

LaCl₃ 对氩弧熔覆 AlCrFeCoNi 高熵合金涂层组织与性能的影响

时海芳, 侯建良, 白杨, 李德财, 金鑫, 李逸凡

(辽宁工程技术大学材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 采用氩弧熔覆技术在 Q235 钢表面制备了 AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ ($x=0, 1, 2, 3$ 和 4, 质量分数) 高熵合金涂层, 研究了 LaCl₃ 含量对高熵合金涂层组织结构和性能的影响。结果表明: 随着 LaCl₃ 的添加及其含量的逐步增加, 高熵合金涂层的晶体结构发生了显著变化, 由 FCC 和 BCC 混合相逐渐转变为单一的 FCC 相; 添加适量的 LaCl₃ 能够细化涂层的晶粒, 并且随着 LaCl₃ 含量的进一步增加, 晶粒发生明显的择优取向; 当 LaCl₃ 含量为 2% 时, 涂层的显微硬度与耐磨性均达到最佳, 与未添加 LaCl₃ 的 AlCrFeCoNi 涂层相比, 显微硬度提升了 70% (从 270 HV0.1 提升到 460 HV0.1), 耐磨性提升了 50% (磨损量从 13 mg 降低为 6 mg), 涂层的主要磨损机制为黏着磨损。

关键词: 氩弧熔覆; 高熵合金涂层; LaCl₃; 性能; 显微组织

中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2025)08-0179-08

Effect of LaCl₃ on microstructure and properties of AlCrFeCoNi high-entropy alloy coatings prepared by argon arc cladding

SHI Hai-fang, HOU Jian-liang, BAI Yang, LI De-cai, JIN Xin, LI Yi-fan

(College of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ ($x=0, 1, 2, 3$ and 4, mass fraction) high entropy alloy coatings were prepared on the surface of Q235 steel using argon arc cladding technology. The effect of LaCl₃ content on microstructure and properties of the high entropy alloy coatings was studied. The results show that with the addition of LaCl₃ and its gradual increase in content, the crystal structure of the high entropy alloy coatings undergoes significant changes, gradually transforming from a mixture of FCC and BCC phases to a single FCC phase. Adding an appropriate amount of LaCl₃ can refine the grain size of the coating, and with further increase in LaCl₃ content, the grain undergoes obvious preferential orientation. When the LaCl₃ content is 2%, the microhardness and wear resistance of the coating reach their optimum, compared with the AlCrFeCoNi coating without LaCl₃, the microhardness increases by 70% (from 270 HV0.1 to 460 HV0.1), the wear resistance increases by 50% (the wear amount decreases from 13 mg to 6 mg), and the main wear mechanism of the coating is adhesive wear.

Keywords: argon arc cladding; high-entropy alloy coating; LaCl₃; property; microstructure

高熵合金 (High-entropy alloys) 是一种由 5 种或 5 种以上等量的元素形成的合金, 其概念最初是由中国台湾学者叶均蔚教授^[1]提出, 合金中每种元素的摩尔百分比介于 5% 至 35% 之间^[2]。相比于传统合金, 高熵合金有四大效应, 分别是高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应、“鸡尾酒”效应^[3-4], 这 4 种效应共

同作用使得高熵合金具有高强度、高硬度、优异的耐磨性、良好的耐腐蚀性、抗高温氧化性^[5]等特点。AlCrFeCoNi 是过去几年广泛研究的合金体系, 具有优异的力学性能和较大的应用潜力^[6]。该体系的高熵合金主要由面心立方 (FCC) 相和体心立方 (BCC) 相组成, 其力学性能主要由 BCC 相和 FCC 相的微观

收稿日期: 2024-09-20 修订日期: 2024-11-19

作者简介: 时海芳 (1968—), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事金属强韧化及材料表面改性技术研究, E-mail: shi680303@163.com。

通信作者: 侯建良 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属材料表面改性研究, E-mail: houjianliang98@163.com。

引用格式: 时海芳, 侯建良, 白杨, 等. LaCl₃ 对氩弧熔覆 AlCrFeCoNi 高熵合金涂层组织与性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2025, 46(8): 179-186.

SHI Hai-fang, HOU Jian-liang, BAI Yang, et al. Effect of LaCl₃ on microstructure and properties of AlCrFeCoNi high-entropy alloy coatings prepared by argon arc cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(8): 179-186.

结构和体积分数决定^[7-8],随着晶体结构的改变,高熵合金的性能也发生变化^[9]。

稀土元素作为变质元素,具有较大的原子尺寸,将其加入合金中后,增大了合金的原子尺寸差,原子运动变得困难,会强化合金的力学性能,稀土元素的加入还可以有效地调控组织,优化合金性能^[10]。Sun等^[11]研究了添加 Sc 元素对 $\text{Al}_{0.2}\text{CoCrFeNi}$ 合金微观结构、相变和力学性能的影响,结果表明,Sc 可以细化晶粒尺寸、改变相类型并改善力学性能。Zhang等^[12]研究了稀土元素 Y 添加量对 CoCrFeNi 合金微观结构和力学性能的影响,结果表明,随着 Y 含量的增加,维氏硬度和屈服强度提高,而断裂强度和塑性应变降低。

已有的研究表明,稀土元素 La 的加入可以细化高熵合金晶粒,从而提高其力学性能、耐磨性和耐腐蚀性^[13-15],但稀土元素 La 对 AlCrFeCoNi 系高熵合金的作用机制和影响规律的研究仍然较少。因此,本文通过氩弧熔覆技术制备 $\text{AlCrFeCoNi}-x\%\text{LaCl}_3$ ($x=0, 1, 2, 3$ 和 4 , 质量分数)高熵合金涂层,研究 LaCl_3 含量对高熵合金涂层的显微组织、硬度及耐磨性的影响。

