

高温抗磨 NiCrAlY/Co 涂层摩擦磨损性能研究

杨荣乾^{1,2,3} 崔功军^{1,2,3} 尤世泉^{1,2,3} 冯小刚^{1,2,3} 刘宇嵩^{1,2,3}

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院, 太原 030024)

(2. 山西省矿山流体控制工程实验室, 太原 030024)

(3. 矿山流体控制国家地方联合工程实验室, 太原 030024)

摘要: 为了改善304不锈钢的高温耐磨性能,延长其使用寿命,采用激光熔覆技术在304不锈钢表面制备了高温抗磨NiCrAlY/Co涂层。分析了涂层形貌、物相组成及显微硬度;研究了304不锈钢和NiCrAlY/Co涂层在不同温度(室温~800℃)的摩擦学性能,并分析了磨损机制。结果表明,涂层形貌良好,与304不锈钢基底冶金结合;涂层由 γ -Co、(Cr,Ni)和AlNi₃相组成;涂层平均显微硬度(303HV)约为基底硬度(194HV)的1.6倍;相比基底,涂层在200~600℃摩擦因数更小,800℃时摩擦因数接近,并且涂层在600℃时摩擦因数最低(0.5);涂层在室温~800℃下的磨损率均低于基底,且在400℃时磨损率最低[$1.91 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$],约为基底磨损率的1/3,表明NiCrAlY/Co涂层使304不锈钢的高温耐磨性能得到了改善。在中低温下,基底磨损机制主要为磨粒磨损和黏着磨损,NiCrAlY/Co涂层磨损机制主要为磨粒磨损和逐渐轻微的黏着磨损;在800℃下,基底的磨损机制为塑性变形和氧化磨损,涂层的磨损机制为氧化磨损。

关键词: 304不锈钢; 激光熔覆; NiCrAlY/Co涂层; 高温摩擦学性能

中图分类号: TH117.1 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.08.004

0 引言

304不锈钢因具有加工成型容易、强度高、韧性强、抗腐蚀等优点,在航天航空、医疗器械、车辆船舶等现代化工业中应用广泛;然而其硬度低,高温下耐磨损性能和热循环耐久性差等缺点,导致304不锈钢的使用寿命较短,每年会造成大量经济损失,甚至会导致安全事故^[1-4]。目前,用表面改性技术来改善材料性能是最直接有效的方法^[5-6]。激光熔覆技术因具有高能激光束,熔覆精度和效率高,热影响区小,制备的涂层组织质量优异,与基底结合强度高等优点,已成为应用最广泛的表面改性技术之一^[7-8]。因此,可以采用激光熔覆技术来改善304不锈钢的摩擦学性能,提高其应用的经济性和安全性。ZHANG等^[9]通过激光熔覆技术在304不锈钢表面制备了纯Co涂层,研究发现,涂层的主要物相为 γ -Co固溶体,涂层显微硬度为287HV高于304不锈钢,并且涂层改善了304不锈钢的高温摩擦学性能,但是在600℃时,涂层的磨损率较大,达到了 $3.8 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

Co合金具有诸多优异性能,如强度高、硬度高、耐腐蚀性和耐磨性良好、在较高温下仍然可以保持良好的

性能^[10],因此得到了广泛应用,特别是在各种恶劣工况,如高温、高载下。日益发展的现代化工业,对材料性能的要求变得更加严苛,传统的单一Co合金在某些情况下可能无法满足零部件的使用要求^[11]。目前在Co合金中添加强化相,如陶瓷颗粒、合金元素、固体润滑剂等来改善Co合金的性能已成为国内外学者的研究热点^{[12][127335][13]100-104[14]}。CHAOPING等^{[12]127335}进行了激光熔覆WC-Co复合涂层提高钛合金耐磨性的研究,发现在良好的金相结合和显微组织的协同作用下,熔覆层显微硬度达到了基底的4.8倍,并且WC颗粒的细化和均匀分布起到了坚硬的支撑框架作用,可以有效地抑制位错滑移,使涂层的耐磨性能得到了改善。易伟等^{[13]100-104}研究了添加NbC对激光熔覆Co基熔覆层磨损性能的影响,发现适当添加NbC可以提高熔覆层的硬度,同时高硬度的NbC颗粒在磨损过程中可以抑制塑性变形并防止涂层进一步磨损,使复合涂层耐磨性得到了很大提升。

