引用格式:闫祥宇,赵刚,李玉环,等.核级阀门密封面堆焊层裂纹成因实验分析及残余应力演化计算[J].热加工工艺,2026,55(15):37-45.YAN Xiangyu, ZHAO Gang, LI Yuhuan, et al.Experimental Analysis of Cracks in Surfacing Layer of Sealing Surface of Nuclear Grade Valve and Residual Stress Evolution Calculation[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(15): 37-45.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20241321

核级阀门密封面堆焊层裂纹成因实验分析及残余应力演化计算

闫祥宇[1], 赵 刚[2], 李玉环[2], 周 犊[2], 方 正[1], 唐 斌[1], 王 正[1]

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要:阀门是核电厂核岛管路系统中的重要控制部件之一。在工程实际中发现,部分阀门堆焊层在工作时出现了裂纹类缺陷,造成核岛管路泄漏等重大安全事故。通过制备阀门模拟实验件进行机械载荷疲劳实验和热载荷疲劳实验分析 Norem 02 铁基合金堆焊层裂纹的产生机理,并对核级阀门密封面堆焊层残余应力进行热弹塑性有限元计算,使用 X 射线衍射法(X-ray diffraction,XRD)对数值模拟结果进行验证,在此基础上计算并分析堆焊层减薄和热载荷作用下堆焊层残余应力的演化规律。研究发现,阀门密封面堆焊层裂纹为焊接残余应力和热应力共同作用导致的脆性贯穿裂纹;在阀门密封面工作过程中,堆焊层的减薄导致堆焊层应力变化很小;在 1000 ℃热载荷作用下,堆焊层应力增加较为明显,而热载荷是导致堆焊层材料产生破坏的主导因素。

关键词:核岛管路阀门;环形多层多道堆焊层;裂纹;残余应力

中图分类号:TG404 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-3814(2026)15-0037-09

Experimental Analysis of Cracks in Surfacing Layer of Sealing Surface of Nuclear Grade Valve and Residual Stress Evolution Calculation

YAN Xiangyu[1], ZHAO Gang[2], LI Yuhuan[2], ZHOU Du[2], FANG Zheng[1], TANG Bin[1], WANG Zheng[1]

(1. School of Energy and Power, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. CGN Nuclear Power Operation Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Valve is one of the important control components in the pipeline system of nuclear power plant. In engineering practice, it is found that cracks appear in some valve surfacing layers during operation, resulting in nuclear island pipeline leakage and other major safety accidents. The mechanism of crack formation of Norem 02 iron-bases alloy surfacing layer was analyzed by mechanical load fatigue test and thermal load impact test, and the residual stress of the sealing surface surfacing layer of a nuclear grade valve was calculated by thermal elastoplastic finite element method. The results of numerical simulation were verified by XRD. On this basis, the evolution law of residual stress of surfacing layer under thickness thinning and thermal load was calculated and analyzed. It is found that the cracks in the surfacing layer of the valve sealing surface are brittle penetration cracks caused by the joint action of welding residual stress and thermal stress. During the operation of valve sealing surface, the stress change of surfacing layer caused by the thinning of surfacing layer is very small. Under the action of 1000 ℃ thermal shock load, the stress of surfacing layer increases obviously, and the thermal load is the main factor leading to the damage of the surfacing layer material.

Key words: valves in nuclear island line; ring multi-layer multi-pass surfacing layer; cracks; residual stress

阀门是核岛管路系统常用的一种控制部件。为了提高核岛管路中阀门的密封性和可靠性,通常在阀门密封面上堆焊钴基或铁基硬质合金层,使其能够在高温高压的环境下工作。但是,在堆焊残余应力和环境热载荷、机械载荷的共同作用下,阀门堆焊层可能出现裂纹类缺陷,造成核岛管路泄漏等重大安全事故[1-3]。钴基合金、铁基合金堆焊层宏观裂纹分

收稿日期:2024-06-18 **修回日期**:2025-11-12

基金项目:国家重点研发项目(2022YFB2503503);国家自然科学基金资助项目(52375310)

作者简介:闫祥宇,男,硕士,主要研究方向:结构强度及疲劳特性分析;E-mail:yxy17824821237@163.com

通讯作者:方正,男,博士,主要研究方向:结构强度校核及疲劳裂纹分析;E-mail:zhengf_dut@126.com

别如图 1、2 所示。

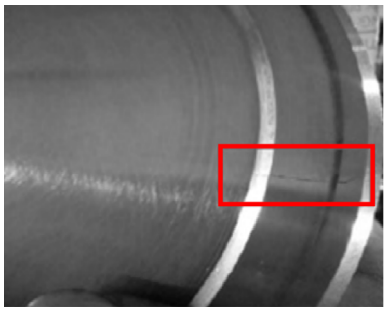


图 1 钴基合金堆焊层宏观裂纹[1]
Fig.1 Macroscopic cracks in cobalt-based alloy surfacing layer[1]

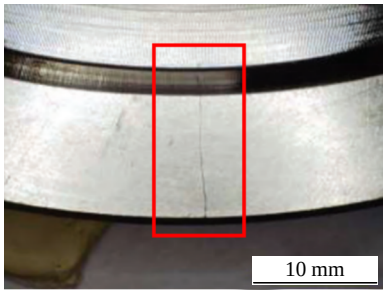


图 2 铁基合金堆焊层宏观裂纹[2]
Fig.2 Macroscopic cracks in the surfacing layer of iron-based alloy[2]

