和分析, 若能够切实有效地加强对药芯焊丝生产、储存、使用等方面的质量控制, 该方法在未来的核电建设过程中可以发挥更大的作用。

关键词: FCAW; 药芯焊丝; 核电标准

1 序言

近年来, 随着我国在建核电项目的增加, 核电现场的焊接量也大幅增加, 在焊接施工过程中, 如何在保证焊接质量的前提下提高焊接效率, 是核

电站各建设单位的重点关注方向。据了解, 核电现场的结构类焊缝主要以焊条电弧焊为主, 焊接效率低, 且连续施焊也对焊工有更高的要求。

药芯焊丝电弧焊(以下简称“FCAW”)具有

上的应力变化是先增后减。

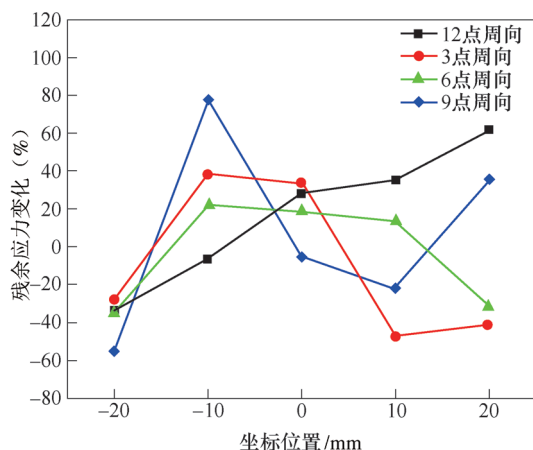


图11 各位置热处理前后轴向残余应力变化趋势

经分析, 管道环焊缝轴向残余应力和周向残余应力经热处理后其残余应力变化趋势相似。

6 结束语

对于P91管道窄间隙全位置TIG自动焊接头而言, 原始焊态与热处理状态下轴向和周向的残余应力分布特点相似, 但热处理可以改善残余应力分布特点。

1) 原始焊态环焊缝, 焊缝中心处为残余压应力, 随着与焊缝中心处的距离增加, 开始出现残余拉应力; 热处理状态环焊缝, 在焊缝中心附近区域为残余拉应力, 离焊缝中心一定距离处为残余压应力。

2) 轴向残余应力和周向残余应力经热处理后, 其残余应力变化趋势相似。

参考文献:

- [1] 张凡志, 李晓晖, 楼玉民, 等.300MW机组主蒸汽管道焊缝表面裂纹成因分析及处理[J].浙江电力, 2015, 34 (10): 29-32.
- [2] 武云龙, 徐祥久.P91与P22低匹配材料的焊接接头研究[J].金属加工(热加工), 2020 (8): 28-30.
- [3] 姜运建.P92钢焊接残余应力场及对高温寿命的影响研究[D].天津: 天津大学, 2011.
- [4] 王影建, 梁艳玲, 星建民, 等.T91小径仪表管焊材选用工艺试验[J].金属加工(热加工), 2020 (11): 42-44.
- [5] 李华.盲孔法测量非均匀残余应力时释放系数的研究[D].合肥: 合肥工业大学, 2012.

MW 20210215

成形好、焊接效率高等优点，作为一种高效的焊接方法，已在石油、造船等行业有了一定范围的应用，如果能在核电工程中进行推广应用，将会大幅提高焊接生产效率。但由于核电行业的特殊性，尤其是在日本福岛事件发生后，核电安全被提到了前所未有的高度，如何保证核电安全是各方考虑的头等大事。

FCAW在核电工程的应用较为有限，目前主要用于预埋件、次要钢结构等非重要焊缝的焊接，若要应用于核级管道、运输容器、主要钢结构等重要设备，还需在多个方面做进一步研究。本文通过对FCAW特点和在核电应用的分析，探讨FCAW在核电工程中的注意事项及应用前景。

