

等离子熔覆 FeCoNiCrMnAl_{0.5}Si_{0.5} 高熵合金修复密封环

黄绍服¹, 王晓龙¹, 柳建², 全永刚³, 肖翊³, 杜娴²

(1. 安徽理工大学机电工程学院, 安徽淮南 232001; 2. 陆军装甲兵学院机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072; 3. 长沙理工大学汽车与机械工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 密封环是盾构机螺旋输送机上的主要零部件之一, 面向高压、冲击和强磨损的严苛服役环境, 密封环零件易发生磨损破坏。选取螺旋输送机上已磨损密封环为基材, 选用高硬度、耐磨性能优异的FeCoNiCrMnAl_{0.5}Si_{0.5} (AS1) 高熵合金为熔覆层材料, 研究分析等离子熔覆密封环-AS1熔覆层显微组织、物相和显微硬度; 对室温下熔覆层的摩擦磨损性能进行测试, 分析密封环-AS1熔覆层耐磨性能, 探索密封环表面等离子熔覆高熵合金修复的可行性。试验发现, 密封环显微组织主要为铁素体+珠光体+贝氏体, 工作时出现粘着磨损和磨粒磨损。AS1熔覆层主要为等轴晶, 其中熔覆层硬度最高 (HV721.3), 约为基材硬度的2倍。AS1双层熔覆层耐磨性较之基体提高了约10倍, 主要磨损机理为磨粒磨损。采用等离子熔覆高熵合金修复密封环表面是一个非常可行的方案, 对保证盾构机顺利运行具有重要意义。

关键词: 等离子熔覆; 高熵合金熔覆层; 耐磨性能; 密封环修复; 熔覆层检测

作者简介:

黄绍服 (1974-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为特种加工技术及装备。电话: 18158894166, E-mail: 5886126@qq.com

通信作者:

柳建, 男, 副研究员, 博士。电话: 13552935899, E-mail: xbdliu5899@163.com

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025) 02-0194-09

基金项目:

国家自然科学基金资助项目 (52275228); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52105234, 52205242); 教育部联合基金资助项目 (8091B032110)。

收稿日期:

2024-06-03 收到初稿,
2024-09-19 收到修订稿。

表面工程技术分为表面涂镀技术、表面合金化技术和表面改性技术^[1-3]。表面工程主要是指通过物理、化学或机械过程使得材料表面的化学成分、微观结构和表面状态发生转变, 以此赋予材料表面腐蚀、磨损和功能特性等, 提高材料综合性能^[4]。目前, 表面工程已经发展成为集材料、化学、力学和焊接学等于一体的综合学科, 广泛应用于防腐、耐磨、修复和强化等领域^[5]。采用高熵合金制造机械零部件时, 在尺寸和成本上往往会受到限制, 而表面工程技术在制备工程部件的过程中无需昂贵模具, 只需在机械零部件表面制备具有特殊性能的合金涂层或者熔覆层就能制备出复杂部件。这为高熵合金的应用提供了新的市场, 高熵合金涂层应用不仅可以充分发挥高熵合金的优良特性, 而且可降低成本, 提高利用率^[6-9]。

材料的磨损性质和力学性能密切相关, 高熵合金涂层往往具有较高的硬度和弹性模量及良好的耐磨性^[10-12]。针对高熵合金的耐磨性研究人员做了大量试验, Fang等通过对FeCoCrNiNb_x (x=0.25, 0.6, 0.8) 系列HEAs涂层的分析, 探讨Nb含量的变化对涂层性能的影响^[13]。结果表明, FeCoCrNiNb_x HEAs涂层的耐磨性随着Nb含量的增加先增大后减小, 变化规律与其硬度变化一致。与之前工作中的其他HEAs涂层相比, FeCoCrNiNb_x HEAs涂层的摩擦系数相对较低且更稳定, 表明在齿轮的磨损保护上具有潜在应用。Hus等通过等离子熔覆设备成功制备了NiCo_{0.6}Fe_{0.2}Cr_{1.5}SiAlTi_{0.6} HEA涂层, 研究了涂层的微观结构与抗磨性^[14]。试验结果显示, 涂层中形成了大量的Cr₃Si相, 并在800 °C和1 100 °C时效时导致硬度和耐磨性大幅增加。氧化增重测试表明, 由于形成了包含Al₂O₃和Cr₂O₃的致密热生长氧化物层, 该涂层在1 100 °C下表现出与典型NiCrAlY涂层一样好的抗氧化性。该涂层成为需要抗氧化和耐磨性的高温保护层的有力候选者。Ye等成功制备出Al_xFeCoNiCuCr高熵合金涂层, 研究了Al含量对其组织结构、耐磨性的影响^[15]。结果证明Al元素促进FeCoNiCuCr合金形成BCC相, 并且观察合金中生成球形硬质相, 对合金的高温硬度与摩擦性能有着显著影响, 研

究表明,较高的铝含量的涂层具有较高的硬度、耐磨性和耐蚀性。Lin等采用激光熔覆法制备 FeCoCrNiAlB_x ($x=0, 0.25, 0.50, 0.75$)涂层,探究不同B含量对涂层耐磨性的影响^[16]。采用摩擦磨损试验研究了试样的耐磨性,并对其磨损机理进行了分析。研究表明添加硼后,相结构发生转变,BCC相对应的峰增加。随着B含量的增加,涂层的耐磨性显著提高, $\text{FeCoCrNiAlB}_{0.75}$ 涂层具有最佳磨损抗力。

