

锆合金表面激光熔覆制备Ti-Cr涂层耐磨性能及腐蚀行为研究

罗华¹, 龙绍军², 任岩², 连利仙¹, 刘颖¹

1. 四川大学材料科学与工程学院 四川成都 610065

2. 中国核动力研究设计院核燃料元件及材料研究所 四川成都 610213

摘要: 锆 (Zr) 及其合金因具有中子吸收截面小等优势成为核燃料包壳材料的首选, 然而核反应堆内部高温、高压、高辐射及磨损等严苛服役环境, 大大缩短了锆合金部件的使用寿命。铬 (Cr) 因具有良好的耐磨性、耐蚀性等特点, 常被选作锆合金的表面涂层材料, 然而纯Cr涂层较脆, 容易产生裂纹等缺陷。钛 (Ti) 具有良好的塑性、耐蚀性和强度, 将Ti引入Cr涂层中, 有望解决纯Cr涂层开裂的问题。通过激光熔覆技术, 在Zr-4合金表面制备出Ti-Cr (质量分数比为8:2) 涂层, 以增强锆合金表面的耐磨性和耐蚀性。制备的涂层致密、无缺陷、且成分均匀, 与Zr-4基体通过互溶, 形成了良好的冶金结合; 与Zr-4基体相比, Ti-Cr涂层的硬度为415.4HV, 比基体提高了1.2倍, 磨损率降低35.3%, 表现出优异的耐磨性; 电化学测试结果表明: Ti-Cr涂层比Zr-4基体的自腐蚀电位高且自腐蚀电流密度低, 同样表现出优异的耐蚀性。本研究为开发适用于在苛刻环境下服役的高性能Zr-4合金涂层提供了重要参考。

关键词: 激光熔覆; Zr合金; Ti-Cr涂层; 耐磨性; 耐蚀性

Wear resistance and corrosion behavior of Ti-Cr coatings fabricated via laser cladding on zirconium alloy

LUO Hua¹, LONG Shaojun², REN Yan², LIAN Lixian¹, LIU Ying¹

1. College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, Sichuan, China

Abstract: Zirconium (Zr) and its alloys are the preferred materials for nuclear fuel cladding due to their low neutron absorption cross-section, among other advantages. However, the harsh service environment inside nuclear reactors, characterized by high temperature, high pressure, intense radiation, and wear, significantly shortens the lifespan of zirconium alloy components. Chromium (Cr), known for its excellent wear and corrosion resistance, is often chosen as a surface coating material for Zr alloys. Nevertheless, pure Cr coatings are brittle and prone to cracking and other

基金项目: 四川省工程技术研究中心资助项目 (2023GFW0462); 中国核动力研究设计院联合创新基金项目 (HG2023164)。

第一作者: 罗华, 硕士研究生, 主要从事利用激光熔覆技术制备金属改性涂层的研究, E-mail: 596066082@qq.com。

通信作者: 连利仙, 教授, 博士生导师, 主要从事稀土钎钛新材料、高温合金、增材制造、核工程材料等研究,

E-mail: scu_lianyi@126.com。

defects. Titanium (Ti), with its good plasticity, corrosion resistance, and strength, is introduced into Cr coatings to potentially address the cracking issues of pure Cr coatings. In this study, a Ti-Cr (mass percentage is 8 : 2) coating was prepared on the surface of Zr-4 alloy using laser cladding technology to enhance the wear and corrosion resistance of the zirconium alloy surface. The prepared coating was dense, defect-free, and compositionally uniform, forming a strong metallurgical bond with the Zr-4 substrate through mutual dissolution. Compared to the Zr-4 substrate, the Ti-Cr coating exhibited a hardness of 415.4HV, which is 2.2 times that of the substrate, and a 35.3% reduction in abrasion wear rate, demonstrating excellent wear resistance. The electrochemical test results revealed that the Ti-Cr coating had a higher self-corrosion potential and lower self-corrosion current density than the Zr-4 substrate, indicating superior corrosion resistance. This research provides important insights for developing high-performance Zr-4 alloy coatings suitable for service in demanding environments.

Keywords: laser cladding; Zr alloy; Ti-Cr coating; wear resistance; corrosion resistance

1 序言

核电作为一种清洁、高效的能源，在全世界能源结构中占据着重要地位^[1, 2]。锆及其合金因具有极低的热中子吸收截面（0.185barn）和较好的耐蚀性、适中的力学性能等特点，常被用作核裂变反应堆核燃料的包壳材料^[3]。但受核反应堆中强辐射、高温高压水等严苛环境的冲刷和侵蚀，使锆合金的寿命大大缩短。特别是在冷却剂丧失的事故工况下，核反应堆中温度急剧上升，产生大量高温水蒸气，与Zr发生反应生成H₂并释放热量，导致包壳破损、核燃料泄漏，最终发生爆炸^[4-6]。当前解决此类事故的有效方法之一是在锆合金表面制备一层改性涂层，将Zr与高温水蒸气隔绝，同时提高锆合金的力学性能和耐蚀性，以期提高包壳管的抗事故能力^[7, 8]。

铬金属因具有良好的耐蚀性、较高的硬度和较低的热中子吸收截面（3.05barn），且热膨胀系数、熔点等物理参数也与锆金属接近等特点，常被选用为锆金属的涂层材料，中国、美国、法国和韩国等多个国家都对Cr涂层开展了大量的研究^[9-12]。但Cr涂层较脆，易产生裂纹^[13-17]。钛也是一种耐腐蚀的金属，具有硬度高、密度小等特点， α 相的Ti与Zr具有相同的密排六方结构（hcp）^[18, 19]。并且，Ti的引入，在发生氧化时，会在涂层表面生成致密的TiO₂，在涂层内部同Cr生成共融物，提高涂层的耐蚀性及力学性能。

本文采用激光熔覆技术，通过调控工艺参数，在Zr-4合金表面制备Ti-Cr（质量分数比为8 : 2）涂层，以下简称Ti-Cr涂层。并从涂层的组成、微观结构、硬度、耐磨性和耐蚀性等方面进行了系统的研

