



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.11.07

核电机组 Overlay 堆焊修复技术的典型应用分析

熊志亮, 匡艳军, 刘 飞, 柳 猛, 黄腾飞, 邱振生

中广核工程有限公司 核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 广东 深圳 518172

摘 要: 随着核电机组运行时间的延长, 核电材料性能劣化和部件失效的几率随之增加。Overlay 堆焊修复技术作为一种可实现无需去除缺陷金属的在线维修方法, 已广泛应用于国内外核电设备及管道的纠正性维修和预防性维修。针对 Overlay 堆焊修复技术, 分析技术原理并进行残余应力有限元模拟验证, 研究了 Overlay 堆焊修复应用于核领域的标准规范要求, 提出了基于失效模式及工况条件进行堆焊材料和堆焊方法的选择原则, 梳理了 Overlay 堆焊修复技术在 CRDM Ω 焊缝和接管安全端异种金属焊缝维修中的应用情况, 分析了堆焊结构和堆焊工艺的关键技术要求, 研究了残余应力和结构完整性分析的相关结论, 提出了后续 Overlay 堆焊修复技术的研究建议。研究表明, Overlay 堆焊修复可实现结构补强和薄弱区域残余应力状态及分布的改善, 堆焊后结构可满足长寿命服役安全要求。

关键词: Overlay 堆焊修复; 残余应力调控; 结构补强; CRDM Ω 焊缝; 异种金属焊缝

中图分类号: TG455 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)11-0043-09

Analysis of Typical Applications of Weld Overlay for Nuclear Power Units

XIONG Zhiliang, KUANG Yanjun, LIU Fei, LIU Meng, HUANG Tengfei, QIU Zhensheng

State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd.,
Shenzhen 518172, China

Abstract: With the extension of operation time of nuclear power units, the probability of degradation of nuclear materials and failures of nuclear components increase. As an on-line repair technology without removing defects, Weld Overlay (WOL) has been widely used in corrective maintenance or mitigation maintenance of nuclear equipments and pipelines at home and abroad. Technical principle was analyzed and residual stress was verified by finite element simulation to study the standard specifications of WOL applied in nuclear field, and the key principles for the selection of welding materials and welding methods of WOL were put forward. The typical applications of WOL on CRDM Ω welds and dissimilar metal welds were summarized, the key technical requirements of welding structure and process parameters of WOL were analyzed, the conclusions of residual stress and structural integrity evaluation were studied, and some research suggestions on WOL were proposed. The results show that WOL can strengthen the structure and improve the state and distribution of residual stress, and the structure after WOL can meet the requirements of service safety in a long operating period.

Keywords: Weld Overlay (WOL); residual stress optimization; structural reinforcement; CRDM Ω weld; dissimilar metal weld

引用格式:熊志亮, 匡艳军, 刘飞, 等. 核电机组 Overlay 堆焊修复技术的典型应用分析[J]. 电焊机, 2022, 52(11): 43-51.

Citation: XIONG Zhiliang, KUANG Yanjun, LIU Fei, et al. Analysis of Typical Applications of Weld Overlay for Nuclear Power Units[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(11): 43-51.

* 收稿日期: 2022-03-25 修回日期: 2022-05-10

作者简介: 熊志亮(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事民用核安全设备焊接及特种维修相关工作。

0 前言

随着我国核电规模的不断扩大以及机组运行时间的延长,核电材料性能劣化和部件失效的几率也随之增加。核电站反应堆压力容器(RPV)、控制棒驱动机构(CRDM)、稳压器(PZR)等机械设备及管道系统在运行过程中因制造缺陷、疲劳、腐蚀、磨损、振动等原因诱发裂纹、减薄甚至泄漏的现象时有发生,导致系统的可靠性和安全裕度降低,需及时进行维修或强化。核电设备及管道长期在高温、高压、辐照、腐蚀等环境条件下运行,其缺陷维修或结构强化既要保证修复质量,还应满足辐射防护的相关要求。如采用挖补返修、部件更换等常规维修方式,往往需临时停运或隔离相关管线系统,影响系统功能,存在异物污染风险,且在部分场合下不可行。

Overlay堆焊修复技术是一种在线维修方法,理论上无需去除缺陷金属,无需对相关管线系统进行介质排空,可避免或减少返修过程与部件内部介质及被其污染的金属接触,易实现远程机械化作业,有利于控制人员受照剂量,节省维修时间。通过调控构件内部残余应力、提升堆焊层熔敷金属服役性能,可实现对应力腐蚀开裂部件的修复和延寿。此外,结合回火焊道设计,还可实现对大壁厚铁素体材料进行免焊后消应力热处理的修复^[1-2]。

本文结合CRDM的 Ω 密封焊缝和接管安全端异种金属焊缝Overlay堆焊修复应用案例,梳理ASME、RCC-M等规范标准要求,探究堆焊层厚度与残余应力的关系、堆焊结构的设计要求、堆焊材料的选择原则、典型核电部件堆焊工艺的控制要求、堆焊结构完整性的评价方法等关键技术,旨在打破国外垄断,为该技术在核电设备纠正性维修和预防性维修领域的应用推广提供参考和指导。

1 Overlay堆焊厚度与残余应力关系

Overlay堆焊技术是在构件待修复区域表面堆焊一定厚度的耐蚀金属,进行结构补强和应力调控。一方面,堆焊层构成新的压力边界,增加了构件的有效承载面积,同时高韧性、耐腐蚀的堆焊层可

