

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.06.18

锆合金包壳管材料的组织与性能研究

韩晓瑞^{1,2}, 刘 博^{1,2}, 王志刚^{1,2}, 于宏生^{1,2}, 米文俊^{1,2}, 张雪伟^{1,2*},
王云波^{1,2}, 潘胜强^{1,2}

1. 中核北方核燃料元件有限公司, 内蒙古 包头 014035
2. 中核包头核燃料元件股份有限公司, 内蒙古 包头 014035

摘要: 锆合金包壳管作为关键的核用结构材料, 其性能与组织结构对核反应堆的安全性及使用寿命具有重要意义。本研究通过电感耦合等离子体发射光谱仪/质谱仪、扫描电子显微镜、显微硬度计及光学三维轮廓仪等设备对进口锆合金、国产锆合金及国产新型锆合金的化学成分、组织性能及端面质量进行分析研究。结果表明: 国产新型锆合金内部的Fe和Sn元素与进口锆合金及国产锆合金相比较; 三种锆合金晶粒细小均匀; 第二相主要为Zr-Nb-Fe相, 进口锆合金相比国产两种合金的第二相粒子分布较为均匀、细小; 国产锆合金的抗拉强度和硬度与其余两种合金相比较, 断后伸长率低于其余两种合金。进口锆合金的端面粗糙度优于其余两种国产锆合金。以上研究有望为锆合金包壳管材料后续的焊缝成形质量控制、接头缺陷形成机理分析以及焊接工艺参数优化提供理论依据。

关键词: 锆合金包壳管; 显微组织; 力学性能; 端面质量

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)06-0132-08

Study on the Organization and Properties of Zirconium Alloy Cladding Tubes for Nuclear Power Generation

HAN Xiaorui^{1,2}, LIU Bo^{1,2}, WANG Zhigang^{1,2}, YU Hongsheng^{1,2}, MI Wenjun^{1,2}, ZHANG Xuewei^{1,2*},
WANG Yunbo^{1,2}, PAN Shengqiang^{1,2}

1. China North Nuclear Fuel Co., Ltd., Baotou 014035, China
2. CNNC Baotou Nuclear Fuel Components Company Limited, Baotou 014035, China

Abstract: Zirconium alloy cladding tubes, as key nuclear structural materials, are of great significance for the safety and service life of nuclear reactors due to their properties and organization. In this paper, the chemical composition, organizational properties and endface quality of imported zirconium alloys, domestic zirconium alloys and domestic new zirconium alloys are analyzed and studied by inductively coupled plasma emission spectrometer/mass spectrometer, scanning electron microscope, microhardness tester, and optical three-dimensional profilometer and other equipments. The results show that: the internal Fe and Sn elements of the new domestic zirconium alloys are higher than those of the imported zirconium alloys and domestic zirconium alloys; the grains of the three types of zirconium alloys are fine and uniform; the second phase is mainly the Zr-Nb-Fe phase, and the distribution of particles of the imported zirconium alloys compared to the domestic two types of zirconium alloys is more uniform and fine; the tensile strength and hardness of the domestic zirconium alloys are higher than the remaining two types of alloys, and the elongation at break is lower than that of the remaining two types of alloys. The tensile strength and hardness of domestic zirconium alloy are higher than the other two alloys, and the elongation after break is lower than the other two alloys. The end face roughness of imported zirconium alloys is better than that of the remaining two domestic zirconium alloys. The above study is expected to provide theoretical basis for the subsequent quality control of

收稿日期: 2025-03-04 修回日期: 2025-04-28

作者简介: 韩晓瑞(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事核材料焊接工艺研究。

通讯作者: 张雪伟, 男, 高级工程师, 主要从事核材料焊接工艺研究。E-mail: 969647786@qq.com。

weld formation, analysis of joint defect formation mechanism and optimization of welding process parameters for zirconium alloy casing pipe materials.

Keywords: Zirconium alloy cased tubes; microstructure; mechanical properties; end face quality

引用格式: 韩晓瑞, 刘博, 王志刚, 等. 锆合金包壳管材料的组织与性能研究[J]. 电焊机, 2025, 55(6): 132-139.

Citation: HAN Xiaorui, LIU Bo, WANG Zhigang, et al. Study on the Organization and Properties of Zirconium Alloy Cladding Tubes for Nuclear Power Generation[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(6): 132-139.