NiCrAlY是一种具有良好的高温抗氧化性和力学性能的合金^[15-16],在高温下涂层会形成致密的富 α -Al₂O₃氧化层,通过抑制氧气扩散,防止涂层高温合金的快速降解^[17]。叶宏等^[18]研究了等离子喷涂

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775365,U1910212); 山西省基础研究计划项目(202303021211163); 山西省回国留学人员科研项目(2021-060)

作者简介: 杨荣乾,男,1998年生,山东济南人,硕士研究生; 主要研究方向为机械摩擦学; E-mail: 1531348238@qq.com。

崔功军(通信作者),男,1981年生,山东淄博人,博士,教授; 主要研究方向为机械摩擦学及表面技术; E-mail: cuigongjun@tyut.edu.cn。

引用格式: 杨荣乾,崔功军,尤世泉,等. 高温抗磨NiCrAlY/Co涂层摩擦磨损性能研究[J]. 机械强度, 2025, 47(8): 28-35.

YANG Rongqian, CUI Gongjun, YOU Shiquan, et al. Research on friction and wear properties of high temperature anti-wear NiCrAlY/Co coating[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(8): 28-35.

NiCrAlY+Al₂O₃ 复合涂层的摩擦学性能,发现 Al₂O₃ 颗粒与基底的结合强度较低,导致添加了 Al₂O₃ 的复合涂层硬度的变化较小,虽然降低了复合涂层在常温下的磨损率,但在 400~700 °C 时对磨损率的影响几乎没有。目前将 NiCrAlY 作为添加相去增强涂层的研究很少,尤其是缺乏 NiCrAlY 对 Co 涂层组织及性能影响的研究,因此研究将 NiCrAlY 作为添加相对 Co 涂层性能的影响具有重要意义。

本研究采用激光熔覆的方法,在 304 不锈钢表面熔覆 NiCrAlY/Co 涂层,以改善 304 不锈钢的高温摩擦学性能。分析了 NiCrAlY/Co 涂层截面形貌、物相组成、力学性能,系统测试了涂层与 304 不锈钢的高温摩擦学性能,并详细阐释了磨损机制。旨在为改善 304 不锈钢的高温摩擦学性能提供参考。

1 试验部分

1.1 试样制备

试验选用 304 不锈钢作为熔覆基底材料,试样尺寸为 32 mm×32 mm×5 mm。在熔覆之前,先将基底用砂纸打磨抛光,然后用丙酮清洗。选择纯度为 99.9% 的 Co 粉(150~300 目)和 NiCrAlY 粉(150~300 目)作为熔覆材料,NiCrAlY 粉末的化学成分见表 1。NiCrAlY/Co 粉末的配比为 25:75。用 V 型混合机将 2 种金属粉末混合均匀(转速 20 r/min、时间 2 h),熔覆前在 100 °C 的干燥箱中将混合粉末烘干 15 min。

表 1 NiCrAlY 合金粉末的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of NiCrAlY alloy powder

元素 Element	Ni	Cr	Al	Y	其他 Others
质量分数 Mass fraction/%	66~67	22.03	10.12	0.95	余量 Bal.

试验采用二氧化碳激光熔覆系统(陕西中美激光科技有限公司)在 304 不锈钢表面熔覆 NiCrAlY/Co 涂层,采用同步送粉方式。熔覆工艺如下:激光功率为 1 100 W,搭接率为 55%,送粉率为 9.2 g/min,扫描速度为 1 000 mm/min,光斑直径为 2 mm,保护气体为 Ar 气。

将激光熔覆后的试样沿垂直于激光扫描速度方向切割,将试样的截面用砂纸(80 目,600 目,1 500 目)打磨抛光,用王水腐蚀,制备出试样。

1.2 试验方法

采用 X 射线衍射仪对 NiCrAlY/Co 涂层的物相组成进行分析,仪器扫描范围为 20°~100°,扫描速度为 4(°)/min,采用 Cu-K_α 靶,电压为 40 kV,电流为 30 mA;利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)及配备的能谱分析仪(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)分析了涂层和磨损表面的形貌及元素含量;采用 HVS-1000Z 型维氏硬度计,负载为 5 N、