1 试验材料与方法

1.1 高熵合金涂层的制备

试验材料选用 Q235 钢作为基体,将其表面打磨光滑,使用酒精清洗并干燥备用。制备 $\text{AlCrFeCoNi}-x\%\text{LaCl}_3$ ($x=0, 1, 2, 3$ 和 4 , 质量分数)高熵合金涂层的原料选用纯度 99.9%、粒度 200 目的 Co、Cr、Fe、Ni、Al 金属粉末以及纯度大于 99% 的 LaCl_3 试剂。随后将金属粉末混合并加入水玻璃作为粘结剂充分研磨,采用 WE-30 型液压式万能试验机以 120 kN 的压力压制形成预制熔覆块,烘干备用。使用 WS-500 型交直流脉冲钨极氩弧焊机进行氩弧熔覆,熔覆电流为 180 A,熔覆速度为 2 mm/s,氩气流速为 8 L/min。

1.2 性能测试与组织观察

将熔覆层切割成 8 mm×8 mm×10 mm 块状试样,使用镶嵌机镶嵌后,用 180 至 1500 目的金相砂纸打磨,然后经抛光、腐蚀、清洗、吹干后,使用 Axiovert 40 MAT 型倒置显微镜、JSM-7500F 型扫描电镜 (SEM) 及其配备的能谱仪 (EDS) 对涂层形貌及元素分布进行分析。使用 XRD-6100 型 X 射线衍射仪 (XRD) 进行物相分析,扫描范围为 $20^\circ \sim 100^\circ$,扫描速度为 $10^\circ/\text{min}$ 。使用 HV-1000Z 自动转塔显微硬度计测量

涂层截面的显微硬度,加载载荷为 0.1 kg,保压时间 10 s。磨擦磨损试验制备直径为 4 mm 的销钉状试样,磨擦副选用 YG6 钨钢,使用 MMU-10 型磨擦磨损试验机测试涂层的耐磨性,试验参数为:转速为 120 r/min,载荷为 80 N,磨损时长为 30 min。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 为 $\text{AlCrFeCoNi}-x\%\text{LaCl}_3$ 涂层的 XRD 图谱。从图 1 可以看出,未添加 LaCl_3 时 AlCrFeCoNi 高熵合金涂层为 FCC 和 BCC 相共存,随着 LaCl_3 含量的增加,BCC 相的衍射峰强度逐渐减弱,尤其是 (110) 和 (211) 衍射峰在 LaCl_3 含量为 4% 时基本完全消失,合金的相结构转变为单一的 FCC 相,这一现象说明 LaCl_3 的添加抑制了 BCC 相的生成。La 元素由于其相对较大的原子半径,当被添加到合金中时,会引起晶格畸变,晶格畸变的程度取决于 La 的添加量,过量的 La 会导致较大的晶格畸变^[16],从而积累足够的能量来破坏原合金相结构的稳定性,这种能量的释放促进了相结构的转变^[17]。

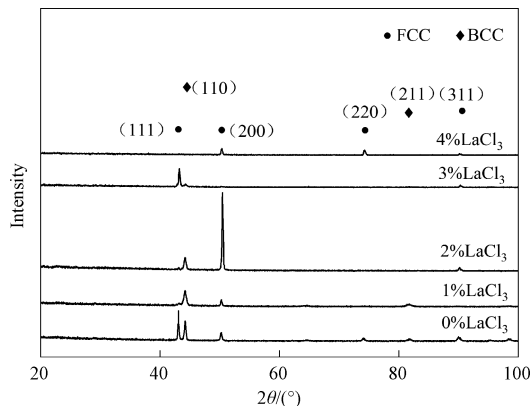


图 1 $\text{AlCrFeCoNi}-x\%\text{LaCl}_3$ 涂层的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the $\text{AlCrFeCoNi}-x\%\text{LaCl}_3$ coatings

图 2 为 AlCrFeCoNi 涂层熔合区附近的显微组织及对应的 EDS 线扫描结果。如图 2(a) 所示,可以看到涂层与基体之间出现较明显的氩弧高温作用下所形成的白亮带,这表明形成了良好的冶金结合,表面未发现裂纹及气孔。同时在过渡区域上方可以观察到平面晶,而温度梯度 (G) 和凝固速率 (R) 是影响晶体生长形态的重要参数^[18],在熔覆过程中,基体与热源的距离较远,温度相对较低,导致固液两相界面存在较大的温度梯度,则 G/R 比值较大,使得晶体形核加速但无法充分生长,从而在固液界面上形成了平面

晶^[19]。在平面晶的上方可以观察到柱状晶,柱状晶的生长方向与热流方向平行,左侧的柱状晶较为发达,在柱状晶上方生长着枝晶。不同区域组织特征的差异主要是由于氩弧熔覆非平衡凝固的特征所决定的。图 2(b)为 EDS 线扫描结果,扫描方向为从基体到涂层。观察图 2(b),从基体到涂层 Fe 元素的含量

呈下降趋势,其他元素呈上升趋势,且从基体到涂层 Fe 元素的含量都明显高于其他元素。造成差异的主要原因是在氩弧熔覆过程中,基体与涂层元素之间发生相互扩散,基体中大量 Fe 元素进入涂层,使得 Fe 元素含量明显高于其他元素,这也进一步证明了涂层与基体之间存在着良好的冶金结合。