0 引言

核燃料包壳管作为核反应堆燃料元件的核心密封结构,其主要功能是包容核燃料,防止放射性物质泄漏到冷却剂中,同时将核燃料裂变产生的热量有效传递给冷却剂^[1-2]。因此,包壳管材料必须具备优异的耐热性、耐蚀性、机械强度和抗辐射性能。锆合金因其独特的物理和化学性质,如低的中子吸收截面、良好的高温力学性能和优异的耐蚀性,成为核燃料包壳管的首选材料并被认定为核反应堆的“第一道安全屏障”^[3-5]。

在核反应堆中,锆合金包壳管的焊接接头性能对整个反应堆的安全性和可靠性至关重要^[6]。焊接接头不仅需要承受高温、高压和辐照环境,还需在复杂的力学和热应力作用下保持稳定^[7]。然而,锆合金的焊接性相对复杂,其焊接接头的性能受到母材成分、焊接工艺参数的显著影响^[8]。例如,焊接过程中产生的热输入可能导致晶粒长大、第二相粒子的析出行为改变,进而影响焊接接头的力学性能和抗腐蚀性能。此外,焊接接头的微观组织不均匀性也可能导致应力集中,从而降低其抗裂性和疲劳寿命^[9-10]。

尽管已有学者对锆合金管材进行了广泛研究,但对不同系列锆合金包壳管材料的系统研究相对较少。特别是对于进口锆合金、国产锆合金以及国产新型锆合金这三种锆合金包壳管材料,其焊接接头性能的差异尚未得到充分探讨。因此,开展焊接前期的材料特性系统研究对于深入理解其焊接性本质具有重要的科学意义。

本文聚焦于锆合金包壳管脉冲TIG焊接项目的前期基础研究,通过化学成分测试、显微组织表征、力学性能测试、端面加工质量分析等系统实验手段,对三种典型锆合金包壳管材料的本质特征及其

影响机制进行深入探究。研究结果将为后续焊缝成形质量控制、接头缺陷形成机理分析以及焊接工艺参数优化提供重要的理论支撑和科学依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

为了更好地研究掌握锆合金包壳管材料的本质特征,本文针对三种不同锆合金包壳管材料的组织与性能等方面进行深入研究,旨在为锆合金管材的后续的焊接应用提供理论依据。试验材料分别为进口锆合金、国产锆合金以及国产新型锆合金。管材尺寸外径为 $\varnothing 9.5$ mm,内径为 $\varnothing 8.0$ mm。纵向截取不同长度锆合金包壳管材料,观察面为管材的纵截面,对三种锆合金包壳管材料的化学成分、显微组织、力学性能及端面粗糙度进行测试。

1.2 化学成分测试

在锆合金包壳管材料端部分别进行刨丝后,将丝放入HF后,在原基础上加入浓HNO₃并加热到230℃后,待丝充分溶解后,利用电感耦合等离子体发射光谱仪/质谱仪(AGILENT 725-ES)进行测试。

1.3 显微组织分析

将三种锆合金包壳管材料沿纵向切开,每段长约3 cm,观察面为管材的纵截面,通过800#~4000#砂纸进行打磨至端面平整光滑。利用HF:HNO₃:H₂SO₄:H₂O=1:3:3:3配制的抛光液进行化学抛光至表面光亮无划痕后进行显微组织拍摄。

1.4 力学性能测试

使用HVS-1000A显微硬度计,在200 gf加载力下,加载时间设置为15 s,随机选取12个点进行测试锆合金包壳管材料的显微硬度,去除最大和最小值后,每种合金取10个点的平均值作为最终结果。通过使用美特斯E45-305万能拉伸机以0.5 mm/min



的恒定速度对锆合金包壳管材料进行轴向拉伸测试,分别对每种合金进行3次测试,最终取平均值,以保证测试结果的准确性。

1.5 端面粗糙度测试

使用Bruker的光学三维轮廓仪Contour GT-K来开展锆合金包壳管材料的端面粗糙度测试。将待测样品清洗干净,并固定在测试平台上。通过调整焦距,使光学系统对准样品表面,以获得清晰的图像并对样品Sa值进行测试。

2 结果与分析

2.1 锆合金管材化学成分分析

表1为三种锆合金包壳管材料的化学成分。根据表1测试数据可得,进口锆合金与其他两种锆合金相比Fe元素含量略低,Fe含量较低会导致锆合金内部Zr-Nb-Fe相含量减少^[11]。其次,锆合金包壳管材料的Sn元素含量存在明显差异,其中表现为进口锆合金最低为0.4347%,国产锆合金为0.5305%,国产新型锆合金为0.484%。Sn元素主要作为固溶强化元素,与Zr元素形成固溶体,从而提高合金的强度。同时Sn元素对锆合金表面氧化膜的形成和稳定性有重要影响,含量较低时会导致氧化膜的保护性能下降,加速合金的腐蚀过程。另外,Sn元素的降低也对 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变点有明显影响,在沉淀析出相颗粒形状基本不变的基础上,使第二相颗粒的平均