究，为后续的Zr-4合金基体涂层的设计及选用提供了理论及试验支撑。

2 试验过程

2.1 试验材料

采用Zr-4合金板材为基材，其化学成分见表1。试验所用Ti、Cr粉末为北京研邦新材料科技有限公司采用旋转电极方法（PREP）生产的球形粉，粒径为15~80 μ m，纯度为99.9%，质量分数比为8 : 2。

表1 Zr-4合金板材化学成分（质量分数）（%）

Sn	Nb	Fe	Cr	Zr
1.5	—	0.2	0.1	余量

对Ti-Cr混合粉末进行形貌及元素分析，如图1所示。从图1a可看出，两种粉末球形度好，有少量卫星粉；从图1b~d可看出，混合后两种粉末分布较为均匀，颗粒分散，未出现明显的同种元素抱团、聚集现象。两种粉末混合的均匀性将有利于后续涂层制备中获得元素均匀分布的涂层，进而实现涂层性能均匀性。由图1e可知，Ti、Cr元素的质量分数比为76.9 : 23.1，与设计比例8 : 2基本一致。

2.2 涂层制备

涂层制备设备为激光熔覆智能加工系统，通过控制变量法，采用正交设计、高通量制备的方法，将激光功率、扫描速度及送粉速率等工艺参数进行优化。采取先单道筛选、后涂层制备验证的顺序，通过对比宏观形貌、热影响区、稀释率、卷曲程度及微观裂纹缺陷等因素，找到制备Ti-Cr涂层的最佳工艺。经探索，最终采用的工艺参数见表2。

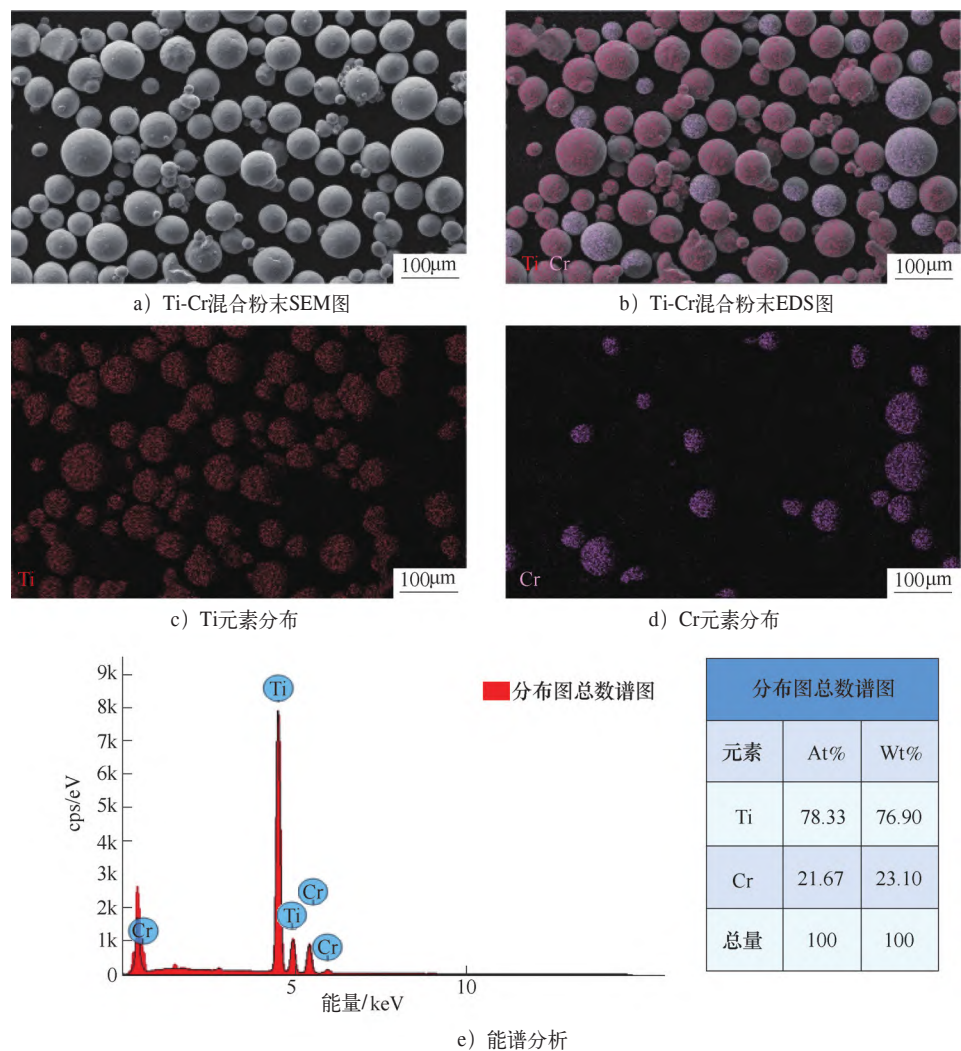


图1 Ti-Cr混合粉末扫描电镜和元素分布

表2 Ti-Cr涂层制备工艺参数

激光功率 /W	扫描速度 /(mm/s)	送粉速率 /(g/min)	喷头间距 /mm	搭接率 (%)
1300	10	15	15	50

试验前采用电火花切割的方式将Zr-4基板切割为150mm×50mm×1.5mm的长条形，并用180#砂纸对基材表面进行打磨，去除表面氧化膜，增加表面粗糙度值，以增强涂层附着力，而后用乙醇对基板进行清洗并烘干，去除表面油污。将Ti、Cr粉按照8：2（质量分数比）的比例在VH-5型V形混粉仪中混合8h，而后置于真空烘箱中烘干6h，温度设置为80℃。采用Z字形的扫描策略（见图2a），涂层制备过程中有氩气氛围保护。制备出的Ti-Cr原始涂层如图2b所示。从图2b可看出，涂层表面平整，与基