盾构机在使用时易出现密封环因高压、冲击和严重磨损而破坏失效的问题,该部件尺寸较大,制造成本高。因此,实现密封环部件的修复,不仅可提升密封环服役性能,延长其服役寿命,还可有效减少资源浪费,具有良好的经济效益和环境效益^[17]。本研究使用等离子熔覆技术以损坏的盾构机密封环为基材,选用 $\text{FeCoNiCrMnAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ 高熵合金为熔敷层材料,研究密封环-AS1熔覆层显微组织、物相和显微硬度,测试其摩擦磨损性能。检测熔覆层表面是否存在缺陷,探索等离子熔覆高熵合金修复密封环的可行性。

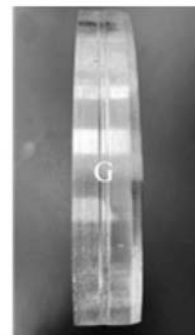
1 试验材料与方法

1.1 熔覆层制备

使用如图1所示的盾构机密封环为基材对其进行



(a)



(b)

图1 磨损的密封环
Fig. 1 Worn sealing ring

1.2 组织结构测试

使用DK77型电火花线切割机对涂层截取 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 试样,打磨抛光。采用X射线衍射仪(XRD)对试样进行相分析,Cu靶X光管电压 $\leq 40\text{ kV}$,电流 $\leq 40\text{ mA}$,连续扫描方式进行采样,采样扫描角度为 $20^\circ \sim 80^\circ$,扫描速率为 $5^\circ/\text{min}$ 。采用Prox型桌面式电子显微镜(SEM)及其附带的能谱分析仪(EDS)对熔覆层的显微组织形貌、截面形貌和摩擦磨损形貌进行观察,并分析组织中不同相成分之间的元素分布。

等离子喷涂。试验操作前,用40 Hz超声清洗10 min左右,用等离子水和酒精擦洗,在烘箱中 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥2 h。采用的AS1 HEA粉末由气雾化工艺制备,粉末直径为 $30 \sim 80\text{ }\mu\text{m}$,表1为高熵合金粉末元素含量,主要成分为Fe、Co、Ni、Cr、Mn、Al、Si,其原子比近似为 $1:1:1:1:1:0.5:0.5$ 。选用密封环为基材,采用AS1粉末材料制备等离子熔覆层。

采用同步送粉方式的等离子熔覆设备,将AS1粉末熔覆于密封环基材表面。HEAs粉末放入烘箱中, $80\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥8 h收集备用。将HEAs粉末倒入等离子设备上的同步送粉器中,采用纯度为99.5%的氩气送粉;采用三爪卡盘将基材固定,设备预热,设置熔覆电流107 A、焊枪速度 $175\text{ mm}/\text{min}$ 、保护气 $\text{Ar } 2.5\text{ L}/\text{min}$,离子气 $\text{Ar } 3\text{ L}/\text{min}$ 、喷枪与基体间距 5 mm 、送粉速度 $22\text{ r}/\text{min}$,焊枪与基材校位后将HEAs粉末通过送粉器送入熔覆设备中进行熔覆。

表1 高熵合金粉末元素含量

Tab. 1 Element content of high entropy alloy powder

at. %

Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Al	Si
16.66	16.66	16.66	16.66	16.66	8.33	8.33

1.3 耐磨性与硬度测试

采用MDW-05往复式摩擦磨损试验机在室温测试合金摩擦磨损性能,对偶球 $\Phi 6.5\text{ mm}$ 的钢球和 Al_2O_3 球,加载载荷50 N、100 N,运行时间30 min,运行频率2 Hz,用精度为0.1 mg的分析天平对每组磨损测试完成前后的试样进行称量。对熔覆层的显微组织形貌、截面形貌和摩擦磨损形貌进行观察,并分析组织中不同相成分之间的元素分布。

使用HVST-1000Z型显微硬度计进行硬度测试,将线切割后的试样镶嵌,金相打磨抛光后进行维氏硬度

测试,从熔覆层截面中线熔覆层顶端开始沿垂直方向每隔0.1 mm取一个测试点。试验载荷100 g,保载15 s,每个硬度测试点测10次,取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 破损密封环修复

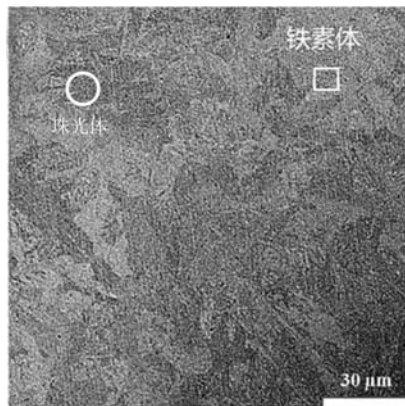
密封环基材及其淬火层微观组织形貌如图2所示,EDS分析化学成分如表2所示。可知密封环基材显微组织主要为铁素体和珠光体组成;密封环淬火层显微组织中存在贝氏体相变现象,其显微组织转变为铁素体