提升构件的服役性能,进而实现对含缺陷构件的结构补强。另一方面,堆焊熔敷金属与母材(包括原始焊缝)的纵向收缩变形不一致,会导致在作为堆焊层刚性支撑的母材(包括原始焊缝)内部形成一定程度的残余压应力,通过合理的堆焊结构设计和堆焊工艺控制,改善构件内部残余应力的状态及分布,促使堆焊后接头薄弱区域呈压应力状态,抑制裂纹等缺陷的萌生和扩展,进而保证堆焊结构满足长寿期安全运行要求。

以外直径273 mm、壁厚7.5 mm、材质为Z2CN18.10的不锈钢管道为研究对象,采用ER316L焊丝在其外表面进行Overlay堆焊,堆焊层长度统一为80 mm,保持其他参数不变,分别堆焊1~4层(每层厚度2 mm),分析堆焊层对构件应力状态的影响。采用MARC软件进行有限元分析,几何模型(采用轴对称模型)和网格划分情况如图1所示。采用双椭圆热源模型和生死单元技术模拟堆焊熔敷过程,从左向右依次进行焊接。

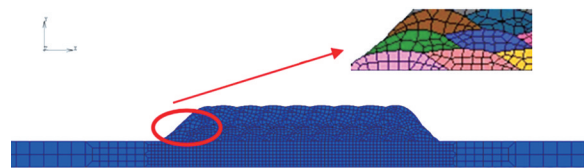


图1 管道Overlay堆焊有限元几何模型

Fig. 1 Finite element analysis model for weld Overlay on pipelines

Overlay堆焊后的轴向残余应力分布如图2所示,堆焊后管道内壁呈压应力状态,堆焊层最后施焊位置存在一个拉应力区。堆焊1~3层时,随着堆焊层数的增加,压应力分布范围逐渐增大且逐步向管道外壁侧移动(堆焊3层时会在管道与堆焊层的交界面处形成压应力),应力分布整体趋于平稳、均匀,当堆焊层数继续增加时,管道壁厚上的压应力分布范围及峰值均减小。Overlay堆焊后的径向和周向残余应力分布分别如图3、图4所示,与轴向残余应力分布规律相似,在堆焊厚度临界值范围内随着堆焊厚度的增加,呈压应力状态的区域逐渐增大且趋于平稳、均匀。当堆焊3层时,除管道内壁受压外,整个管道壁厚方向基本均为压应力状态或低拉应力状态。由此可知,就本文研究对象而言,堆焊3层效果较好,堆焊后管道内表面及邻近区域呈三维压应力状态。

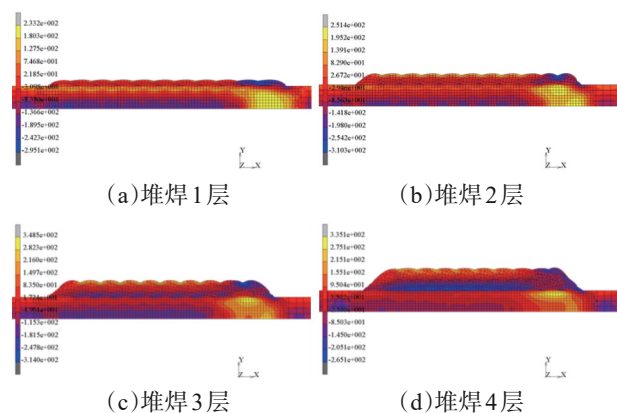


图 2 管道 Overlay 堆焊后的轴向残余应力分布

Fig. 2 Axial residual stress distribution after weld Overlay on pipelines

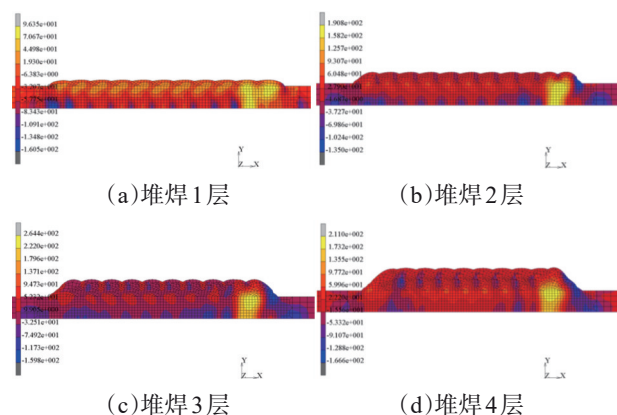


图 3 管道 Overlay 堆焊后的径向残余应力分布

Fig. 3 Radial residual stress distribution after weld Overlay on pipelines

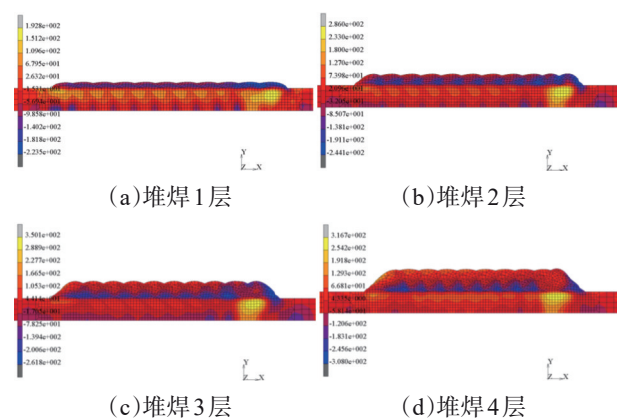


图 4 管道 Overlay 堆焊后的周向残余应力分布

Fig. 4 Circumferential residual stress distribution after weld Overlay on pipelines