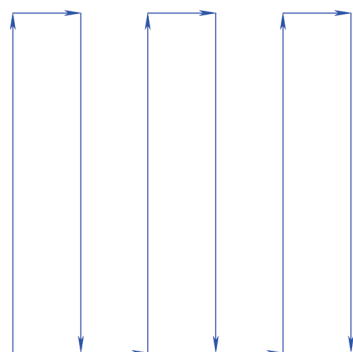
材结合良好，无分层，无裂纹。

2.3 涂层的表征及性能测试

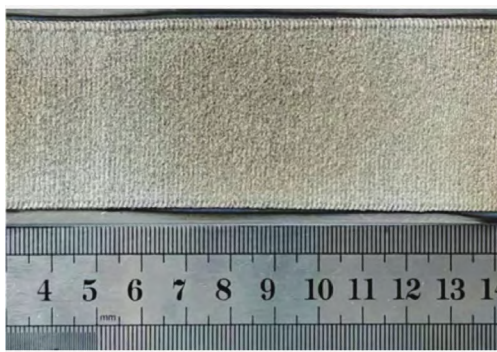
采用电火花将涂层样品切割为15mm×25mm×1.5mm长方形小块，用400#、800#、1200#、1500#、2000#砂纸对样品侧面和正面依次打磨，而后用0.5μm的SiO₂悬浮液进行抛光，制备出测试用样品。

（1）微观组织表征 采用XRD分析样品的物相组成，XRD测量使用具有Cu Kα 辐射的DX-2700型X射线衍射仪，参数设置为电压40kV，电流30mA，步进角度0.03°，采样时间0.5s，扫描范围 20°～120°。利用金相显微镜和扫描电镜分别观察试样的宏观和微观组织。

（2）力学性能测试 采用日本MATSUZAWA 室温维氏硬度测试仪对涂层和基材样品进行硬度测试，试验力为0.5kgf（4.9N），在一条直线上每间



a) 扫描策略



b) Ti-Cr涂层原始形貌

图2 扫描策略和Ti-Cr涂层原始形貌

隔2mm取一个点，共取10个点，保压时间10s，最后结果取平均值。

采用美国RTEC MFT-5000型摩擦磨损测试仪对涂层和基材样品进行耐磨性测试。选用往复模式，测试时间30min，频率1.25Hz，对偶材质为6mm SiN球，测试载荷5N，摩擦单程5mm。记录摩擦系数，对磨损的二维、三维图像进行采样，计算出体积磨损量和磨损率。并用SEM、EDS对摩擦部位形貌、物相、元素分布等进行分析和表征。

(3) 耐蚀性测试 电化学测试装置为CHI660C电化学工作站。利用三电极体系进行测试，参比电极为氯化银电极，对电极采用10mm×10mm的铂片电极，工作电极采用暴露表面为10mm×10mm的试验合金，电解液为海水模拟溶液（3.5% NaCl溶液）。等效电路采用合金体系常用的 $R(QR)$ 型等效电路（见图3）进行拟合。电路包括 R_s 、 R_c 和 Q_c ，分别代表溶液电阻、涂层电阻和涂层电容。

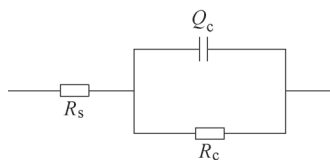


图3 电化学腐蚀等效电路

3 结果与讨论

3.1 熔覆层的形貌和物相组成

(1) 涂层微观结构分析 图4所示为Ti-Cr涂层截面金相。从图4可看出，Ti-Cr涂层紧密地熔覆在Zr-4合金基体上，两者之间有较为明显的过渡区，没有界面缝隙，为冶金结合。涂层宏观致密，无裂纹及孔洞等缺陷，厚度250~300μm。

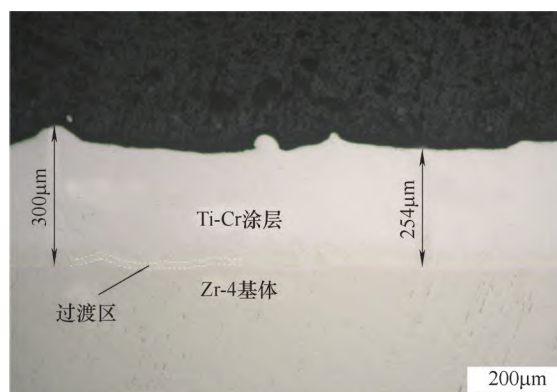


图4 Ti-Cr涂层截面金相

为了深入分析Ti-Cr涂层的微观形貌，对Ti-Cr涂层进行了SEM与EDS测试，结果如图5所示。从图5a~d的EDS面扫分布图中可以看出，Ti、Cr、Zr元素分布整体均匀，没有明显偏析存在，这归功于激光与合金粉末作用过程是一个快速非平衡凝固过程，有利于获得组织均匀、性能稳定的涂层。涂层与基板之间有一段明显的热影响区和过渡区，宽度在50μm左右，在过渡区内，Zr元素逐渐增多，Ti、Cr元素逐渐减少，说明涂层与基板之间通过互溶的形式实现了冶金结合，如图5e、f所示。通过对Ti-Cr涂层局部区域进行EDS测试（见图5e、h），发现有较多Zr从基板扩散至涂层中，占比约为36.1%，涂层中 $w_{Ti}=51.3\%$ ，约是 $w_{Cr}=12.6\%$ 的4.07倍，符合最初的元素比例设定。足量的Ti元素有利于在涂层表面形成一层致密的氧化钛，进而提升涂层的耐磨性、耐蚀性^[20-23]。

为了进一步分析Ti-Cr涂层的微观结构，用扫描电镜更高倍数对其微观组织进行观察，如图6所示。从图6a可看出，Ti-Cr涂层呈现出相互交错的树枝状晶间结构。结合面扫结果（见图6b）分析可以，

