

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.06.09

Cr涂层锆合金包壳管压力电阻焊工艺与性能研究

徐忠峰¹, 陈兵兵², 高明月², 李思功³, 鲁立¹, 杨佳¹

1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004

2. 中广核铀业发展有限公司, 广东 阳江 529500

3. 中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000

摘要: 为克服传统熔化焊工艺对Cr涂层锆合金包壳管焊接的局限性,采用自主研发的压力电阻焊设备,实现了Cr涂层锆合金包壳管与端塞的可靠连接。通过微观组织分析、力学性能测试和腐蚀性能评估,证实了该工艺的适用性和优势。研究发现,焊接过程中Cr涂层保持完整,未发生熔化、开裂或脱落,且未观察到明显的Cr元素扩散。此外,爆破试验和拉伸试验结果表明焊接接头具有优异的力学性能,断裂均发生在母材区,证实了接头的可靠性和强度。水腐蚀试验进一步证实了Cr涂层在高温高压水环境中的优异抗腐蚀性能,有效抑制了腐蚀介质扩散,且未出现TIG焊缝常见的涂层开裂和脱落现象。压力电阻焊工艺的低热输入、快速焊接速度和低变形率等优势,使其成为Cr涂层锆合金包壳管批量生产的理想选择。本研究为提高核燃料棒束的安全性和可靠性提供了重要的技术支持,并为相关材料的焊接工艺研究提供了新的思路。

关键词: 压力电阻焊; 包壳管; Cr涂层; 涂层稳定性; 组织; 性能

中图分类号: TG441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)06-0065-07

Study on the Process and Properties of Pressure Resistance Welding of Cr-coated Zirconium Alloy Cladding Tube

XU Zhongfeng¹, CHEN Bingbing², GAO Mingyue², LI Sigong³, LU Li¹, YANG Jia¹

1. Suzhou Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China

2. China Guangdong Nuclear Uranium Industry Development Co., Ltd., Yangjiang 529500, China

3. China Guangdong Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China

Abstract: In order to overcome the limitations of traditional fusion welding processes for Cr-coated zirconium alloy cladding tubes, a self-developed pressure resistance welding equipment was used to achieve reliable connections between Cr-coated zirconium alloy cladding tubes and end plugs. Through microstructure analysis, mechanical property testing, and corrosion performance evaluation, the applicability and advantages of this process were confirmed. The study found that the Cr coating remained intact during the welding process, with no melting, cracking, or peeling, and no obvious diffusion of Cr elements was observed. In addition, burst tests and tensile tests showed that the welded joints had excellent mechanical properties, with fractures occurring in the base material area, confirming the reliability and strength of the joints. Water corrosion tests further confirmed the excellent corrosion resistance of the Cr coating in high-temperature and high-pressure water environments, effectively inhibiting the diffusion of corrosive media, and no coating cracking or peeling commonly seen in TIG welds was observed. The advantages of low heat input, fast welding speed, and low deformation rate of the pressure resistance welding process make it an ideal choice for mass production of Cr-coated zirconium alloy cladding tubes. This study provides important technical support for improving the safety and reliability of nuclear fuel rod bundles and provides new ideas for the study of welding processes for related materials.

Keywords: resistance spot welding under pressure; cladding tube; Cr coating; stability of the coating; structure; property

收稿日期: 2025-02-18 修回日期: 2025-03-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U21B2079)

作者简介: 徐忠峰(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事自动化焊接设备研发及焊接工艺开发。E-mail: xzhf8866@163.com。



引用格式:徐忠峰,陈兵兵,高明月,等. Cr涂层锆合金包壳管压力电阻焊工艺与性能研究[J]. 电焊机,2025,55(6):65-71.

Citation:XU Zhongfeng, CHEN Bingbing, GAO Mingyue, et al. Study on the Process and Properties of Pressure Resistance Welding of Cr-coated Zirconium Alloy Cladding Tube[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 65-71.