综上分析,Overlay 堆焊厚度存在一个临界值,临界值的大小与待修复部件的壁厚有关,可通过有限元模拟分析等方式确认。在临界值范围内,随着堆焊厚度增加,呈压应力状态的区域逐渐增大。当堆焊厚度达到一定尺寸后,管道内表面和一定深度

范围的近内表面能实现压应力状态。随着堆焊厚度增加,内表面应力峰值逐渐降低,呈压应力状态的区域逐渐向管道外表面移动。通过调整焊接顺序或堆焊层长度,可改变拉应力区与待修复部件薄弱区的相对位置,避免拉应力区位于待修复部件薄弱区处。

2 Overlay 堆焊修复标准规范对比

核电机组 Overlay 堆焊修复分为全结构堆焊修复技术、优化堆焊修复技术、挖槽补焊技术等多种类型^[3],其结构设计、焊材选用、工艺控制、设计评价等需满足 ASME、RCC-M 等标准规范的相关要求。

RCC-M 规范^[4]对常规性堆焊以及结构强度设计进行了规定,如 RCC-M S3000 规定了不锈钢/镍基合金堆焊等焊接工艺评定的相关要求,RCC-M B3600 规定了核一级管道结构设计要求等,但没有关于 Overlay 堆焊修复技术的专用章节。通过分析可知,RCC-M 规范允许在核电部件表面进行堆焊(没有禁止 Overlay 堆焊修复),可为 Overlay 堆焊修复的结构补强设计、焊接工艺评定等提供指导。

ASME 规范^[5]已将堆焊修复作为一种永久性的修复方法,目前国际上针对核电典型部件的堆焊修复也主要参照 ASME 体系实施。如 ASME 第 XI 卷 IWB-3640 和附录 C、第 III 卷 NB-3227.7 等对堆焊修复结构设计和力学评价的要求进行了规定,第 XI 卷非强制性附录 Q 规定了核 1、2、3 级奥氏体不锈钢管道堆焊修复设计、检验的补充要求。此外,ASME 规范中有较多关于堆焊修复的规范案例,部分案例的情况分析如表 1 所示。通过分析可知,ASME 规范允许核电部件进行 Overlay 堆焊修复,并为 Overlay 堆焊修复的结构设计、工艺设计和检验评价等提供了参照。

综上所述,以堆焊结构设计为例,堆焊最小厚度可基于如下规范要求确定:(1)根据 ASME 第 III 卷 NB-3227.7,满足压力所引起的总体一次薄膜应力强度的限制要求;(2)根据 ASME 第 XI 卷 IWB-3640,缺陷深度超过壁厚的 75% 是不可接受的;(3)按照 ASME 第 XI 卷附录 C,根据净截面塌陷理论以

表1 Overlay堆焊的部分ASME规范案例^[6-9]

Table 1 Some ASME code cases for Weld Overlay

序号	ASME Code Case	关键技术要求	主要应用对象
1	N-504-4,核1、2、3级奥氏体不锈钢管道的堆焊修复	焊材:低碳奥氏体不锈钢焊材 工艺:禁用埋弧焊,可用手工电弧焊	不锈钢管道焊缝
2	N-740-2,核1、2、3级设备异种金属的全结构堆焊修复	焊材:镍基合金(ERNiCrFe-7/7A) 工艺:焊接方法未做规定,可采用回火焊道	考虑SCC影响的异种金属焊缝(P-No.1, 3,8,43间)
3	N-666-1,核1、2、3级插套焊缝的堆焊修复	焊材:对于P-No.1,采用碳钢焊材;对于P-No.8,采用奥氏体不锈钢焊材 工艺:手工电弧焊或钨极氩弧焊	P-No.1 Group 1和Group 2或P-No.8间的插套焊缝
4	N-561-2,核2、3级高能碳钢管道壁厚修复	焊材:抗拉强度不低于母材的碳钢或低合金钢焊材 工艺:焊接方法未做规定	局部侵蚀、腐蚀、气蚀或点蚀导致壁厚减薄的管道

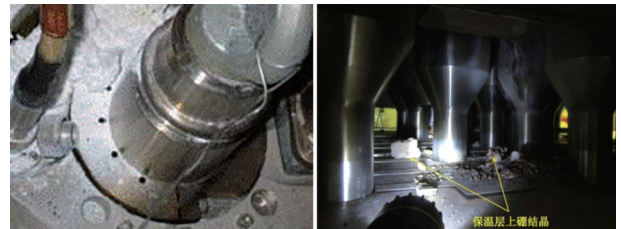
及极限载荷准则计算最小厚度;(4)堆焊至少两层。

失效模式及工况条件是Overlay堆焊修复焊材选择的重要因素,当失效模式以应力腐蚀开裂及其引起的其他开裂为主时,应优选耐蚀性好的52/52M镍基合金,其他场合下耐蚀性可不作为考虑的重点,可选用与母材成分或性能相匹配的焊材。Overlay堆焊修复一般选用稀释率低、熔敷效率高、焊缝成形好、单层熔深小的焊接工艺,可采用钨极氩弧焊、焊条电弧焊等方法,对于薄壁结构或热裂纹敏感材料,应控制道间温度和焊接热输入。