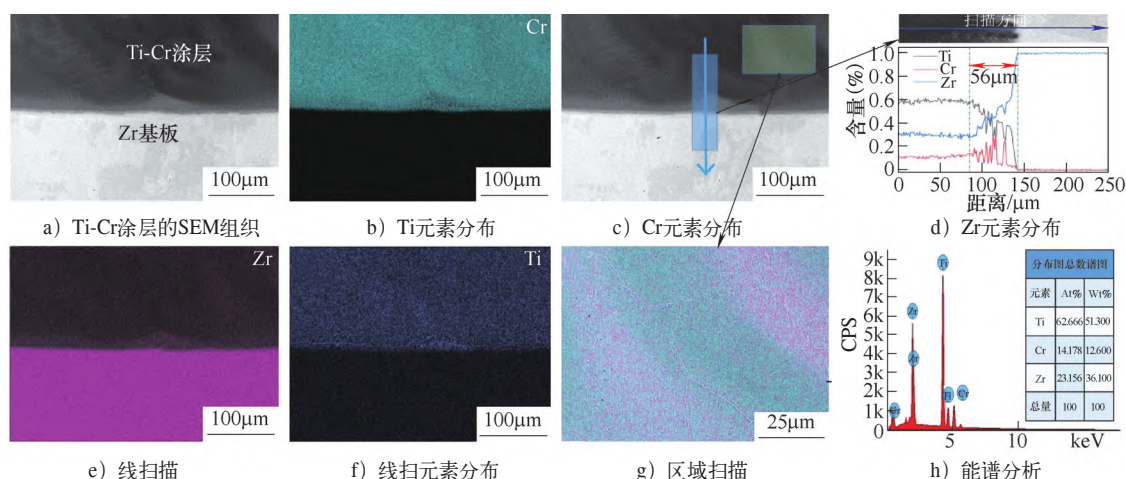


图5 Ti-Cr涂层的SEM与EDS测试结果

图6b中枝晶干灰白色区域为Ti、Zr元素富集，枝晶间黑色区域为Cr元素富集，靠近Zr-4基体处，晶粒表现出外延生长趋势，二次枝晶臂较短，平行于热能量梯度方向向上生长，远离基板面热能量梯度减

弱，枝晶向横向生长，枝晶臂变长。另外，由于激光凝固过程时间较短（105~108K/s），枝晶臂来不及长大，因此生成的二次枝晶臂较短^[24, 25]，晶粒取向在Ti-Cr涂层中呈随机分布的特点。

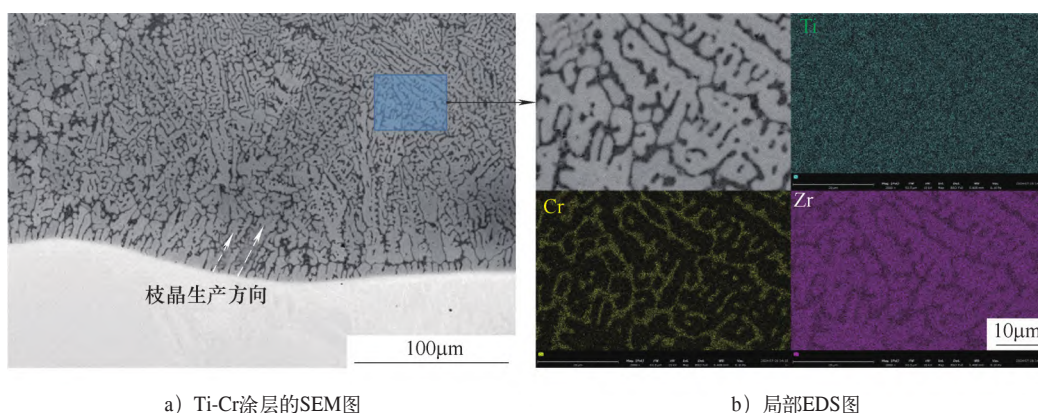


图6 Ti-Cr涂层的SEM图和局部EDS图

(2) 涂层的物相组成分析 Ti-Cr涂层的XRD测试结果（见图7）表明，Ti-Cr涂层主要由Ti-BCC、Ti-HCP、 $Ti_{0.5}Cr_{0.5}$ 、 Ti_2ZrO_2 这4种物相组成。查阅Ti合金相图可知，室温下，Ti一般呈 α 相（HCP结构），温度较高时呈 β 相（BCC结构），由于激光熔覆快热快冷的特点，部分 β 相的Ti未能全部转变为 α 相，故存在较多的Ti-BCC相（ β 相Ti）。涂层主要由Ti-BCC相与Ti-HCP相交错混合形成涂层主体。 $Ti_{0.5}Cr_{0.5}$ 的形成，说明涂层的两种金属Ti和Cr均匀混合，形成了固溶体，对Zr-4基体进行致密包覆。此外， Ti_2ZrO_2 的形成表明，Ti-Cr涂层与Zr-4基体通过互溶的形式实现了涂层在基体上的紧密结

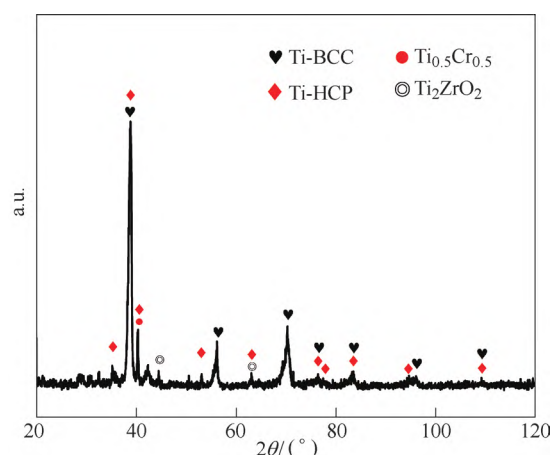


图7 Ti-Cr涂层的XRD测试图

合,极大地提高了涂层界面的稳定性。由于Ti与Zr之间的原子尺寸和电负性差异相对较小,因而Ti-Cr涂层与Zr-4基体可以形成互溶体 Ti_2ZrO_2 。

3.2 涂层力学性能研究

(1) 硬度 图8所示为激光熔覆Ti-Cr涂层与Zr-4基体室温维氏硬度测试表面压痕形貌和硬度值。图8a、b所示分别为Zr-4基体与Ti-Cr涂层表面压痕形貌,二者都呈四边形形状,压痕周围无裂纹。从图8c可以看出,Ti-Cr涂层的平均硬度为415.4HV,是Zr-4基体硬度(189.0HV)的2.2倍。维氏硬度的计算公式为^[26]

$$HV = 0.102 \frac{F}{S} = \frac{2f \sin \frac{\alpha}{2}}{D_1 D_2} \quad (1)$$

式中 HV——维氏硬度值(HV);
F——试验力(N);
S——压痕表面积(mm^2);

