

## 电解抛光工艺对 AP1000 管座焊接表面的改善作用

黄军波, 何毅, 殷福星

(中国一重能源装备材料科学研究所, 天津 300457)

**[摘要]** 研究了 AP1000 上封头 CRDM 管座用焊接镍基合金的电解抛光工艺条件, 探讨了电解抛光对其表面粗糙度和应力的改善作用。结果表明: 焊接镍基合金的抛光电流密度应控制在  $0.3 \sim 0.5 \text{ A/cm}^2$  之间, 抛光时间宜为  $2 \sim 5 \text{ min}$ ; 电解抛光使表面拉应力大幅度减少, 甚至产生压应力, 这可抑制焊接镍基合金应力腐蚀开裂的发生。

**[关键词]** 焊接镍基合金; 电解抛光; 表面粗糙度; 表面应力

**[中图分类号]** TG175

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2013)05-0070-04

### Improvement of Electro-polishing on the Welding Nickel-based Alloy Surface of AP1000 CRDM Nozzle

HUANG Jun-bo, HE Yi, YIN Fu-xing

(Materials Research Institute for Energy Equipments, China First Heavy Industries, Tianjin 300457, China)

**[Abstract]** Electro-polishing process for the welding nickel-based alloy of AP1000 upper head CRDM nozzle was studied. The improvement on the surface roughness and residual surface stress were investigated. The results show that the current density should be controlled in the range of  $0.3 \sim 0.5 \text{ A/cm}^2$  and the polishing time should be within  $2 \sim 5 \text{ min}$ . The residual stress tests in surface demonstrate that tensile stress is remarkably decreased, and even pressing stress is induced by the electro-polishing process, which may restrain the occurrence of stress-corrosion cracking in the welding nickel-based alloy.

**[Key words]** welding nickel alloy; electro-polishing; surface roughness; surface stress

目前, 镍基合金焊接被广泛应用于核电设备的关键连接部位, 如压水堆核电站中压力容器上封头控制棒驱动管座(CRDM)、压力容器和蒸汽发生器接管安全端等。在焊接的接头部位, 常常因焊接收缩引起高的局部应力, 以及因冷加工产生高的表面应力, 这些因素都会降低材料的稳定性, 提高环境开裂的敏感性, 从而影响核电站的运行安全和使用寿命<sup>[1]</sup>。研究表明, 在这些高残余应力下, 即使没有外加应力, 焊接部件也会自动发生应力腐蚀开裂(SCC)<sup>[2]</sup>。此外, 镍基合金应力腐蚀敏感性与材料表面状态具有密切关系。柯伟等人研究发现<sup>[3]</sup>, 经 400 号砂纸打磨的镍基合金在高温浸泡腐蚀实验中, 出现了大量的深应力腐蚀裂纹, 而采用电解抛光后, 表面裂纹大量减少, 只存在少量微小裂纹。从这一角度来看, 电解抛光可以改善金属焊接部件的表面粗糙度和应力状态<sup>[4-5]</sup>, 有利于提高其抗 SCC 性能。

虽然目前针对镍基合金焊接问题的研究报道很多<sup>[1,2,6]</sup>, 但大部分集中在焊接残余应力和热影响区的

SCC 方面, 对于用电解抛光的方法来改善表面粗糙度和应力状态, 还未见报道。文中研究了电解抛光对焊接镍基合金 SANICRO69 表面粗糙度的影响, 以及它对表面应力状态的改善作用。

### 1 实验

采用 AP1000 上封头 CRDM 管座用 SANICRO69 镍基合金焊材(Santdvik 公司, 化学成分见表 1), 在 508-III 钢表面进行多层多道堆焊, 最终堆焊层厚度约为 6 mm, 制得试样块。焊接过程中, 焊接速度为  $180 \text{ mm/min}$ 。将试样块切割为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的小方块, 再经过砂轮或砂纸打磨, 制得小试样。