0 引言

核燃料棒作为反应堆堆芯释热和包络放射性物质的核心部件,是维护核安全的第一道屏障,其性能的可靠性一直是核电领域关注的重点。尤其在福岛核事故后,国际核能界对核燃料在极端事故工况下的容错能力提出了更为严苛的要求,并形成事故容错燃料技术研究的新领域^[1-2]。为提升核燃料组件在长时间、苛刻运行条件及事故工况下的耐受性,研究人员聊聚焦于提高燃料材料热物性以及增强包壳材料抗高温氧化性能,并在先进包壳材料研发领域提出锆合金包壳表面氧化^[3-4]、渗层^[5]以及镀层^[6-10]等技术路线,其中以包壳表面镀 Cr 工艺方面取得的进展最为显著。

前期研究已对镀 Cr 包壳的性能进行了初步验证。杨红艳^[11]等人研究了水蒸气环境下锆合金多弧离子镀 Cr 涂层在 800~1 400 °C 条件下的氧化行为,发现 1 200 °C 下 Cr 与水蒸气氧化涂层形成的氧化膜对基体有良好的保护作用。刘艳等^[12]研究了镀 Cr N36 合金在不同温度下的拉伸开裂行为,发现随着温度升高,涂层的塑性改善,裂纹数量和裂纹的尖端状态均发生明显的变化,当拉伸温度超过 200 °C,涂层断裂方式由脆性断裂转变为韧性断裂。这些研究表明,镀 Cr 包壳具有优异的高温水腐蚀性能,可有效抑制锆水反应,有极高的应用潜力^[13-15]。

然而,将镀 Cr 包壳技术从实验室研究推向工程应用,一个关键的瓶颈在于缺乏与之适配的、能够保证燃料棒束整体性能的焊接方法和工艺。堆芯内燃料棒束需承受复杂的力学和化学环境,对连接接头的可靠性提出了极高的要求。相关研究^[16-17]表明,传统的熔化焊工艺在进行包壳管与端塞的焊接时不仅造成接头的 Cr 涂层开裂脱落,还会使部分 Cr 元素不同程度地熔入焊缝,恶化焊缝耐腐蚀性能,并可能诱发焊缝裂纹。压力电阻焊作为一种成熟的核燃料棒制造技术,通过固相连接实现锆合金端塞和包壳管的结合,其显著优点是焊接热输入低,

理论上可有效避免 Cr 涂层熔化及其元素向焊缝迁移。目前针对 Cr 涂层压力电阻焊相关的研究多集中于法式压力电阻焊工艺,该工艺常用于 AFA3G 燃料组件,但在焊接过程中会在包壳局部产生一定程度的径向膨胀,这可能对包壳涂层的完整性及性能产生不利影响。相比之下,俄式压力电阻焊工艺在整个焊接过程中,包壳管被管电极完全包覆,焊接接头外部无膨胀区,保持原始外径,理论上并不会对 Cr 涂层产生影响。然而,目前针对俄式电阻焊工艺的研究较少,为确定该压力电阻焊工艺对 Cr 涂层包壳的适用性,仍需研究材料高温流变过程对涂层特性的影响。

基于此,本文采用苏州热工研究院有限公司与中广核铀业发展有限公司联合研制的压力电阻焊设备及工艺开展了 Cr 涂层锆合金包壳管与端塞的俄式压力电阻焊试验,研究了该焊接工艺下镀 Cr 包壳管的成形特点和接头连接的可靠性,并重点分析焊接接头的微观组织、力学性能、耐腐蚀性能以及 Cr 涂层的脱落性,为镀 Cr 包壳技术在核燃料棒制造中的工程化应用提供关键工艺依据和性能评估。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

选用 ZrNb 合金作为包壳管材,ZrSn 合金作为端塞材料,两种材料的主要化学成分如表 1 所示。包壳管材规格为外径(OD)9.5 mm×80.57 mm 规格,其表面通过气相沉积工艺均匀镀覆了一层纯 Cr 涂层,涂层厚度约为 15 μm。端塞材料根据设计要求进行加工。

1.2 焊接方法

试验选用自研的压力电阻焊试验平台,焊接原

表 1 母材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal(wt. %)

材料	Sn	Nb	Fe	Cr	O	Cu	S	Zr
管材 ZrNb	—	1.0	0.15	—	0.135	0.01	0.002	余量
端塞 ZrSn	1.50	—	0.21	0.10	0.125	—	—	余量



理示意如图1所示。首先,管电极夹持镀Cr包壳管,端塞安装于端塞电极上,并在电机驱动下对包壳管施加预压紧力;然后,对端塞电极和管电极通电,利用电阻加热效应使端塞与包壳管接触界面的材料达到热塑性状态;最终在持续压力作用下,端塞与包壳管实现固相连接,形成压力电阻焊接头。