保载时间为 10 s,从涂层顶部垂直向下测试直至基底,每隔 0.1 mm 测量一个点位,多次测量,取测量值的平均值作为涂层显微硬度。

采用球-盘式高温摩擦磨损仪(HT-1000)测试 304 不锈钢与涂层的高温摩擦学性能。试验条件:室温为 -800 °C、负载为 10 N、速度为 0.2 m/s、摩擦副为 Si₃N₄ 陶瓷球(直径为 6 mm)、试验时间为 20 min。在试验前,用砂纸打磨涂层。摩擦因数由计算机实时记录,采用 Links-2007 型表面轮廓仪测量磨损体积(V)。通过磨损体积(V)除以负载(F)和滑动距离(L)得出磨损率。每个试样测量 5 个不同位置,取测量值的平均值作为磨损率的值。

2 结果与讨论

2.1 涂层物相组成

图 1 所示为 NiCrAlY/Co 涂层的 X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)图谱。由图 1 可知,涂层主要由 γ -Co、(Cr, Ni)、AlNi₃ 相组成。由于 Y 元素含量较少,涂层中未检测到 Y 元素相关的衍射峰。 γ -Co 稳定存在于 417 °C 之上,常温下的 Co 固溶体是面心立方结构,因为激光熔覆凝固冷却速度较快,高温下涂层中的 γ -Co 来不及发生相变,所以 Co 在涂层中以面心立方结构的 γ -Co 存在^[19]。此外,Ni 具有稳定立方点阵的作用^[20],因此 γ -Co 可以在涂层中稳定存在。涂层中固溶相和金属化合物相对涂层的硬度及摩擦学性能的提高有重要作用。

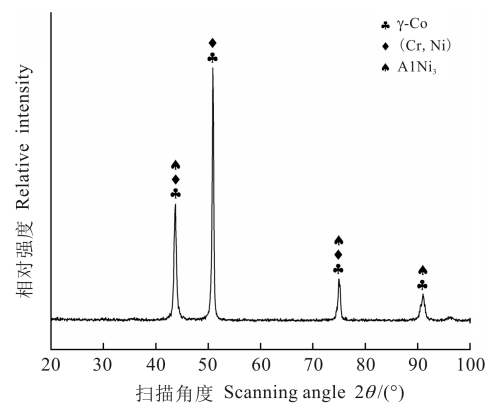


图 1 涂层的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the laser clad coating

2.2 涂层的截面形貌与元素分析

涂层的截面形貌如图 2 所示,涂层厚度大约为 1.1 mm;涂层组织均匀致密,未发现裂纹,涂层与基底冶金结合。因为激光熔覆凝固速度较快,气体来不及逸散出来,导致涂层中微小气孔的产生^[21]。

图 3 为 NiCrAlY/Co 涂层截面的线扫描元素分布图。由图 3 可知,涂层中 Co、Fe、Cr、Ni 元素在界面处均有所扩散,且存在着过渡段。Co 元素和 Ni 元素在过渡

到基底时含量降低,Fe元素和Cr元素在过渡到基底时含量升高,并且图3中的过渡段较短。这说明,NiCrAlY/Co涂层与304不锈钢基底已经完全熔合,并且涂层稀释率较低^[22]。

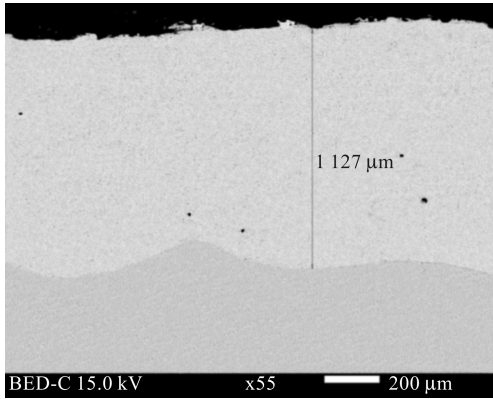
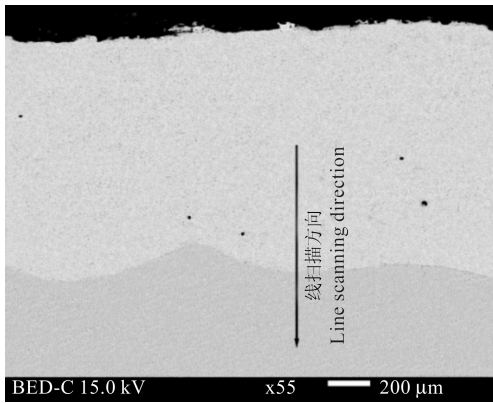


