

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2020.12.007



蒸汽发生器手孔镍基合金堆焊层开裂分析

赵亮¹,涂善东¹,刘刚²,刘福广²,李勇²,杨二娟²

(1. 华东理工大学 承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237; 2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054)

摘要:蒸汽发生器是核电厂主要的承压边界,某核电厂蒸汽发生器手孔 152 镍基合金堆焊层发生开裂,对核电安全、经济地运行造成一定影响。预制手孔模拟件复现缺陷并分析开裂处的微观特征,采用横向可调拘束试验分析 152 熔敷金属的开裂倾向,并利用有限元分析手孔堆焊层的塑性应变分布,复现出了与实际缺陷特征和位置一致的裂纹,发现 152 堆焊层开裂位置处存在长条状、颗粒状碳化物沿晶界析出,明确了蒸汽发生器手孔 152 堆焊层开裂机理为碳化物诱导型高温失塑裂纹 (DDC),碳化物在晶界析出与焊接应变共同作用导致手孔堆焊层发生开裂。

关键词:蒸汽发生器;镍基合金;高温失塑裂纹

中图分类号:TH49;TG406 **文献标志码:**B

Analysis on cracking mechanism of nickel based alloy buttering of steam generator hand hole

ZHAO Liang¹, TU Shandong¹, LIU Gang², LIU Fuguang², LI Yong², YANG Erjuan²

(1. Key Laboratory of Pressure Systems and Safety, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Steam generator is the main pressure boundary of nuclear power plant. Cracking was discovered on the 152 nickel base alloy buttering of steam generator hand hole in a nuclear power plant, which caused a certain impact on the safe, reliable and economic operation of the nuclear power plant. In this paper, defects were reproduced on the hand hole mockup, and the micro characteristics of cracks were analyzed. The cracking tendency of 152 deposited metal was analyzed by transverse adjustable restraint test, and the plastic strain distribution of hand hole buttering was analyzed by finite element method. The characteristics and the positions of the reproduced cracks were consistent with the actual defect. It is found that there are long strip and granular carbide at the cracking position. The results show that the cracking mechanism of the hand hole 152 buttering was carbide induced ductility dip cracking (DDC), the combined action of carbide precipitation and welding strain led to cracking of the hand hole buttering.

Key words: steam generator; nickel base alloy; ductility dip cracking (DDC)

0 引言

蒸汽发生器是核电厂主要的承压设备,某核电厂蒸汽发生器手孔 152 镍基合金堆焊层发生开裂,开裂的手孔位于蒸汽发生器二次侧管板上,手孔密封结构为焊接隔膜式,孔径 100 mm,蒸汽发生器壳体材料为 ASME SA508,手孔处壳体厚度 100 mm,在蒸汽发生器壳体外

壁堆焊了厚度 10 mm 的 152 镍基合金堆焊层作为手孔密封面,以便在定期检修打开手孔后重复焊接密封,152 堆焊焊接方法为手工电弧焊 (Shielded Metal Arc Welding, SMAW)。密封隔膜与密封面之间采用 52 镍基焊丝,通过手工钨极氩弧焊 (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) 进行封焊。手孔密封焊接结构如图 1 所示。堆焊层上的开裂主要位于封焊焊道热影响区内部,呈网状分布,如图 2 所示。