阀门堆焊层上出现的裂纹既可能是工作过程中周期性机械载荷和热载荷共同作用导致的疲劳裂纹，也可能是外部载荷和堆焊层残余应力共同作用导致的脆性裂纹。在考虑焊接残余应力的基础上，研究焊层减薄和各种载荷对堆焊层应力演化的影响，确定主要影响因素，对降低堆焊层内部应力、减少堆焊层裂纹萌生、提高管路系统安全性等工作具有重要意义[4-6]。

现有焊接结构残余应力计算模型多为直线焊道或单层单道焊结构[7-10]，且对残余应力的计算并未考虑堆焊层在使用和维修中的焊层减薄过程。通过实验方法确定堆焊层裂纹种类，以及在此基础上进行环形多层多道堆焊层残余应力计算，并分析其在服役环境下的应力演化方面的研究，目前也比较缺少。为研究焊层减薄和热载荷作用对阀门密封面堆焊层应力演化的影响，确定服役过程中堆焊层应力演化的主要影响因素，本文首先制备 Norem02 铁基合金堆焊层核级阀门模拟件，进行机械载荷疲劳实验和热载荷疲劳实验，确定堆焊层裂纹种类和产生原因；然后，进行阀门堆焊层残余应力热弹塑性有限元计算，并使用 X 射线衍射法（X-Ray diffraction，XRD）[11-15]对堆焊模拟件表面的残余应力进行测量，以验证有限元计算结果的准确性；最后，在堆焊层残余应力基础上，进行不同厚度的堆焊层在热载荷作用下的应力计算，研究堆焊层减薄后的应力重分布规律和不同厚度的堆焊层经过热载荷作用后的残余应力演化规律。

1 实验材料与堆焊工艺

1.1 实验材料

阀门母材选用 316L 不锈钢，堆焊层材料为 Norem02 铁基合金，两种合金材料的化学成分分别见表 1、2。

表 1 316L 不锈钢的化学成分(质量分数，%)
Tab.1 Chemical composition of 316L stainless steel (wt%)

C	Cr	Fe	Mn	Mo	Ni	P	Si	S
≤0.030	16~18	61.9~72.0	2.0	2.0~3.0	10~14	≤0.045	≤1.0	≤0.030

表 2 Norem 02 铁基合金的化学成分(质量分数，%)
Tab.2 Chemical composition of Norem 02 iron-based alloy (wt%)

C	Cr	Fe	Mn	Mo	Si	W
≤4.0	25	≤59.85	4.5	2.0	3.4	≤1.25

1.2 堆焊工艺

实验模拟件密封面堆焊层的堆焊方法均采用粉末等离子弧堆焊。使用多层多道焊技术，分 3 层进行堆焊，单层厚度为 1mm。每层有两条环形焊道，焊道宽 5mm，共 6 条焊道。堆焊顺序为“先内后外，逐层堆焊”。堆焊方向为逆时针，焊道形状及堆焊方向如图 3 所示，焊道分布如图 4 所示，Norem02 铁基合金堆焊层成型工艺参数见表 3。

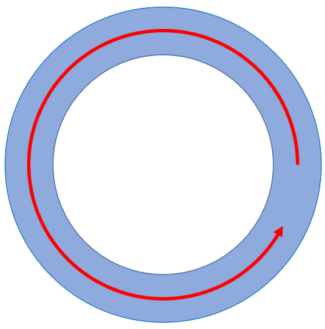


图 3 焊道形状及堆焊方向
Fig.3 Shape of weld pass and direction of surfacing welding

Norem02 铁基合金堆焊层成型过程中，预热温度为 125 ℃，最大层间温度不超过 300 ℃，层间冷却时间为 600 s。各层堆焊电流为 180 A，各层堆焊电压为 18 V，堆焊速度为 300～600 mm/min，每条焊道堆焊时间为 30 s。堆焊完成后，在 600 ℃下保温 1～2 h，

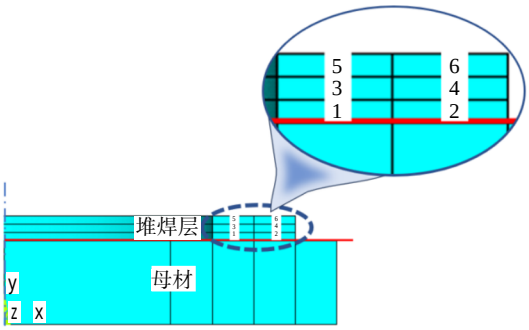


图 4 焊道分布示意图
Fig.4 Schematic diagram of weld bead distribution

表 3 Norem 02 铁基合金堆焊层成型工艺参数
Tab.3 Forming process parameters of Norem 02 iron-based alloy surfacing layer

电气特性	电流 I/A	电压 U/V	堆焊速度 v/(mm·min^{-1})
第 1 层	150~200	16~23	300~600
第 2、3 层	150~200	16~20	300~600

然后自然冷却到室温。

2 阀门堆焊层裂纹实验分析

2.1 实验流程

2.1.1 机械载荷疲劳实验

机械载荷疲劳实验使用的设备是 MTS Landmark 电-液伺服实验系统。本实验需要按照前文介绍的堆焊工艺,制备 Norem 02 铁基合金堆焊层材料的阀瓣模拟件共 4 个。制备夹具和衬垫,用于模拟阀座,衬垫与阀瓣配合处堆焊同种硬质合金层,用于模拟阀座的密封面。实验前在研磨台上使用 250 目和 1000 目砂纸对密封面进行分级研磨。使用螺栓固定夹具和衬垫,将模拟件在 MTS Landmark 电-液伺服实验系统的夹头上夹装好,夹装示意图如图 5 所示。设置实验加载类型为单侧纵向拉压,模拟工作开关过程,载荷施加方式采用力控制和正弦波循环,最大力值 F_{max}=-5 kN,应力比 R=0.1,频率 f=10 Hz。