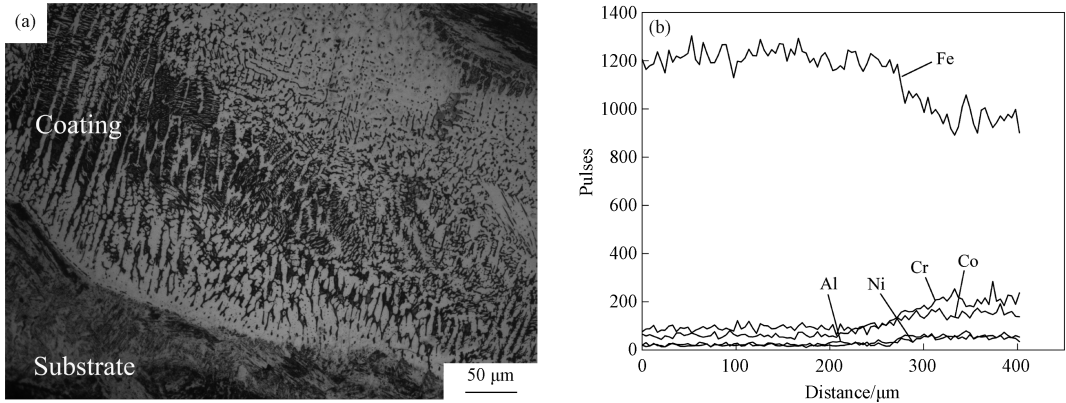


图 2 AlCrFeCoNi 涂层与基体熔合区附近的(a)显微组织及(b)对应的 EDS 线扫描结果
Fig. 2 (a) Microstructure and (b) corresponding EDS line scanning results near the fusion zone between AlCrFeCoNi coating and substrate

图 3 为 AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ 涂层的截面显微组织。从图 3 可以看出,不同含量 LaCl₃ 涂层显微组织均由树枝晶(DR)和枝晶间(ID)构成。如图 3(a)所示,未添加 LaCl₃ 时,晶界清晰,一次枝晶较为发达,在二次枝晶中观察到颈缩现象;添加 LaCl₃ 之后,涂层的显微组织发生明显变化,枝晶变得粗大,枝晶间

组织变多,可以观察到黑色及灰色枝晶间区域,枝晶及枝晶间组织都沿着特定的晶体取向生长。当 LaCl₃ 含量为 2% 时,枝晶细化,枝晶间组织减少,二次枝晶臂间距减小,此时晶粒尺寸最小。根据经典形核理论,稀土元素 La 的加入会降低相界面的表面张力和生成晶核所需的能量波动,有效地提高了形核率,改

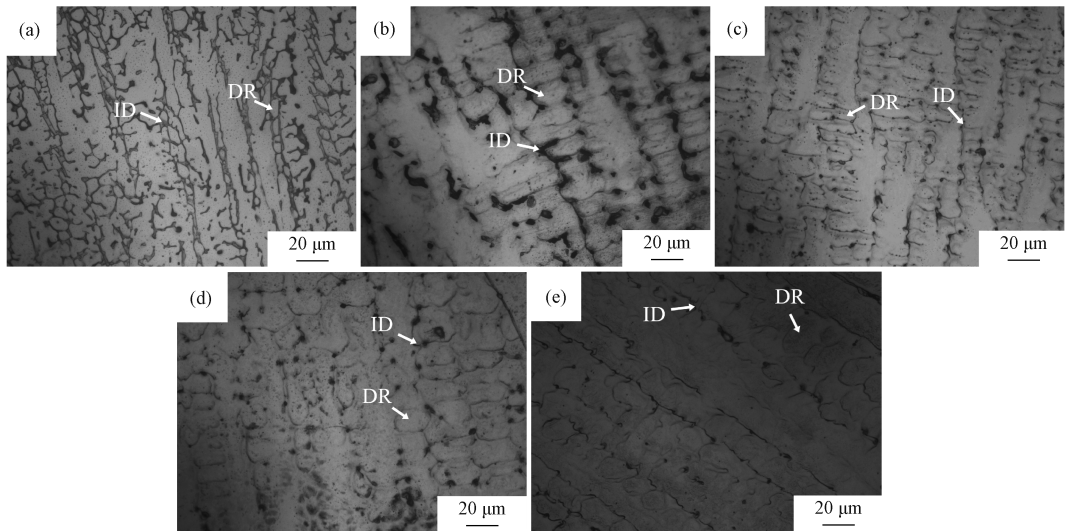


图 3 AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ 涂层的截面显微组织

(a) AlCrFeCoNi; (b) AlCrFeCoNi-1%LaCl₃; (c) AlCrFeCoNi-2%LaCl₃; (d) AlCrFeCoNi-3%LaCl₃; (e) AlCrFeCoNi-4%LaCl₃
Fig. 3 Cross-sectional microstructure of the AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ coatings
(a) AlCrFeCoNi; (b) AlCrFeCoNi-1%LaCl₃; (c) AlCrFeCoNi-2%LaCl₃; (d) AlCrFeCoNi-3%LaCl₃; (e) AlCrFeCoNi-4%LaCl₃

善了晶体形貌,使晶粒更细^[20]。同时,由于 La 原子有较大的原子半径,因此在晶内固溶度有限而易富集在枝晶间,添加 La 之后,富集在固液界面前沿的 La 原子会阻碍其他原子的扩散,从而限制了晶粒长大^[21];如图 3(d)~ 3(e)所示,当 LaCl₃ 含量超过 2% 时,二次枝晶臂间距稍有增大,树枝晶趋于长大趋势,晶粒发生明显的择优取向,细化组织的作用并没有随着 LaCl₃ 含量的增加而增大。