+珠光体+贝氏体的混合组织,如图2(b)所示。发生相变的原因是热处理后基体表面和内部的冷却速率不同,基体表面空气流动大,冷却速度快,铁素体和珠光体的转变量减弱,贝氏体转变量迅速增加^[18]。而随着冷却速率的加快,密封环淬火层的硬度也会逐渐增大。由此可见硬度的增加主要是由于冷却速率不同导致相转变产生的组织变化所致。密封环基材中,奥氏体中析出铁素体,随着温度的下降发生珠光体转变,最终形成为铁素体和珠光体的组织形貌。而密封环淬火层的奥氏体发生贝氏体转变。

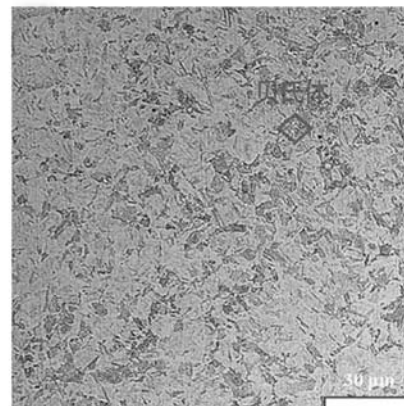
图3为磨损密封环的截面与硬度图,从图3(a)可以明显看出密封环截面分为三个区域,最上层为磨损区域,它是由于对磨件与密封环淬火层磨损时发生热能转换,导致其发生组织结构变化,厚度约为0.5 mm;中间为淬火层区域,约为3 mm,最下层为基体区域。因为组织的变化,各区域硬度也随之变化,按图3(a)所示的硬度点测量硬度,结果如图3(b)

表2 密封环化学成分
Tab. 2 Chemical composition of sealing ring

项目密封	Ni	Fe	C	Cr	Mo	Mn	Co	at. %
环基材	0.53	其余	0.41	1.13	0.33	0.73	-	
密封环淬火层	0.4	其余	0.91	1.03	0.33	0.58	1.68	



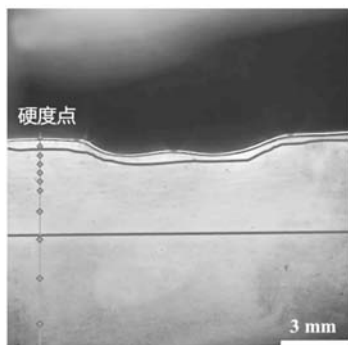
(a) 密封环基材



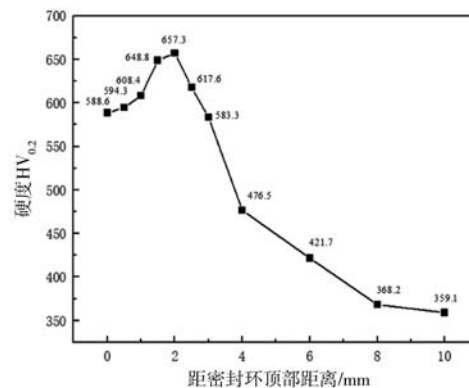
(b) 密封环淬火层

图2 密封环基材与淬火层的显微组织

Fig. 2 Microstructure of sealing ring substrate and quenched layer



(a) 磨损密封环截面图



(b) 磨损密封环硬度图

图3 磨损密封环截面与硬度图

Fig. 3 Worn seal ring cross-section and hardness diagram

所示。可以发现对磨层硬度为HV588.6，较淬火层硬度（HV657.3）有所下降，这是因为对磨层磨损过程中组织发生变化，导致硬度下降。淬火层与基材中间的热影响分界区平均硬度为HV476.5，基材硬度最低为HV359.1。

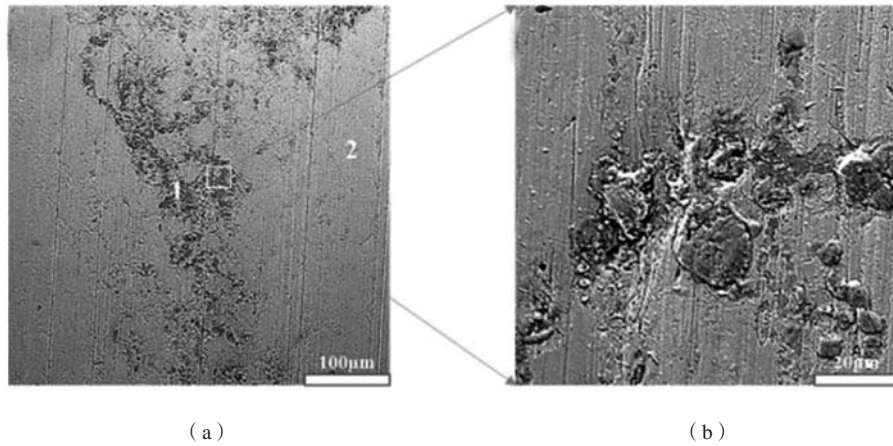
对破损密封环磨痕进行扫描分析，其磨痕形貌如图4所示。可以发现磨痕表面存在许多剥落坑、颗粒和犁沟，磨损情况较为严重。这是因为在摩擦磨损过程中，对磨件对基体表面施加较强的正压力，而密封环抗塑性变形能力较弱，随着变形逐步加剧，会产生错位材料塞积，进而引发微裂纹产生。裂纹失稳扩展后，基体表面材料呈薄片脱落，形成剥落坑。犁沟的形成是由于盾构机工作时带入的硬质颗粒进入橡胶套