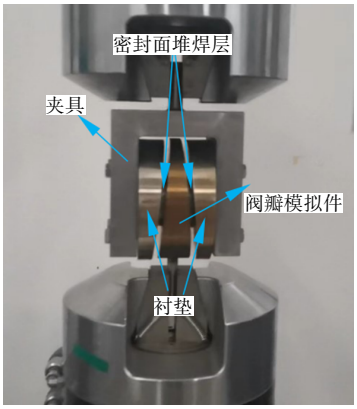


图 5 夹装示意图
Fig.5 Schematic diagram of clamping

根据实际阀门服役过程中的开启关闭次数和频率,取安全系数为 10,确定机械载荷疲劳实验中每个阀瓣模拟件载荷循环次数为 10000 次。每进行 1000 次载荷循环,使用 Olympus DSX1000 数码显微镜观察阀瓣密封面是否产生裂纹,记录当前循环次数和裂纹长度。

2.1.2 热载荷疲劳实验

将制备好的阀瓣模拟件置于加热炉中加热保温到一定温度,取出后进行水冷。每个阀瓣模拟件载荷循环次数为 300。每进行 30 次载荷循环,使用 Olympus DSX1000 数码显微镜观察阀瓣密封面是否产生裂纹,记录当前循环次数和裂纹长度。

2.2 实验结果分析

2.2.1 机械载荷和 600 ℃热载荷疲劳实验结果分析

根据实际阀门服役过程中的开启关闭次数和频率,取安全系数为 10,确定机械载荷疲劳实验的载荷循环次数为 10000。热载荷疲劳实验(600 ℃)次数取 300。对 4 个阀瓣模拟件进行实验。实验结果为:载荷循环次数为 10000 次时,4 个阀瓣模拟件堆焊层均无裂纹萌生;在热载荷疲劳实验温度为 600 ℃时,4 个阀瓣模拟件在实验循环 300 次后均无裂纹萌生。

2.2.2 1000 ℃条件下热载荷实验结果分析

实验发现,在 1000 ℃热载荷作用下,阀瓣模拟件堆焊层在第 2 次热载荷循环后,便形成裂纹,迅速完成从萌生到扩展为贯穿裂纹的整个过程。形成的裂纹为径向裂纹,无分叉,堆焊层在热载荷疲劳实验中形成的宏观裂纹如图 6 所示。可见,与文献中核电厂定期检修时现场发现的堆焊层裂纹形式一致。



图 6 堆焊层在热载荷疲劳实验中形成的宏观裂纹
Fig.6 Macroscopic cracks formed in the thermal load fatigue test of the surfacing layer

通过以上实验可以确定,以实际阀门服役过程中的开启关闭次数和频率,阀门工作环境下的周期

性机械载荷及热载荷无法导致堆焊层出现疲劳裂纹。堆焊层裂纹属于脆性裂纹，是焊接残余应力和热应力共同作用导致的堆焊层直接开裂，在一次热载荷实验时间段内直接形成贯穿裂纹。

3 焊层减薄和热载荷对堆焊层应力演化的影响

由机械载荷疲劳实验和热载荷疲劳实验结果可知，核级阀门密封面在工作过程中产生的裂纹与机械载荷无关，是堆焊层熔覆成型过程的残余应力和热应力共同作用导致的堆焊层直接开裂。考虑到在定期检修时，为确保密封面足够光滑，检修人员会对堆焊层进行磨削加工，导致堆焊层厚度降低。为研究在热载荷作用下，堆焊层残余应力的演化情况，本节将在堆焊层残余应力有限元计算的基础上，采用生死单元法，通过逐层杀死堆焊层单元，减少堆焊层厚度，模拟堆焊层减薄过程中的残余应力释放；并对不同厚度堆焊层的阀门模型进行热载荷下堆焊层残余应力演化的数值模拟，研究堆焊层减薄后的应力重分布规律和不同厚度的堆焊层在热载荷作用下的残余应力演化规律。

3.1 有限元模型的建立

用于有限元计算的几何模型及其网格划分分别如图 7、8 所示。该模型网格数为 80031(包括表面效应单元)，节点数为 59618。圆柱形母材的厚度为 10 mm，直径为 80 mm；圆环形堆焊层的厚度为 3 mm，内径为 50 mm，外径为 70 mm，模型尺寸如图 9 所示。

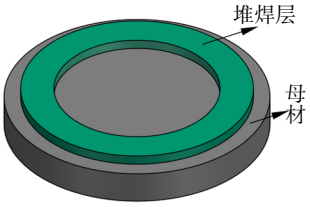


图 7 有限元计算几何模型
Fig.7 Geometric model of finite element calculation

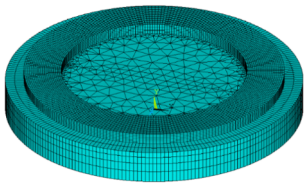


图 8 网格划分
Fig.8 Grid division

3.2 材料属性

对堆焊过程进行数值模拟，需要输入不同温度下材料的性能参数。而堆焊过程中，金属材料的局部温度甚至可以达到 2000 ℃以上，远远超过常见金属材料的熔点，难以通过实验方法得到相应温度下的材料性能参数。因此，需要借助材料分析软件

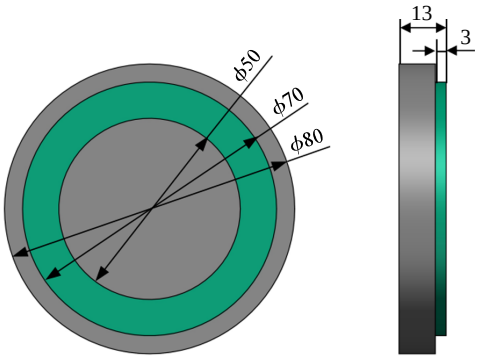


图 9 模型尺寸(mm)
Fig.9 Model sizes (mm)