2.2 硬度

图 4 为 AlCrFeCoNi-*x*% LaCl₃ 涂层的截面硬度。从图 4 可以看出涂层的硬度明显高于基体,AlCrFeCoNi 高熵合金涂层的硬度值为 270 HV0.1,添加 LaCl₃ 后,AlCrFeCoNi-*x*% LaCl₃ 涂层的硬度随 LaCl₃ 含量的增加呈先增大后减小的趋势,在 LaCl₃ 含量为 2% 时,涂层的硬度最高,为 460 HV0.1,比未添加 LaCl₃ 时硬度提升了 70%,说明适量 LaCl₃ 的添加可以提高涂层的硬度。涂层硬度提高的主要原因是固溶强化。一方面,La 元素的原子半径较大,在形成固溶体时会发生强烈的晶格畸变和显著的固溶体强化;另一方面,根据经验电子和固体分子理论^[22],稀土原子的结构半径是不固定的,在包层过程中,稀土原子吸附在 Fe、Ni、Cr 等原子上,稀土原子的一些电子会脱离原子核的束缚或迁移,稀土原子的半径因此减小,通过空位和双空位进入固溶体,形成置换固溶体,在晶格间隙中引入更多的晶界原子,晶格尺寸发生变化,提高了固溶强化的效果^[23]。同时,稀土元素可以与涂层中的其他元素形成强键,进一步提高涂层的硬度^[24-25]。另外,LaCl₃ 的加入也增加了高熵合金的相对密度,有助于强度的提高^[26]。此外,当 LaCl₃ 含量为 2% 时,晶粒尺寸最小,所以此时涂层硬

度最高还有细晶强化作用的贡献。当 LaCl₃ 含量超过 2% 时,涂层硬度降低,甚至比未添加 LaCl₃ 的涂层硬度更低,这与涂层的显微组织结构改变有关。由 XRD 图谱可知,AlCrFeCoNi 高熵合金涂层相结构为 FCC 和 BCC 共存,当 LaCl₃ 含量超过 2% 时 FCC 结构占主导,由于 FCC 结构具有更多的滑移系(滑移面和滑移方向的组合),这使得位错在 FCC 结构中更容易移动,从而导致其硬度较低。

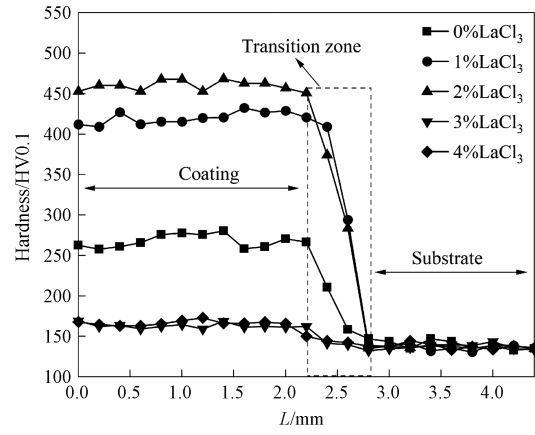


图 4 AlCrFeCoNi-*x*% LaCl₃ 涂层的截面硬度
Fig. 4 Cross-sectional hardness of the AlCrFeCoNi-*x*% LaCl₃ coatings

2.3 耐磨性

图 5 为 AlCrFeCoNi-*x*% LaCl₃ 涂层的摩擦系数。从图 5(a)可以看出,摩擦过程可以分为两个阶段,分别是磨合阶段^[27]和稳定阶段。在磨合阶段摩擦系数逐渐增大,曲线起伏较大,主要原因是在摩擦初期,涂层与摩擦副实际接触面积小,为点接触,随着摩擦的进行,接触面中的微峰被磨平,接触面积增大,形成良好的面接触,摩擦进入稳定阶段^[28]。从图 5(b)可以

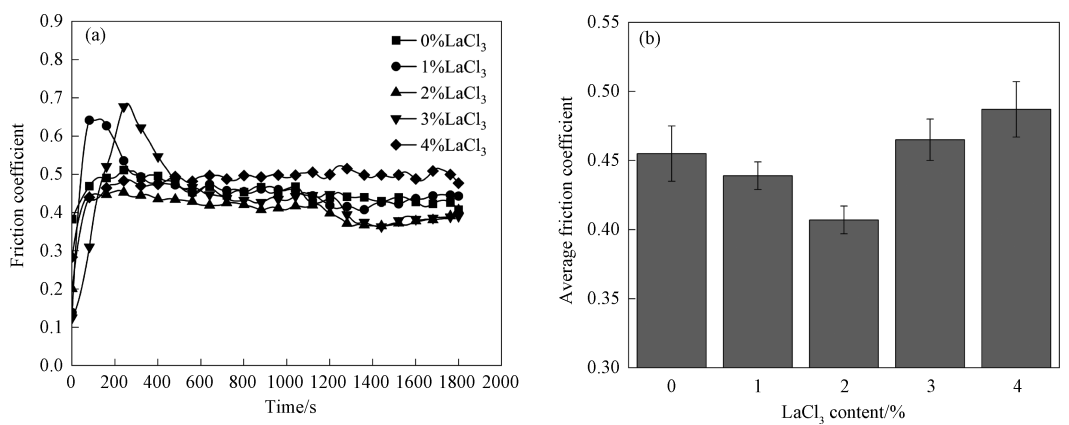


图 5 AlCrFeCoNi-*x*% LaCl₃ 涂层的 (a) 摩擦系数曲线及 (b) 平均摩擦系数

Fig. 5 (a) Friction coefficient curves and (b) average friction coefficient of the AlCrFeCoNi-*x*% LaCl₃ coatings