2 FCAW的特点

FCAW是以可熔化的药芯焊丝作为一个电极，母材作为另一极，通常采用纯CO₂或CO₂+Ar气作为保护气体，焊接时在电弧的热作用下熔化状态的焊丝金属+焊剂、母材金属和保护气体相互之间发生冶金作用，同时形成一层较薄的液态熔渣包覆熔滴并覆盖熔池，对熔化金属形成了又一层的保护。

与普通熔化极气体保护焊相比，FCAW具有以下特点：

(1) 优点 采用气渣联合保护，焊缝成形美观，电弧稳定性好，飞溅少且颗粒细小；焊丝熔敷速度快，熔敷效率（85%~90%）和生产率都较高（比焊条电弧焊高3~5倍）。

焊接各种钢材的适应性强，通过调整焊剂的成分与比例，可提供所要求的焊缝金属化学成分；焊接效率高（对比焊条），适用于自动焊接、半自动焊接；焊接利用率高（对比焊条），焊丝利用率远超焊条，同样重量下焊丝比焊条性价比更高。

(2) 缺点 焊丝制造过程复杂；焊丝外表容易锈蚀，焊剂混合物易吸潮，因此需要对焊丝的保存严加管理。

3 核电主要标准

(1) RCC-M 在制造篇中限制FCAW为半自动焊，且主要用于碳素钢铸件的补焊；在支承件H篇和小型设备E篇中允许使用药芯焊丝，并规定了组批原则和验收试验要求。另外，强调对于奥氏体不

锈钢焊丝，需增加进行铁素体含量测定。

(2) ASME 基本未对FCAW进行限制，只是在QW-409.2中，限制了FCAW的过渡模式，即从喷射过渡、颗粒过渡或者脉冲过渡改变为短路过渡；反之，需要重新评定焊接工艺。

在材料篇的SFA5.20、SFA5.29、SFA5.36分别详细规定了碳素钢药芯焊丝和低合金钢药芯焊丝的各项性能，包括化学成分、力学性能等详细数据。其中，在SFA5.36中表6中提到，如果化学成分中添加硼元素或 w_B 超过0.001%必须报告。

(3) NB/T 47018—2017 在NB/T 47018—2017标准中，规定碳素钢和低合金钢药芯焊丝应为碱性渣系；并规定在订货合同中需包含保证药芯成分、药芯填充均匀性的具体内容和检验方法，以及打开真空包装后的药芯焊丝保证熔敷金属扩散氢含量的措施。

另外，虽然在NB/T 47015—2011标准正文未采用药芯焊丝，但在后附编制说明中提到“目前还没有成熟的适用于锅炉压力容器药芯焊丝渣系，对药芯粉料的均匀性、熔敷金属化学成分、力学性能的稳定性和没有达到应用于压力容器焊材的水平”。

(4) GB 50661—2011 本标准未限制FCAW的使用，在常用钢材的焊接材料推荐表中给出了FCAW的焊丝型号和标准。另外，还规定了免于评定的焊接方法及施焊位置。

4 核电应用现状及思考

据笔者了解，目前已在核电工程中应用FCAW焊接方法（见表1）的核设备包括次要钢结构、预埋件、LX抗甩击、钢衬里背肋角钢等，母材材质均为碳素钢。

表1 核电工程中FCAW的应用

设备名称	母材型号	焊材型号
次要钢结构	Q355、Q390	E501T-1
预埋件	Q235B、Q355B	E501T-1
LX抗甩击	Q390	E501T-1
钢衬里背肋角钢	20HR	E501T-1