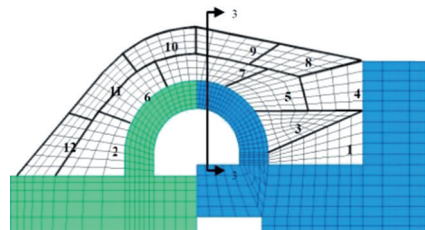
3 CRDM的 Ω 密封焊缝Overlay堆焊修复

CRDM是核电站进行反应性控制的关键核心设备,其机械部件的承压边界包含多道薄壁变形的 Ω 焊缝,壁厚仅为1.9~2.3 mm。国内外多个核电站CRDM发生过 Ω 焊缝及邻近母材泄漏的现象(见图5),泄漏的失效模式主要为应力腐蚀开裂^[1,10]。美国Zion核电站、Diablo Canyon核电站、Watts Bar核电站、岭澳核电站、秦山核电站等多个电站采用Overlay堆焊方法进行了修复^[11],主要参照ASME Code Case N-504要求执行并附加了部分特殊要求。

2005~2007年,岭澳核电站先后发现P10、K14、H14等多组CRDM上部 Ω 焊缝或其邻近母材存在硼结晶现象。电厂对上述CRDM进行了Overlay堆焊修复,采用应力腐蚀阻抗系数(SCRI)不小于34的镍基合金焊材(Alloy 52),共堆焊两层,堆焊总厚度不小于4.06 mm,焊道布置如图6所示。堆焊过程中,

图5 CRDM Ω 焊缝泄漏现场照片Fig. 5 Photos of leakage of CRDM Ω welds

第一层和第二层的最大热输入分别控制在6.54 kJ/cm和9.84 kJ/cm,道间温度控制在177 °C。堆焊完成后,通过设备机头上的一个彩色摄像机对焊缝质量进行目视检验,该质量检验方式已被NRC所接受。利用残余应力分析结果推算出构件的应力强度因子,进而开展裂纹扩展分析,计算结果表明,在电站寿期内裂纹扩展尺寸是可以忽略的,与ASME许用的缺陷尺寸比较,裂纹扩展尺寸是保守安全的,堆焊应用可保证修复后的 Ω 焊缝满足40年安全运行要求^[1]。

图6 岭澳核电站CRDM上部 Ω 焊缝堆焊结构^[11]Fig. 6 Bead layout and assumed crack propagation paths of weld Overlay on CRDM upper Ω welds in Ling'ao NPP

2013年,秦山核电站发现19组CRDM下部 Ω 焊缝有缺陷显示,其中3组发生了泄漏,泄漏原因主要是一回路冷却剂高温水中氯离子和溶解氧联合作用下的穿晶应力腐蚀开裂。最终电厂在保持原来的 Ω 密封结构形式的基础上,采用镍基合金焊材

(Alloy 52M)对所有 Ω 焊缝进行了Overlay堆焊修复,即直接在原焊缝上再堆焊2层镍基合金^[12]。堆焊厚度的设计主要考虑:(1)结构强度。按照原焊缝已全部贯穿进行设计,由于镍基堆焊层的机械性能优于原不锈钢焊缝,堆焊层厚度只要不小于原 Ω 焊缝厚度即可。(2)裂纹扩展。把电站剩余寿命及可能的20年延寿作为假设进行分析,计算得到堆焊层厚度为3.3 mm。堆焊前,须对贯穿性缺陷进行补焊,以防止堆焊过程中出现塌陷缺陷而影响堆焊层质量。此外,堆焊前在焊缝上钻2个小孔,对密封腔室进行排水放气,以防止堆焊熔深达到原焊缝中未贯穿缺陷时,内部水汽进入焊接熔池而影响焊缝质量。电厂按照ASME规范NB-4367的要求进行金相检验,没有发现裂纹、未焊透等超出规范要求的焊接缺陷,如图7所示。

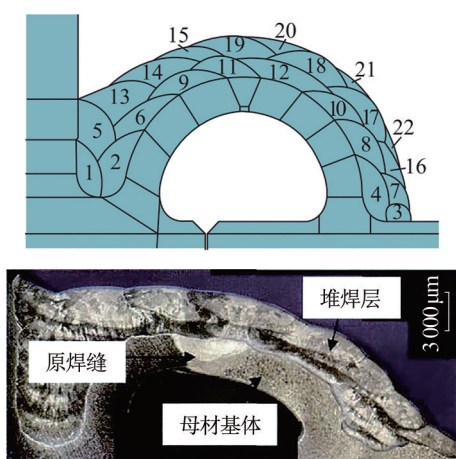


图7 秦山核电站CRDM下部 Ω 焊缝堆焊结构和焊缝形貌^[12]

Fig. 7 Bead layout and structure morphology of weld Overlay on CRDM lower Ω seal welds in Qinshan NPP