看出,AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ ($x=0、1、2、3$ 和 4) 涂层平均摩擦系数分别为 0.455、0.439、0.407、0.465 和 0.487,平均摩擦系数随 LaCl₃ 含量的变化趋势为先降低后升高,与涂层硬度的变化趋势相似。摩擦系数作为材料的物理属性可用来衡量其减磨性能的好坏,2% 含量 LaCl₃ 涂层摩擦系数最小,则此时涂层有最好的减磨性。

图 6 为 AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ 涂层的磨损量变化图。从图 6 可以看出,在相同的参数条件下,AlCrFeCoNi 涂层的质量损失为 13 mg。当 LaCl₃ 的含量从 0% 逐渐增加到 2% 时,涂层磨损后的质量损失显著下降,耐磨性提高。这是因为随着 LaCl₃ 含量的增加,尺寸较大的 La 原子占据其他的晶格位置,会造成较大的晶格畸变,导致位错滑移产生钉扎作用,增大位错的阻力,提升了涂层的耐磨性^[29]。当 LaCl₃ 的含量为 2% 时,涂层的质量损失达到最小值 6 mg,比未添加 LaCl₃ 时减少 50%。然而随着 LaCl₃ 含量的增加,涂层的质量损失反而有所增加,当 LaCl₃ 的含量为 4% 时,涂层的质量损失达到最大值 29 mg。这一结果符合经典的 Archard 磨损计算定律^[30],即在其他条件一定的情况下,材料的耐磨性与其硬度成正比,材料的硬度越高,磨损量越小,耐磨性越好。2% 含量 LaCl₃ 涂层硬度最高,磨损量最小,因此其耐磨性最好,而当 LaCl₃ 含量大于 2% 时,涂层的硬度较小,在摩擦过程更容易产生磨屑,磨屑在摩擦副上堆积,因此有较大摩擦系数和磨损量,进一步验证了

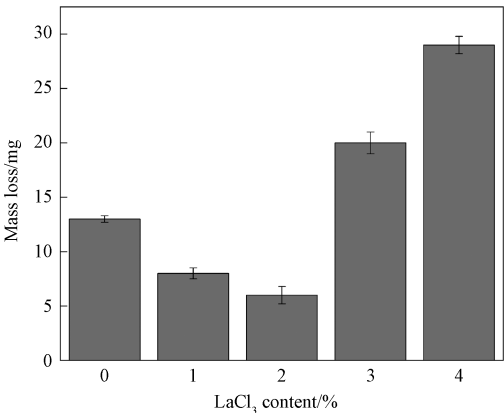


图 6 AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ 涂层的磨损量

Fig. 6 Wear mass loss of the AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ coatings

AlCrFeCoNi 涂层耐磨性随 LaCl₃ 含量变化的规律。

图 7 为 AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ 涂层的磨损表面形貌。从图 7(a) 可以看出,未添加 LaCl₃ 涂层表面有平行于磨损方向的犁沟以及粘附特征,犁沟宽大且深,并伴有较多磨屑,且有明显的剥落层区域,磨损较为严重,磨损机理为黏着磨损和磨粒磨损。随着 LaCl₃ 含量的增加,磨损颗粒以及碎屑减少,犁沟变浅变窄,如图 7(c) 所示,涂层表面比较光滑,观察不到明显的犁沟和粘附特征。结合前文分析,在固溶强化的作用下,涂层硬度提高,能够有效抵抗磨损所引起的塑性变形,对磨损起到一定的阻碍作用。表 1 为 AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ 涂层磨损面的化学成分,随着 LaCl₃ 含量的增加,磨损面中 O 元素的含量也提高,

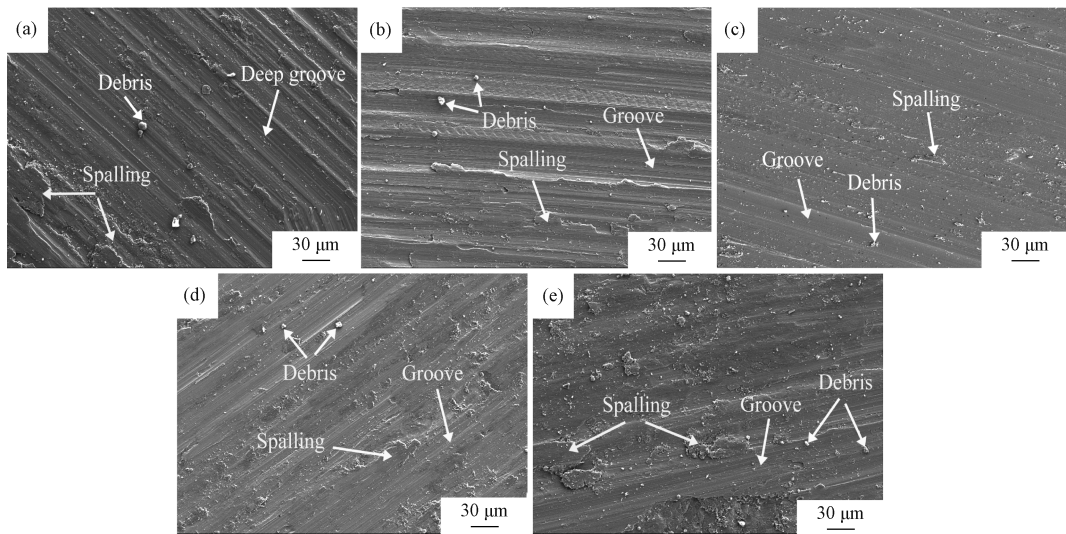


图 7 AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ 涂层的磨损表面形貌

(a) AlCrFeCoNi; (b) AlCrFeCoNi-1%LaCl₃; (c) AlCrFeCoNi-2%LaCl₃; (d) AlCrFeCoNi-3%LaCl₃; (e) AlCrFeCoNi-4%LaCl₃

