

# 带镍基堆焊层管嘴与 Type 304L GTAW 焊接 裂纹分析及预防措施

赵辉, 付永生, 张学武

(国核工程有限公司, 山东 海阳 265118)

**摘要:** 针对 AP1000 核电厂正常余热排出泵带堆焊层管嘴与 Type 304L 奥氏体不锈钢管道安装焊接过程中产生裂纹, 对裂纹产生的原因进行了分析, 并提出了改进焊接材料及优化焊接工艺等措施, 防止了裂纹的产生。

**关键词:** 带镍基堆焊层; Type 304L; GTAW 焊接; 裂纹

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2015.11.074

中图分类号: TG441.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2015)11-0243-02

## Welding Crack Analysis and Prevention Measures of GTAW Welding Between Nozzle of Nickel Based Alloy Welding Layer and Type 304L

ZHAO Hui, FU Yongsheng, ZHANG Xuewu

(State Nuclear Power Engineering Company, Haiyang 265118, China)

**Abstract:** The welding crack was found using GTAW welding between Type 304L stainless steel and pump nozzle with nickel based alloy surfacing layer of AP1000 normal residual heat removal system. The reasons for the appearance of welding cracks were analyzed. Some protection such as change welding material and optimizing welding technique was proposed to prevent the occurrence of crack.

**Key words:** nickel based alloy surfacing layer; Type 304L; GTAW welding; crack

AP1000 正常余热排出系统 RNS 执行停堆工况下低温超压保护、将堆芯衰变热带出, 冷却堆芯, 事故工况后向反应堆冷却剂系统补水以及冷却安全壳内置换料水箱等<sup>[1]</sup>。正常余热排出泵管嘴带 ERNiCr3 镍基堆焊层与 Type304L 奥氏体不锈钢管道焊接, 如图 1 所示, 采用 ER308L 焊丝, GTAW 焊打底焊过程中发现焊缝表面产生裂纹, 且多处存在类似情况。由于缺陷的存在对核电站的安全运行造成极大的隐患, 所以分析焊接裂纹的产生原因, 采用合理正确的预防措施, 对确保核电站质量和运行有重要意义。

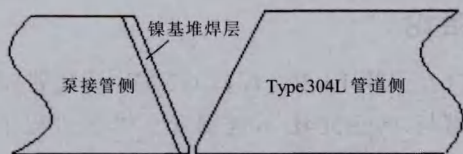


图 1 泵接管与管道焊接示意图  
Fig.1 Schematic diagram of pump nozzles  
and pipe welding

## 1 裂纹产生原因分析

由于裂纹产生于打底层, 打底层母材稀释率相比填充层和盖面层大, 采用 GTAW 焊接时假设焊缝由 70% ER 308L 填充焊丝和 30% 母材 (15% ERNiCr3 堆焊层和 15% Type 304L) 熔合组成<sup>[2]</sup>, 焊缝主要化学元素如表 1 所示。

表 1 焊缝主要化学成分归一化(质量分数, %)  
Tab.1 Normalized main chemical composition of  
weld seam (wt%)

元素	ER 308L ×70%	Type 304L ×15%	ERNiCr3 堆焊层 ×15%	焊缝金属
Cr	18	12.6	18	18
Ni	9	6.3	8	10.05
C	0.04	0.028	0.05	0.015
Mn	0.5	0.35	2.0	0.375
Si	1	0.7	-	0.075

将焊缝化学成分按照 Cr 当量和 Ni 当量公式进行转化:

$$Cr_{\text{equiv}} = w_{\text{Cr}} + w_{\text{Mo}} + 0.7w_{\text{Nb}}$$

$$Ni_{\text{equiv}} = w_{\text{Ni}} + 35w_{\text{C}} + 20w_{\text{N}} + 0.25w_{\text{Cu}}$$

焊缝  $Cr_{\text{equiv}} = 18$ ,  $Ni_{\text{equiv}} = 17.55 + 35 \times 0.0505 = 19.3175$ , 带入 WRC-1992 铁素体含量及凝固模式预测图如图 2 所示, 焊缝 FN 为 0, 且初始凝固模式为 A 奥氏体, 该焊缝没有铁素体存在。同时经铁素体磁测仪测

收稿日期: 2014-12-12

作者简介: 赵辉(1965-), 男, 吉林长春人, 高级工程师, 从事安全质量管理  
理工作; 电话: 18930178702; E-mail: zhaohui@snpec.com.cn