圈，对密封环造成磨损所致。颗粒是硬质颗粒与密封环对磨形成的。密封环淬火层表面主要呈现粘着磨损和磨粒磨损的特征。

为探索密封环磨损机理，进一步对图4中颗粒1区域和磨痕2区域进行元素分析，结果如表3所示。可以发现剥落颗粒区域的O、C、Si、Al元素相对磨痕平整光滑区域的成分明显增加，证明盾构机工作时大量硬质颗粒进入橡胶套圈内，与密封环形成对磨脱落，导致O、C、Si、Al含量的增加。

2.2 熔覆层显微组织

密封环修复如图5所示，图6为AS1单、双层熔覆层的微观组织。熔覆层的微观结构存在明亮（DR）和



(a) (b)

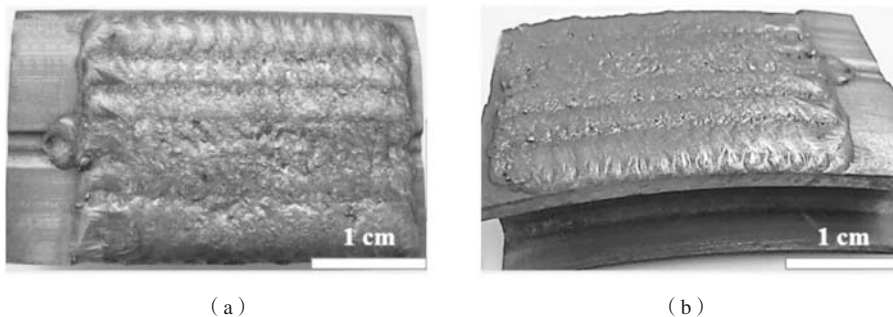
图4 磨损密封环磨痕形貌图

Fig. 4 Morphologies of worn marks on the sealing ring

表3 密封环磨痕各区域化学成分

Tab. 3 Chemical compositions of various worn areas of the sealing ring

区域	O	Fe	C	Cr	Mo	Mn	Co	Si	Al	at. %
区域1	21.26	66.10	5.40	2.99	1.23	0.29	1.14	1.27	0.41	
区域2	1.15	93.44	1.64	0.93	0.34	0.56	1.47	0.38	0.08	

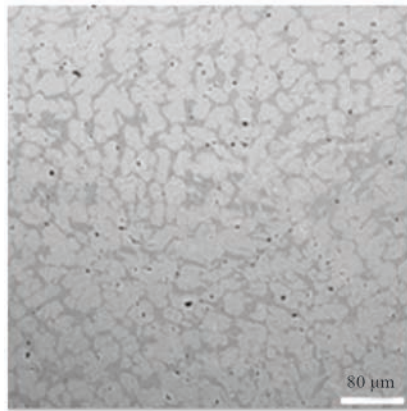


(a) (b)

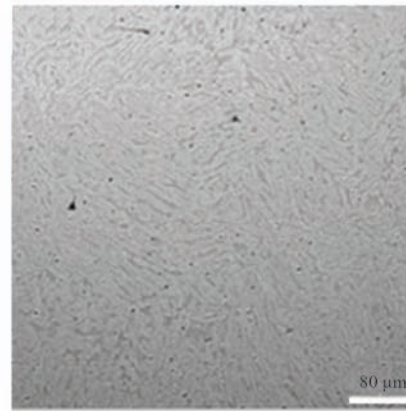
图5 密封环-AS1熔覆层宏观图

Fig. 5 Macroscopic views of sealing ring AS1 cladding layers

黑暗 (ID) 区域。在AS1单层熔覆层组织呈明显的等轴晶, 如图6 (a) 所示, 晶粒大小约为20 μm, 沿晶界有一些暗区域。随着熔覆层层数增加, AS1双层熔覆层暗区域更细, 连续性更强, 明亮颗粒的尺寸逐渐减小, 晶粒大小约为5~10 μm, 如图6 (b) 所示。采用EDS法分析了熔覆层中不同区域的化学成分, 结果见表4。发现暗区域中富含Ni和Al, 而明亮的颗粒比其他区域含有较多的Fe、Co、Cr元素, 单层熔覆层中不同区域元素含量存在一定差异, 随着熔覆层数增加, 各区域元素分布较为均匀。



(a) 单层熔覆层的显微组织



(b) 双层熔覆层的显微组织

图6 AS1单、双熔覆层的显微组织

Fig. 6 Microstructures of AS1 single and double cladding layers

表4 合金的各区域化学成分
Tab. 4 Chemical compositions of various areas for the alloys at. %

项目	区域	Fe	Co	Cr	Ni	Mn	Al	Si
AS1单层	ID	32.62	12.78	11.71	14.10	12.69	7.52	8.58
	DR	37.49	13.69	12.72	13.08	12.14	4.91	5.97
AS1双层	ID	32.76	14.02	12.64	13.81	12.63	7.32	6.83
	DR	33.55	13.50	13.93	12.07	12.20	7.05	7.70
AS1截面	ID	37.11	12.32	12.64	12.81	12.72	5.67	6.73
	DR	38.74	11.98	11.55	11.77	12.03	8.01	5.91