Fig. 7 Wear surface morphology of the AlCrFeCoNi- $x\%$ LaCl₃ coatings

(a) AlCrFeCoNi; (b) AlCrFeCoNi-1%LaCl₃; (c) AlCrFeCoNi-2%LaCl₃; (d) AlCrFeCoNi-3%LaCl₃; (e) AlCrFeCoNi-4%LaCl₃

表 1 AlCrFeCoNi-x%LaCl₃ 涂层磨损面的化学成分 (原子分数, %)

Table 1 Chemical compositions of the worn surface of the AlCrFeCoNi-x%LaCl₃ coatings (at%)

Alloy	Co	Cr	Fe	Ni	Al	La	Cl	C	O
AlCrFeCoNi	16.5	16.1	29.0	16.3	11.7	0.0	0.0	5.9	4.9
AlCrFeCoNi-1%LaCl ₃	10.7	11.0	48.0	10.7	4.2	0.0	0.0	8.3	7.1
AlCrFeCoNi-2%LaCl ₃	16.3	16.2	30.7	16.3	11.9	0.0	0.0	4.3	4.3
AlCrFeCoNi-3%LaCl ₃	8.4	8.3	42.4	8.2	4.1	0.0	0.1	9.9	18.5
AlCrFeCoNi-4%LaCl ₃	10.0	9.8	36.0	9.7	5.7	0.0	0.0	7.1	21.8

表明涂层在磨损过程中都伴随着氧化磨损,在磨损过程中形成的摩擦层内的氧化物和超细晶粒的保护屏蔽作用使得涂层表面免受进一步的磨损^[31]。当 LaCl₃ 的含量达到 3%,涂层粘附特征显著且磨屑开始变多,涂层的耐磨性下降。一方面由于涂层的硬度较低,抵抗切削的能力弱,另一方面涂层的相结构开始由 FCC 结构占主导,FCC 结构由于滑移系较多,位错可以在多个方向上运动,这有助于塑性变形的发生,但同时也会导致在磨损过程中材料更容易被移除。当 LaCl₃ 的含量为 4%时,磨痕表面犁沟加深,同时氧化层的剥落区域面积变大。此时涂层为单一的 FCC 结构,FCC 结构延展性好,但硬度低,此时试样与摩擦副之间的往复运动所产生的高粘合力 and 剪切

力会导致表面和次表面区域的裂纹和剪切带的产生和扩展^[32],随着摩擦副与涂层的不断摩擦,粘合力会从裂纹处撕裂涂层表面,撕裂下来的斑块随着摩擦副的转动不断割裂涂层,从而导致涂层表面犁沟变深并出现大量粘附特征。

图 8 为 AlCrFeCoNi-4% LaCl₃ 涂层磨损表面的 EDS 面扫描分析结果。可以发现,O 元素大多分布在磨屑以及破裂的氧化膜上,这是因为涂层与摩擦副摩擦产生高温,在高温作用下磨屑与空气接触加速氧化。另外,随着摩擦的进行,氧化膜破裂形成磨屑,在往复作用下加剧涂层的磨损,导致此时涂层的耐磨性最差。结合表 1 磨损面的化学组成来看,AlCrFeCoNi-4% LaCl₃ 涂层磨损表面 O、Fe 元素含量所占比例