从已应用的设备可以看出，核电项目对FCAW的使用是非常谨慎的。通过对现有核电相关标准和

现场应用的分析,笔者认为,主要有以下几个方面需要考虑或改进。

(1) 药芯焊丝的生产过程 药芯焊丝与实芯焊丝相比,主要区别在于药芯焊丝内部装有焊剂混合物,而焊剂混合物在焊丝生产过程中能否做到均匀一致,对于焊丝使用的稳定性影响很大,这对生产焊丝的设备要求较高,不但要保证填焊剂的稳定性,还需要在填加过程中能够根据焊剂混合物的密度进行及时调整,难度较大。这对焊材生产厂家提出了更高的要求,需要在焊丝生产设备、焊丝焊剂混合物的研发等方面多下功夫,在焊丝生产过程中多积累数据,并加大对焊丝成品的抽检比例;同时,药芯焊丝的使用单位也需在焊材生产过程中加强质量控制,全程监督焊丝的生产过程,保证焊丝的出厂质量。

(2) 药芯焊丝的储存和使用 由于焊接接头裂纹的产生很大程度上受扩散氢的影响,因此目前已在核电工程中应用的FCAW方法都是使用的低氢型药芯焊丝,对熔敷金属的扩散氢含量进行严格控制,这也对药芯焊丝的储存和使用提出了很高的要求。

首先,药芯焊丝出厂时需要进行真空包装,焊丝使用单位在焊丝入库时需确保真空包装无破损,并制定严格的焊材库温湿度要求,确保焊丝的干燥。

其次,药芯焊丝一旦打开包装使用,需控制严格的暴露时间,在AWS D1.8—2016中推荐暴露在空气中的最长时间 $\leq 72\text{h}$;当厂家推荐的最长暴露时限超过上述要求时,焊丝生产厂家应证明药芯焊丝暴露在最苛刻的时间、温度和湿度限值的条件下满足规定的扩散氢要求值。另外,超出上述时限的药芯焊丝不允许再次烘干。

(3) 药芯焊丝的硼含量控制 通过文献[7]对硼含量与裂纹关系的描述,可以看出硼含量对焊接接头裂纹的产生有很大影响,因此需要在焊丝生产过程中严格控制微量元素硼的含量;在ASME材料篇的SFA5.36中也指出,如果化学成分中添加硼元素或 w_B 超过0.001%必须报告。

(4) 焊材生产厂家的重视程度 焊材生产厂家需提高对药芯焊丝生产过程的重视,体现在生产过程的全流程监督和管理,包括原材料的检测、关

键工艺人员的培训、质检人员责任心的培养等。另外,厂家需对质量保证体系重视,建立针对核级焊材的生产质保体系文件,并通过不定期的内外部质保监查确保多批次焊丝的质量稳定性,同时为焊丝使用单位提升信心。

(5) 使用单位的人员培训 由于药芯焊丝的特殊性,需要在储存和使用过程中严格遵守相关规定,如果在使用过程中由于人为的疏忽,可能会造成较为严重的后果,比如焊缝裂纹的产生。因此,对于参与药芯焊丝储存、使用的相关人员的技能和责任心培训显得很重要,建议使用单位组织专门的队伍,对药芯焊丝的储存、焊接工艺评定的制定、焊接实施过程进行全方位培训和监督,制定切实有效的实施办法;与此同时,注意积累焊接相关数据,为后续在更大范围内的使用积累应用经验。

参考文献:

- [1] 法国核岛设备设计和建造规则协会.Design and construction rules for mechanical components of PWR nuclear islands: RCC-M—2017[S].法国:法国核岛设备设计和建造规则协会,2017.
- [2] ASME.Boiler & Pressure Vessel Code: ASME-2017[S].USA: ASME, 2017.
- [3] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.承压设备用焊接材料订货技术条件:NB/T 47018—2017[S].北京:新华出版社,2017.
- [4] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.压力容器焊接规程:NB/T 47015—2011[S].北京:新华出版社,2011.
- [5] 中冶建筑研究总院有限公司.钢结构焊接规范:GB 50661—2011[S].北京:中国建筑出版社,2011.
- [6] AWS.Structural welding code-seismic supplement: AWS D1.8/D1.8M—2016[S].USA: AWS, 2016.
- [7] LEE H W. The relationship between Boron content and crack properties in FCAW deposited metal[J]. Welding Journal, 2006,85 (6) : 131-136.

MW 20210401