JMatPro 计算材料的性能参数，并导入有限元计算软件中。有限元计算所使用的材料性能参数如图 10、11 所示。

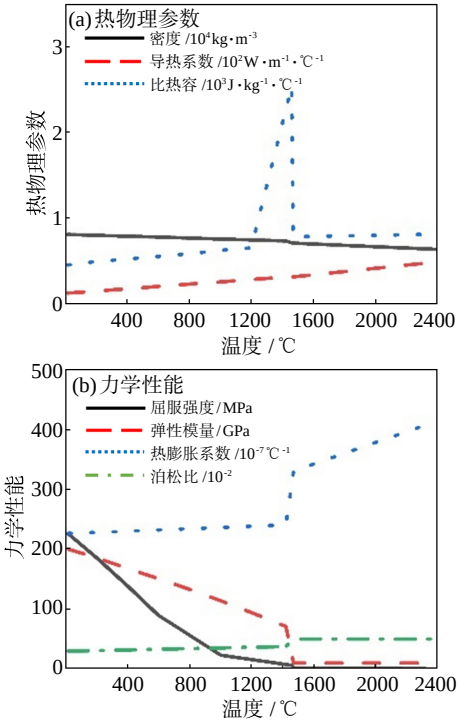


图 10 母材 316L 不锈钢的性能参数
Fig.10 Performance parameters of base material 316L stainless steel

3.3 堆焊层残余应力有限元计算

堆焊层残余应力的计算采用顺序耦合法。完成前处理后，使用生死单元法逐层杀死堆焊层单元，将初始温度设置为 125 ℃。根据堆焊层数、单层焊道数、每条焊道载荷步数，设置 3 层嵌套循环。每条焊道分为 60 个载荷步进行计算。在每一个载荷步，激活该载荷步内熔覆的堆焊层材料单元，通过表面效应单元设置表面换热条件，环境温度为 25 ℃，表面换热系数为 30

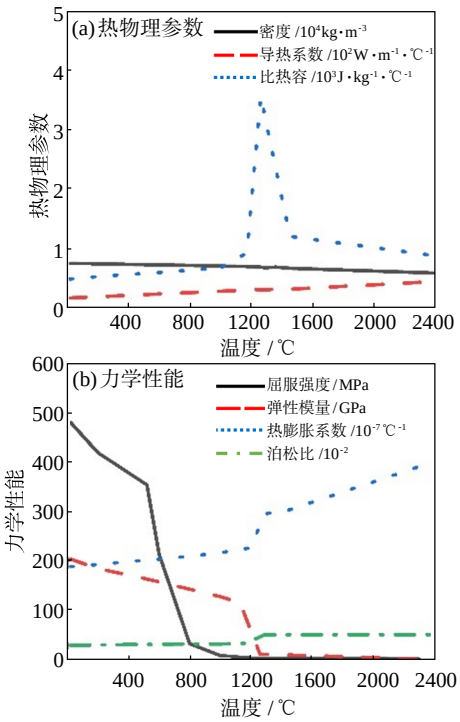


图 11 堆焊层材料 Norem 02 铁基合金的性能参数

Fig.11 Performance parameters of Norem 02 iron-based alloy for surfacing layer

W/(m²·K)。更新热源中心坐标后,在热源中心建立局部坐标系,施加双椭球体热源[16-22]进行求解,最终得到整个堆焊过程的瞬态温度场。

温度场计算完成后,进行应力场计算。首先,将分析类型由热分析转换为结构分析,将单元类型由三维 8 节点热实体单元转变为三维 8 节点结构实体单元。然后,在全局笛卡尔坐标系中,对模型底面上所有节点的轴向(Y 向)的位移自由度进行约束;在模型底面所在平面(XOZ 平面),选取坐标 z=0 的所有节点,约束其 Z 向的位移自由度,选取坐标 x=0 的所有节点,约束其 X 向的位移自由度。在每个载荷步,应力场计算与温度场计算的模型和网格都需要保持一致。

堆焊开始前,杀死所有堆焊层单元,设置初始温度 125 ℃、结构分析参考温度 25 ℃,通过 1 个稳态分析步进行应力场初始化。模拟堆焊层成型过程中,根据堆焊层数、单层焊道数、每条焊道载荷步数,设置 3 层嵌套循环。在每个载荷步激活相应的堆焊层单元,读取温度场计算结果,进行求解。最终完成整个堆焊过程的应力场求解。阀门密封面堆焊层残余应力数值模拟整体流程如图 12 所示。