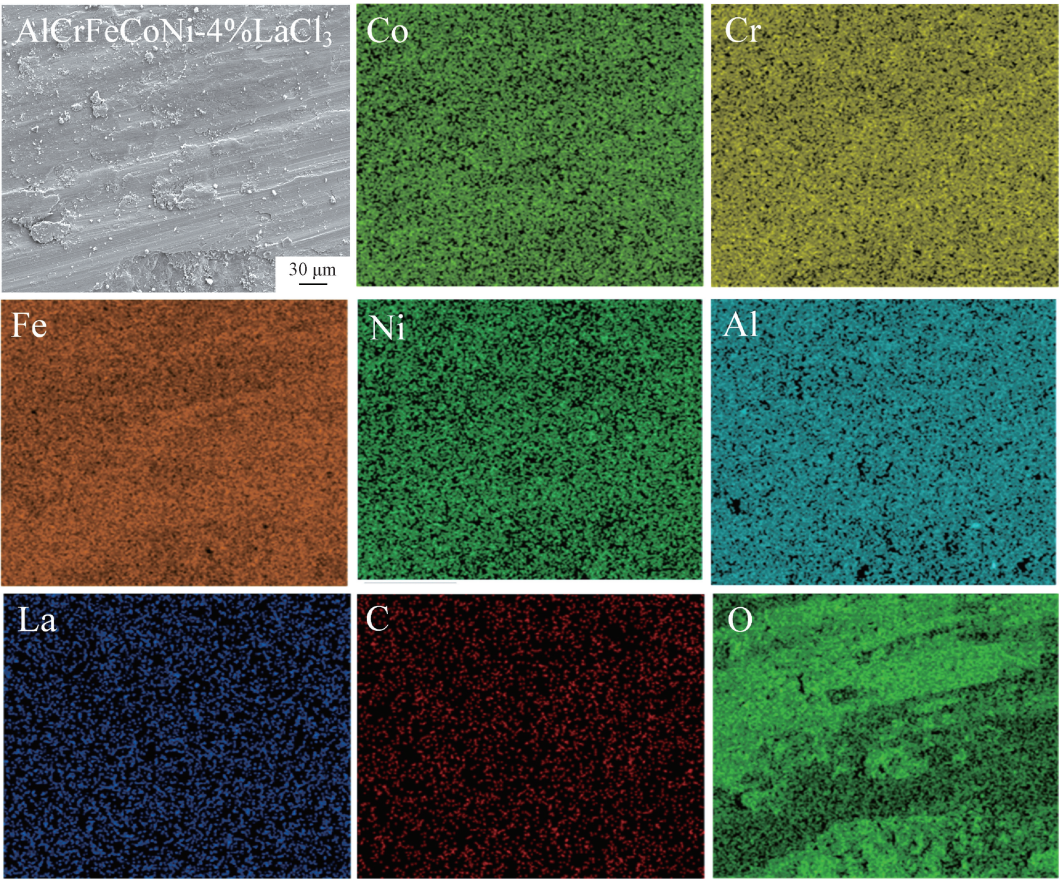


图 8 AlCrFeCoNi-4%LaCl₃ 涂层磨损表面的 EDS 面扫描分析

Fig. 8 EDS mapping scanning analysis of worn surface of the AlCrFeCoNi-4% LaCl₃ coating

较高,说明氧化膜主要成分是 Fe 的氧化物^[33],进一步验证了氧化磨损的存在。

3 结论

1) LaCl_3 的添加对抑制 $\text{AlCrFeCoNi}-x\%\text{LaCl}_3$ 高熵合金涂层中 BCC 相的形成具有积极意义,未添加 LaCl_3 的 AlCrFeCoNi 高熵合金涂层中, FCC 和 BCC 相共存,随着 LaCl_3 的添加及含量的逐步提升, BCC 相的强度逐渐减弱,当 LaCl_3 的含量达到 4% 时,涂层的相结构完全转变为 FCC 相;

2) 不同 LaCl_3 含量的涂层显微组织均主要

由树枝晶以及枝晶间区域构成,随着 LaCl_3 含量的增加,枝晶间组织先增多后减少,同时晶粒发生了显著的择优取向;另一方面,适量 LaCl_3 的添加能够有效细化晶粒,当 LaCl_3 含量为 2% 时,晶粒尺寸最小;

3) 添加适量 LaCl_3 能够提升涂层的硬度及耐磨性,随着 LaCl_3 含量的增加,涂层硬度及耐磨性先升高后降低,均在 LaCl_3 含量为 2% 时性能达到最佳,此时涂层的硬度为 460 HV0.1,相比添加前硬度提升了 70%,在耐磨性方面比添加前提升了 50%,磨损机制主要为黏着磨损。

参 考 文 献

- [1] Yeh J W, Chen S K, Lin S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(5): 299–303.
- [2] 谢马冲, 杨坤, 李来平. CoCrFeMnNi 高熵合金组织与力学性能研究进展[J]. *中国材料进展*, 2024, 43(7): 627–636.
XIE Ma-chong, YANG Kun, LI Lai-ping. Research progress on microstructure and mechanical behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. *Materials China*, 2024, 43(7): 627–636.
- [3] Yeh J W. Recent progress in high entropy alloys[J]. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, 31(6): 633–648.
- [4] Zhang Y, Zuo T T, Tang Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. *Progress in Materials Science*, 2014, 61: 1–93.
- [5] Ma K, Feng L, Wang Z P. Microstructure and properties of $\text{FeCrMn}_x\text{AlCu}$ high-entropy alloys and coatings[J]. *Coatings*, 2023, 13(8): 1401.
- [6] Cheng Q R, Shi H C, Jiang Q, et al. Effect of phase composition on microstructure and wear resistance of $(\text{Al}_{16.80}\text{Co}_{20.74}\text{Cr}_{20.49}\text{Fe}_{21.28}\text{Ni}_{20.70})_{99.5}\text{Ti}_{0.5}$ high-entropy alloy coatings[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103765.
- [7] Nong Z S, Lei Y N, Zhu J C. Wear and oxidation resistances of AlCrFeNiTi -based high entropy alloys[J]. *Intermetallics*, 2018, 101: 144–151.
- [8] Joseph J, Stanford N, Hodgson P, et al. Understanding the mechanical behaviour and the large strength/ductility differences between FCC and BCC $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 726: 885–895.
- [9] Wang W R, Wang W L, Wang S C, et al. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys[J]. *Intermetallics*, 2012, 26: 44–51.
- [10] Li G R, Liu M, Wang H M, et al. Effect of the rare earth element yttrium on the structure and properties of boron-containing high-entropy alloy[J]. *JOM*, 2020, 72: 2332–2339.
- [11] Sun Y, Wang Z, Zhao X, et al. Effects of Sc addition on microstructure, phase evolution and mechanical properties of $\text{Al}_{0.2}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33(12): 3756–3769.
- [12] Zhang L J, Zhang M D, Zhou Z, et al. Effects of rare-earth element, Y, additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 725: 437–446.
- [13] Sun Y P, Wang Z, Yang H J, et al. Effects of the element La on the corrosion properties of CrMnFeNi high entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 842: 155825.
- [14] Wang Y F, You Y, Yan M F, et al. The effect of La on the surface properties of plasma nitrided CoCrCuFeNi high-entropy alloys at 440 degrees celsius[J]. *Coatings*, 2024, 14(3): 303.
- [15] Guo K T, Sun Y N, Cheng W J. Effect of rare earth La_2O_3 on the microstructure and tribological properties of laser-clad CoCrFeNiMoSi high-entropy alloy coatings[J]. *Materials Letters*, 2024, 355: 135398.
- [16] Qiu X W, Zhang Y P, Liu C G. Effect of Ti content on structure and properties of $\text{Al}_2\text{CrFeNiCoCuTi}_x$ high-entropy alloy coatings[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 585: 282–286.