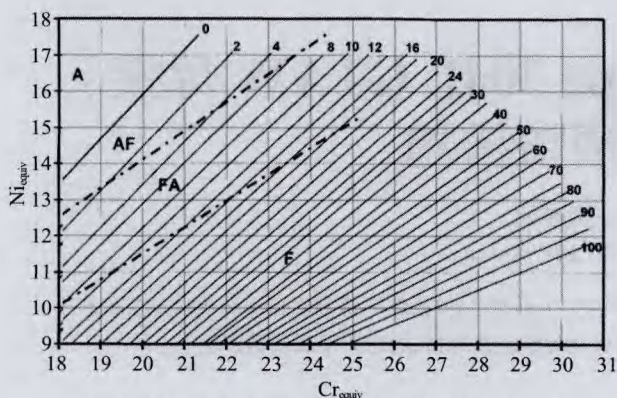


图2 WRC-1992 铁素体含量及凝固模式预测图  
Fig.2 Forecast map of WRC-1992 ferrite content and solidification mode

试也得到验证。

由于铁素体一方面打乱单一奥氏体柱状晶的结晶方向性,细化晶粒。由于铁素体铬含量高于奥氏体,而且铬在铁素体中的扩散比在奥氏体中快得多,所以可以帮助克服任何贫铬问题。 $M_{23}C_6$  碳化物倾向于在凹凸不平的铁素体-奥氏体边界析出,而不是在通常比较直的奥氏体-奥氏体边界析出。所以这些因素都大大限制了在含有铁素体的奥氏体不锈钢焊缝金属的敏化。

S、P 低熔共晶的存在扩大凝固温度范围,当焊接过程中大部分晶粒边界仍然处于液态,增加了热裂纹的敏感性。而铁素体存在另一方面可以破坏焊缝结晶时低熔液态薄膜的连续性,且铁素体对硫、磷等杂质有较高的溶解度,这样以铁素体为初始相的凝固过程中就能够限制这些杂质元素在枝晶间的偏聚。出现奥氏体+铁素体组织,产生凹凸不平的晶界而改变晶界浸润性质,液体薄膜很难浸润该边界,且裂纹一旦起裂,很难在这个凹凸不平的边界上扩展。

纯奥氏体组织晶界平直,低熔共晶液态薄膜容易浸润该晶界,抗裂性差。图3为不含铁素体和含有铁素体在奥氏体基体分布图<sup>[3]</sup>。

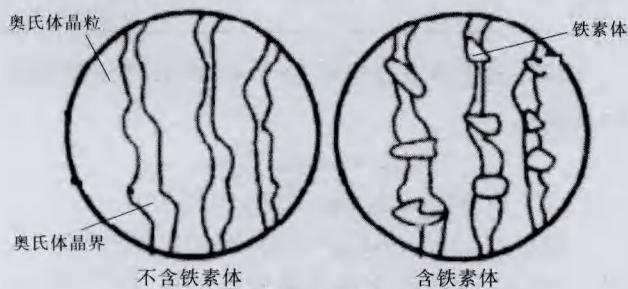


图3 铁素体在奥氏体基体分布  
Fig.3 Distribution of ferrite in austenite matrix

打底焊焊道的表面为凹形,凹形表面受到焊趾和焊根的拉应力作用,如图4(a)所示,同时奥氏体不锈钢导热系数小,线膨胀系数大,在焊接局部加热和冷却条件下,接头在冷却过程中形成大的拉应力。

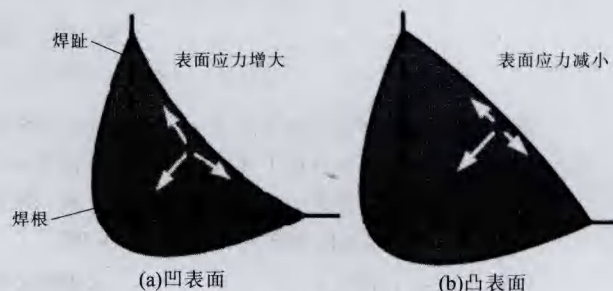


图4 焊缝表面应力分布  
Fig.4 Distribution of stress on the surface of weld seam

采用 ER308L 焊丝焊接镍基合金与 304L 不锈钢焊缝金属以 A 模式凝固时为全奥氏体(不含铁素体),此时热裂纹最为敏感,分布在晶界的 S、P 低熔共晶液态薄膜与拉应力共同作用下产生了热裂纹。

## 2 改进措施

为了提高焊缝耐腐蚀性和抗热裂纹性能,焊丝改为 ERNiCrFe3,提高了焊缝镍含量,提高晶粒整体电极电位和耐腐蚀性。

焊接顺序进行调整,正式焊接之前采用 ERNiCrFe3 镍基焊丝 GTAW 焊接对 Type 304L 坡口进行堆焊,小电流、低热输入堆焊可以减少 Type 304L 稀释率,同时可以较少整体热输入和拘束度而使晶粒边界裂纹减到最少,同时降低结晶凝固时的应变变量,有利于减少粗大枝晶的形成。

焊缝表面采用凸形表面,由于根部收缩将对凸形表面产生压缩作用从而抵消焊趾拉应力,从而最终减小焊缝表面拉应力作用,如图4(b)所示,同时需要填满弧坑<sup>[4]</sup>。