Watts Bar核电站采用钨极氩弧焊和Inconel 625

对CRDM下部 Ω 焊缝进行了堆焊修复,共堆焊3层,堆焊总厚度不小于9.144 mm。分析发现,随着堆焊层数增加,内表面应力逐渐降低,基于SCC扩展规律预测修复后的焊缝寿命超过57年^[13]。鲁治诚等人^[14]对CRDM上部 Ω 焊缝堆焊修复结构完整性分析的结果表明,修复部件的疲劳性能、应力强度因子及裂纹扩展等均能满足核电设计规范要求(见图8)。罗家成等人^[15]基于ASME规范中的断裂力学分析方法,计算得到了CRDM中部 Ω 焊缝堆焊修复结构在60年设计寿期内的最大环向裂纹深度扩展量(0.567 mm)和最大轴向裂纹深度扩展量(0.414 mm),均小于堆焊设计裂纹允许的扩展量(1 mm)。芦丽莉等人^[16]采用XRD实测法和有限元模拟分析得到的CRDM上部 Ω 焊缝堆焊残余应力结果吻合度高达86.4%,整个堆焊构件的残余应力呈中心对称分布,平均应力水平约为100 MPa,局部变形量最大不超过0.32 mm。文忠等人^[17]通过对AP1000核电站CRDM中部 Ω 焊缝激光堆焊修复工艺研究发现,焊道搭接率在42%时,可获得平整的堆焊层,熔池边界处未混合区铁素体富集,与镍基堆焊层形成晶格差异,会导致平直的II型边界出现,需堆焊21道次才能对整个 Ω 焊缝进行双层覆盖,两侧交替堆焊可保证 Ω 焊缝不出现下塌现象。

综上,CRDM Ω 焊缝的Overlay堆焊修复重点在于焊道布置和焊接质量控制。对于薄壁结构的 Ω 焊缝,一般堆焊2~3层(堆焊厚度3~5 mm),通过对密封腔室进行排水放气以及控制热输入来保障 Ω 焊缝堆焊质量且不出现下塌现象。采用第一层对称施焊、后续层顺序施焊的焊道布置方式进行整圈熔

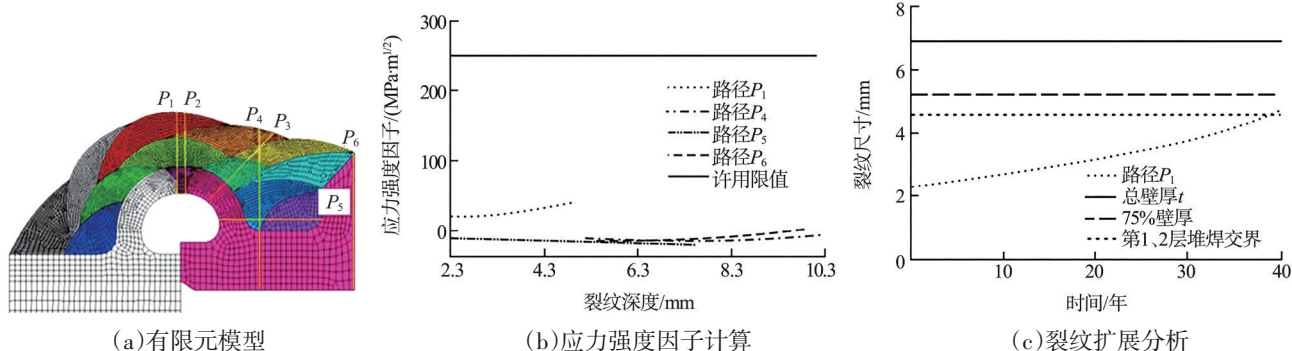


图8 CRDM上部 Ω 焊缝Overlay堆焊修复的结构完整性分析^[14]

Fig. 8 Structural integrity analysis of weld Overlay on CRDM upper Ω welds

敷,有利于控制焊接变形并促进 Ω 焊缝区域压应力的形成。采用 52/52M 镍基合金焊材进行堆焊以提升堆焊修复结构的耐蚀性,通过控制焊材杂质元素含量和焊接热输入、降低稀释率、充分打磨和清洁等措施抑制镍基合金微裂纹等质量缺陷的产生。依据 ASME 规范要求设计的结构尺寸进行堆焊,可以满足 40 年甚至 60 年寿期服役安全要求。

4 异种金属焊缝 Overlay 堆焊修复

RPV、PZR 等设备接管嘴一般由低合金钢制成,而与之连接的反应堆冷却剂管道材料为奥氏体不锈钢,为降低现场施焊难度,一般会在接管嘴上预先焊接一段不锈钢安全端,现场安装时再进行安全端与不锈钢管道的焊接。受不同材料热膨胀系数及合金元素差异、焊接残余应力、碳迁移、马氏体带以及服役环境等因素影响,核电安全端异种金属焊接接头服役过程中易产生高温高压水环境下的应力腐蚀裂纹(PWSCC),瑞典 Ringhals 核电站、美国 V.C.Summer 核电站等曾发生接管安全端开裂失效。

目前减轻和修复 PWSCC 的技术主要是在安全端管接头外表面堆焊一层更抗腐蚀的 Alloy52 材料。1985~1986 年, Vermont Yankee 沸水堆核电站首次对接管安全端进行了 Overlay 堆焊修复,之后,美国对 D C Cook 核电站 1 号机组等超过 200 个稳压器接管安全端焊缝进行了修复^[18](见图 9)。相较于不锈钢管道焊缝的修复,安全端焊缝的修复难点在于低合金钢接管侧的堆焊,因为在役维修一般很难对铁素体材料进行焊后消应力热处理。因此,接管安全端的堆焊修复需采用回火焊道等特殊工艺控制措施。美国机械工程学会在 ASME Code Case N-504 基础上,制定了用于指导核级设备异种金属焊缝全结构堆焊修复的 ASME Code Case N-740。回火焊道技术是一种通过精确控制焊接热循环、焊道几何尺寸及焊道搭接量,使第二层焊道形成的次临界区能够最大程度覆盖第一层焊道所形成的粗晶区,借助后一焊道热循环对前一焊道及热影响区起到“回火”作用(见图 10),改善其组织和性能的焊接修复方法。