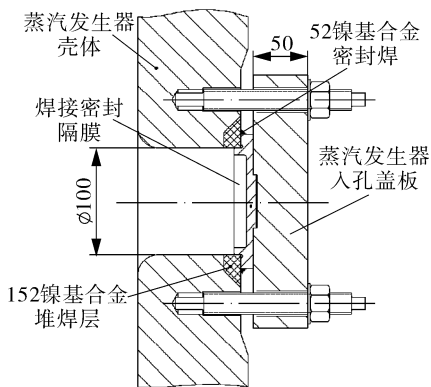


图1 手孔密封焊接结构示意图

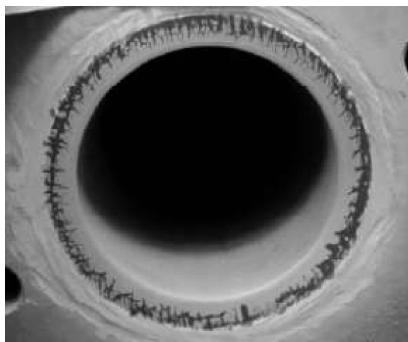


图2 裂纹形貌

152 镍基合金焊材具有良好的抗氧化性和高温力学性能,目前已广泛应用于核电设备的制造与安装^[1]。镍基合金焊材主要的焊接性问题为热裂纹^[2-3]和高温失塑裂纹(Ductility Dip Cracking, DDC),热裂纹的形成与热输入、高值热应变(0~20%)、晶界 P, S 含量高等因素^[4-8]有关。DDC 形成机制主要有晶界滑移^[9-10]、应力集中和碳化物诱导^[11]、晶界弱化^[12]等。影响 DDC 的因素主要包括成分及第二相析出物、应变速率、晶界取向与再结晶、晶粒尺度等,其中,碳化物的大小形态对 DDC 的产生影响较大^[13]。

为明确手孔密封面开裂机理,本文预制手孔模拟件复现缺陷并分析开裂处的微观特征,采用横向可调拘束试验,分析 152 熔敷金属的开裂倾向,并利用有限元方法分析手孔堆焊层的塑性应变分布。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

152 焊材的主要成分如表 1 所示,其主要力学性能如表 2 所示。

表1 152 焊材的主要成分

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ti	Al	Nb	Co	Ni
数值	0.016	0.11	0.77	0.006 0	0.005 1	30.48	0.013	0.008 6	0.22	0.085	1.86	0.010	余量

表2 152 镍基合金的主要力学性能

项目	$R_{\sigma 0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$\delta(\%)$	$\psi(\%)$
数值	250	599	60	58

1.2 手孔模拟件制备

手孔模拟件按照蒸汽发生器手孔的实际尺寸制作,其结构如图 3 所示。

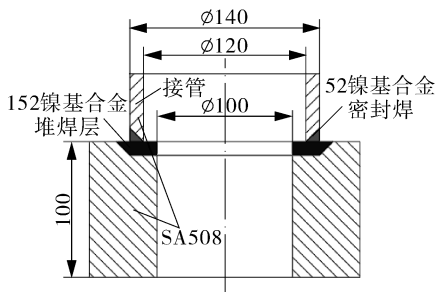


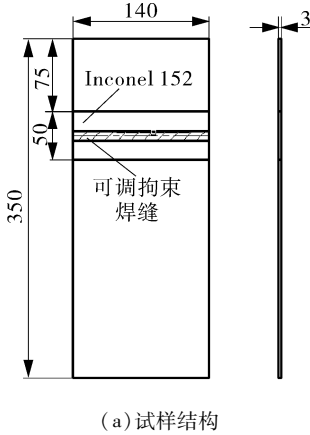
图3 模拟件结构示意图

堆焊焊缝采用 152 焊材、SMAW 方法焊接,封焊焊缝采用 52 焊材、GTAW 方法焊接。模拟件堆焊及封焊完成后,磨除封焊焊缝,模拟重新封焊的过程,随后再次磨除封焊焊缝,观察堆焊层表面在封焊过程中产生的裂纹情况,采用线切割方法切取微观分析试样。

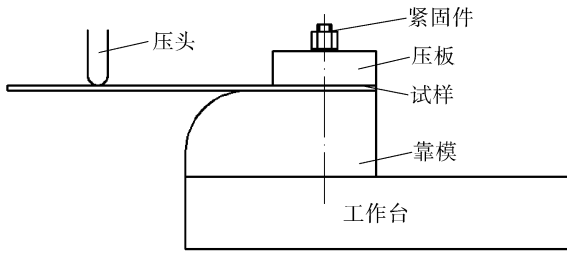
1.3 横向可调拘束试样及试验装置

采用开槽堆焊的方法制备横向可调拘束试样,基材厚度 50 mm,开槽宽度 50 mm、深度 6 mm,焊接方法为 SMAW,焊材为 152,焊接电流 120 A、焊接速度 1 mm/s。堆焊结束后采用机械切割方法去除基材部分,制成如图 4(a)所示的试样,试样的装夹采用图 4(b)所示的结构,利用万能试验机的压头施加弯曲载荷。靠模产生的弯曲应变有两种,分别为 2%,4%,应变加载速率为 0.1%/s。试样装夹后采用 GTAW 方法进行可调拘束焊缝的焊接,引弧后即开始施加应变,分别经