表1 三种锆合金包壳管化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of three types of zirconium alloy casing tubes (wt. %)

材料类型	Fe	Sn	Zr	Nb
进口锆合金	0.278 0	0.434 7	98.645 2	0.501 3
国产锆合金	0.301 2	0.530 5	98.516 6	0.510 0
国产新型锆合金	0.302 4	0.484 0	98.543 8	0.527 7

尺寸减小^[12]。

2.2 锆合金管材金相组织分析

图1为三种锆合金包壳管材料显微组织。通过图1对进口锆合金、国产锆合金和国产新型锆合金的金相组织对比分析发现,进口锆合金的晶粒细小且分布,组织致密,显示出优异的冶金质量;国产锆合金的晶粒尺寸和均匀程度接近于进口锆合金;为了定量计算三种锆合金包壳管的晶粒度,每种锆合金管材选取3张光学显微组织照片按照GB/T6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》通过ImageJ软件进行标定,并以此确定晶粒度等级。统计结果如表2所示,三种锆合金包壳管的平均晶粒尺寸接近,进口锆合金较细小为4.81 μm ,国产新型锆合金略为粗大为4.92 μm ,国产锆合金居中为4.88 μm 。

表2 三种锆合金包壳管晶粒度统计

Table 2 Three kinds of zirconium alloy pipe grain size statistics

材料类型	线段长度总和 / μm	晶界结点数	平均晶粒尺寸 / μm
进口锆合金	634.92	264	4.81
国产锆合金	634.40	260	4.88
国产新型锆合金	634.68	258	4.92

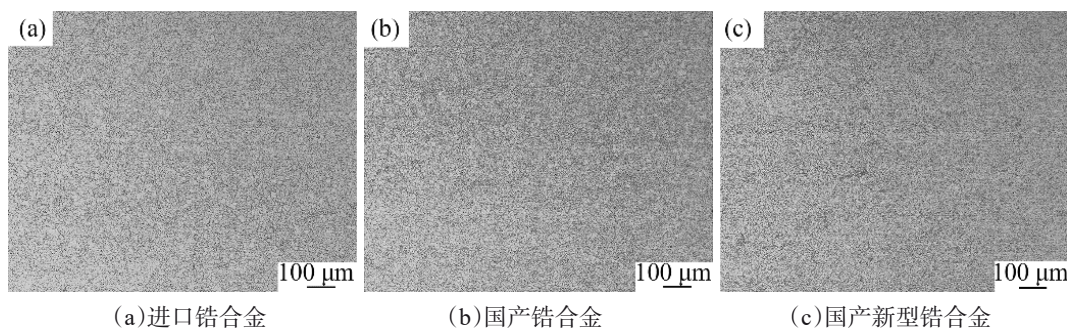
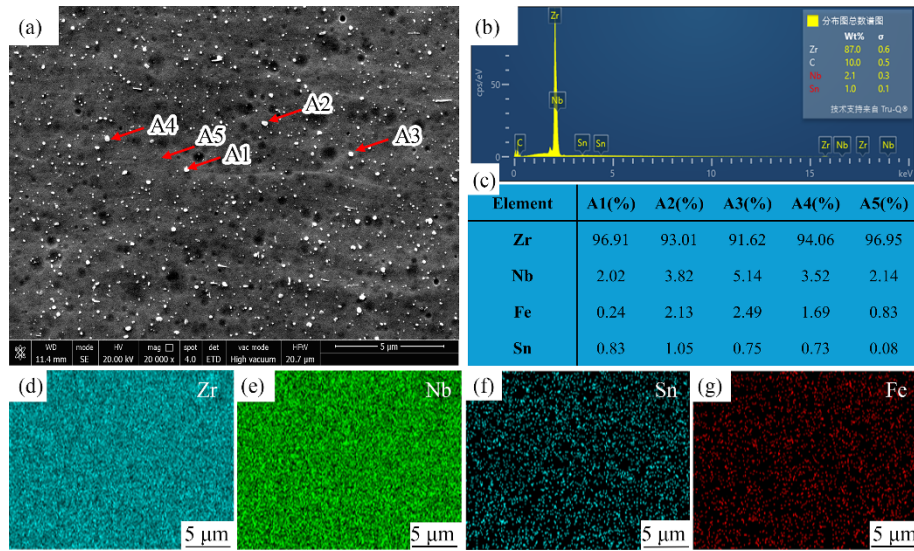


图1 三种锆合金管材显微组织

Fig. 1 Microstructure of three zirconium alloy tubes

图2~图4分别为进口锆合金、国产锆合金和国产新型锆合金的SEM和EDS图。可以看出,三种合金内部均无明显缺陷,第二相粒子主要为Zr-Nb-Fe相,均匀分布于晶内和晶界处,呈纳米级颗粒。进