2.3 硬度

为分析熔覆层的显微硬度, 对熔覆层平面、截面、热影响区取点进行显微硬度值的测量, 观察分析熔覆层各区域显微硬度的变化情况, 测得显微硬度如图7所示。由图7可知密封环基材及其淬火层硬度分别为HV367.27和HV681.4; 密封环基体单层熔覆层平面、截面、热影响区的硬度分别为HV704.7、HV576.4和HV447.27; 密封环基体双层熔覆层平面、截面、热影响区的硬度分别为HV721.3、HV616.27和HV466.07, 可观察到密封环-AS1熔覆层硬度约为基材的2倍, 均超过了密封环淬火层硬度。

2.4 耐磨性

图8 (a) 为密封环基材在钢球下摩擦系数图, 密封环基材在30 N、50 N和100 N下的平均摩擦系数分别为0.11、0.19和0.21。图8 (b) 为密封环基材在Al₂O₃球下摩擦系数图, 其平均摩擦系数分别为0.11、0.22和0.21。图8 (c) 为密封环淬火层在钢球下的摩擦系数图, 平均摩擦系数分别为0.25、0.23和0.25。图8 (d) 为密封环淬火层在Al₂O₃球下摩擦系数图, 平均摩擦

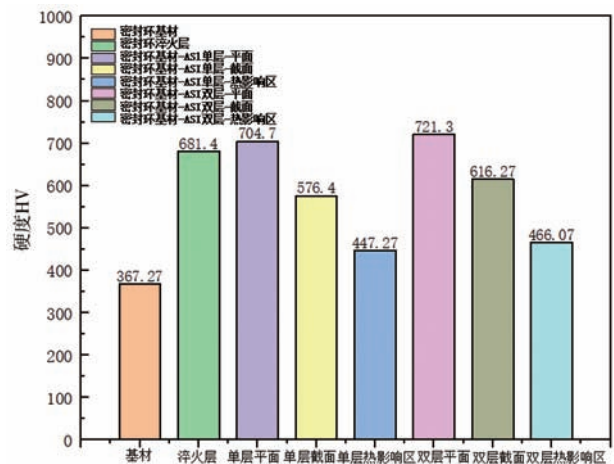
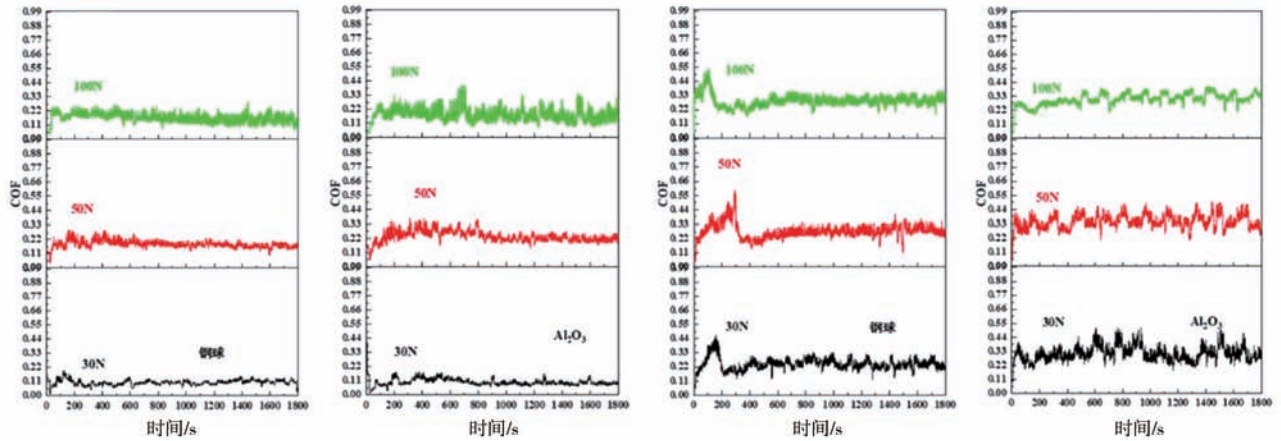