电解抛光液配方为 West-housing 公司技术标准要求的  $20\% \text{ H}_2\text{SO}_4 + 80\% \text{ H}_3\text{PO}_4$  (均为体积分数)。采用这种简单的电解液配方, 主要是考虑到工厂大规模生产的可操作性和成本节约原则。

用 200MAT 金相显微镜观察小试样电解抛光前、

**[收稿日期]** 2013-05-08; **[修回日期]** 2013-05-23

**[作者简介]** 黄军波(1982—), 男, 天津人, 博士生, 工程师, 主要从事金属材料腐蚀与防护、大型铸锻件材料的研究。

表 1 SANICRO69 镍基合金焊材的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of SANICRO69 nickel-based alloy

元素	C	Si	Mn	S	P	Fe	Cr	Ti	Al	Ni
质量分数/%	0.015	0.30	0.32	0.002	<0.005	9.10	29.42	0.26	0.16	余量

后的表面状态,并用 T2000 型接触式表面粗糙度测量仪测定其表面粗糙度,最后采用 PROTO iXRD 便携式残余应力测量仪(Mn 靶)测定其表面应力。

2 结果与讨论

2.1 电解抛光电流密度对表面粗糙度的影响

电解抛光电流密度是电解抛光工艺的重要参数之一。图 1 是试样表面粗糙度随电解抛光电流密度的变化曲线,抛光时间固定为 2 min。如图 1 所示,当电流密度很小(约 $<0.2\text{ A/cm}^2$ )时,随着电流密度增大, $R_a$  值缓慢降低。此时,由于电流密度过小,试样表面只处于活化状态,金属溶解速度极小,仅发生轻微的腐蚀,抛光效果极差。当电流密度较大(约 $0.2\sim0.5\text{ A/cm}^2$ )时,随着电流密度增大, $R_a$  急剧降低,从 $2.0\text{ }\mu\text{m}$  下降到 $1.0\text{ }\mu\text{m}$  左右。此时有利于表面成膜或溶解,具有很好的抛光效果。电流密度进一步加大(约高于 $0.6\text{ A/cm}^2$ )时, $R_a$  值反而开始增大。

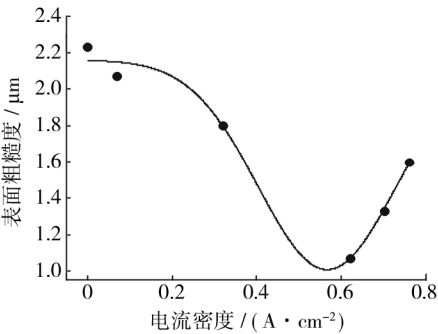


图 1 表面粗糙度随电流密度的变化

Fig. 1 Change of surface roughness with increasing electro-polishing current density

为解释随电解抛光电流密度的增大,试样表面粗糙度先减小、后增加这种现象,实验中观察了试样电解抛光后的表面形貌,如图 2 所示。在电流密度为 $0.32\text{ A/cm}^2$  时,试样表面的划痕明显显得圆滑,且毛刺较小。根据钝化膜抛光机制可知<sup>[7]</sup>,凸起部分形成的钝化膜疏松多孔,化学活性大,从而优先溶解;而凹陷部分处于较稳定的钝化状态;如此反复,不断降低表面粗糙度,达到良好的表面抛光效果。然而,当抛光电流密度过大时,表面钝化膜被击穿,并伴有大量气体析出,产生局部腐蚀(如点蚀),如图 2b—d 中的黑色点状区,将严重影响到表面的抛光效果,使得  $R_a$  值较大。此外,金属表面的剧烈反应会使电解液温度迅速增加,