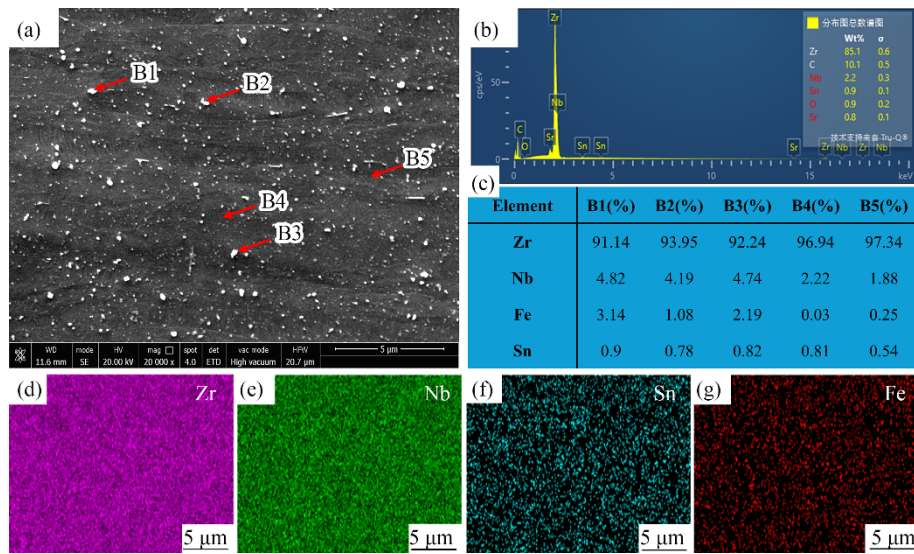
口锆合金内部第二相粒子与其余两种国产合金相比较为均匀。Zr和Nb元素呈弥散分布于材料内部,进口锆合金内部的Fe、Sn元素略低于国产锆合金和国产新型锆合金。



(a)显微形貌;(b)面扫描;(c)点扫描;(d)~(g)能谱图

图 2 进口锆合金 SEM 图

Fig. 2 SEM image of imported ZIRLO alloy



(a)显微形貌;(b)面扫描;(c)点扫描;(d)~(g)能谱图

图 3 国产锆合金 SEM 图

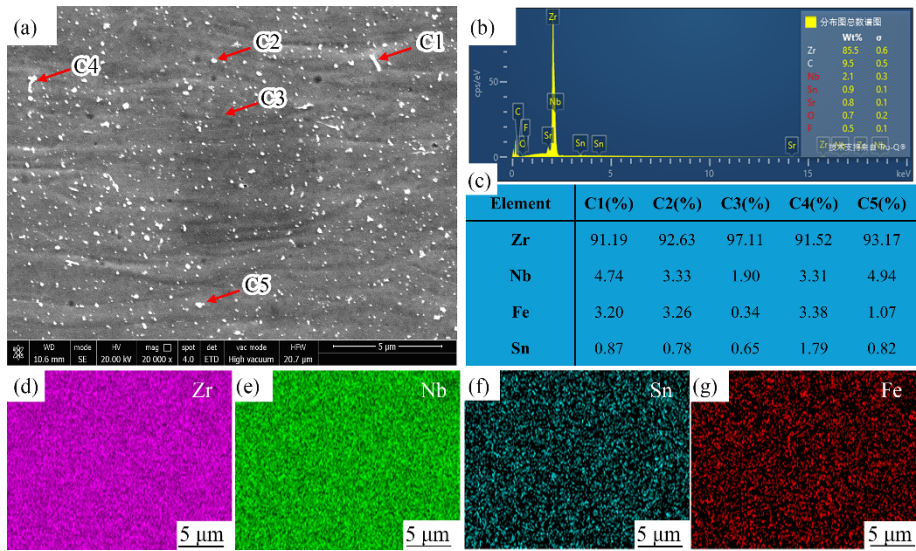
Fig. 3 SEM images of domestic ZIRLO alloy

2.3 锆合金管材力学性能分析

图 5 为三种锆合金包壳管材料的力学性能,图 6 为三种锆合金包壳管材料的应力-应变曲线。由图 5、图 6 可知,国产锆合金的抗拉强度略高,为 181.06 ± 2.759 MPa, 国产新型锆合金为 179.34 ± 1.921 MPa, 进口锆合金的抗拉强度略低,为 168 ± 1.418 MPa。与此相反,进口锆合金断后伸长率较高,为 $45.933 \pm 3.723\%$, 国产新型锆合金居中,为 $41.99 \pm 1.015\%$, 国产锆合金断后伸长率较低,为 $34.433 \pm 1.106\%$ 。