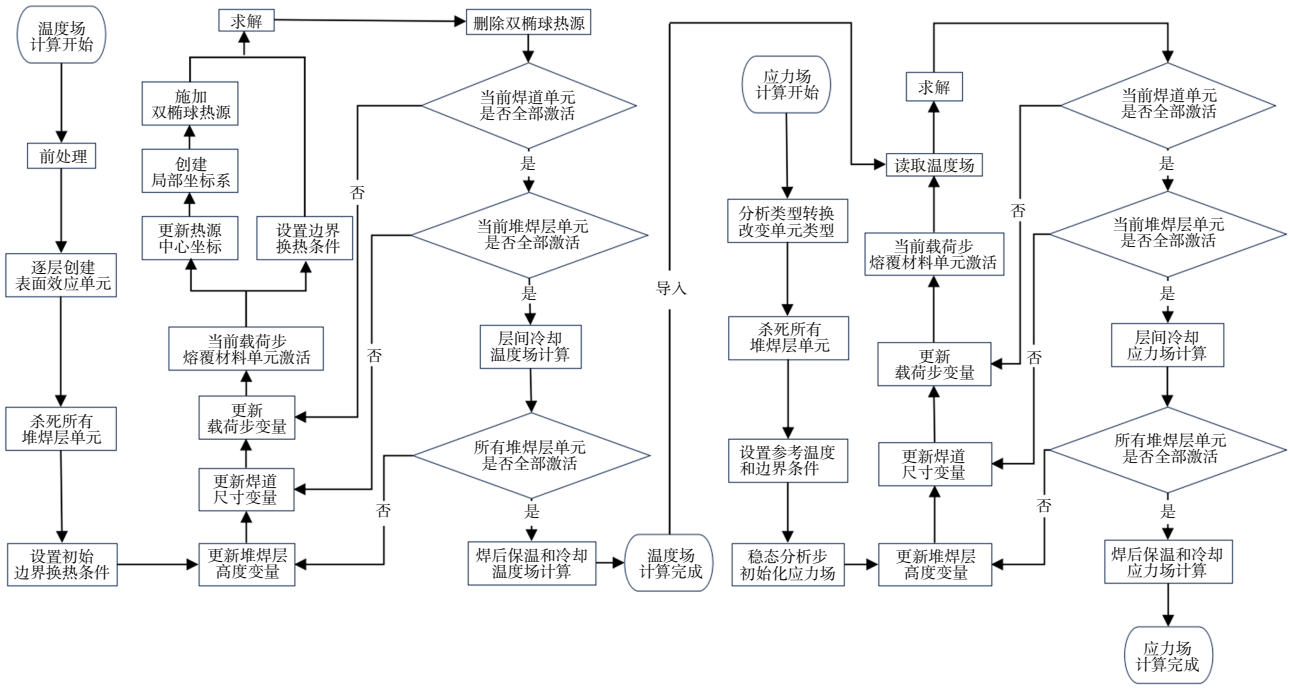


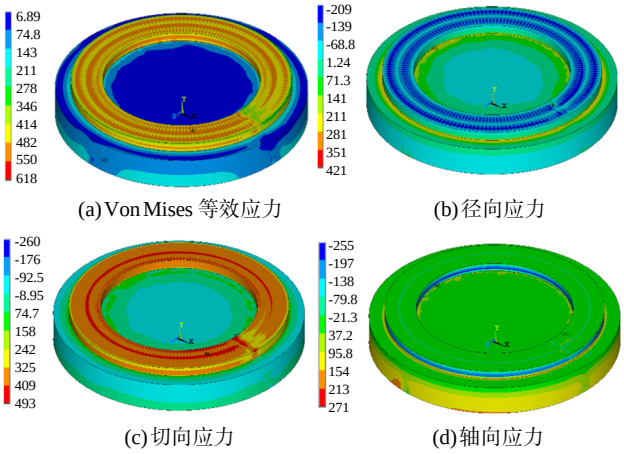
图 12 顺序耦合法计算堆焊层残余应力流程图

Fig.12 Flow chart of calculating residual stress of surfacing layer by sequential coupling method

3.4 堆焊层残余应力计算结果分析与验证

堆焊层残余应力计算结果如图 13 所示。堆焊层残余应力呈现轴对称分布特点且等效残余应力最大值出现在母材与堆焊层连接处。在堆焊层表面,径向应力主要为压应力,切向应力主要为拉应力,解释了文献[1-3]中阀门密封面出现的裂纹均为贯穿堆焊层的径向裂纹的现象。

由图 13 可知,堆焊层残余应力的轴向分量很



(a) Von Mises 等效应力　(b) 径向应力

(c) 切向应力　(d) 轴向应力

图 13　堆焊层残余应力计算结果(MPa)

Fig.13　Calculation results of residual stress of surfacing layer (MPa)

小，用 XRD 法测量堆焊层表面径向和切向的残余应力即可表征焊件的实际的应力水平和分布特点。实验使用由邯郸市埃斯特应力技术有限公司生产的 XL640 型 X 射线衍射法应力测定仪对样件进行残余应力检测。用于应力检测的焊件实物如图 14 所示，测量点 A、B、C 的位置如图 15 所示。

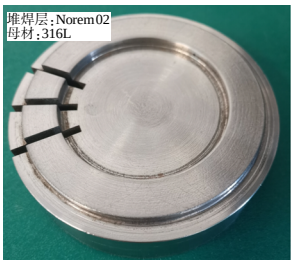


图 14　焊件实物

Fig.14　Real welded parts

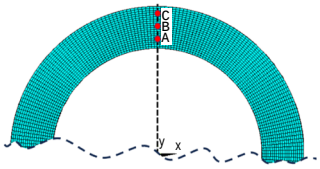


图 15　测量点位

Fig.15　Measuring point position

实验最终测得的应力值与有限元计算结果对比如图 16 所示。由图 16 可知，实验测量堆焊层表面径向与切向残余应力与有限元计算结果变化规律一致，应力值大小接近，说明有限元计算结果准确。

3.5　不同厚度的堆焊层在热载荷作用下的应力计算

首先，建立初始堆焊层厚度为 3 mm 的阀门有限元模型，导入计算得到的堆焊层残余应力场作为预定义场，并通过一个稳态分析步完成应力场初始化。初始几何模型和网格划分方法要和堆焊层残余应力计算时的完全一致。采用生死单元法，模拟逐层去除堆焊层材料的过程，每杀死一层单元，进行一次稳态分析。堆焊层厚度减薄后，通过顺序耦合方法模拟阀门受热载荷作用的过程，即先将温度升至 1000 ℃，再快速冷却到 0 ℃。模拟加热过程中，模型表面换热系