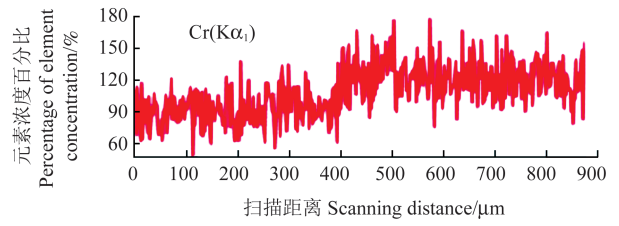
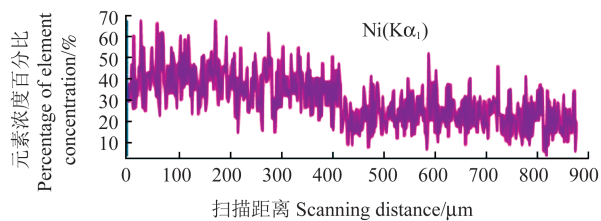
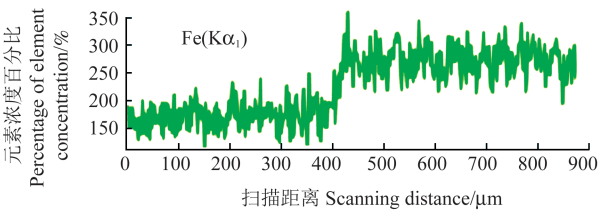
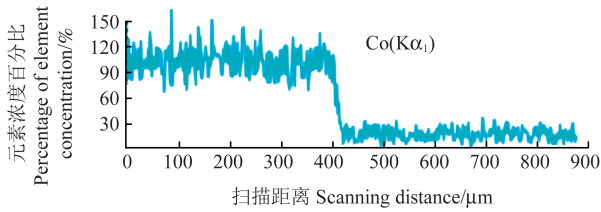
图2 涂层的截面形貌

Fig. 2 Cross-sectional morphology of the coating



(a) 涂层截面线扫描方向

(a) Line scanning direction of the coating cross section



(b) 涂层截面线扫描元素分布

(b) Line scanning element distribution of the coating cross-section

图3 涂层横截面的线扫描方向及元素分布

Fig. 3 Line scanning direction and element distribution of the coating cross section

2.3 涂层显微硬度

NiCrAlY/Co涂层沿横截面方向的硬度分布如图4所示。由图4可知,基底平均显微硬度为194 HV, NiCrAlY/Co涂层的硬度在290~309 HV,较基底硬度有了较大提高。涂层硬度提高是因为 γ -Co^[23]和(Cr, Ni)相的固溶强化。此外,Y元素可以使晶粒细化^[24],进一步提高涂层硬度。另外,测得的涂层厚度与上述截面分析的厚度一致。

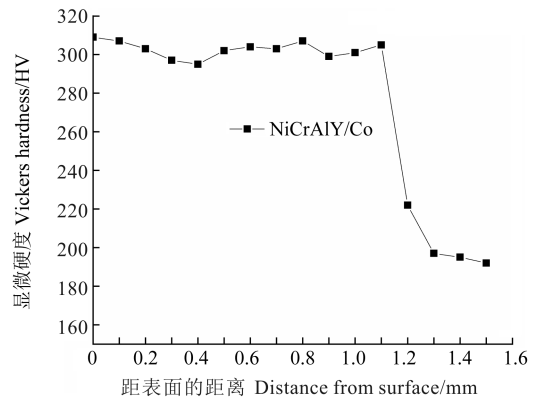


图4 涂层截面硬度分布

Fig. 4 Hardness distribution of the coating cross section

2.4 涂层的摩擦学性能

图5显示了304不锈钢与NiCrAlY/Co涂层在不同温度(室温~800 °C)下的平均摩擦因数。由图5可知,在200 °C时304不锈钢的摩擦因数达到最大值(0.78),原因是在200 °C时304不锈钢表面与氮化硅陶瓷球的黏着现象严重,滑动阻力增加^[25],致使摩擦因数升高;随着温度继续升高;304不锈钢逐渐软化,滑动阻力减小,因此摩擦因数在200~800 °C逐渐降低,并且在800 °C时达到最低(0.56)。由室温升高至600 °C, NiCrAlY/Co涂层的摩擦因数呈降低趋势,并在600 °C时为最低值(0.50),原因是随温度的升高涂层发生软化,涂层与氮化硅陶瓷球的黏着减轻,并且在600 °C时涂层产生了不连续的氧化膜,将涂层对磨球摩擦变为氧化膜对磨球摩擦,起到了很好的减摩作用,摩