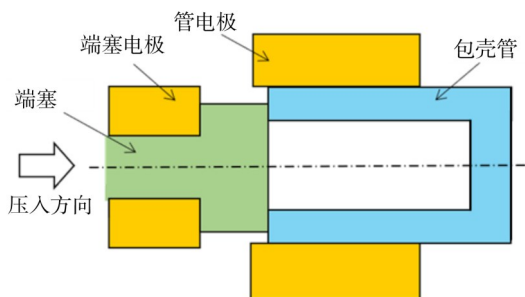


图1 压力电阻焊焊接原理示意

Fig.1 Schematic diagram of pressure resistance welding principle

为系统评估焊接工艺参数的影响,设计了两组焊接参数进行试验,焊接参数如表2所示。一组参数(试样编号1#~5#)用于评估不同焊接电流对腐蚀性能测试与爆破试验的影响;另一组参数(试样编号6#~10#)用于测试不同焊接电流对拉伸性能的影响。所有焊接试样均与采用相同焊接工艺参数制备的无涂层包壳管焊接试样进行对比分析。

表2 压力电阻焊工艺参数

Table 2 Process parameters of pressure resistance welding

试样编号	数量	焊接电流/kA	顶锻压力/N	焊接时间/ms
1#	6	16	2 500	20
2#	6	17	2 500	20
3#	6	18	2 500	20
4#	6	19	2 500	20
5#	6	20	2 500	20
6#	3	10.5	2 500	20
7#	3	12.5	2 500	20
8#	3	14.5	2 500	20
9#	3	16.5	2 500	20
10#	3	18.5	2 500	20

1.3 测试与表征

焊接完成后,使用蔡氏 ZEISS Observer 7 金相显微镜分析焊缝及结合界面金相组织;使用 ZEISS Sigma 300 扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)分析接头的Cr涂层结合状态;采用 Oxford Xplore 能谱仪(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)进行微区成分分析。按照 ASTM G2 标

准要求,将焊接试样在 360 °C 的高压釜中进行 72 h 的水腐蚀试验。采用内压爆破法测试焊缝的结合强度,爆破时管材内部填充 $\varnothing 8\text{ mm}\times 28\text{ mm}$ 弹性树脂材料。采用 30 kN AG-IS 万能材料试验机对焊接试样进行常温拉伸试验,确认其拉伸性能,拉伸试样长度约为 200 mm,端塞侧通过机加工形成 M6 螺纹,并使用专用延长杆进行拉伸夹持,如图2所示。使用自动划痕仪分析焊接热力学过程对Cr涂层与基体结合状态的影响,设备如图3所示,可同步提供声发射信号监测及摩擦力数据测试,加载载荷 10~100 N,划痕长度 5 mm,加载速率 45 N/min。