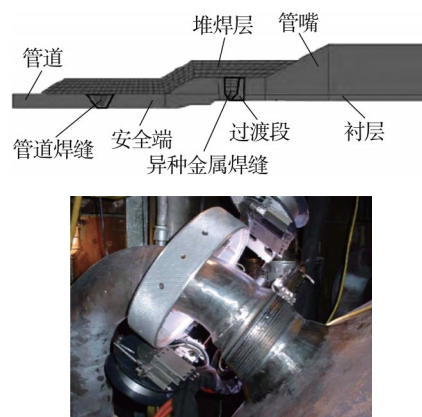


图 9 异种金属焊缝 Overlay 堆焊修复案例

Fig. 9 Cases of weld Overlay on dissimilar metal welds

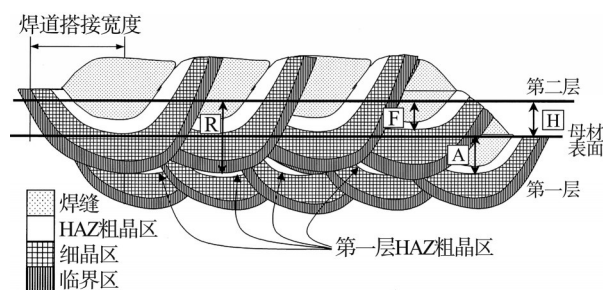


图 10 回火焊道焊接技术示意

Fig. 10 Diagram of temper bead welding

RPV、PZR 接管等异种金属焊缝堆焊前后的应力状态分析结果表明^[19], Overlay 堆焊可有效改善薄弱区域的应力状态,堆焊后内表面轴向和环向残余应力均由拉应力转变为压应力,如图 11 所示。对堆焊前后的残余应力进行测试^[20],实测结果与模拟数据趋势一致(见图 12), Overlay 堆焊可使异种金属焊缝近内表面的应力显著改善,应力曲线明显下移,部分位置已经由拉应力转变为压应力。张世伟等人^[21-22]依据 ASME 第 XI 卷 C-5320 中关于缺陷深度与厚度比的规定,以及薄膜应力和弯曲应力的限值要求,计算得到秦山核电站稳压器接管安全端异种金属焊缝最小堆焊厚度为 11.2 mm(接管嘴侧)和 9.6 mm(管道侧),堆焊修复后稳态运行期间轴向和环向残余应力均转变为压缩应力。

俄亥俄州立大学 John C. Lippold 等人^[23]对异种金属焊缝 Overlay 堆焊修复研究发现,堆焊修复后可能发生凝固开裂,这是因为 316L 型不锈钢管道硫含量高,52/52M 镍基合金熔敷金属被不锈钢材料稀释,造成其凝固温度区间变大。为此,需要降低焊接

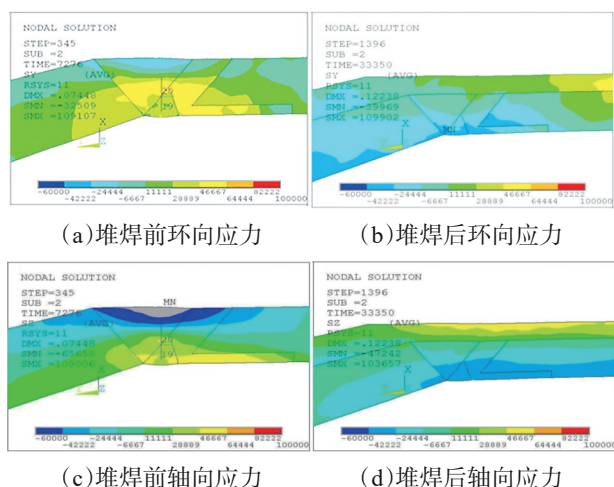
图 11 接管安全端异种金属堆焊修复前后应力分布对比^[20]

Fig. 11 Comparison of residual stress distribution before and after weld Overlay on dissimilar metal welds

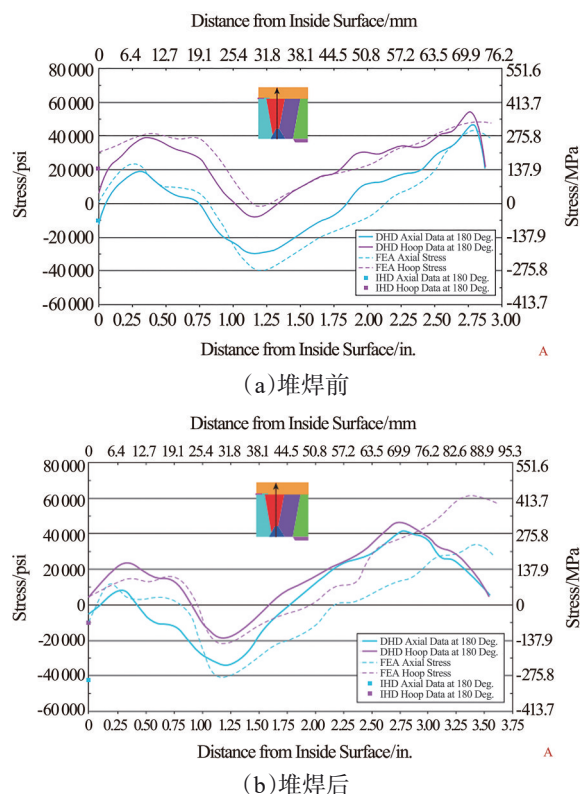
图 12 异种金属焊缝中心线路径上的应力分布对比^[21]