过 20 s, 40 s 后试样将与靠模完全贴合, 焊接完成后取下试样。



(a) 试样结构



(b) 试验装置

图 4 试样及试验装置示意

1.4 裂纹及组织观察方法、硬度分析方法

试样制备完成后, 采用线切割方法在可调拘束焊缝的热影响区内取金相观察试样。采用 500[#], 1000[#], 1500[#] 和 2000[#] 砂纸进行水磨, 利用抛光机结合粒度为 2.5 μm 和 1.5 μm 的抛光剂进行抛光, 金相试样用王水进行腐蚀, 再用水和酒精清洗、吹干后置于丙酮溶液中, 采用超声清洗 15 min, 然后依次在光学显微镜和 JSM-6490LCV 型扫描电镜下对裂纹进行观察。采用线切割的方法从堆焊层切取 0.4 mm 的薄片作为透射电镜试样, 再用砂纸打磨到 80 μm 以下, 用 Tenupol-5 型双喷电解仪进行双喷, 使用 JEM-200CX 型透射电镜观察显微组织的形态、结构及析出形态等。

1.5 焊接过程应变分析

依据 GB/T 228.2—2015《金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法》测试 152 熔敷金属和 SA508 母材的拉伸性能, 试样为 ∅5 mm 棒状试样, 采用 CCS3910 型电子拉伸蠕变试验机进行测试, 获得的材料性能参数分别见表 3, 4。采用热弹塑性方法, 分析手孔经过堆焊、封焊、模拟重复封焊过程后的应变分布, 初始预热温度 100 ℃; 环向切割面为对称边界, SA508 壳体为刚性固定约束, 手孔外表面为自然对流边界, 在堆焊部分施加焊接热源, 通过子程序控制热源加载强度及加载路径。

表 3 152 熔敷金属材料性能

温度/ ℃	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	比热/ [J·(kg·K) ⁻¹]	线胀系数/ K ⁻¹	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	比重/ (kg·m ⁻³)	伸长率 (%)
20	12.1	440	1.52 × 10 ⁻⁵	2.03 × 10 ⁵	264	960	8 190	28
200	16.6	489	1.69 × 10 ⁻⁵	1.95 × 10 ⁵	239	853		32
400	19.5	543	1.79 × 10 ⁻⁵	1.83 × 10 ⁵	221	800		38
600	22.5	597	1.88 × 10 ⁻⁵	1.64 × 10 ⁵	201	647		42
800	26.6	652	1.93 × 10 ⁻⁵	1.49 × 10 ⁵	155	241		18
1 000	30.6	706	1.98 × 10 ⁻⁵	1.34 × 10 ⁵	36	45		6

表 4 SA508 材料性能

温度/ ℃	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	比热/ [J·(kg·K) ⁻¹]	线胀系数/ K ⁻¹	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	比重/ (kg·m ⁻³)	伸长率 (%)
20	41.6	394	1.13 × 10 ⁻⁵	2.10 × 10 ⁵	371	606	7 850	24
200	41.1	510	1.27 × 10 ⁻⁵	1.95 × 10 ⁵	327	606		26
400	37.9	599	1.38 × 10 ⁻⁵	1.87 × 10 ⁵	264	606		22
600	33.6	724	1.47 × 10 ⁻⁵	1.52 × 10 ⁵	159	374		29
800	27.0	992	1.52 × 10 ⁻⁵	0.93 × 10 ⁵	55	188		8
1 000	28.2	706	1.57 × 10 ⁻⁵	0.70 × 10 ⁵	19	136		8

2 模拟件堆焊层组织与裂纹形貌

手孔模拟件经堆焊、封焊、模拟重复封焊后,堆焊层表面发生了开裂,裂纹出现在封焊缝两侧的堆焊层外表面(如图5(a)所示),距离封焊缝熔合线约100 μm ,分布范围约3 mm宽,裂纹尺度范围为213 ~ 1 349 μm 。堆焊层内部组织如图5(b)所示,其组织呈现典型的柱状晶状态,柱

状晶发达且方向明显,枝晶间有条状骨架形或颗粒状析出,晶内有弥散的点状析出物。透射电镜物相分析结果显示,这些析出物为 Cr_{23}C_6 、 NbC 、 TiC 等碳化物。堆焊层表面组织状态如图5(c)所示,可以发现为胞状特征,晶界弯曲,非平直类型晶界,碳化物弥散分布在枝晶间及晶界位置。透射电镜观察结果如图5(d)所示,晶间存在长条形、颗粒状碳化物,同时在晶粒之间存在三角形的共晶组织。