图 7 为三种锆合金包壳管材料的显微硬度。由图 7 可得,三种合金显微硬度差异较小,国产锆合金硬度略高,为 235.251 ± 3.31 HV_{0.2}, 国产新型锆合金居中,为 227.83 ± 5.733 HV_{0.2}, 进口锆合金的硬度略低,为 226.249 ± 5.08 HV_{0.2}。国产锆合金的抗拉强度较高促使其在受到外部拉力作用时抵抗断裂的能力较强。进口锆合金的断后伸长率较高,表示该合金具有良好的塑性促使其能够承受的塑性变形能力较强。





(a)显微形貌;(b)面扫描;(c)点扫描;(d)~(g)能谱图

图4 国产新型锆合金SEM图

Fig. 4 SEM images of the new domestic Zr alloy

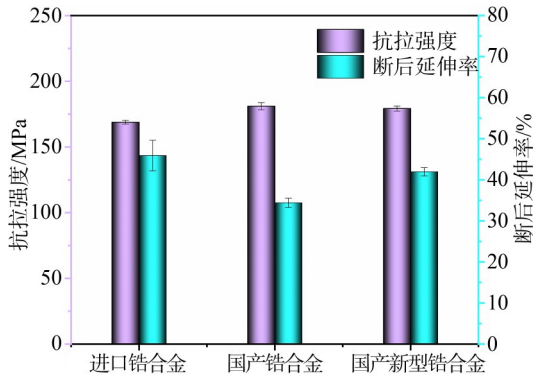


图5 三种锆合金管材力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of three kinds of zirconium alloy pipes

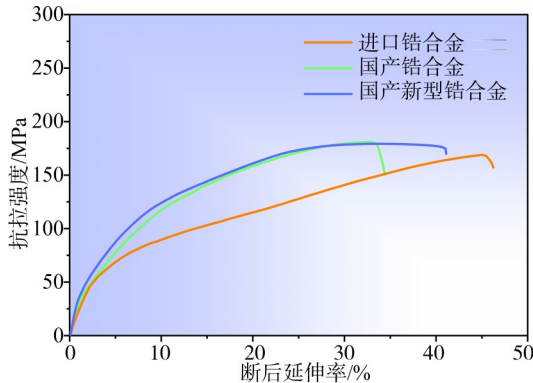


图6 三种锆合金管材应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of three kinds of zirconium alloy tubes

三种锆合金包壳管材料的力学性能存在一定的差异,主要原因在于:国产锆合金内部的Fe、Sn两种元素略高于国产新型锆合金和进口锆合金,使得

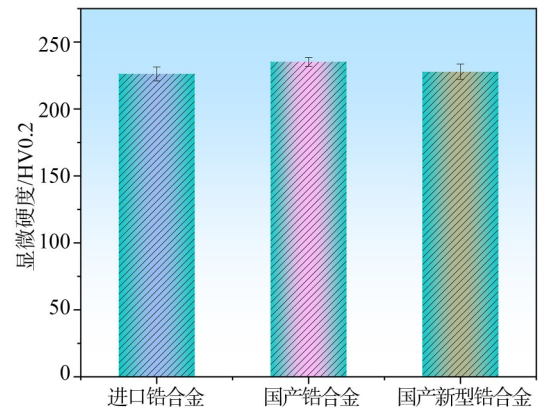


图7 三种合金显微硬度

Fig. 7 Schematic diagram of microhardness of three alloys

国产锆合金内部的第二相粒子(Zr-Nb-Sn相)数量较多,且分布于晶界处,第二相粒子能够进一步强化晶界,增强国产锆合金的抗拉强度。相比之下,进口锆合金断后延伸率最高,主要是由于其细小且均匀分布的晶粒(4.81 μm)可以有效分散应力集中,使得进口锆合金再受到拉伸时能够承受较大的变形,从而表现出良好的塑性。