## 3 结论

(1) 采用 ER308 焊丝 GTAW 焊接带镍基堆焊层管嘴与 Type 304L 不锈钢管,焊接过程中产生热裂纹的原因为焊缝中无铁素体,奥氏体晶粒间液态薄膜与拉应力共同作用下产生。

(2) 采用 ERNiCrFe3 焊丝,焊接前采用小电流对 Type 304L 不锈钢管道侧坡口侧进行堆焊,正式焊接采用小线能量,凸形焊缝表面,填满弧坑解决焊缝热裂纹及耐腐蚀性下降问题。(下转第 249 页)

表5 力学性能检验结果

取样部位		$R_{p0.02}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	A(%)	Z(%)	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$25^\circ\text{C } A_{kv}/(\text{J}\cdot\text{cm}^2)$	FATT <sub>50</sub> /°C
本体	汽轮机端	732	860	24	69	775	167	≤-10
	励磁端	741	868	23.5	68	790	168	≤-10
中心孔		765	880	26.0	72	790	182	≤-5

求。该批 1000MW 标准电机转子的成功研制, 为我在百万千瓦级火力发电设备市场提供了业绩支持, 为我们后期开发更高技术含量的汽轮机高、中、低压转子锻件提供了技术积累。

## 4 结语

1000MW 标准电机转子锻件技术要求高, 锻造技术复杂。需要制定合理的冶炼工艺、锻造工艺, 避免中心疏松、缩孔和微裂纹等小当量密集缺陷, 以满足转子锻件的探伤要求。同时制定合理的热处理工艺, 避免成分偏析, 以满足转子锻件的力学性能要

### 参考文献:

- [1] 秦红付, 李昌义, 孙统辉, 等. 300 MW 发电机转子锻件生产实践[J]. 矿山机械, 2012(6): 149-150.
- [2] 吕政, 宋雷钧, 王晓芳, 等. 1000 MW 超超临界汽轮机转子锻件研制[J]. 装备机械, 2012(2): 10-15. [1]

(上接第 242 页)

- 耐热钢中  $\delta$  铁素体形成及影响因素 [J]. 材料热处理学报, 2010, (11): 61-67.
- [11] Wang P, Lu S P, Xiao N M, et al. Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr-4Ni martensitic stainless steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(13): 3210-3216.
  - [12] 李明娜, 刘峰, 于洪森. 焊后热处理对 308L 不锈钢焊缝  $\delta$ -铁素体形态及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(9): 9-11.
  - [13] Anderko K, SchÄfer L, Materna-Morris E. Effect of the  $\delta$ -ferrite phase on the impact properties of martensitic chromium steels [J]. Journal of nuclear materials, 1991, 179: 492-495.
  - [14] SchÄfer L. Influence of delta ferrite and dendritic carbides on the impact and tensile properties of a martensitic chromium steel [J].

- Journal of Nuclear Materials, 1998, 258: 1336-1339.
- [15] Fujio ABE, Torsten-Ulf Kern, Viswanthan R. Creep-resistant Steels [M]. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited, 2008.
  - [16] 徐庆东, 林鑫, 宋梦华, 等. 激光成形修复 2Cr13 不锈钢热影响区的组织研究[J]. 金属学报, 2013, (5): 95-103.
  - [17] 黄本生, 刘阁, 黄龙鹏, 等. 不同焊材匹配与时效处理对异种钢焊接接头显微结构与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2013, (8): 75-84.
  - [18] 付宇明, 柴璇, 郑丽娟, 等. 2Cr13 焊接构件埋藏裂纹电磁热止裂及力学性能强化[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 58-63.
  - [19] 严彪. 不锈钢手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. [1]

(上接第 244 页)

### 参考文献:

- [1] 孙汉虹. 三代核电技术 AP1000[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] Sindo Kou. Welding Metallurgy [M]. Wisconsin: A John Wiley

- & Sons, INC. Publication, 2003.
- [3] 满达虎. 奥氏体不锈钢焊接热裂纹的成因及防止对策[J]. 热加工工艺, 2014, 43(11): 181-184.
  - [4] John C Lippold, Damian J Kotecki. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008. [1]

(上接第 246 页)

### 参考文献:

- [1] 王爱华, 朱久发. 我国电镀锌板发展趋势的探讨[J]. 轧钢, 2008, 25(4): 39-42.
- [2] 陈家光, 田青超, 季思凯, 等. 丝状斑迹缺陷的成因[J]. 理化检验: 物理分册, 2002, 38(11): 514-516.

- [3] Hiroaki Nakano. Effects of plating factors on morphology and appearance of electrogalvanized steel sheets [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc China, 2009, 19(8): 35-841.
- [4] 朱晓东, 李宁, 黎德育, 等. 高速电镀锌工艺对镀层粗糙度及微观形貌的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(1): 145-150. [1]