图2 压力电阻焊拉伸试样

Fig.2 Tensile specimen of pressure resistance welding

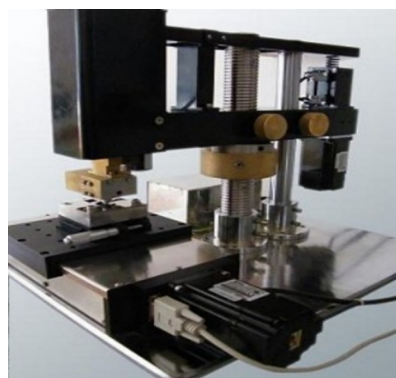


图3 划痕检测设备

Fig.3 Scratch detection equipment

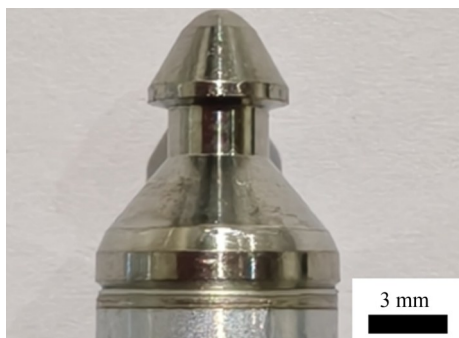
2 结果与讨论

2.1 焊接接头组织形貌分析

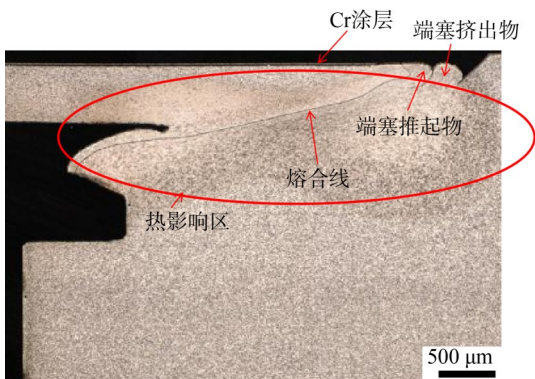
图4a为2号试样焊后外观,观察可见该试样表面的Cr涂层在焊接过程中保持完好,未发现明显的变形、开裂或脱落现象。图4b为该试样纵切后的宏观金相,其余样品的金相特征与之类似。分析表明,焊接热影响区主要分布在结合线两侧,且范围相对有限,主要集中在端塞处,而包壳管材的表层



仅受轻微的热循环影响,组织形态基本维持原始母材的状态,这表明,整个焊接过程不具备使Cr涂层发生熔化冶金或元素扩散的条件。在热量和径向力作用下,管口对端塞凸台前部进行挤压,最终在管口前端形成挤出物。



(a) 焊缝外观



(b) 焊缝金相

图4 压力电阻焊焊缝形貌

Fig. 4 Weld morphology of pressure resistance welding

顶锻长度(端塞推进量)、焊缝长度(端塞与包壳管有效结合长度)与焊接电流的关系如图5所示,随着焊接电流的增加,其长度基本为线性增长。

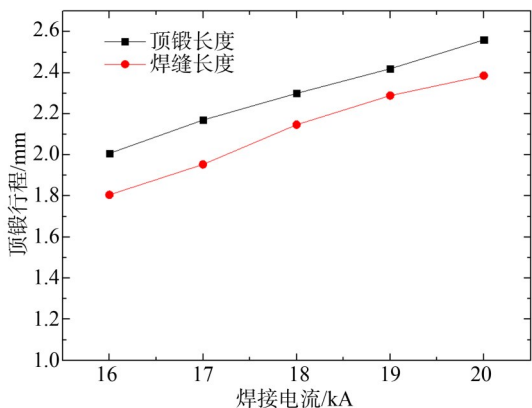
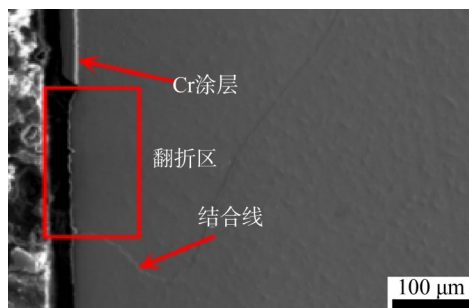


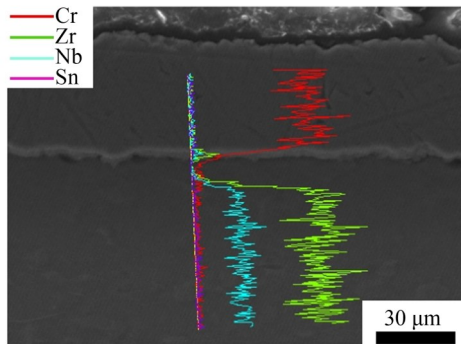
图5 焊接电流对焊缝成型的影响

Fig. 5 Effect of welding current on weld formation

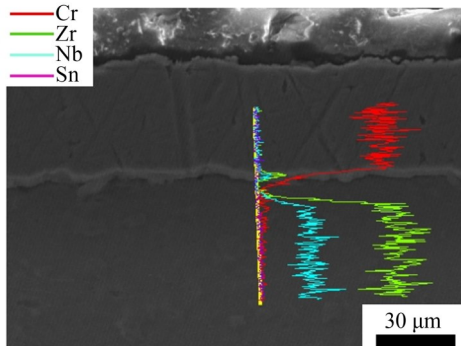
为进一步探究焊接过程中Cr元素在界面区域的迁移行为,防止引发焊缝和基体的性能恶化,使用SEM和EDS对焊缝区域Cr涂层状态进行分析,结果如图6所示。SEM观察显示,Cr涂层清晰完整,未出现微裂纹等缺陷,涂层与基体的界限清晰可辨,EDS成分分析确认焊缝区Cr涂层与基体的过渡扩散层宽度约为1~2 μm,与非焊接区的界面状态一致,表明在本工艺条件下并不会引起明显的Cr元素扩散或与基体的合金化。事实上,根据金相结果亦可发现,Cr涂层基本位于热影响区外,且受焊接过程中管材端面的流变翻折,Cr涂层被进一步隔离在结合线外。