D_1 、 D_2 ——压痕对角线长度(mm);

α ——压头的面角($^\circ$)。

在相同的试验力F作用下,材料强度越高,抵御外力变形的能力越强,压痕的尺寸就会越小,计算出的维氏硬度值也就会越大。与基体相比,Ti-Cr涂层表面压痕更小,4个角尖锐分明,说明Ti-Cr涂层硬度更高,且塑性较好。

硬度提高的主要原因如下:一方面,Cr、Ti的引入,Cr为BCC体心立方结构,自身硬度较高,并且由XRD分析结果可知,涂层中还有部分Ti-BCC相,也增大了涂层的硬度;另一方面,由图5可知,Zr-4基体中Zr原子扩散到熔覆层中,且3种金属分布较为均匀,形成了固溶体,由于原子半径差异,必然会造成晶格畸变,增大了位错运动的阻力,起到固溶强化的作用^[27]。

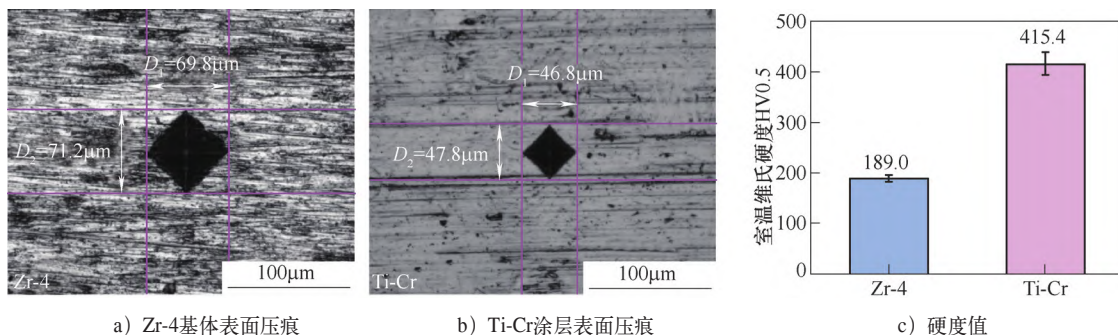


图8 Ti-Cr涂层与Zr-4基体室温维氏硬度测试表面压痕形貌图和硬度值

(2) 耐磨性 图9所示为Ti-Cr涂层与Zr-4基体的摩擦系数变化曲线。由图9可看出,在初始磨合阶段,两种样品的摩擦系数上下波动幅度较大。此阶段主要是样品表面存在氧化不均匀的现象,导致表层耐磨性存在差异。Zr-4基体在前140s内,样品表面未磨损,摩擦系数非常小;140s后,表面磨损,摩擦系数迅速升高。在约3min后,二者的摩擦系数趋于平稳,之后仅呈现小范围内周期波动,Ti-Cr涂层与Zr-4基体的平均摩擦系数分别为0.63与0.45。Ti-Cr涂层的平均摩擦系数较Zr-4基体稍大。现有研究表明,摩擦系数与耐磨性并非简单的正相关或负相关的关系,还要综合考虑材料的力学性能(如硬度、强度等)、表面处理技术等因素^[28]。

进一步对磨损后样品的表面形貌与元素分布通过SEM、EDS进行测试,结果如图10所示。由图

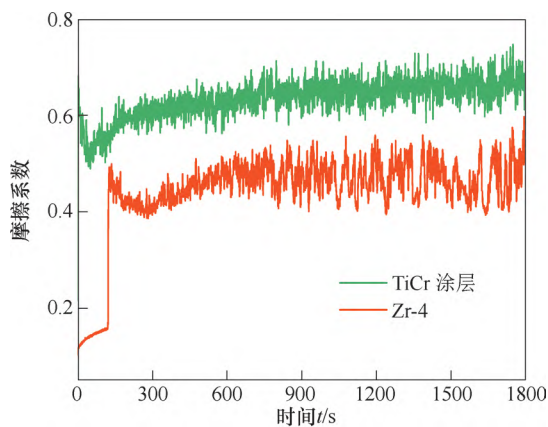


图9 Ti-Cr涂层与Zr-4基体的摩擦系数曲线

10a~d可发现,具有涂层的样品磨损区域有明显低程度的氧化层、犁沟,以及分布于氧化层与基体上的疲劳裂纹,这分别指向氧化磨损、磨粒磨损和疲劳磨损的磨损机制;而由图10e~h可看出,没有涂层的