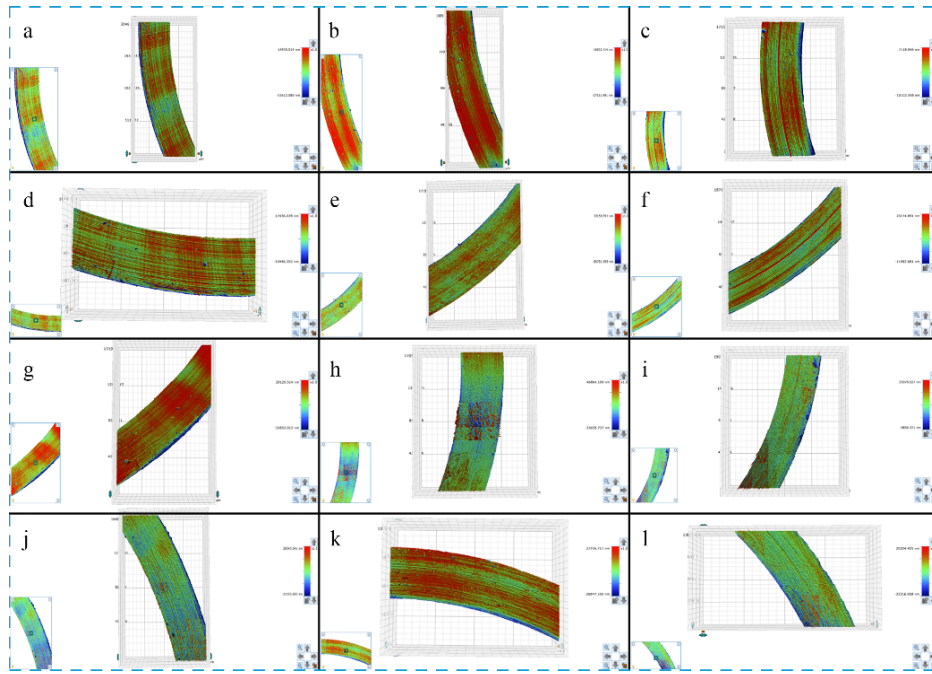
2.4 锆合金管材端面粗糙度分析

端面粗糙度是指在机加工表面具有较小的间距和微小峰谷的不平整程度,主要是由加工方法及材料性质的不同造成的表面平整程度的差别,对成形试件的使用寿命有着重要的影响。图8、图9表示三种锆合金包壳管材料在四个不同位置的端面粗

糙度均方根偏差(Sa)的分布情况和对应的SEM图。由图8、图9可以看出,在同一机加工工艺下,三种包壳管材料的端面粗糙度存在一定的差异,端面高度差沿环向呈明显的阶梯状,各个环向位置间的粗糙度数值差异较大,但呈明显的规律性。进口锆合金

的端面较为光滑,起伏程度较小。国产锆合金的起伏程度较大,端面相对粗糙。

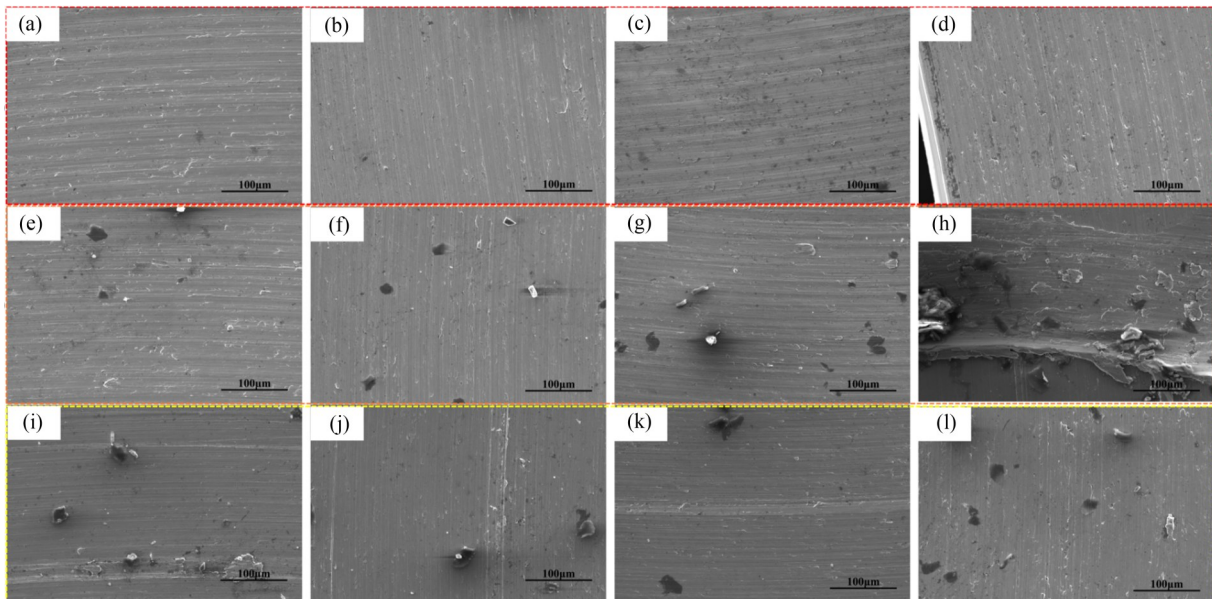
表3为三种锆合金包壳管材料的端面粗糙度Sa测量数值。结合表3可得,进口锆合金的端面粗糙度较低,Sa=397.895 nm。国产新型锆合金的端面粗