擦因数降低,但在 800 °C 时摩擦因数升高,原因是摩擦过程中形成了大面积的剥坑和碎屑,导致摩擦因数上升。对比 NiCrAlY/Co 涂层与 304 不锈钢的摩擦因数可以发现,室温下,涂层摩擦因数比 304 不锈钢高,在 200~600 °C 时,涂层摩擦因数比 304 不锈钢小得多,800 °C 时摩擦因数相当。这说明 NiCrAlY/Co 涂层起到了很好的减摩效果。

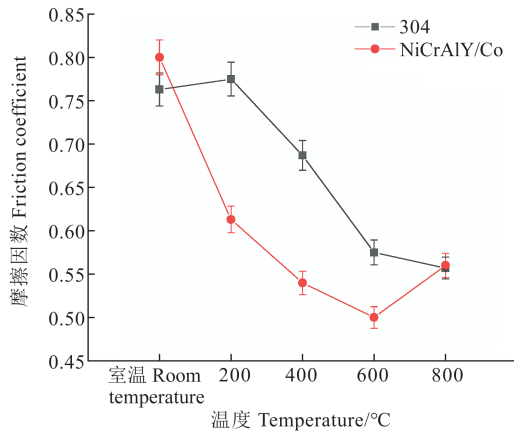


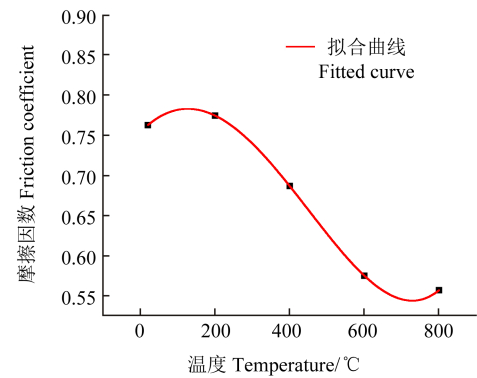
图 5 室温~800 °C 下 304 不锈钢与涂层的摩擦因数

Fig. 5 Friction coefficient of 304 stainless steel and coating from the room temperature to 800 °C

图 6 所示为 304 不锈钢与 NiCrAlY/Co 涂层摩擦因数随温度变化的拟合曲线。可以看出 304 不锈钢基底摩擦因数随温度变化的关系式为 $y = \text{Intercept} + B_1X^1 + B_2X^2 + B_3X^3 + B_4X^4$ (Intercept=0.75; $B_1=4.75 \times 10^{-5}$; $B_2=-2.04 \times 10^{-6}$; $B_3=7.23 \times 10^{-10}$; $B_4=8.68 \times 10^{-13}$); NiCrAlY/Co 涂层摩擦因数随温度变化的公式为 $y = \text{Intercept} + B_1X^1 + B_2X^2 + B_3X^3 + B_4X^4$ (Intercept=0.84; $B_1=-1.92 \times 10^{-3}$; $B_2=5.45 \times 10^{-6}$; $B_3=-8.20 \times 10^{-9}$; $B_4=4.80 \times 10^{-12}$)。

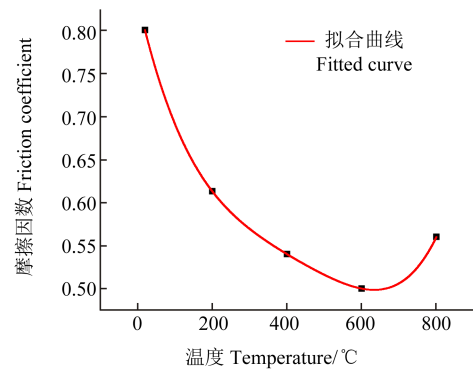
304 不锈钢与 NiCrAlY/Co 涂层的磨损率如图 7 所示。由图 7 可知,304 不锈钢磨损率在 200 °C 时略微降低,400~800 °C 时逐渐增大,原因是随着温度的升高,304 不锈钢逐渐软化,力学性能下降,抵抗氮化硅陶瓷球入侵的能力下降,导致磨损率增高。涂层磨损率在室温~400 °C 时呈降低趋势,在 400 °C 时达到最低 [$1.91 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$],是不锈钢基底的 1/3;在 600~800 °C 又呈上升趋势并在 800 °C 时达到最大值 [$1.07 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$],是 304 不锈钢基底的 2/5,在 600 °C 和 800 °C 时涂层发生氧化,但是氧化速率小于磨损的去除效率,导致涂层磨损率上升^[26],这也与高温下涂层软化有关。NiCrAlY/Co 涂层在室温~800 °C 下磨损率较 304 不锈钢基底明显降低。这表明 NiCrAlY/Co 涂层具有优异的高温摩擦学性能。在 304 不锈钢表面制备 NiCrAlY/Co 涂层,可以显著改善 304 不锈钢的高温摩擦