能源消耗增大,成本增加。综上分析,最佳电流密度控制在 $0.3\sim0.5\text{ A/cm}^2$  为宜。

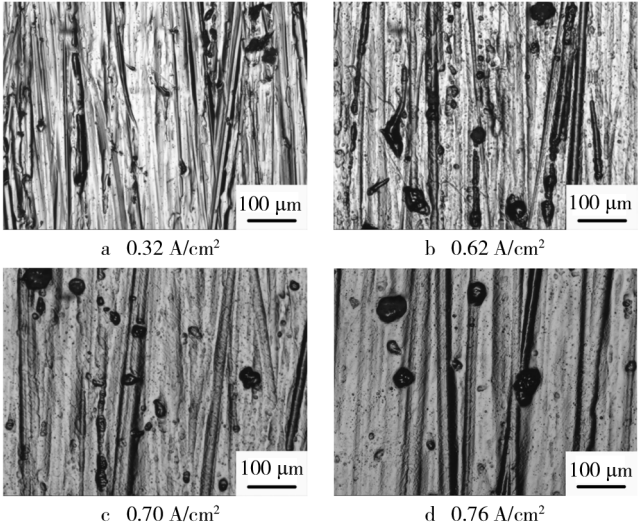


图 2 试样经不同电流密度抛光后的金相形貌  
Fig. 2 Surface metallographs after electro-polishing within different current densities

2.2 电解抛光时间对表面粗糙度的影响

抛光时间是电解抛光的另一重要参数。在前述适宜电流密度范围内选择了两个值——较低值 $0.31\text{ A/cm}^2$  和较高值 $0.48\text{ A/cm}^2$ , 分别进行不同时间的电解抛光实验。

图 3 给出了试样表面粗糙度  $R_a$  随抛光时间的变化趋势。由图可知,抛光速度在最初几分钟内达到最大,然后逐渐趋于平缓。这是由于金属表面的钝化膜,即金属/溶液界面上的电容、电阻以及试样反射率,在最初几分钟内就完成了,以后趋于平稳<sup>[7]</sup>。由图还可看出,较小电流密度( $0.31\text{ A/cm}^2$ ) 的最大抛光  $R_a$  值

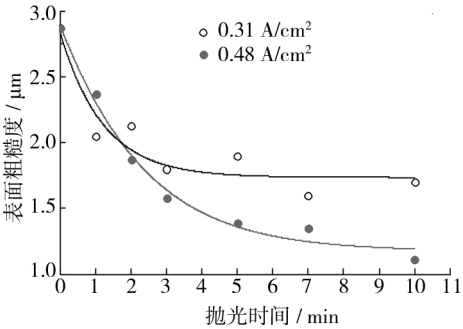


图 3 表面粗糙度随抛光时间的变化

Fig. 3 Change of surface roughness with increasing electro-polishing time

只能达到 1.7 左右,而较大电流密度( $0.48 \text{ A/cm}^2$ )则达到 1.1 左右,说明较大电流密度的抛光效果明显好于低电流密度。在最初 1~2 min 内,两种电流密度的抛光速度基本相同,但是较小电流密度在第 3 分钟就开始变得平缓,而较大电流密度则从第 5 分钟才开始趋缓,这也说明较大电流密度对于这种焊接镍基合金具有较大的抛光饱和度,抛光能力更强。

抛光时间绝非越长越好。一方面,长时间的工作会损失大量的抛光液,消耗多余能源,增加抛光成本;另一方面,过长时间的电解抛光会给材料表面带来很多负作用。图 4 是试样在  $0.48 \text{ A/cm}^2$  电流密度下抛光不同时间后的表面金相图。可以看到,抛光 1 min 的表面整平效果明显(图 4b),但金属光泽较差;抛光 3 min 的表面的质量、粗糙度和平整度都最好(图 4c);抛光时间长于 5 min 后,表面出现了明显的腐蚀坑(图 4e,f),甚至由于过腐蚀而暴露出晶界,使抗腐蚀性能下降。综上分析,电解抛光时间控制在 2~5 min 较合适。