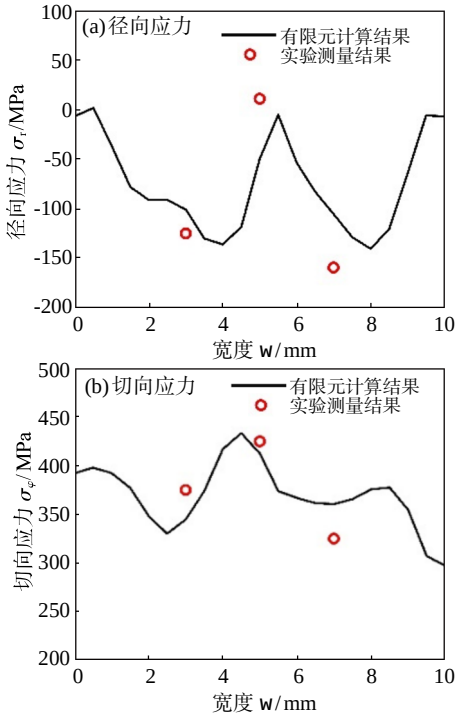


图 16　有限元计算结果与实际测量残余应力值对比

Fig.16　Comparison of finite element calculation results with actual measured residual stress values

数设为 150 W/(m²·K)；模拟水冷过程中，模型表面换热系数设为 800 W/(m²·K)，计算出该堆焊层厚度的阀门模型在热载荷作用下的应力场变化。建立多个模型，每个模型的堆焊层使用生死单元法减薄到不同厚度，再进行热载荷的热-力耦合计算，即可得到不同堆焊层厚度的阀门模型在热载荷作用下的残余应力变化。

3.5.1　不同厚度 Norem 02 堆焊层在热载荷作用下应力变化

建立 3 个 Norem 02 铁基合金堆焊层的阀门模型，将堆焊层厚度分别调整到 3 mm(未减薄)、2 mm 和 1 mm，计算得到了不同厚度的 Norem 02 堆焊层在热载荷前后等效应力总体分布对比，见图 17。

提取不同堆焊层厚度模型的所有堆焊层节点等效应力，绘制频率分布曲线图，分析热载荷疲劳前后，堆焊层所有节点等效应力随应力值分布的相对频率，不同厚度 Norem 02 堆焊层节点等效应力值频率分布曲线如图 18 所示。

由图 17 可知，Norem 02 铁基合金堆焊层初始等效应力值的集中分布区间为 450～550 MPa。经过热载荷作用后，等效应力分布非常集中，接近材料的屈服强度，说明铁基合金堆焊层在热载荷疲劳作用下

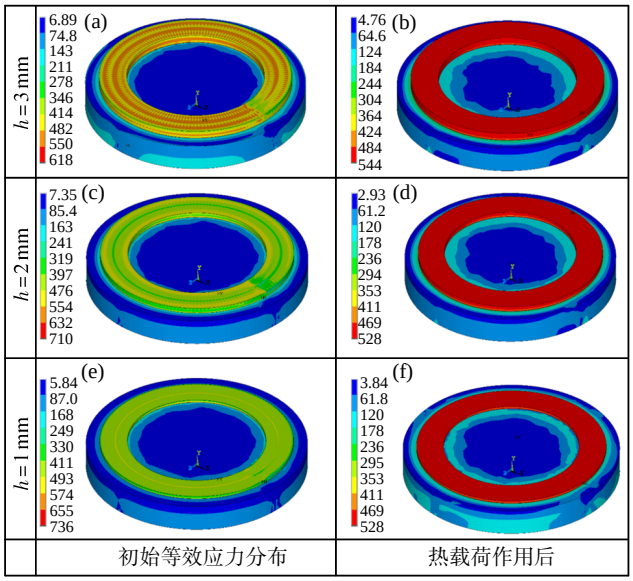


图 17 不同厚度 Norem 02 堆焊层热载荷作用前后的等效应力变化(MPa)

Fig.17 Change of equivalent stress of Norem 02 surfacing layer with different thicknesses before and after thermal load (MPa)

易产生裂纹,与前文热载荷疲劳实验结果吻合。如图 18 所示，不同厚度的堆焊层节点初始应力值频率分布接近,当 h=1mm 时,热载荷作用后的最大等效残余应力小于其他两种厚度的最大等效残余应力。堆焊层减薄对剩余部分堆焊层的残余应力影响很小,而热载荷作用对堆焊层残余应力演化影响较大。

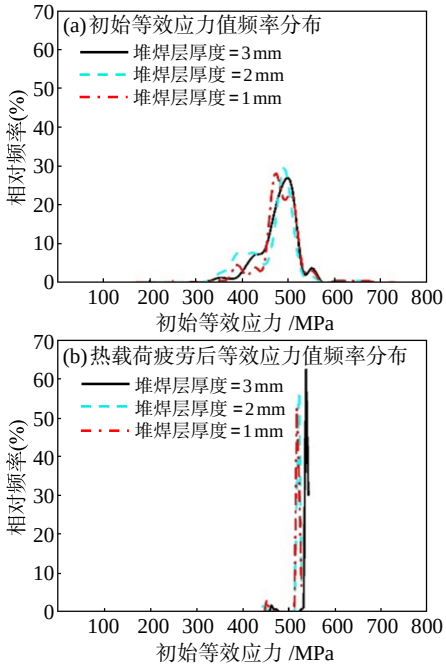


图 18 不同厚度 Norem 02 堆焊层节点等效应力值频率分布曲线

Fig.18 Frequency distribution curves of equivalent stress value of Norem 02 surfacing layer joints with different thicknesses