学性能。



(a) 304 不锈钢

(a) 304 stainless steel



(b) NiCrAlY/Co 涂层

(b) NiCrAlY/Co coating

图 6 摩擦因数随温度变化的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of the friction coefficient changing with the temperature

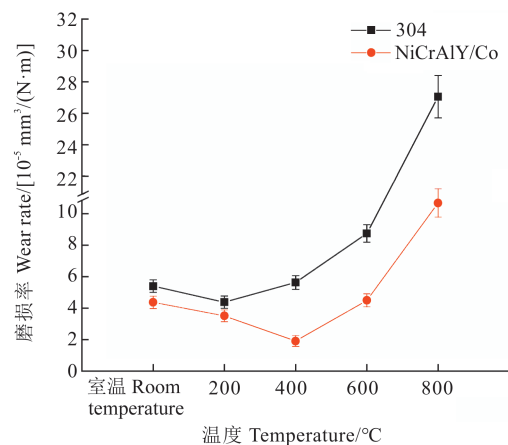
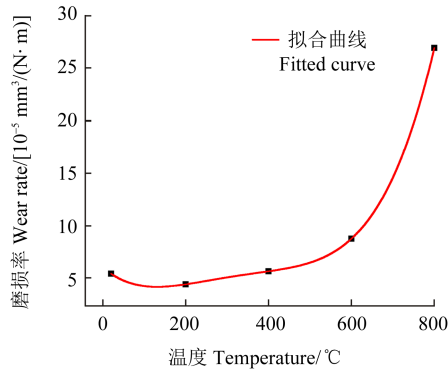


图 7 室温~800 °C 下 304 不锈钢与涂层的磨损率

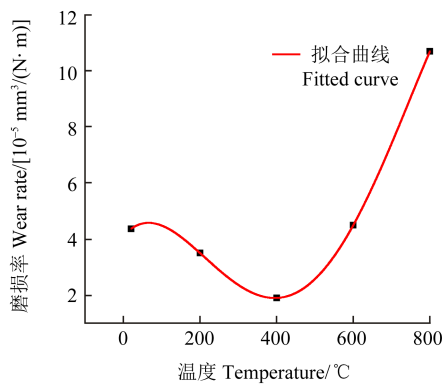
Fig. 7 Wear rate of 304 stainless steel and coating from room temperature to 800 °C

图 8 所示为 304 不锈钢与 NiCrAlY/Co 涂层磨损率随温度变化的拟合曲线。由图 8 可知,304 不锈钢基底磨损率随温度变化的关系式为 $y = \text{Intercept} + B_1X^1 + B_2X^2 + B_3X^3 + B_4X^4$ (Intercept=6.02; $B_1=3.50 \times 10^{-2}$; $B_2=2.13 \times 10^{-4}$; $B_3=-4.69 \times 10^{-7}$; $B_4=3.73 \times 10^{-10}$); NiCrAlY/Co 涂层磨损率随温度变化的关系式为 $y = \text{Intercept} + B_1X^1 + B_2X^2 +$

$B_3X^3+B_4X^4$ (Intercept=4.12; $B_1=1.50\times 10^{-2}$; $B_2=-1.43\times 10^{-4}$; $B_3=2.88\times 10^{-7}$; $B_4=-1.50\times 10^{-10}$)。