Fig. 12 Comparison of residual stress distribution along the centerline of dissimilar metal welds

热输入和稀释率,同时考虑在不锈钢侧先预堆焊一层 308L 过渡层(见图 13),该方案已在稳压器波动管座修复中应用。此外,ASME Code Case N-766 中给出了在应力腐蚀敏感材料的内表面施加耐蚀层的 Inlay 和 Onlay 技术^[24],可在一定程度上抑制裂

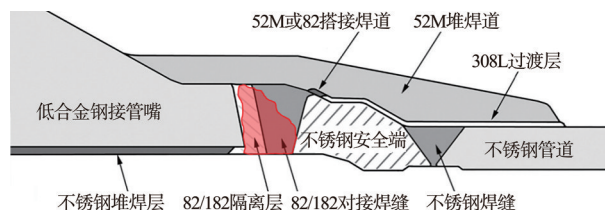
图 13 接管安全端异种金属焊缝堆焊结构优化示意^[24]

Fig. 13 Optimization design of weld Overlay on dissimilar metal welds 纹萌生和扩展。

分析可知,接管安全端异种金属焊缝的 Overlay 堆焊修复重点在于免热处理实施和 SCC 控制,可采用回火焊道的工艺控制方式,通过选用 52/52M 镍基合金焊材、调控薄弱区域残余应力分布等措施抑制 SCC 的萌生和扩展。此外,接管安全端焊缝的堆焊修复需进行超声检验,堆焊层通常会把安全端与主管道的焊缝覆盖在内,以便不影响该焊缝区域的在役检查。

5 结论

(1) Overlay 堆焊修复可实现对含缺陷构件的结构补强和服役性能提升,可改善构件内部残余应力的状态及分布,促使堆焊后内表面或薄弱区域呈压应力状态,抑制裂纹等缺陷的萌生和扩展,技术可行性和可靠性在 CRDM Ω 焊缝、接管安全端异种金属焊缝等工程维修案例中得到了充分验证,可广泛应用于核电部件的纠正性维修和预防性维修。

(2) 核电设计规范允许 Overlay 堆焊修复技术的应用。ASME 规范可为堆焊结构设计、工艺设计和检验评价等提供依据或指导,通过合理选择焊材、优化焊道布置、控制焊接热输入、降低焊缝稀释率、采用回火焊道工艺、强化焊接过程管控等措施,可保证 Overlay 堆焊焊缝质量并实现堆焊修复后构件满足长寿期安全运行要求。

(3) 有必要进一步开展 Overlay 堆焊修复技术的创新研究,以最大限度地发挥其优越性。焊接工艺方面,研究开发基于激光焊、冷金属过渡焊(CMT)等高效、低热输入焊接方法的堆焊工艺。焊接材料方面,研究开发高熵合金等通用性堆焊材料,进一步攻克异种金属堆焊焊缝的裂纹缺陷。残余应力方面,研究开发耦合外能量场调控应力的堆

焊修复技术,研究无损、高精度的残余应力在线测量技术等。

参考文献:

- [1] 吴江涛. 控制棒驱动机构密封焊缝缺陷修复技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
WU J T. Study of overlay technology for the repair of control rod drive mechanism canopy seal weld [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2008.
- [2] 孙海涛,盛朝阳,高晨,等. OVERLAY堆焊技术在核电设备维修中的应用[J]. 焊接,2015(9):53-56.
SUN H T, SHENG C Y, GAO C, et al. Application of OVERLAY technology in nuclear power equipment maintenance[J]. Welding & Joining,2015(9):53-56.
- [3] 王宇欣,郭城湘,李华,等. 核电厂焊接OVERLAY技术标准分析[J]. 电焊机,2022,52(2):57-62.
WANG Y X, GUO C X, LI H, et al. Study and Discussion on Weld OVERLAY Technical Standards for Nuclear Power Plants [J]. Electric Welding Machine, 2022,52(2):57-62.
- [4] French Association for Design, Construction and In-service inspection Rules for Nuclear Island Components. Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands [S]. France: RCC-M,2007.
- [5] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code[S]. New York:ASME,2015.
- [6] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-504-4, Alternative Rules for Repair of Class 1, 2, and 3 Austenitic Stainless Steel Piping[S]. New York:ASME,2006.
- [7] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-740-2, Full Structural Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair or Mitigation of Class 1, 2, and 3 Items [S]. New York: ASME,2008.
- [8] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-666-1, Weld Overlay of Class 1, 2, and 3 Socket Welded Connections [S]. New York:ASME,2012.
- [9] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-561-2, Alternative Requirements for Wall Thickness Restoration of Class 2 and High Energy Class 3 Carbon Steel Piping[S]. New York:ASME,2007.
- [10] Control rod drive mechanism lower omega seal weld overlay repair for Qinshan unit 1[R]. California: Structural Integrity Associates, Inc.,2013.
- [11] 郑晓敏. 岭澳核电厂L1号机组控制棒驱动机构泄漏问题[J]. 核安全,2007(2):25-29.
ZHENG X M. The Leakage Problem of CRDM in Ling'ao Station Unit 1 [J]. Nuclear Safety,2007(2):25-29.
- [12] 李建春. 秦山核电站控制棒驱动机构泄漏分析及修复[J]. 中国核电,2015,8(3):231-238.
LI J C. Leakage Analysis and Repair Method for CRDM in Qinshan Nuclear Power Plant [J]. China Nuclear Power,2015,8(3):231-238.
- [13] Design and Analysis of a Weld Overlay Repair for CRDM Lower Canopy Seal Welds of Watts Bar Nuclear Plant[R]. California: Structural Integrity Associates, Inc.,1997.
- [14] 鲁治诚,徐晓,王大胜,等. 控制棒驱动机构上部 Ω 焊缝堆焊修复结构完整性分析[J]. 核动力工程,2018,39(5):75-79.
LU Z C, XU X, WANG D S, et al. Integrity Analysis of Weld Overlay Repair Structure of Upper Ω Seal Weld of Control Rod Drive Mechanism [J]. Nuclear Power Engineering,2018,39(5):75-79.
- [15] 罗家成,张勇,李朋洲,等. CRDM中部 Ω 密封环堆焊修复裂纹扩展分析[J]. 核动力工程,2016,37(S2):11-13.
LUO J C, ZHANG Y, LI P Z, et al. Crack Growth Analysis of Ω Seal Overlay Weld Repair for CRDM [J]. Nuclear Power Engineering,2016,37(S2):11-13.
- [16] 芦丽莉,林方强,伍建文,等. 核电厂控制棒驱动机构上部 Ω 密封焊缝堆焊维修工艺[J]. 电焊机,2019,49(7):19-26.
LU L L, LIN F Q, WU J W, et al. Overlaying repair technology for the upper Ω seal weld of control rod drive mechanism in nuclear power plant [J]. Electric Welding Machine,2019,49(7):19-26.
- [17] 文忠,俞照辉,闫国华,等. 核电控制棒驱动机构密封焊缝激光堆焊修复工艺研究[J]. 热加工工艺,2017,46(23):176-179.
WEN Z, YU Z H, YAN G H, et al. Study on Laser Cladding Repair of Canopy Weld of Nuclear Power Control Rod Drive Mechanism [J]. Hot Working Technology,2017,46(23):176-179.
- [18] Bamford W, Newton B, Seeger D. Recent Experience with Weld Overlay Repair of Indications in Alloy 182 Butt Welds in Two Operating PWRs[R]. ASME Pressure Vessels & Piping/icpvt-11 Conference,2006.