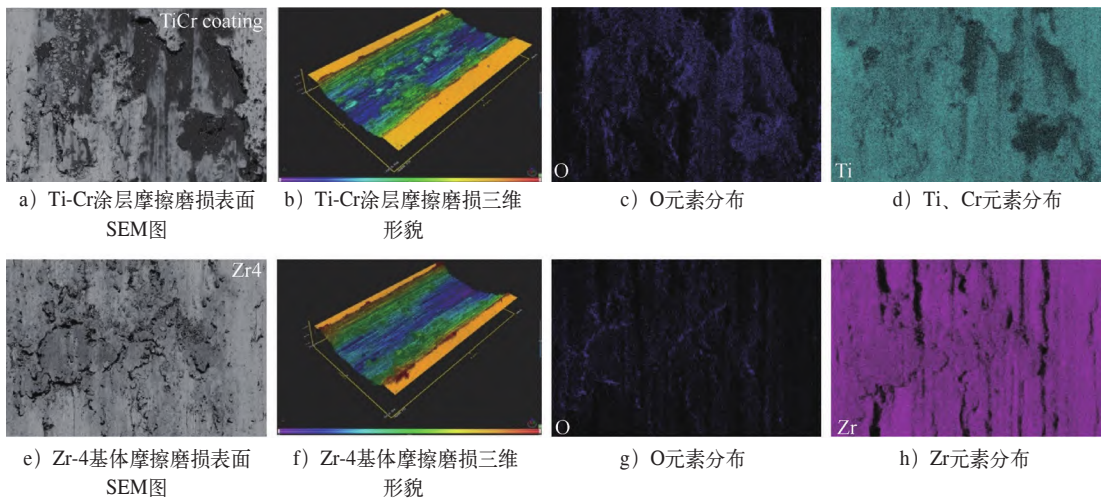


图10 Ti-Cr涂层与Zr-4基体的摩擦磨损三维形貌图和SEM、EDS图

Zr-4基体磨损表面氧化层较少，同时观察到在基体上有剥落形成的凹坑、犁沟，这是黏着磨损和磨粒磨损的结果。

由此可以说明，涂层中的Ti作为易于氧化的成分在摩擦磨损过程中形成了具有减磨作用的氧化层，从而对基体具有一定的保护作用。Ti-Cr涂层经过摩擦磨损测试后，其表面存在多处微裂纹及凸起结构，这是由于涂层中含有高硬度的合金，表面更为粗糙，在摩擦磨损过程中涂层受到的内应力作用不均匀^[29]，因而摩擦系数比Zr-4基体大。

摩擦磨损所得试验数据见表2，由表2可看出，Ti-Cr涂层的磨损深度和磨损体积均小于Zr-4基体，说明Ti-Cr涂层的耐磨性明显优于Zr-4基体。磨损率 W 的计算公式为

$$W = \frac{V}{FL} \tag{2}$$

式中 W ——磨损率 $[\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})]$ ；
 V ——磨损体积 (mm^3) ；
 F ——法向载荷 (N) ；
 L ——总摩擦距离 (m) 。

通过计算，Ti-Cr涂层的磨损率为0.580，Zr-4基体的磨损率为0.896，磨损率降低35.3%。

表2 摩擦磨损试验结果

样品	摩擦系数	磨损深度/ μm	磨损体积/ mm^3	磨损率/ $[\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})]$
Ti-Cr	0.63	18.747	0.0145	0.580
Zr-4	0.45	24.152	0.0224	0.896

3.3 涂层的耐腐蚀性能研究

图11所示为Ti-Cr涂层与Zr-4基体电化学腐蚀的测试结果。图11a所示为Ti-Cr涂层与Zr-4基体的Tafel极化曲线。二者极化曲线变化趋势一致，表明不同试样有相似的阴极反应。利用Tafel经验定律及对极化曲线进行拟合得到自腐蚀电位(E_{corr})和自腐蚀电流(I_{corr})，见表3。 E_{corr} 值反映了腐蚀的难易程度，若 E_{corr} 值高，则表明涂层具有良好的耐蚀性。 I_{corr} 反映了涂层的电化学特性， I_{corr} 值越低，涂层的腐蚀速率越低，耐蚀性越好^[30]。由此可见，Ti-Cr涂层的引入将增强Zr-4基体的耐蚀性。同时，开路电位测试结果如图11b所示，Ti-Cr涂层最后的开路电位基本稳定在0.08~0.09V，Zr-4基体基本稳定在-0.12~-0.11V。Ti-Cr涂层的引入使得Zr-4基体的腐蚀电位更高，这与图11a所示的测试结果一致。

表3 Ti-Cr涂层与Zr-4基体的 E_{corr} 和 I_{corr}

样品	自腐蚀电位 E_{corr} / V	自腐蚀电流 I_{corr} / $(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$
Ti-Cr	-0.386	1.455×10^{-2}
Zr-4	-0.531	1.941×10^{-2}

为了进一步解释Ti-Cr涂层提高Zr-4基体腐蚀性的机理，对涂层的交流阻抗谱(EIS)进行了研究。图11c所示为Bode图，展示的为阻抗谱和相频图。阻抗模 $|Z|$ 越大，表明钝化膜越难被破坏，耐蚀性越好^[31]，图11c中Ti-Cr涂层阻抗模 $|Z|$ 更大，表明耐蚀性更好。对于相频图，最大相位角越接近-90°