3.5.2 Path 1 上堆焊层应力的变化

为了研究热载荷作用前后,不同厚度 Norem 02 堆焊层等效残余应力在厚度方向的变化规律，在堆焊层截面上,设置 Path 1 路径,如图 19 所示。

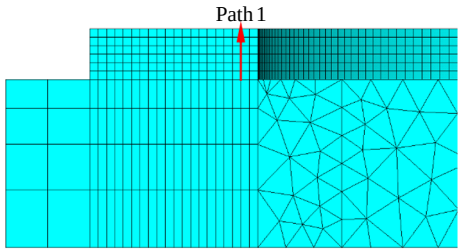


图 19 Path 1 位置

Fig.19 Path 1 position

不同厚度的 Norem 02 铁基合金堆焊层沿 Path 1 的残余等效应力如图 20 所示。可以发现,经过磨削减薄之后,Path 1 处的等效应力沿厚度方向变化规律并未发生改变,整体上来看,堆焊层金属层间接触面上应力值比其他位置应力值略大，且应力最大值位于堆焊层金属与母材连接处。堆焊层的减薄后,应力值的变化很小。热载荷作用前后，不同厚度的 Norem 02 铁基合金堆焊层在 Path 1 位置等效应力的变化如图 21 所示。

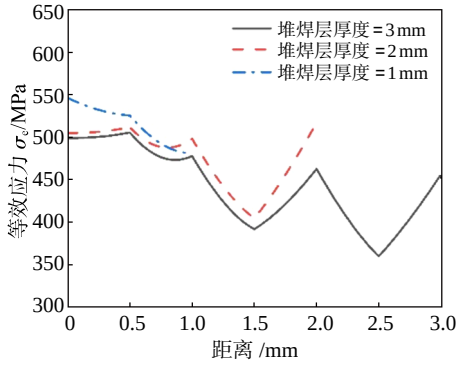


图 20 不同厚度 Norem 02 堆焊层沿 Path 1 的等效应力

Fig.20 Equivalent stress of Norem 02 surfacing layer with different thicknesses along Path 1

如图 21 所示，热载荷作用下，温度达到 1000℃时,等效应力值降到最低,在水冷过程中,堆焊层应力重新上升。并且,热载荷作用后堆焊层的应力分布变得更加均匀,Path 1 位置总体应力水平上升,且 h=3mm 或 2mm 时等效应力最大值有所上升。

由以上计算结果可知，堆焊层厚度减小对残余应力影响很小,且经过热载荷作用后,不同厚度的堆焊层应力值频率分布更为集中，厚度变化引起的应力差距进一步缩小。在热载荷作用下,堆焊层残余应

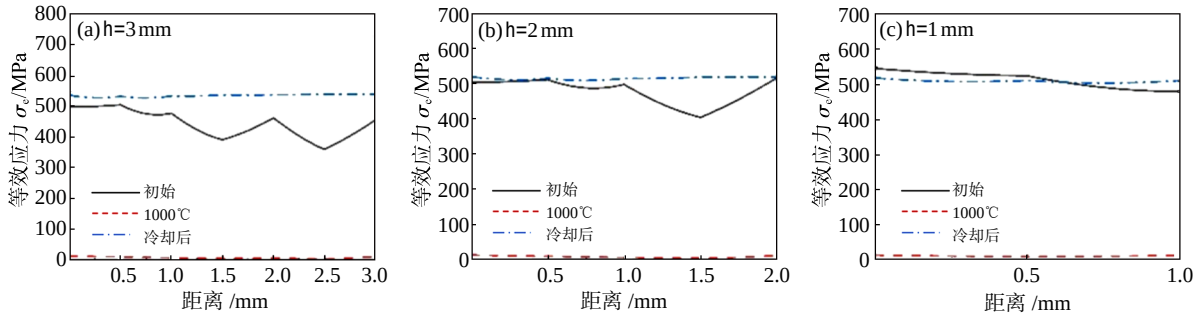


图 21 热载荷作用下堆焊层 Path 1 处的等效应力变化

Fig.21 Changes of equivalent stress at Path 1 of the surfacing layer under thermal load

力分布更为均匀,总体应力水平上升,残余应力数值接近材料屈服强度,更易产生裂纹。在阀门密封面工作过程中，堆焊层厚度的减薄对堆焊层应力演化的影响远小于热载荷的影响。

4 结论

研究了核电厂重要阀门密封面堆焊层的残余应力场及裂纹类型，给出了多层多道环形堆焊层残余应力场的有限元计算方法，分析了堆焊层残余应力的分布规律，应用 XRD 法测量了 Norem 02 铁基合金堆焊层表面的残余应力。通过阀门模拟件的机械疲劳和热载荷疲劳实验确定了阀门密封面堆焊层裂纹的产生机理，进一步分析了堆焊层厚度减薄时堆焊层材料产生破坏的主导因素。主要结论如下：

（1）完成了阀门模拟件的机械疲劳和热载荷疲劳实验，探讨了堆焊层减薄时的材料热载荷疲劳问题。首先,搭建了阀门模拟件机械载荷疲劳和热载荷疲劳实验系统,对实际阀门服役过程中的工作环境、开启关闭次数等进行了模拟实验。研究发现,阀门密封面堆焊层在焊接残余应力和热应力共同作用下直接开裂产生了裂纹。此类裂纹萌生之后,直接形成位于堆焊层的径向贯穿裂纹。