(a) 304 不锈钢
(a) 304 stainless steel



(b) NiCrAlY/Co 涂层
(b) NiCrAlY/Co coating

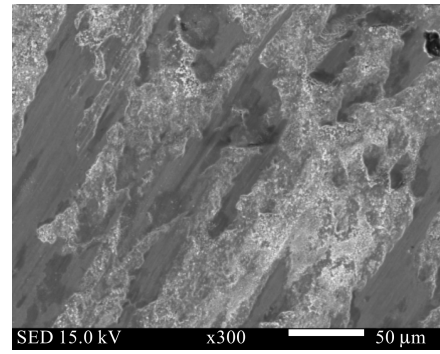
图 8 磨损率随温度变化拟合曲线图

Fig. 8 Fitting curves of the wear rate changing with the temperature

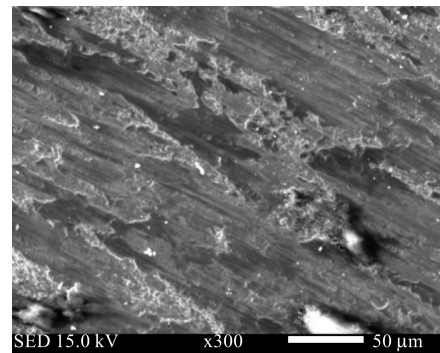
2.5 磨损机制分析

图 9 显示了室温下 304 不锈钢和 NiCrAlY/Co 涂层的磨损表面形貌。304 不锈钢磨损表面存在黏着剪切层、磨屑和犁痕,表明 304 不锈钢的磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损。在高硬度的氮化硅陶瓷球连续剪切应力作用下,犁出碎屑颗粒,这些碎屑颗粒在摩擦过程中聚集形成磨粒,磨粒切削表面形成犁痕。可以看到,涂层磨损表面存在的磨屑和黏着剪切层减少,这表明涂层磨损程度降低。这是因为涂层的硬度高,较高的硬度会在摩擦过程中抵抗 Si_3N_4 陶瓷球的侵入,防止进一步磨损。涂层的磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损。

图 10 显示了 400 °C 下 304 不锈钢和 NiCrAlY/Co 涂层磨损后的表面形貌。304 不锈钢磨损表面覆盖着大量的磨屑,剥落减少,伴随着温度的升高出现了轻微的塑性变形,磨损机制仍为磨粒磨损和黏着磨损。可以看出, NiCrAlY/Co 涂层磨损表面较 304 不锈钢磨损表面要平滑很多,磨损表面依然存在少量的分层、犁痕和剥落。涂层的磨损机制为磨粒磨损和轻微的黏着磨损,这与摩擦因数降低相对应。



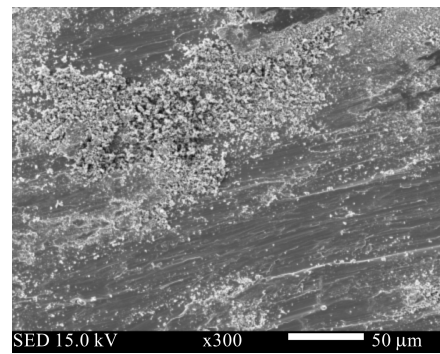
(a) 304 不锈钢基底
(a) 304 stainless steel substrate



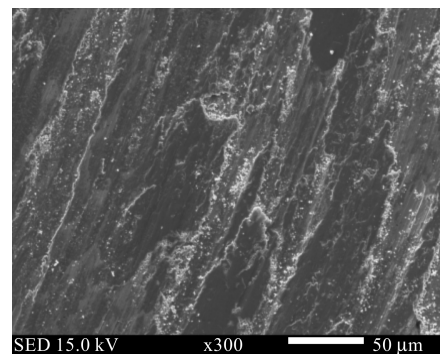
(b) NiCrAlY/Co 涂层
(b) NiCrAlY/Co coating