(a) 涂层结合区域SEM图像



(b) 焊缝区线扫描EDS图像



(c) 母材区线扫描EDS图像

图6 焊缝微观形态及EDS分析

Fig. 6 Microstructure and EDS analysis of weld

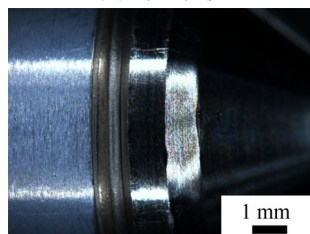
2.2 焊接接头性能评估

2.2.1 耐腐蚀性能

根据 ASTM G2 标准,对压力电阻焊焊接接头进行 360 °C、72 h 高温高压水腐蚀试验,腐蚀后的试样宏观形貌如图 7 所示。压力电阻焊试样整体外观状态良好,Cr 涂层包覆区在腐蚀后仍保持其银色金属光泽,表明其在高温高压水环境中具有良好的耐腐蚀性能。这归因于 Cr 涂层能够有效抑制腐蚀介质向锆合金基体的扩散。此外,压力电阻焊的固相连接特性,避免了 Cr 涂层与 Zr 基体的冶金反应,从而确保了 Cr 涂层在腐蚀前后与接头的结合形态保持完整,未出现 TIG 焊缝的表层开裂和脱落情况^[17]。



(a)宏观形貌



(b)管口处局部图像

图 7 试样腐蚀后涂层形态

Fig. 7 Macroscopic morphology of the coated specimen after corrosion

2.2.2 拉伸性能

表 3 为不同焊接电流下 Cr 涂层锆合金包壳管焊接接头拉伸结果。图 8 为试样的拉伸断裂状态。试验结果显示,所有试样的断裂均发生在包壳管母材区域,焊缝本身并未发生破坏。拉伸试验结果表明,焊缝性能优于母材,可靠性高。

2.2.3 爆破性能

爆破试验结果如表 4 所示,爆破后的试样形态

表 3 压力电阻焊焊缝接头拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of pressure resistance welded joints

序号	数量	焊接电流 /kA	平均抗拉强度 UTS/MPa
6#	3	10.5	534
7#	3	12.5	535
8#	3	14.5	533
9#	3	16.5	537
10#	3	18.5	534



图 8 压力电阻焊试样拉伸结果

Fig. 8 Fracture state of pressure resistance welded specimens under tensile test

如图 9 所示。所有参数试样的爆破破坏均发生在包壳管或端塞的母材区域,焊缝结合区均保持完整,未成为失效点。这进一步验证了压力电阻焊焊缝具有优异的连接强度和可靠性。

表 4 压力电阻焊焊缝接头爆破试验结果

Table 4 Burst test results of pressure resistance welded joints

序号	数量	焊接电流/kA	平均爆破力值/N
1#	2	16	11 043
2#	2	17	10 687
3#	2	18	10 955
4#	2	19	10 084
5#	2	20	10 123



图 9 压力电阻焊试样爆破结果

Fig. 9 Burst test results of pressure resistance welded specimen

2.2.4 涂层结合性能

划痕仪检验结果如图 10 所示。试验过程中,未出现 Cr 涂层脱落的情况;摩擦力及声发射检测结果如图 11 所示。分析表明,在从母材向焊缝过渡的区域,切向摩擦力随加载力的增加近似线性增长,声发射测试信息在整个测试区域内(母材区和焊缝)状态相同,表明涂层结合状态稳定。以上测试结果说明,压力电阻焊的热力学过程并未对 Cr 涂层与母



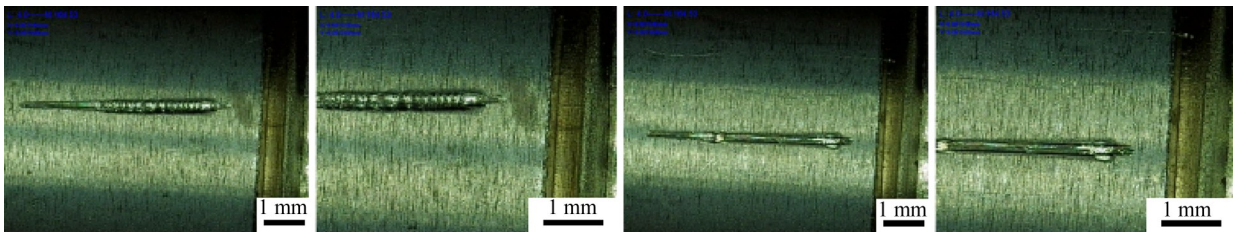


图 10 压力电阻焊试样划痕试验后表面状态

Fig. 10 Surface condition of pressure resistance welded specimen after scratch test