- [17] He J Y, Liu W H, Wang H, et al. Effects of Al addition on structural evolution and tensile properties of the FeCoNiCrMn high-entropy alloy system[J]. *Acta Materialia*, 2014, 62: 105–113.
- [18] 单华亮, 陶美悦, 庄文晨, 等. H13 钢表面激光熔覆 $\text{Al}_{0.8}\text{CoCr}_{0.23}\text{FeNi}_x\text{W}$ 高熵合金涂层及其性能[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(4): 546–550.
- SHAN Hua-liang, TAO Mei-yue, ZHUANG Wen-chen, et al. Microstructure and properties of laser cladding $\text{Al}_{0.8}\text{CoCr}_{0.23}\text{FeNi}_x\text{W}$ high entropy alloy coating on H13 steel[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2024, 44(4): 546–550.
- [19] 时海芳, 王红蕾, 李强, 等. B_4C 对氩弧熔覆 AlCuFeNiCo 高熵合金涂层组织及性能的影响[J]. *材料保护*, 2021, 54(11): 27–30.
- SHI Hai-fang, WANG Hong-lei, LI Qiang, et al. Effects of B_4C on the microstructure and properties of AlCuFeNiCo high-entropy alloy coatings prepared by argon arc cladding[J]. *Materials Protection*, 2021, 54(11): 27–30.
- [20] Xu Q, Chen D Z, Wang C R, et al. Effects of La on microstructure and mechanical properties of $\text{NbMoTiVSi}_{0.2}$ refractory high entropy alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(2): 512–520.
- [21] 董方, 毛宁, 瞿伟. La 添加对 FeMnCrNiCo 高熵合金铸态组织及硬度的影响[J]. *金属热处理*, 2021, 46(3): 116–120.
- DONG Fang, MAO Ning, QU Wei. Effect of La addition on as-cast microstructure and hardness of FeMnCrNiCo high entropy alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021, 46(3): 116–120.
- [22] 林成, 黄土星, 尹桂丽, 等. 固体与分子经验电子理论的发展现状与展望[J]. *兵器材料科学与工程*, 2016, 39(1): 110–114.
- LIN Cheng, HUANG Shi-xing, YIN Gui-li, et al. Present situation and prospect of empirical electronic theory of solids and molecules[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2016, 39(1): 110–114.
- [23] Shu F Y, Tian Y, Jiang S S, et al. Effect of rare earth oxide CeO_2 on microstructure and surface properties of laser cladded CoFeCrNiSiB high-entropy alloy coatings[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 106517.
- [24] Li H C, Wang D G, Chen C Z, et al. Effect of CeO_2 and Y_2O_3 on microstructure, bioactivity and degradability of laser cladding CaO-SiO_2 coating on titanium alloy[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2015, 127: 15–21.
- [25] Das A K. Effect of rare earth oxide additive in coating deposited by laser cladding: A review[J]. *Materials Today Proceedings*, 2022, 52: 1558–1564.
- [26] Wang X, Jiang X S, Chen J M, et al. Microstructure and mechanical properties of TiZrVMnCu high entropy alloy by addition of Er element[J]. *Materials Letters*, 2023, 330: 133322.
- [27] Tian L H, Xiong W, Liu C, et al. Microstructure and wear behavior of atmospheric plasma-sprayed AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy coating[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25: 5513–5521.
- [28] 时海芳, 李德财, 白杨, 等. Ti 含量对氩弧熔覆 CoCrFeNiCuTi_x 高熵合金涂层组织及性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2024, 45(3): 82–89.
- SHI Hai-fang, LI De-cai, BAI Yang, et al. Effect of Ti content on microstructure and properties of CoCrFeNiCuTi_x high-entropy alloy coatings by argon arc cladding[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2024, 45(3): 82–89.
- [29] 郝晨帆, 孟君晟, 丁皓, 等. 氩弧熔覆 $\text{Al}_x\text{CoCrFeCuNi}$ 高熵合金涂层组织与耐磨性[J]. *表面技术*, 2023, 52(12): 360–368.
- HAO Chen-fan, MENG Jun-sheng, DING Hao, et al. Microstructure and wear resistance of $\text{Al}_x\text{CoCrFeCuNi}$ high entropy alloy coating by argon arc cladding[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(12): 360–368.
- [30] Wu H, Baker I, Liu Y, et al. Dry sliding tribological behavior of Zr-based bulk metallic glass[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(3): 585–589.
- [31] Vo T D, Tran B, Tieu A K, et al. Effects of oxidation on friction and wear properties of eutectic high-entropy alloy $\text{AlCoCrFeNi}_{2.1}$ [J]. *Tribology International*, 2021, 160: 107017.
- [32] Yang H J, Liu Y, Zhang T, et al. Dry sliding tribological properties of a dendrite-reinforced Zr-based bulk metallic glass matrix composite[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2014, 30(6): 576–583.
- [33] 宫书林, 王永东, 李艳春, 等. 激光熔覆 CoCrFeNiTi_x 高熵合金涂层的组织与性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2024, 29(2): 118–124.
- GONG Shu-lin, WANG Yong-dong, LI Yan-chun, et al. Microstructure and properties of CoCrFeNiTi_x high-entropy alloy coating by laser cladding[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2024, 29(2): 118–124.