图7 密封环-AS1熔覆层各区域硬度图

Fig. 7 Hardness diagram of each area of the sealing ring AS1 cladding layer

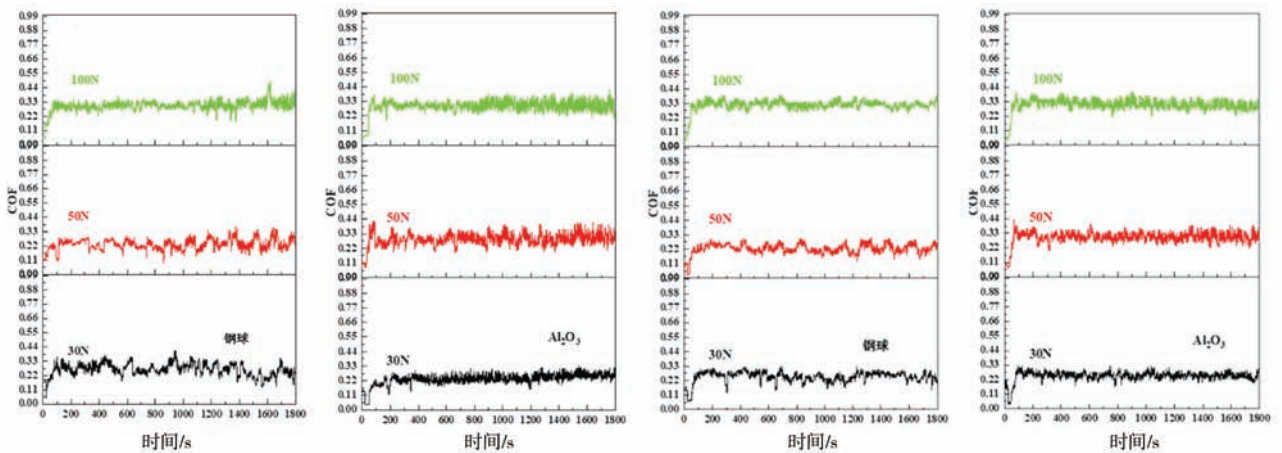
系数分别为0.31、0.33和0.31。图9 (a) 为在密封环基材-AS1单层熔覆层在钢球下的摩擦系数图, 其平均摩擦系数分别为0.26、0.23和0.28。图9 (b) 为密封环基材-AS1单层熔覆层在Al₂O₃球下摩擦系数图, 平均摩



(a) 密封环基材在钢球下的摩擦曲线 (b) 密封环基材在Al₂O₃球下的摩擦曲线 (c) 密封环淬火层在钢球下的摩擦曲线 (d) 密封环淬火层在Al₂O₃球下线的摩擦曲线

图8 密封环基材与淬火层摩擦系数图

Fig. 8 Friction coefficient diagrams of sealing ring substrates and quenching layers



(a) 单层熔覆层在钢球下的摩擦曲线 (b) 单层熔覆层在Al₂O₃球下的摩擦曲线 (c) 双层熔覆层在钢球下的摩擦曲线 (d) 双层熔覆层在Al₂O₃球下的摩擦曲线

图9 AS1单层、双层熔覆层摩擦系数图

Fig. 9 Friction coefficient diagrams of AS1 single and double cladding layers

摩擦系数分别为0.22、0.27和0.28。图9(c)为密封环基材-AS1双层熔覆层在钢球下的摩擦系数图,平均摩擦系数分别为0.25、0.24和0.32。图9(d)为密封环基材-AS1双层熔覆层在Al₂O₃球下的摩擦系数图,平均摩擦系数分别为0.25、0.31和0.33。分析试验数据,熔覆层曲线较为平稳,摩擦系数平均值也低,说明熔覆层磨损最为稳定,耐磨性相对来说比较好。

图10为密封环基体、淬火层和密封环基材-AS1单双层熔覆层的质量磨损量图。可以看出密封环基材-AS1双层熔覆层失重量最小,密封环基材质量磨损量最大,密封环淬火层的质量磨损量次之,密封环基材-AS1单层熔覆层摩擦损失量只比双层熔覆层失重量

稍大。可以明显发现,密封环基材-AS1单、双层熔覆层的耐磨性均明显高于密封环基体和密封环淬火层,其中密封环基材-AS1双层熔覆层质量磨损量仅为基体1/10,相对密封环淬火层的质量磨损量减少了一半以上。

图11为密封环基材-AS1双层熔覆层在钢球和Al₂O₃球(100 N)下摩擦磨损扫描电镜图片,从图11(a)可以看出密封环基材-AS1双层熔覆层在钢球下磨痕表面划伤而出现了较浅的犁沟,有少量磨粒附着在磨痕表面,磨损表面没有微裂纹的出现,且没有观察到大面积剥离的层片组织,磨损表面主要以磨粒磨损特征为主。在Al₂O₃球下可以观察到,如图11(b)所示,熔覆

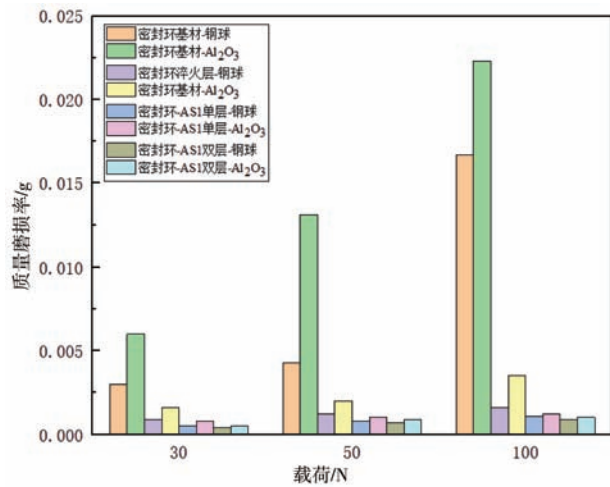


图10 AS1熔覆层与基材在研磨球下的质量磨损量

Fig. 10 Mass wear of as1 cladding layer and substrate under grinding ball

层磨痕表面光滑平整，表面基本无损失，出现微量犁沟，其表面磨损情况较钢球下磨损效果好，磨损机理为磨粒磨损。

2.5 熔覆层检测

熔覆层缺陷主要有裂纹、偏离、气孔。裂纹一般是沿焊道横向呈现一定长度条状形态。偏离是离子束流发生侧偏，致使另一侧材料熔池太浅或未形成冶金结合。采用着色渗透法对熔覆层进行表面检测，基本操作如下：