(a,d,g,j)进口锆合金;(b,e,h,k)国产锆合金;(c,f,i,l)国产新型锆合金

图 8 端面粗糙度 Sa 图

Fig. 8 Roughness of end face Sa diagram



(a,b,c,d)为进口锆合金;(e,f,g,h)为国产锆合金;(i,j,k,l)为国产新型锆合金

图 9 不同位置下三种锆合金包壳管材料原管口 SEM 图

Fig. 9 SEM images of the original orifices of the three zirconium alloy casing tube materials at different positions

糙度居中, $S_a=516.053$ nm。国产锆合金的端面粗糙度较高, $S_a=535.197$ nm。造成三种材料端面粗糙度出现差异的主要原因是:国产锆合金的硬度较高,国产新型锆合金居中,进口锆合金的硬度相对较低。在相同的机加工工艺下,硬度越高的锆合金包壳管材料,更容易使刀具产生磨损,引起刀具振动加剧,从而使加工表面的端面粗糙度增大。端面粗糙程度对后续焊接过程的影响较大,表面越粗糙,对于过盈配合而言,由于装配时将微观凸峰挤平,减小了实际的有效过盈,对应力集中较为敏感,无法严密地结合从而影响焊接成形,易出现焊接水波纹等缺陷。

表3 端面粗糙度 S_a 测试数值

材料类型	S_a /nm
进口锆合金	397.895
国产锆合金	535.157
国产新型锆合金	516.053

3 结论

(1) 国产新型锆合金内部的Fe和Sn元素与进口锆合金及国产锆合金相比略高;三种锆合金晶粒细小均匀,平均晶粒尺寸接近,进口锆合金较细小为 $4.81\ \mu\text{m}$,国产新型锆合金略为粗大为 $4.92\ \mu\text{m}$,国产锆合金居中为 $4.88\ \mu\text{m}$ 。三种锆合金的第二相主要为Zr-Nb-Fe相,进口锆合金第二相粒子较为细小且分布均匀。

(2) 国产锆合金的抗拉强度略高为 181.06 ± 2.759 MPa,国产新型锆合金为 179.34 ± 1.921 MPa,进口锆合金较低为 168 ± 1.418 MPa。进口锆合金断后延伸率为 $45.933\pm 3.723\%$,优于其他两种国产锆合金。硬度方面,国产锆合金的略高为 235.251 ± 3.31 HV_{0.2},国产新型锆合金为 227.83 ± 5.733 HV_{0.2},进口锆合金略低为 226.249 ± 5.08 HV_{0.2}。

(3) 由于不同锆合金管材的组织与性能的差异,导致在相同机加工工艺下三种合金的端面粗糙度表现明显不同,进口锆合金端面 S_a 为 397.895 nm较为平整,国产锆合金端面 S_a 为 535.157 nm略为粗糙。国产新型锆合金居中, S_a 为 516.053 nm。为了

保障焊接质量,应合理提高两种国产锆合金包壳管材料的端面加工精度。

参考文献:

- [1] 包春玲,金德华,张有为,等. 锆及锆合金铸造工艺与成型技术研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(S2): 377-381.
BAO C L, JIN D H, ZHANG Y W, et al. Research Progress of Casting Technology and Forming Technology of Zirconium and Zirconium Alloys [J]. Materials Reports, 2024, 38(S2): 377-381.
- [2] 刘学强,左家栋,王亚强,等. 锆合金包壳表面纳米多层涂层的研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(12): 1125-1137.
LIU X Q, ZUO J D, WANG Y Q, et al. Research Progress of Nanolaminated Coatings on Zirconium Alloy Cladding [J]. Materials China, 2024, 43(12): 1125-1137.
- [3] 王瑶,李金山,陈波,等. Cr涂层锆合金耐事故燃料包壳材料高温蒸汽氧化行为研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(11): 3271-3280.
WANG Y, LI J S, CHEN B, et al. Research Progress on High-Temperature Steam Oxidation Behavior of Cr-Coated Zirconium Alloy as Accident-Tolerant Fuel Cladding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(11): 3271-3280.
- [4] RIBIS J, ONIMUS F, BÉCHADE J, et al. Experimental study and numerical modelling of the irradiation damage recovery in zirconium alloys [J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 403(1): 135-146.
- [5] 张海芹,王旭峰,渠静雯,等. Zr-4合金包壳管维氏硬度与强度关系研究[J]. 钛工业进展, 2023, 40(06): 36-40.
ZHANG H Q, WANG X F, QU J W, et al. Study on the relationship between Vickers hardness and strength of Zr-4 alloy cladding tubes [J]. Advances in Titanium Industry, 2023, 40(06): 36-40.
- [6] 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(02): 84-89.
ZHOU X, LEI M, YUAN Y, et al. Corrosion resistance of Cr-coated zirconium alloy clad shell tube and end plug annular welded joints [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(02): 84-89.
- [7] 吴洋,苏宝龙,袁睿豪,等. 钨极氩弧焊对接ZrTiNb合金焊接组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术,



2024,45(06):543-550.