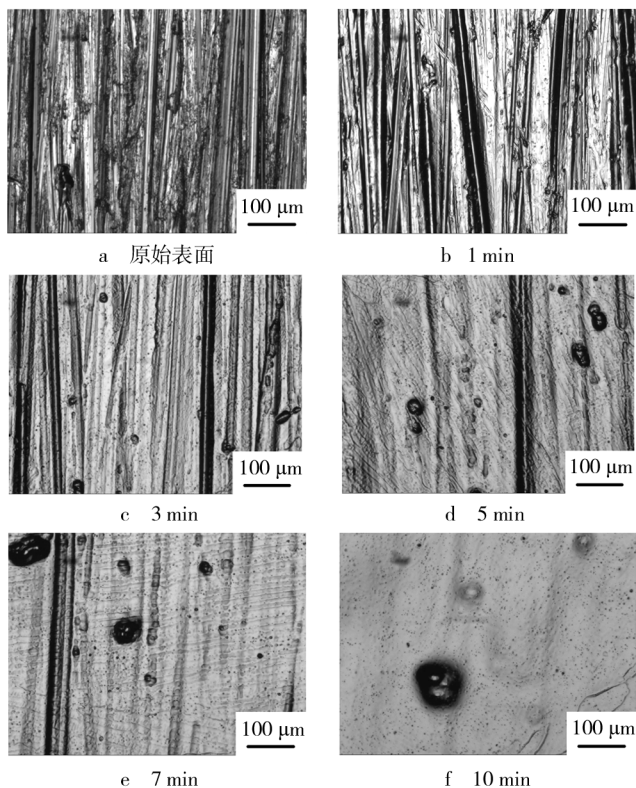


图 4 试样电解抛光不同时间后的金相形貌

Fig. 4 Surface metallographs in different electro-polishing time

## 2.3 电解抛光对不同粗糙度试样表面的改善作用

在实际生产中,镍基焊接试件表面一般采用砂纸手工打磨,经打磨工序后,表面粗糙度不均一,现场测得  $R_a$  在 1.4~4.2 之间。因此笔者采用不同型号的砂纸打磨,模拟现场不同的表面粗糙度,然后在  $0.48 \text{ A/}$

$\text{cm}^2$  的条件下电解抛光 2 min。如图 5 所示,电解抛光对不同粗糙度的表面均有明显的改善作用,可使原始表面粗糙度降低 1~2 级,并且原始表面打磨砂纸的颗粒越细,电解抛光的效果越明显。如经 100 号砂纸打磨的试样表面粗糙度达 1.7,再经过电解抛光后,表面粗糙度只有 1.0,在很大程度上降低了材料的表面粗糙度。这可能与试样表面形成的微电池反应有关,也就是说,试样表面划痕越细小,抛光时形成的微电池电化学系统越多,使得电化学反应快速而均匀,表面整平作用也就越好。

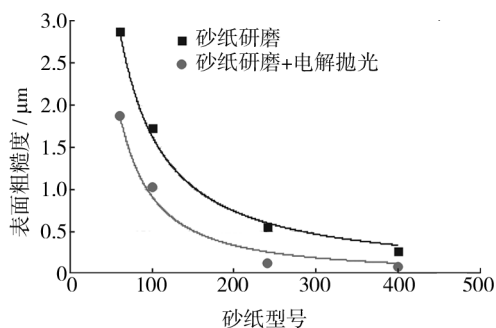


图 5 电解抛光对不同粗糙度表面的改善作用

Fig. 5 Improvement of electro-polishing on different surface roughness

## 2.4 电解抛光对试样表面应力状态的改善作用

有效改善表面应力也是电解抛光的主要优点之一。为了测定电解抛光对焊接镍基合金表面应力的改善作用,对比了试样抛光前后的表面应力状态。如图 6 所示,在垂直焊接方向,电解抛光前的原始表面应力很大(约 800 MPa),经 2 min 电解抛光后,表面应力减小至 200 MPa 左右,经 5 min 电解抛光后的表面应力甚至转变为压应力;在平行焊接方向,原始表面应力较小,经电解抛光后,同样会产生压应力。这种压应力的产生可能与表面划痕不同部位的应力状态有关。根据文献报道<sup>[8]</sup>,在微小的划痕两边产生拉应力,而划痕底