(1) 预处理。受检表面及缺陷是否被污染是着色渗透检测成功的关键。渗透剂要能有效地渗入受检试样，必须进行熔覆层表面清理和预处理。渗透剂能否有效发挥作用，关键在于其能否顺利进入缺陷且产生颜色变化，而熔覆层表面存在杂质则会限制渗透液进



(a) 钢球

(b) Al₂O₃

图11 密封环基材-AS1双层熔覆层在研磨球下的磨痕形貌图

Fig. 11 Morphologies of worn marks on the sealing ring substrate - AS1 cladding layers under grinding balls

入缺陷。

(2) 渗透。渗透时间和环境温度对渗透检测极为关键。首先，要保证熔覆层受检面完全喷覆渗透剂，且维持整个渗透期内有一定潮湿度。其次，喷覆渗透剂时，喷嘴应距受检面20~30 mm，渗透时间应根据所选渗透液的使用规范进行调整，一般为5~15 min。

(3) 清洗。清洗时，用干洁无毛的纸巾蘸取清洗剂沿一个方向擦洗，切记采用清洗剂直接喷洗受检试样，避免过度清洗，擦拭过程中亦不可杂乱无章的擦拭。受检面光滑时，直接用纸巾擦洗即可；表面粗糙时则应将纸巾先润湿再擦洗。

(4) 显像。显像操作是将缺陷内的渗透剂利用显像剂吸出到试样表面并将之放大，得到颜色鲜艳的标记。压力喷罐中试剂使用前需要摇匀，此操作可使

喷罐中显像剂分布均匀。试验前，最好先进行试喷，喷射距离被检面30 mm左右，并呈30°~45°，这样喷覆的显像剂分布均匀且薄，切不可多次喷涂于一处。喷覆试验后，等待15~20 min即可观察受检表面。当有明显彩色迹痕时，首先在正常光下确定迹痕的真伪。最后，对受检熔覆层加以标记，且标记的位置和方式应对受检零件无害。

(5) 后处理。检测结束后，为避免显像剂残余腐蚀样品，可以对样品进行水冲或用水擦除显像剂。图12为原始和打磨后的熔覆层表面检测图，通过表面显像分析，可以发现原始表面经过检测后，试样的颜色发生变化，可以明显看出裂纹的存在，裂纹的产生是因为熔覆层的焊道与焊道之间搭接部分凹凸不平。表面打磨处理后的检测结果无颜色变化，说明其表面无

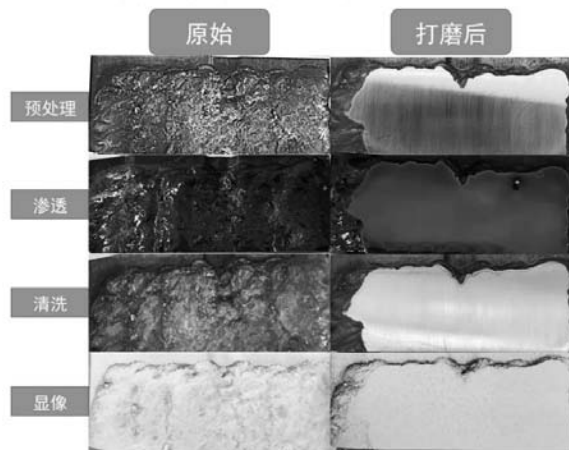


图12 熔覆层检测图

Fig. 12 Inspection diagrams of cladding layers

裂纹存在。着色渗透检验结果：表面打磨后熔覆层无裂纹出现，符合工业安全生产的标准。同时，也说明这次着色渗透探伤试验取得了成功。

3 结论

本研究对密封环的磨损机理进行分析，选择耐磨性优异的AS1高熵合金，在密封环基材表面成功制备了AS1熔覆层，并对其最佳工艺参数、显微组织、力学性能和耐磨性进行测试分析，主要结论如下。

(1) 密封环基材显微组织为铁素体+珠光体；密封环淬火层显微组织中已经开始出现贝氏体相变，其显微组织为铁素体+珠光体+贝氏体的混合组织；密封环工作过程中的磨损机理以粘着磨损和磨粒磨损为主。

(2) AS1熔覆层具有致密的组织结构，晶粒呈均匀分布且以等轴晶为主。熔覆层硬度曲线呈阶梯状下降，分别对应熔覆层、热影响区和基材区域，其中熔覆层硬度最高（HV721.3），约为基材硬度的2倍。

(3) 密封环基材-AS1双层熔覆层耐磨性较之基体提高了约10倍，相对密封环淬火层耐磨性则提高了2倍以上，其主要磨损机理为磨粒磨损。

(4) 对熔覆层表面打磨后进行着色渗透检测，未发现裂纹缺陷，符合工业安全生产的标准。

参考文献:

- [1] LIAN G F, GAO W B, CHEN C R, et al. Review on hard particle reinforced laser cladding high-entropy alloy coatings [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 1366–1405.
- [2] 秦真波, 吴忠, 胡文彬. 表面工程技术的应用及其研究现状 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (9): 2192–2216.
- [3] 李红, 韩祎, 曹健, 等. 高熵合金在钎焊和表面工程领域的应用研究进展 [J]. 材料工程, 2021, 49 (8): 1–10.
- [4] 师昌绪, 徐滨士, 张平, 等. 21世纪表面工程的发展趋势 [J]. 中国表面工程, 2001 (1): 2–7.
- [5] MCGUIRE N. Bioinspired surface micro/nano-topography engineering for tribological applications [J]. Tribology Lubrication Technology, 2023, 79 (3): 48–53.
- [6] ARAVIND S K, NIVEDITHA N, N. R., et al. A comprehensive review on advances in high entropy alloys: fabrication and surface modification methods, properties, applications, and future prospects [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 109: 583–606.
- [7] 李占明, 王梦璐, 孙晓峰, 等. 高熵合金在激光增材修复中研究应用进展 [J]. 航空材料学报, 2024, 44 (1): 59–71.
- [8] CAI Y C, ZHU L S, CUI Y, et al. Influence of high-temperature condition on the microstructure and properties of FeCoCrNiAl_{0.3} and FeCoCrNiAl_{0.7} high-entropy alloy coatings [J]. Surface Engineering, 2021, 37 (2): 179–187.
- [9] YU Y Y, LI Y, TAN N, et al. Influence of cBN on the microstructure and tribology properties of (CoCrNi)₉₄Al₃Ti₃ medium-entropy alloy coating prepared by high-speed laser cladding: the evolution and strengthening mechanism of cBN [J]. Ceramics International, 2024, 50 (12): 22041–22049.
- [10] YUAN S H, LI H L, HANG C F, et al. FeCoNiCrAl_{0.6} high-entropy alloy coating on Q235 steel fabricated by laser cladding [J]. Materials Science and Technology, 2023, 39 (6): 705–713.
- [11] F. Y. I., E. V. G., A. K. O. Structure and properties of FeCoCrNiAl high-entropy alloy coating [J]. Steel in Translation, 2022, 52 (7): 648–650.
- [12] 董天顺, 刘建辉, 陆鹏炜, 等. 高熵合金复合涂层研究现状及展望 [J]. 粉末冶金工业, 2024, 34 (1): 117–123.
- [13] FANG Q H, CHEN Y, LI J, et al. Microstructure and mechanical properties of FeCoCrNiNb_x high-entropy alloy coatings [J]. Physica B: Condensed Matter, 2018, 550: 112–116.
- [14] HSU W L, YANG Y C, CHEN C Y, et al. Thermal sprayed high-entropy NiCo_{0.6}Fe_{0.2}Cr_{1.5}SiAlTi_{0.2} coating with improved mechanical

- properties and oxidation resistance [J]. *Intermetallics*, 2017, 89: 105–110.
- [15] YE X Y, MA M X, CAO Y X L, et al. The property research on high-entropy alloy $\text{Al}_x\text{FeCoNiCuCr}$ coating by laser cladding [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 303–312.
- [16] LIN D Y, ZHANG N N, HE B, et al. Tribological properties of FeCoCrNiAlB_x high-entropy alloys coating prepared by laser cladding [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2017 (2): 18: 4–9.
- [17] QI X X, LI Y L, LI F Y, et al. Improving the properties of remanufactured wear parts of shield tunneling machines by novel Fe-based composite coatings [J]. *Ceramics International*, 2022, 48 (5): 6722–6733.
- [18] 肖翊. $\text{FeCoNiCrMnAl}_{0.5}(\text{Si}_{0.5})$ 高熵合金熔覆层的制备与性能 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.

Plasma Cladding $\text{FeCoNiCrMnAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ High Entropy Alloy for Repairing Sealing Rings

HUANG Shao-fu¹, WANG Xiao-long¹, LIU Jian², TONG Yong-gang³, XIAO Yi³, DU Xian²

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 2. National Engineering Research Center for Mechanical Product Remanufacturing of Army Armored Force Academy, Beijing 100072, China; 3. School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract:

The sealing ring is one of the main components on the screw conveyor of the shield tunneling machine. Facing the harsh service environment of high pressure, impact, and strong wear, the sealing ring components are prone to wear and tear. Selecting the worn sealing ring on the screw conveyor as the substrate, and the $\text{FeCoNiCrMnAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ (AS1) high entropy alloy with high hardness and excellent wear resistance as the cladding material, the microstructure, phase, and microhardness of the plasma cladding sealing ring AS1 cladding layer were studied and analyzed. Through testing the friction and wear performances of the cladding layer at room temperature, the wear resistance of the sealing ring AS1 cladding layer was analyzed, and the feasibility of plasma cladding high entropy alloy repair on the surface of the sealing ring was explored. It was found through experiment that the microstructure of the sealing ring is mainly composed of ferrite, pearlite and bainite, and adhesive wear and abrasive wear occur during operation. The AS1 cladding layer is mainly composed of equiaxed crystals, with the highest hardness(HV721.3), which is about twice the hardness of the substrate. The wear resistance of the AS1 double-layer cladding layer has increased by about 10 times compared to the substrate, mainly due to abrasive wear mechanism. Using plasma cladding high entropy alloy to repair the surface of the sealing ring is a very feasible solution, which is of great significance for ensuring the smooth operation of the shield tunneling machine.

Key words:

plasma cladding; high entropy alloy cladding layer; abrasion resistance; sealing ring repair; cladding inspection