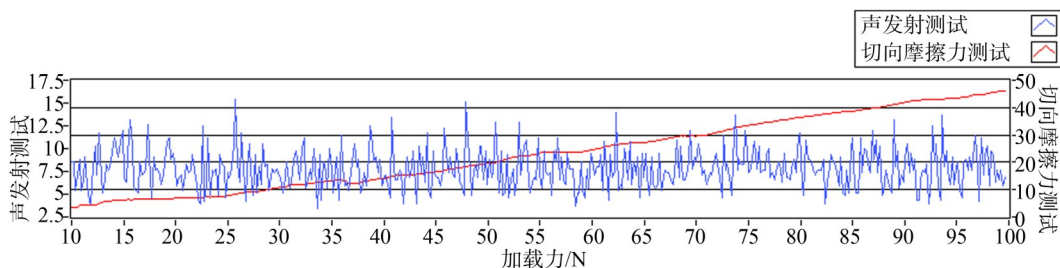


图 11 声发射及切向摩擦力结果曲线

Fig. 11 The acoustic emission and tangential friction force result curves for No. X sample

材基体的结合状态产生影响。其原因在于,焊接热输入主要集中于结合线两侧的微小区域,Cr涂层表面仅端部的极小区域在热影响区内,因此Cr涂层与母材基体的结合状态几乎不受影响。

3 结论

为掌握Cr涂层锆合金包壳的焊接性能,采用自主研发的压力电阻焊设备开展了Cr涂层锆合金包壳的压力电阻焊工艺试验,并通过焊缝外观、金相、腐蚀、拉伸、爆破、划痕、摩擦力、声发射等手段对Cr涂层的焊接特性和接头组织性能进行了表征,得出以下结论:

(1)焊接过程中,Cr涂层未发生变形、开裂或脱落,保持了良好的完整性。金相和能谱分析结果表明,焊压力电阻焊焊接热力学过程未引起明显的Cr元素扩散或与基体合金化,涂层与基体的结合状态稳定可靠。

(2)爆破试验和拉伸试验均表明,焊接接头具有良好的力学性能,断裂均发生在母材区,未出现在焊缝结合区,证实了接头的可靠性和强度。

(3)水腐蚀试验结果显示,Cr涂层在高温高压水环境中表现出优异的抗腐蚀性能,有效抑制了腐蚀介质扩散至锆合金基体内部,且未出现TIG焊缝

常见的涂层开裂和脱落现象。

(4)相比于传统熔化焊工艺,压力电阻焊具有热输入小、焊接速度快、焊接变形小等优点,能够有效避免Cr涂层的熔化、脱落和污染问题。

参考文献:

- [1] Zinkle S J, Terrani K A, Gehin J C, et al. Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective [J]. Journal of Nuclear Materials Materials, 2014, 448(1): 374-379.
- [2] Kim H, Yang J, Kim W, et al. Development Status of Accident-tolerant Fuel for Light Water Reactors in Korea [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(1): 1-15.
- [3] 吴华, 范洪远, 应诗浩, 等. 表面处理对锆合金性能的影响 [J]. 金属热处理, 2006, 31(1): 17-19.
WU H, FAN H Y, YING S H, et al. Effect of Surface Treatment on the Properties of Zirconium Alloys [J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(1): 17-19.
- [4] 黄小波, 宋俊凯, 高玉魁. 核电锆管的表面改性技术 [J]. 表面技术, 2016, 45(4): 57-64.
HUANG X B, SONG K J, GAO Y K. Surface Modification Technique of Nuclear Power Zirconium Tube [J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 57-64.
- [5] 胡汝骞, 樊湘芳, 丰振东, 等. Zr4合金离子氮化和软氮化表面处理的研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(14): 130-132.
HU R Q, FAN X F, FENG Z D, et al. Research on Zr4 Alloy After Ion Nitriding and Soft Nitriding Surface