WU Y, SU B L, YUAN R H, et al. Effects of tungsten argon arc welding on the welding organization and mechanical properties of ZrTiNb alloy [J]. Foundry Technology, 2024, 45(06): 543-550.

- [8] 戚彦强,李顺平,彭倩,等. Zr-Sn-Nb合金焊接薄板低周疲劳试验方法研究[J]. 核动力工程,2023,44(S1): 188-193.

QI Y Q, LI S P, PENG Q, et al. Research on the low-frequency fatigue test method for welded thin plates of Zr-Sn-Nb alloy [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(S1): 188-193.

- [9] 林健,冯刚,雷永平,等. 核电用锆合金电阻对焊的研究进展[J]. 北京工业大学学报,2022,48(10): 1078-1087.

LIN J, FENG G, LEI Y P, et al. Research progress of resistance butt welding of zirconium alloy for nuclear power generation [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2022, 48(10): 1078-1087.

- [10] 张天广,王家斌,李刚. 工业锆合金焊接方法研究现状[J]. 中外企业家,2020(02): 154.

ZHANG T G, WANG J B, LI G. Research status of industrial zirconium alloy welding method [J]. Chinese and foreign entrepreneurs, 2020(02): 154.

- [11] Fan Q, Yuan B, Xie M, et al. Effects of hot rolling temperature and aging on the second phase particles of Zr-Sn-Nb-Fe zirconium alloy [J]. Nuclear Materials and Energy, 2019: 20100700-100700.

- [12] 栾佰峰,苏婧,黄天林,等. Sn含量对Zr-Sn-Nb-Fe-Cr合金相变温度和沉淀析出相的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2012,41(05): 830-834.

LUAN B F, SU J, HUANG T L, et al. Effect of Sn content on phase transition temperature and precipitation precipitation phase of Zr-Sn-Nb-Fe-Cr alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41 (05) : 830-834.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第131页

34-37.

- [4] 赵永庆,葛鹏,辛社伟. 近五年钛合金材料研发进展[J]. 中国材料进展,2020,39(Z1): 527-534.

ZHAO Y Q, GE P, XIN S W. Progresses of R&D on Ti-Alloy Materials in Recent 5 Years [J]. Materials China, 2020, 39(Z1): 527-534.

- [5] 赵恒,李兰云,辛超,等. 钛合金在油气开采中的应用及研究现状[J]. 热加工工艺,2023(4): 1-4+15.

ZHAO H, LI L Y, XIN C, et al. Application and Research Status of Titanium Alloy in Oil and Gas Exploitation [J]. Hot Working Technology, 2023(4): 1-4+15.

- [6] 刘颖,刘志富. TA16钛合金导管的自动钨级旋转氩弧焊[J]. 航空制造技术,2009,332(10): 117-119+125.

LIU Y, LIU Z F. Automatic Rotating Argon Tungsten-Arc Welding of TA16 Titanium Alloy Conduit [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 332 (10) : 117-119+125.

- [7] 宋怡漾,朱勇辉,潘晓冬,等. 小直径厚壁钛合金管对接焊缝产生微气孔缺陷原因分析及控制研究[J]. 热加工工艺,2014,43(11): 197-200.

SONG Y Y, ZHU Y H, PAN X D, et al. Cause Analysis and Control Research of Effect of Micro Pores to Butt Weld of Small Diameter Titanium Alloy Pipe [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(11): 197-200.

- [8] 殷亚运,苏晓炜,叶长青,等. TA16换热管5G位置脉冲GTAW机动焊工艺研究[J]. 材料开发与应用, 2022,37(01): 72-76.

YIN Y Y, SU X W, YE C Q, et al. Study on Automatic Pulse-GTAW Welding Process on 5G Position of TA16 Heat Exchange Tube [J]. Development and Application of Materials, 2022, 37(01): 72-76.

- [9] 罗强,王理,周之入,等. TA16和TA17钛合金热物理性能与温度的关系[J]. 机械工程材料,2009(10): 30-32+67.

LUO Q, WANG L, ZHOU Z R, et al. Relationship between Temperature and Thermal Physical Properties of TA16 and TA17 Titanium Alloys [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2009(10): 30-32+67.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