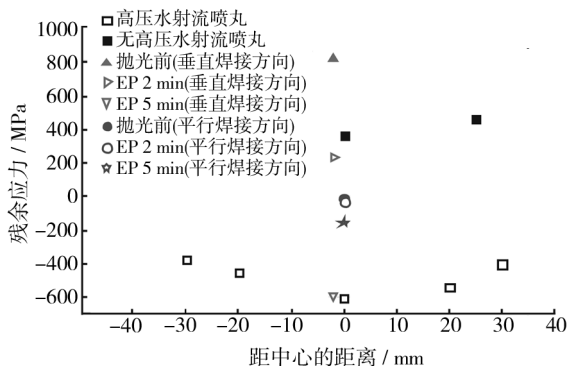


图 6 电解抛光在改善应力方面与高压水射流喷丸技术的比较

Fig. 6 Comparison of improving residual stress between electro-polishing and water jet peening

部则产生压应力。砂纸打磨后,试样表面形成了很多微小的划痕,而电解抛光正好优先溶解凸起的划痕两边,有效消除了其拉应力,而保留了较大的压应力。

这种压应力有利于提高材料抗 SCC 性能<sup>[8-9]</sup>。处于拉应力状态的微小划痕两侧是产生 SCC 的主要起始源<sup>[8]</sup>,如果通过电解抛光溶解这些高拉应力部位,可有效减少 SCC 的发生。目前各国核电站也采用压应力方法来预防 SCC 问题的发生,例如日本采用的高压水射流喷丸技术(WJP),即应用高压水射流去除或减小原始表面拉应力层,使金属表面产生压应力<sup>[9]</sup>。对比电解抛光和高压水射流喷丸后的表面应力状况(图 6)可知,电解抛光可在一定程度上达到相同的效果,即电解抛光可改善金属表面应力状态,使其表面原始拉应力状态变为压应力状态,从而抑制 SCC 问题的发生。

### 3 结论

1) AP1000 上封头 CRDM 管座用焊接镍基合金的适宜电解抛光工艺参数如下:电流密度 0.3 ~ 0.5 A/cm<sup>2</sup>,抛光时间 2 ~ 5 min。