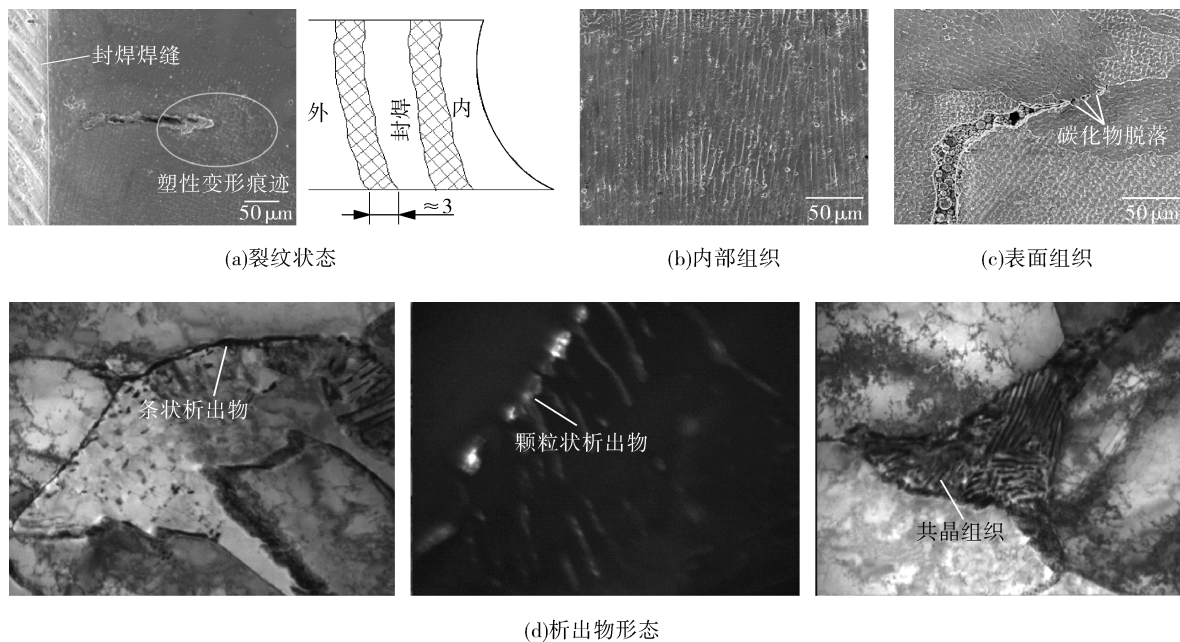


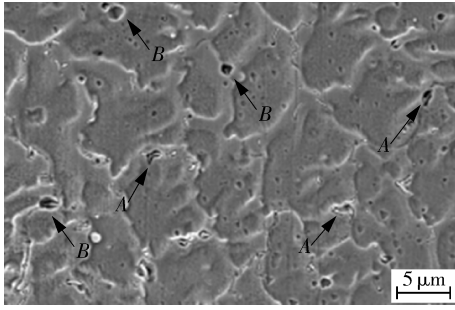
图5 堆焊层组织及裂纹情况

3 开裂机理分析

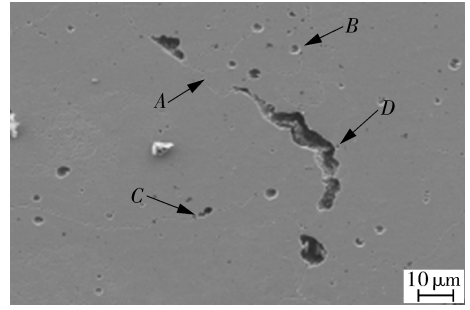
手孔模拟件堆焊层裂纹处的微观特征显示,开裂主要与碳化物析出有关,能够明确裂纹形成机理为碳化物诱导型 DDC。一般只有尺寸很小且成弥散状分布的碳化物才能起到阻碍位错运动、防止开裂的作用。当晶界上存在的碳化物为尺寸较大的条状时(如图6(a)中位置A所示),在外加应变作用下,大尺寸析出物阻碍位错的运动,产生应变集中。由于碳化物与基体之间的错配度较高,两者界面结合强度低,从而在界面处开裂,使碳化物首先脱离基体形成微孔。同时,尺寸较大的颗粒状碳化物也会与基体分离,形成微孔洞,如图6(a)中位置B所示。图6(b)中位置A