- Treatment[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(14): 130-132.
- [6] 廖业宏,彭振骅,严俊,等. Cr涂层锆合金包壳高温蒸汽氧化动力学及微观机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(1): 291-299.
- LIAO Y H, PENG Z X, YAN J, et al. High-Temperature Steam Oxidation Kinetics and Mechanisms of Cr-Coated Zr Alloy Claddings [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(1): 291-299.
- [7] 位东辉,吴亚文,贺秀杰,等. 锆合金表面CrAl涂层的高温氧化与拉伸行为[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 44-53.
- WEI D H, WU Y W, HE X J, et al. High-temperature Oxidation and Tensile Behaviors of CrAl Coating on Zirconium Alloy [J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 44-53.
- [8] Kim H G, Kim I H, Jung Y I, et al. Adhesion property and high-temperature oxidation behavior of Cr-coated Zircaloy-4 cladding tube prepared by 3D laser coating [J]. Journal of Nuclear Materials: Materials Aspects of Fission and Fusion, 2015, 465: 531-539.
- [9] Xiao W, Chen H, Liu X, et al. Thermal shock resistance of TiN-, Cr-, and TiN/Cr-coated zirconium alloy [J]. Journal of Nuclear Materials: Materials Aspects of Fission and Fusion, 2019, 526: 151777.
- [10] 张腾飞,廖海燕,阮海波,等. 锆合金表面Mo/Al/Cr复合涂层的抗高温水蒸气氧化性能[J]. 中国表面工程, 2023, 36(2): 97-103.
- ZHANG T F, LIAO H Y, RUAN H B, et al. High Temperature Steam Oxidation Resistance of Mo/Al/Cr Composite Coating on Zirconium Alloy [J]. China Surface Engineering, 2023, 36(2): 97-103.
- [11] 杨红艳,韦天国,张瑞谦,等. 电弧离子镀工艺参数对Cr涂层沉积及性能的影响[J]. 材料保护, 2021, 54(12): 97-103.
- YANG H Y, WEI T G, ZHANG R Q, et al. Effect of Arc Ion Plating Technological Parameters on the Deposition and Properties of Cr Coatings [J]. Materials Protection, 2021, 54(12): 97-103.
- [12] 刘艳,张云华,闫秀林,等. 变形温度对核电用锆包壳管表面Cr涂层开裂行为的影响[J]. 中国表面工程, 2023, 36(2): 222-230.
- LIU Y, ZHANG Y H, YAN X L, et al. Effect of Deformation Temperature on Cracking Behavior of Cr Coatings on the Surface of Zircalloy Cladding Tube for Nuclear Power [J]. China Surface Engineering, 2023, 36(2): 222-230.
- [13] Wei T, Zhang R, Yang H, et al. Microstructure, corrosion resistance and oxidation behavior of Cr-coatings on Zircaloy-4 prepared by vacuum arc plasma deposition [J]. Corrosion Science, 2019, 158(9): 108077.1-108077.12.
- [14] 吴亚贞,席航,李国云,等. 中子辐照对Cr涂层锆合金力学性能的影响[J]. 核动力工程, 2023, 44(2): 116-121.
- WU Y Z, XI H, LI G Y, et al. Influence of Neutron Irradiation on Mechanical Properties of Cr-coated Zirconium Alloy [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(2): 116-121.
- [15] 王毅飞,刘春明,王彦峰,等. 包壳用锆合金表面Cr涂层的高温耐蚀性能[J]. 稀有金属, 2022, 46(8): 1013-1020.
- WANG Y F, LIU C M, WANG Y F, et al. High Temperature Corrosion Resistance of Cr Coating on Surface of Zirconium Alloy Cladding [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46(8): 1013-1020.
- [16] 陈兵兵,冯亮,李思功,等. Cr涂层厚度对锆合金包壳GTAW焊缝组织与性能的影响分析[J]. 中国核电, 2023, 16(2): 260-263.
- CHEN B B, FENG L, LI S G, et al. Influence of Thickness of Cr Coating on GTAW welding's Microstructure and Property of Zircalloy Cladding Tube [J]. China Nuclear Power, 2023, 16(2): 260-263.
- [17] 周希,雷明,袁野,等. Cr涂层锆合金包壳管与端塞环缝焊接接头耐腐蚀性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 84-89.
- ZHOU X, LEI M, YUAN Y, et al. Study on Corrosion Resistance of Girth Welding Joint of Cr-Coated Zirconium Alloy Cladding Tube and End Plug [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 84-89.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