- [19] Electric Power Research Institute. Materials Reliability Program: Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs(MRP-169) Revision 1-A[R]. EPRI, Palo Alto, CA:2010.1021014.
- [20] Doug Killian. EPRI-NRC Welding Residual Stress Model Validation Program-Phase IV-Cold Leg Nozzle Optimized Weld Overlay[R]. NRC/Industry WRS FEA Validation Meeting, 2011.
- [21] 张世伟,陈学德,张勇,等. 秦山核电厂稳压器管嘴 DMW 焊缝堆焊修复残余应力分析[J]. 核动力工程, 2016,37(S2):4-6.
ZHANG S W, CHEN X D, ZHANG Y, et al. Analysis of Weld Overlay Residual Stress for Dissimilar Metal Welds in Qinshan Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2016,37(S2):4-6.
- [22] 林方强,王建,罗绪珍,等. 核电管道安全端异种金属焊接接头表面堆焊的有限元分析[J]. 电焊机, 2016, 46(7):129-133.
LIN F Q, WANG J, LUO X Z, et al. Finite element analysis of the overlay welding on a nuclear nozzle safe-end dissimilar metal weld joint[J]. Electric Welding Machine, 2016,46(7):129-133.
- [23] DuPont J N, Lippold J C, Kiser S D. Welding Metallurgy and Weldability of Nickel Base Alloys[M]. Wiley and Sons Inc. Hoboken, 2009.
- [24] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-766-3, Nickel Alloy Reactor Coolant Inlay and Onlay for Mitigation of PWR Full Penetration Circumferential Nickel Alloy Dissimilar Metal Welds in Class 1 Items[S]. New York: ASME, 2017.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

2023 年《电焊机》杂志征订工作已全面启动!

岁月不居,时节如流。还未从层林尽染、芙蓉花开的盎然秋意中回过神来,初冬已悄然而至。如果说秋天是一个收获的季节,那么冬天必定是一个沉淀的季节。冬日围炉好读书,回顾,思索,蓄势。

《电焊机》杂志 2023 年的征订工作已全面展开,我们将继续以最专业的内容、最诚挚的态度助力于您的 2023!

刊登论文涵盖:焊接设备、焊接工艺、焊接材料、表面工程、增材制造等专题综述、研究性论文及工程技术文章等。主要读者对象是从事焊接、金属学及金属工艺、表面工程及相关专业的工程技术人员和院校师生,以及采购人员参阅。

本刊 2023 年策划专刊包括:电弧增材制造,搅拌摩擦焊,表面工程与极端连接,大功率激光焊,轻金属材料焊接,人机协作 智能焊接,异质材料焊接。

欢迎大家积极订阅!

邮发代号:62-81(全国各地邮局均可订阅) 零售价:15 元/期(12 期,全年共 180 元)

欢迎来全媒体平台宣传推广!

2023 年《电焊机》杂志全媒体广告宣传征集服务工作也全面展开,广告宣传投放、广告版面修订、企业软文宣传报道投稿等事宜欢迎来电垂询。

联系我们:

成都电焊机杂志有限公司 地址:成都市成华区二环路东一段 29 号

联系电话:028-83267908

邮箱:bj@toweld.com(编辑部) dhj84216672@126.com(广告部)

官方投稿网站:<http://www.71dhj.com>