处晶界无析出物,位置B处碳化物为颗粒状,且尺寸较大,与基体分离后形成了凹坑;在力的作用下凹坑发生形变,凹坑之间的材料发生撕裂,凹坑连接在一起形成C处所示的微小裂纹,由于C处的裂纹方向与载荷方向一致,并未发生进一步的扩展;而与外力垂直的晶界D处的凹坑会持续发生变形、断裂、合并的过程,扩展成为尺寸更大的裂纹。凹坑的形成合并过程与碳化物直接相关,由于碳化物为沿晶分布,因此裂纹呈现沿晶开裂的特征。

工作过程中手孔内部压力为4.5 MPa,温度约300 $^{\circ}\text{C}$ 。通过以上分析可以发现,手孔件模拟件的堆焊层在经过封焊缝作用后即产生了微观的DDC裂纹,从而形成了裂纹源,经过多次启停产生的加载和卸载后,形成图2所示宏观裂纹。



(a) 碳化物



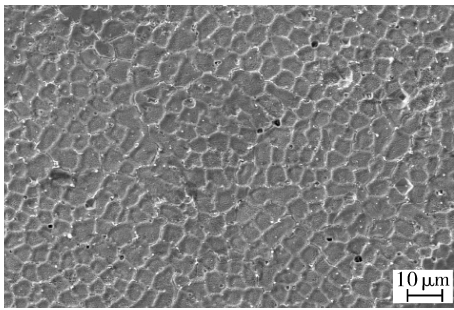
(b) 裂纹

图6 堆焊层微观特征

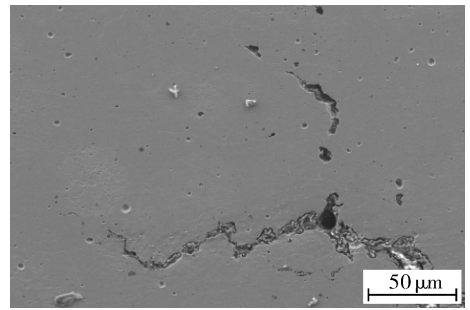
4 模拟件的应变

裂纹的形成除了与碳化物的析出形态、位置有关外,与外加应变的大小也是直接相关的。可

调拘束试验结果表明,当外加应变为2%时,152堆焊金属未发生开裂,如图7(a)所示;当外加应变增大到4%时,可在可调拘束焊缝的热影响区中观察到裂纹,如图7(b)所示。可见152熔敷金属的应变容限介于2%~4%之间。



(a) 2% 应变



(b) 4% 应变

图7 可调拘束试验结果

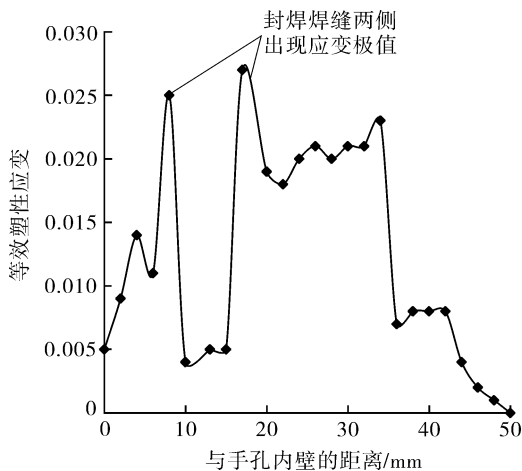


图8 堆焊层表面塑性应变分布

手孔模拟件堆焊层的有限元分析结果表明,封

焊焊缝两侧的塑性应变最大达到2.78% (如图8所示),超过152堆焊层应变容限范围,导致局部出现开裂。可见,手孔堆焊层的开裂是由于自身碳化物在晶界析出与焊接应变共同作用的结果。

5 结论

(1) 蒸汽发生器手孔模拟件经过堆焊、封焊、模拟重复封焊后,复现出了与实际缺陷特征和位置一致的沿晶裂纹。

(2) 152堆焊层开裂位置处存在长条状、颗粒状碳化物沿晶界析出,是产生裂纹的先决条件。

(3) 蒸汽发生器手孔152堆焊层开裂机理为碳化物诱导型DDC,开裂是碳化物在晶界析出与焊接应变二者共同作用导致的。

参考文献:

- [1] 董毅,高志远. 我国核电事业的发展与 Inconel 690 合金的研制[J]. 特钢技术,2004,9(3):45-48.
- [2] 霍树斌,徐锴,王庆江,等. 690 镍基合金焊丝热裂纹测试与评价方法研究[J]. 焊接,2018(4):33-38.
- [3] 李翠翠,和广庆. 核电蒸汽发生器胀接接头质量事故分析及应对措施研究[J]. 压力容器,2019,36(11):70-73.
- [4] 薄春雨,杨玉亭,丑树国,等. 690 镍基合金焊接结晶裂纹形成机理分析[J]. 焊接学报,2007,28(10):69-72.
- [5] 朱亮,姚文选. 690 镍基合金焊缝失塑裂纹产生的力学机制[J]. 焊接学报,2017,38(12):9-13.
- [6] SAIDA K, NOMOTO Y, OKAUCHI H, et al. Influences of phosphorus and sulphur on ductility dip cracking susceptibility in multipass weld metal of alloy 690[J]. Science and Technology of Welding and Joining,2012,17(1):1-8.
- [7] ZHANG Xu, LI Dianzhong, LI Yiyi, et al. Effect of Nb and Mo on the microstructure, mechanical properties and ductility-dip cracking of Ni-Cr-Fe weld metals[J]. Acta Metallurgica Sinica-English Letters, 2016, 29(10):928-939.
- [8] NISHIMOTO K, SAIDA K, OKAUCHI H. Microcracking in multipass weld metal of alloy 690 Part I—Microcracking susceptibility in reheated weld metal[J]. Science and Technology of Welding and Joining,2006,

11(4):455-461.

- [9] NISSLEY N E, LIPPOLD J C. Ductility-dip cracking susceptibility of nickel-based weld metals Part 1: strain-to-fracture testing[J]. Welding Journal, 2008, 87(10):257-264.
- [10] FINK C. An investigation on ductility-dip cracking in the base metal heat-affected zone of wrought nickel base alloys—Part I: Metallurgical effects and cracking mechanism [J]. Welding in the World, 2016, 60(5):939-950.
- [11] YOUNG G A, CAPOBIANCO T E, PENIK M A, et al. The mechanism of ductility dip cracking in nickel-chromium alloys[J]. Welding Journal, 2008, 2(2):31S-43S.
- [12] NISHIMOTO K, SAIDA K, OKAUCHI H, et al. Microcracking in multipass weld metal of alloy 690 Part 3 - Prevention of microcracking in reheated weld metal by addition of La to filler metal [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(4):471-479.
- [13] F F N, DUPONT J N. Metallurgical investigation into ductility dip cracking in Ni-based alloys: Part II [J]. Welding Journal, 2009, 88(3):7S-20S.

作者简介:赵亮(1981),男,研究员级高工,主要从事核电厂焊接检修工作,通信地址:314300 浙江省海盐县秦山核电三厂 25 号楼 8011, E-mail: zhaol01@cnpc.com.cn。

本文引用格式:

赵亮,涂善东,刘刚,等. 蒸汽发生器手孔镍基合金堆焊层开裂分析[J]. 压力容器,2020,37(12):42-47.

ZHAO Liang, TU Shandong, LIU Gang, et al. Analysis on cracking mechanism of nickel based alloy buttering of steam generator hand hole[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(12):42-47.

(上接第 41 页)

- [9] 谭蔚,樊东东. 水冷夹套器壁过热损伤的失效分析[J]. 压力容器,2019,36(9):47-52.
- [10] 张亚宁,于永娟. 高温不锈钢衬里换热器的制造技术[J]. 压力容器,2013,30(1):64-69.
- [11] 龚岩,倪建军,梁钦锋,等. 气化炉与辐射废锅接口壁面熔渣流动数值模拟[J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(7):858-864.
- [12] 倪建军,梁钦锋,周志杰,等. 气化炉辐射废锅内多

相流场和温度场的数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2010,30(5):59-65.

作者简介:张亚宁(1980),男,高级工程师,主要从事煤气化技术研发以及大型气化炉设计与开发工作,通信地址:750200 宁夏银川市德胜西路 1 号宁夏神耀科技有限责任公司气化开发部, E-mail: zhangyaning@nxstc.com。

本文引用格式:

张亚宁,匡建平,刘水刚,等. 大型干煤粉气化炉渣口缺陷分析和结构改进[J]. 压力容器,2020,37(12):36-41.

ZHANG Yaning, KUANG Jianping, LIU Shuigang, et al. Defect analysis and structure improvement of slag tap of large-scale pulverized coal gasifier[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(12):36-41.