（2）使用有限元方法分析了多层多道环形堆焊层的残余应力场，通过 XRD 法测量焊件 Norem 02 铁基合金堆焊层表面残余应力，并将实验测量结果与有限元法计算结果对比，验证了有限元计算结果的准确性。研究发现：Norem 02 铁基合金堆焊层残余应力整体上呈现轴对称分布特点，堆焊层的切向残余拉应力是使实际阀门堆焊层裂纹总是沿径向生长的原因。

（3）在堆焊层残余应力计算结果的基础上,采用生死单元法模拟阀门堆焊层磨削减薄导致的堆焊层厚度降低，采用热-力顺序耦合法分析不同厚度的堆焊层在热载荷作用下的应力演化。结果表明：阀门密封面堆焊层减薄导致的堆焊层应力变化很小；在 1000 ℃热载荷作用下，堆焊层应力增加较为明显。堆焊层厚度减薄对残余应力的影响远小于热载荷的影响。

参考文献:

[1] 朱奇敏,高廷斌,朱慧秦. 核岛阀门阀瓣堆焊裂纹失效原因分析及改进[J]. 焊接技术,2019,48(11):81-85.

[2] 朱伟,高俊根,孔永红,等. 铁基合金堆焊层裂纹原因分析及工艺改进[J]. 电焊机,2021,51(11):122-127.

[3] 张铧斌,徐磊,俞雄军. 钴基合金堆焊层裂纹成因及控制措施[J]. 西华大学学报(自然科学版),2024,43(5):1-18.

[4] Hu S X, Li F, Zuo P. Numerical simulation of laser transmission welding-a review on temperature field,stress field, melt flow field,and thermal degradation [J]. Polymers (Basel), 2023,15(9):2015.

[5] Withers P J. Residual stress and its role in failure[J]. Reports on Progress in Physics,2007,70(12):2211-2264.

[6] Tekriwal P, Mazumder J. Transient and residual thermal strain-stress analysis of GMAW [J]. Journal of Engineering Materials and Technology,1991,113(3):336-343.

[7] 汪建华,陆皓,魏良武. 固有应变有限元法预测焊接变形理论及其应用[J]. 焊接学报,2002(6):36-40.

[8] Ganesh K C, Vasudevan M, Balasubramanian K R, et al. Thermo-mechanical analysis of TIG welding of AISI 316LN stainless steel [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014,29(8):903-909.

[9] 施传锐,周建平,伊里哈木·阿布都热木. 堆焊速度对堆焊成型质量的影响[J]. 热加工工艺,2019,48(15):164-167.

[10] 张雪,夏玉峰,滕海灏,等. 多道多层堆焊成形数值模拟及残余应力研究[J]. 机械科学与技术,2023,42(3):408-414.

[11] Tayon W A, Pagan D C, Yeratapally S R, et al. Exploring the role of Type-II residual stresses in a laser powder bed fusion nickel-based superalloy using measurement and modeling [J]. International Journal of Fatigue,2024,181:108153.

[12] Shajari Y, Khiabani A, Seyedraoufi Z S, et al. Nondestructive method to measure residual stress and structural properties of 1.4923 (X22CrMoV12-1) martensitic stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2023,https://doi.org/10.1007/s11665-023-09007-9.

[13] Ramineni L, Almotari A, Ali M, et al. Residual stress mapping in heat-assisted additive manufacturing of IN 718:an X-Ray diffraction study [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2024,33:4124-4135.

[14] 梁军强,蒋玲玲,迟珉良,等. 焊接顺序对电动汽车电池盒铝合金框架残余应力及焊接变形的影响 [J]. 热加工工艺,2023,52(19):133-138.

[15] Qi L C, Hou X Y, Huang X F, et al. The role of residual stress in anisotropic mechanical properties of titanium alloy after rolling [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2025,34:2755-2762.

[16] Withers P J. Residual stress and its role in failure[J]. Reports on Progress in Physics,2007,70(12):2211-2264.

[17] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions B:Process Metallurgy,1984,15:299-305.

[18] Lundbäck A, Runnemalm H. Validation of three-dimensional finite element model for electron beam welding of Inconel 718 [J]. Science and Technology of Welding and Joining,2005,10(6):717-724.

[19] Fang H Y, Meng Q G, Xu W L, et al. New general double ellipsoid heat source model [J]. Science and Technology of Welding and Joining,2005,10(3):361-368.

[20] Li P L, Lu H. Hybrid heat source model designing and parameter prediction on tandem submerged arc welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2012,62(5/8):577-585.

[21] Bjelic M, Radicevic B, Kovanda K, et al. Multi-objective calibration of the double-ellipsoid heat source model for GMAW process simulation [J]. Thermal Science,2022,26(3):2081-2092.

[22] Yang L F, Chen X, Wang J N, et al. Temperature and residual stress field analysis in double-pulse MIG welding of AA6061-T6 aluminum alloy thin sheets [J]. Journal of Adhesion Science and Technology,2023,37(24):3598-3621.

(上接第 36 页)

[3] 李萌蘖,李闯,李绍宏. TC4 合金增材制造的研究现状[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2018,43(6):20-27.

[4] 赵耀邦,成群林,徐爱杰,等. 激光-电弧复合焊接技术的研究进展及应用现状[J]. 航天制造技术,2014(4):11-14.

[5] 肖荣诗,吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光,2008(11):1680-1685.

[6] 樊立民,耿乃涛,杨柳,等. 钛合金焊接过程防氧化保护技术进展[J]. 钢铁钒钛,2021,42(6):43-50.

[7] Kim Y S, Eager T W. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding[J]. Welding Journal, 1993, 72(6):269-278.

[8] 杨春利,林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003:166-168.

[9] Li Z, Srivatsan T S, Li Y, et al. Coupling of laser with plasma arc to facilitate hybrid welding of metallic materials:a review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2013,22(2):384-395.