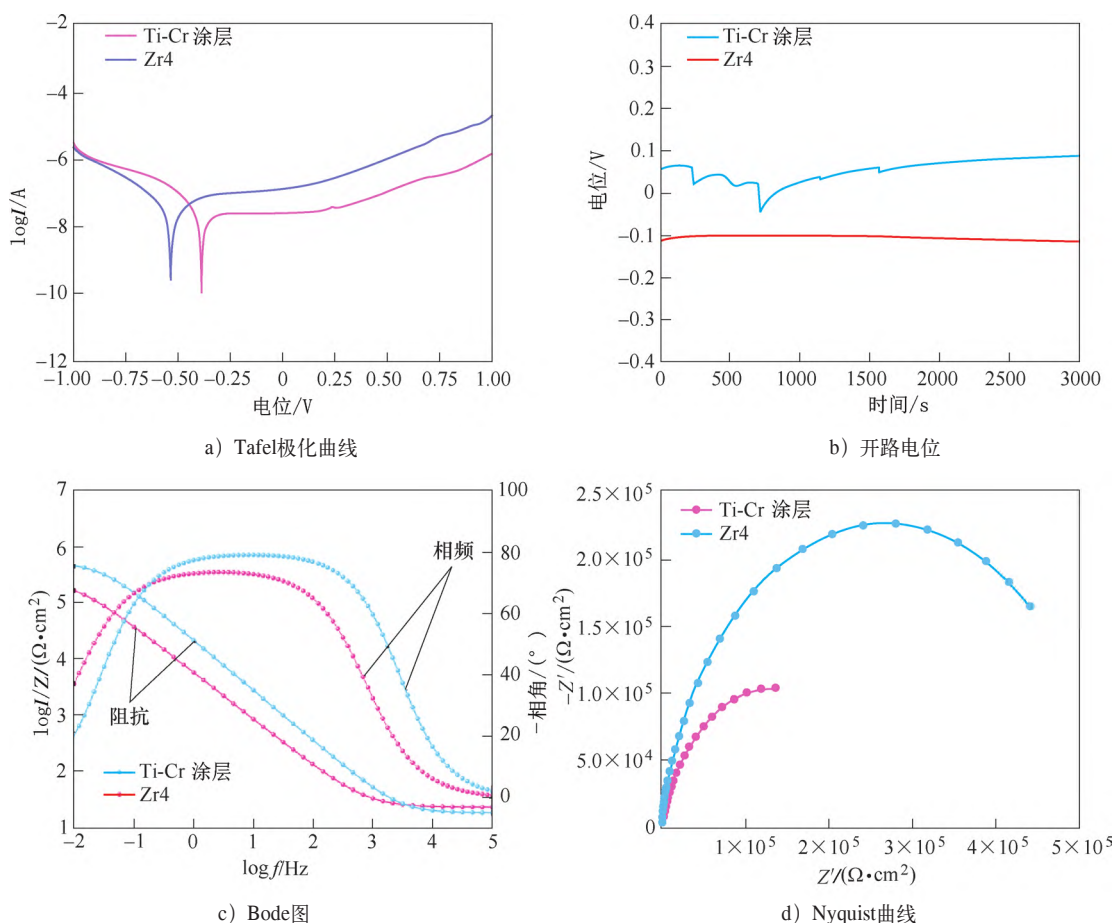


图11 Ti-Cr涂层与Zr-4基体的耐蚀性测试

且频率范围越宽,表明钝化膜越稳定和致密^[32],图11c中Ti-Cr涂层最大相位角更接近 -90° ,也说明了Ti-Cr涂层耐蚀性更好。此外,图11d所示为Ti-Cr涂层拟合出的Nyquist曲线,其中横坐标 Z' 为电极阻抗的实部,主要反映阳极的阻抗,纵坐标 Z'' 为电极阻抗的虚部,主要反映阳极的容抗和感抗^[33]。Ti-Cr涂层较Zr-4基体容抗弧半径更大,容抗弧半径反映了材料表面的阻抗,容抗弧半径越大,表明阻抗越大,电荷转移越困难,形成的钝化膜的耐蚀性就越好^[34]。故Ti-Zr合金涂层的耐腐蚀性能表现比Zr-4基体更为优异。

4 结束语

本文采用激光熔覆技术,在Zr-4合金表面制备了Ti-Cr涂层。并从涂层的组成、微观组织、硬度、耐磨性和耐蚀性等方面来评价涂层的综合表现,分析得到如下主要结论。

1) 利用激光熔覆技术,选用激光功率1300W、扫描速度10mm/s、送粉速率15g/min、喷嘴间距

15mm、搭接率50%的工艺参数设置,成功在Zr-4合金表面制备出原始厚度为250~300 μm 的Ti-Cr(质量分数比为8:2)涂层,涂层内部致密,无裂纹、孔洞等缺陷。

2) Ti-Cr涂层平均硬度为415.4HV,比Zr-4基体提高了1.2倍;磨损深度、磨损体积均比Zr-4基体低,磨损率降低35.3%,耐磨性更好。

3) Ti-Cr涂层较Zr-4基体的开路电位更高,阻抗更大,自腐蚀电位更高,自腐蚀电流更小,表明Ti-Cr涂层的耐蚀性优于Zr-4基体。

4) Ti-Cr涂层元素分布均匀,各向同性,涂层主要由Ti-BBC相与Ti-HCP相交错混合形成涂层主体,Ti和Cr两种金属相互固溶,形成 $\text{Ti}_{0.5}\text{Cr}_{0.5}$ 。Ti-Cr涂层与Zr-4基体通过互溶的形式实现了涂层在基体上的冶金结合。

参考文献:

- [1] 陈璐. 天然气在我国能源结构中的比较优势及其战略地位研究[D]. 荆州: 长江大学, 2014.
- [2] 许佳. 中国核电“核”谐之美理念与实践[J]. 企业管

- 理, 2024 (2) : 74-76.
- [3] 刘世宏, 肖魏魏, 罗彪, 等. 1000-1100℃下多弧离子镀Cr涂层Zr-4合金的高温蒸气氧化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53 (7) : 1962-1969.
- [4] 赵英泽, 陈勇, 帅斌财. 事故容错锆包壳表面Cr涂层的研究进展[J]. 机电工程技术, 2022, 51 (4) : 12-15.
- [5] 娄磊, 李满仓, 柴晓明, 等. 耐事故包壳中子经济性分析[J]. 中国核电, 2021, 14 (2) : 273-276.
- [6] SERGEI A Y, GENNADY V K, SERGEI V M, et al. Nuclear reactor fuel element: CN201910826898.0[P]. 2024-09-22.
- [7] 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.
- [8] 陈青松. 锆合金表面事故容错金属涂层的制备及相关性能研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2024.
- [9] DENG C M, ZHOU K S, LIU M, et al. Influence of Cr on the corrosion resistance of supersonic flame sprayed WC-Co coatings against neutral salt spray[J]. Materials Development and Application, 2007, 22 (3) : 4.
- [10] 王引真, 孙永兴, 何艳玲. 涂层结构对Cr₂O₃涂层组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2004, 29 (12) : 7-9.
- [11] 张弛, 范周洋, 林晓冬, 等. Cr对Zr-0.3Nb合金显微组织及在400℃/10.3MPa过热蒸汽中腐蚀行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (5) : 1915-1924.
- [12] 张文超, 刘立斌, 张梦婷, 等. 在H13钢上超音速火焰喷涂制备WC-10Co-4Cr和Cr₃C₂-25NiCr涂层的性能比较(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (11) : 3700-3707.
- [13] PAN C Y, LIU Z D, SHEN Y, et al. Microstructure and wear resistance of Ni-Cr alloy laser cladding layer with high Cr content[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53 (9) : 2438-2445.
- [14] MATTHEWS A, JAMES B, HYLAND M. The role of microstructure in the mechanism of high velocity erosion of Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings: Part 1 — As-sprayed coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203 (8) : 1086-1093.
- [15] THOULESS M D. Cracking and delamination of coatings[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1991, 9 (4) : 2510-2515.
- [16] LEE K S, RHEE Y W, BLACKBURN D H, et al. Cracking of brittle coatings adhesively bonded to substrates of unlike modulus[J]. Journal of Materials Research, 2000, 15 (8) : 1653-1656.
- [17] JIANG J, ZHAN D, LV J, et al. Comparative study on the tensile cracking behavior of CrN and Cr coatings for accident-tolerant fuel claddings[J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 409 (1) : 126812.
- [18] XU W, BIRBILIS N, SHA G, et al. A high-specific-strength and corrosion-resistant magnesium alloy[J]. Nature Materials, 2015 (14) : 1229-1235.
- [19] DORSEY J T, MIKULAS, MARTIN M. Preliminary design of a large tetrahedral truss/hexagonal panel aerobrake structural system[J]. AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, 1990: 533-546.
- [20] FERGUS J W. Effect of chromium and niobium additions on the cyclic oxidation behavior of gamma titanium aluminides[J]. 2003, 355 (1-2) : 69-77.
- [21] CHEN A, MA Y, WANG Z F, et al. Preparation of yttrium oxide coating with enhanced thermal shock resistance on refractories used for titanium alloy melting and casting[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31 (6) : 1411-1422.
- [22] EL-DAHSHAN M E. The oxidation of cobalt chromium alloys containing titanium[J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1981, 22 (1) : 25-34.
- [23] SEBAYANG D, SARYANTO H, UNTORO P, et al. The cross-sectional investigation of oxide scale FeCr alloys and commercial ferritic steel implanted with lanthanum and titanium dopants after oxidation test at 900℃[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 324: 012075.
- [24] BARBER L P. Characterization of the solidification (下转第32页)