2) 电解抛光对焊接镍基合金的不同粗糙度表面均有明显的改善作用,可使原始表面粗糙度降低 1 ~ 2 级,并且预打磨颗粒越细,电解抛光的效果越明显。

3) 电解抛光在一定程度上可改善焊接镍基合金的表面应力状态,使其表面原始拉应力状态变为压应力状态,从而抑制应力腐蚀开裂的发生。

### [参 考 文 献]

- [1] 候娟,彭群家,庄子哲雄,等. 镍基合金焊接过渡区微观结构及应力腐蚀行为研究[J]. 金属学报,2010,46(10): 1258—1266.
- [2] LU B T, CHEN Z K, LUO J L, et al. Pitting and Stress Corrosion Cracking Behavior in Welded Austenitic Stainless Steel[J]. *Electrochimica Acta*, 2005, 50(6): 1391—1403.
- [3] 柯伟. 现代腐蚀科学与防护技术的研发趋势与未来挑战[R]//中国腐蚀与防护学会三十周年学术会议报告集. 北京:中国腐蚀与防护学会,2009.
- [4] 郝杰芬. 不锈钢电解抛光[J]. 表面技术,2000,29(3): 36—37.
- [5] 杜炳志,漆红兰. 电化学抛光技术新进展[J]. 表面技术,2007,36(2): 56—58.
- [6] 李光福,杨武. 核电站异材焊接件的破裂问题与应力腐蚀评价方法[J]. 核安全,2003(2): 37—40.
- [7] DATTA M, VERCRUYSEE D. Transpassive Dissolution of 420 Stainless Steel in Concentrated Acids under Electropolishing Conditions[J]. *The Electrochemical Society*, 1990, 137(10): 3016—3023.
- [8] MENG F J, WANG J Q, HAN E H, et al. Effects of Scratching on Corrosion and Stress Corrosion Cracking of Alloy 690TT at 58 °C and 330 °C [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51: 2761—2769.
- [9] SAGAWA W, YOSHIKUBO F, MORINAKA R, et al. Application of Water Jet Peening (WJP) Technology to BWR Core Support Structures[J]. *Protection Science*, 2009, 7(4): 69—76.
- [1] 候娟,彭群家,庄子哲雄,等. 镍基合金焊接过渡区微观结构及应力腐蚀行为研究[J]. 金属学报,2010,46(10): 1258—1266.
- [2] LU B T, CHEN Z K, LUO J L, et al. Pitting and Stress Corrosion Cracking Behavior in Welded Austenitic Stainless Steel[J]. *Electrochimica Acta*, 2005, 50(6): 1391—1403.
- [3] 柯伟. 现代腐蚀科学与防护技术的研发趋势与未来挑战[R]//中国腐蚀与防护学会三十周年学术会议报告集. 北京:中国腐蚀与防护学会,2009.
- [4] 郝杰芬. 不锈钢电解抛光[J]. 表面技术,2000,29(3): 36—37.
- [5] 杜炳志,漆红兰. 电化学抛光技术新进展[J]. 表面技术,2007,36(2): 56—58.
- [6] 李光福,杨武. 核电站异材焊接件的破裂问题与应力腐蚀评价方法[J]. 核安全,2003(2): 37—40.
- [7] DATTA M, VERCRUYSEE D. Transpassive Dissolution of 420 Stainless Steel in Concentrated Acids under Electropolishing Conditions[J]. *The Electrochemical Society*, 1990, 137(10): 3016—3023.
- [8] MENG F J, WANG J Q, HAN E H, et al. Effects of Scratching on Corrosion and Stress Corrosion Cracking of Alloy 690TT at 58 °C and 330 °C [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51: 2761—2769.
- [9] SAGAWA W, YOSHIKUBO F, MORINAKA R, et al. Application of Water Jet Peening (WJP) Technology to BWR Core Support Structures[J]. *Protection Science*, 2009, 7(4): 69—76.

(上接第 58 页)

- [3] KLIGERMAN Y, ETSION I, SHINKARENKO A. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing[J]. *Transactions of the ASME Journal of Tribology*, 2005, 127(3): 632—638.
- [4] GERBIG Y, DUMITRU G, ROMANO, et al. Effects of laser Texturing on Technical Surfaces[C]//Surface Engineering 2002—Synthesis, Characterization and Applications, 2003: 45—60. (余不详)
- [5] MEIJER J. Laser Beam Machining (LBM), State of the Art and New Opportunities[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149: 2—17.
- [6] VILHENA L M. Surface Texturing by Pulsed Nd:YAG Laser[J]. *Tribology International*, 2009, 42: 1496—1504.
- [7] KLINK U. New Technologies of Honing[C]//International Honing Conference. Atlanta, Georgia, 1998. (余不详)
- [8] RAMOS J A, ESTRELA R, PITARCH L V. Laser Micromachining of Metals[C]//Proceedings of SPIE, 1999. (余不详)
- [9] CHEN K, YAO Y L. Process Optimization in Pulsed Laser Micromachining with Applications in Medical Device Manufacturing[J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2000, 16: 243—249.
- [10] 刘志勇,罗柏文,夏毅敏,等. 钛合金表面织构的光纤激光加工多参数耦合研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(3): 36—38.
- [11] 符永宏,华希俊,陶根宁,等. 摩擦副表面激光微造型工艺试验研究[J]. 应用激光,2006,26(5): 295—298.