头抗拉强度略低于其他两种接头。拉伸断口分布着密集的等轴韧窝，断裂类型可判定为韧性断裂。

3) 3种接头硬度分布呈“凸”字形状。焊缝区由于贝氏体的存在硬度最高；热影响区由于焊接热源的作用，经过了正火处理，因此硬度低于焊缝；母材区硬度最低。由于2.5mm厚板材中珠光体含量较高，因此2.5mm厚母材硬度大于4.0mm厚母材。

4) 2.5mm对接、4.0mm对接和2.5mm+4.0mm搭接接头疲劳极限分别为203MPa、144MPa和91MPa。参照国际焊接协会对不同焊接结构疲劳等级分类可判断3种接头疲劳性能优异。疲劳断口有着明显的起裂源、扩展区及终断区。扩展区分布着垂直于裂纹扩展方向的二次剪切裂纹和疲劳辉纹，符合疲劳断裂的特性。

参考文献:

[1] 朱宇, 丁宁, 熊毅. Cu-P-Cr-Ni-Mo耐候钢热变形和再结晶行为分析研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41 (12): 68-71.

[2] 陈勇, 陈辉, 李仁东, 等. 耐候钢激光-MAG复合焊接头的低温断裂韧性[J]. 中国激光, 2019, 46 (7): 92-99.

[3] 马龙. SMA490BW耐候钢TIG焊接接头残余应力分析[J]. 焊接, 2024 (6): 68-73, 80.

[4] 孙洪斌, 杨少军, 张丛, 等. 耐候钢Q370qENH埋弧焊接接头锈蚀行为与机理研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44 (1): 152-156.

[5] 张运通. 耐候钢激光填丝焊T型接头组织与疲劳性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2022.

[6] 张运通, 孙杨, 魏巍, 等. 激光焊工艺对Q310NQL2耐候钢T形接头疲劳强度的影响[J]. 焊接技术, 2021, 50 (12): 17-21, 129-130.

[7] 刘红宁, 王艳俊, 杨上陆, 等. 焊后热处理对中锰TRIP钢激光焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 电焊机, 2023, 53 (7): 9-15.

[8] 刘超. Q345NQR2耐候钢薄板激光焊接接头拉伸与疲劳性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

(收稿日期: 20241227)

(上接第25页)

- behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys[J]. USA: Worcester Polytechnic Institute, 2004.
- [25] SOICHIRO K, SHINYA M, NAOYA K. Secondary Battery: JP19920320559[P]. 2024-09-25.
- [26] 胡子杰. 灰铸铁表面激光熔覆制备Ni60/ZrO₂涂层及其性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2024.
- [27] 何启浪, 张益豪, 师文庆, 等. 铜含量对316L激光熔覆钴基涂层组织与性能影响[J]. 激光技术, 2024, 48 (4): 527-533.
- [28] HUANG G L, HE Y, LONG S J, et al. Microstructure, compressive performance and wear resistance of pure molybdenum additively manufactured via laser powder bed fusion[J/OL]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2024-06-01. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106740.
- [29] 杨凯欣, 孙文磊, 肖奇, 等. 激光熔覆Fe06+(TiC/Mo)复合涂层硬度及耐磨性能研究[J]. 激光技术, 2023, 47 (3): 393-399.
- [30] LOU B Y, LUO K C, XU B. The influence of temperature on Cr-Ti coating in carbon steel: International Conference on Physical & Numerical Simulation of Materials Processing Scientific[C]. USA: Springer, 2007: 1157-1161.
- [31] DAI N, ZHANG L C, ZHANG J, et al. Corrosion behavior of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2016, 102: 484-489.
- [32] PAN J, THIERRY D, LEYGRAFC. Electrochemical impedance spectroscopy study of the passive oxide film on titanium for implant application[J]. Electro Chimica Acta, 1996, 41 (7-8): 1143-1153.
- [33] ROSENTHAL H, BEILIS I, GOLDSMITH S, et al. A spectroscopic investigation of the development of a hot-anode vacuum arc[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1996, 29 (5): 1245.
- [34] KIM J, FLORIAN B, JÜRGEN BEHM R, et al. Temperature-dependent insertion and adsorption of titanium on spinel Li₄Ti₅O₁₂(111) thin films – an angle-resolved XPS study[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2018 (20): 18319-18327.

(收稿日期: 20250221)