图 9 室温下测试样品的磨损形貌

Fig. 9 Wear morphology of the samples was tested at room temperature



(a) 304 不锈钢基底
(a) 304 stainless steel substrate

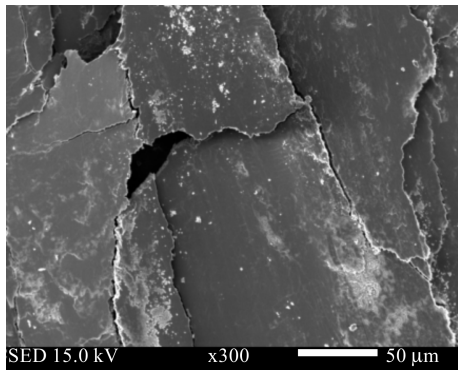


(b) NiCrAlY/Co 涂层
(b) NiCrAlY/Co coating

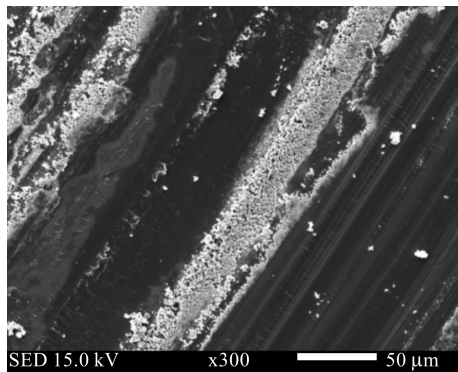
图 10 400 °C 下测试样品的磨损形貌

Fig. 10 Wear morphology of the samples at 400 °C

图 11 显示了 800 °C 下 304 不锈钢和 NiCrAlY/Co 涂层磨损后的表面形貌。304 不锈钢磨损表面氧化膜发生了大面积的断裂和脱落,塑性变形严重。这也是磨损率急剧上升的原因,表明 304 不锈钢在 800 °C 时摩擦学性能骤减,磨损机制为氧化磨损和塑性变形。NiCrAlY/Co 涂层磨损表面出现了剥坑、裂纹、明显的塑性变形和平行的犁痕。出现剥坑的原因是对磨球与涂层磨损表面的黏附力较大,在交变应力作用下,一部分氧化膜破裂,被带离磨损表面,导致剥落凹坑的形成,并且可以看到剥坑里面存在大量的磨屑,剥坑和磨屑导致磨损加剧,与图 5 中 800 °C 下 NiCrAlY/Co 涂层摩擦因数升高相对应。结合磨损表面的 EDS(图 12)和磨损表面的 XRD(图 13)可以发现,O 元素含量最高,说明磨损表面被氧化,且氧化膜由 Al₂O₃、Cr₂O₃、Co₃O₄、NiO、NiCr₂O₄ 和 CoCr₂O₄ 等氧化物组成,但是由于氧化速率小于磨损去除速率,导致氧化膜不连续,这也与上述磨损率上升相对应,涂层的磨损机制为氧化磨损。



(a) 304 不锈钢基底
(a) 304 stainless steel substrate



(b) NiCrAlY/Co 涂层
(b) NiCrAlY/Co coating

图 11 800 °C 下测试样品的磨损形貌
Fig. 11 Wear morphology of the sample at 800 °C

3 结论

通过以上分析,得出以下主要结论:

1) 采用激光熔覆技术在 304 不锈钢表面制备了

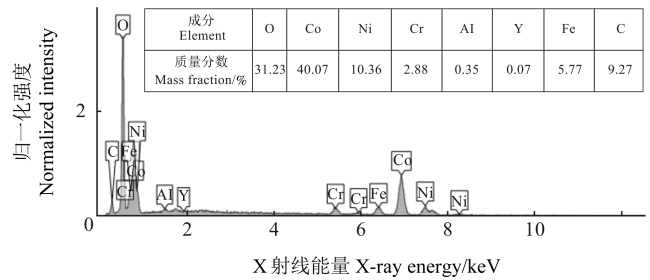


图 12 NiCrAlY/Co 涂层 800 °C 下磨损表面能谱分析结果
Fig. 12 EDS analysis results of NiCrAlY/Co coating wear surface at 800 °C

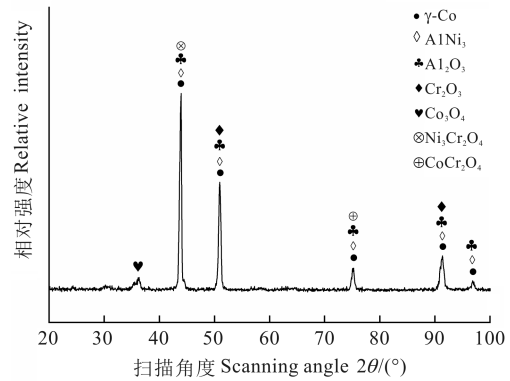


图 13 800 °C 时涂层磨损表面 XRD 图谱

Fig. 13 XRD pattern of the coating wear surface at 800 °C

高温抗磨 NiCrAlY/Co 涂层,涂层厚度大约为 1.1 mm,由 γ-Co、(Cr, Ni) 和 AlNi₃ 相组成,涂层硬度为 303 HV,约为基底的 1.6 倍,涂层形貌良好,与基底呈良好的冶金结合。

2) 随温度升高,304 不锈钢基底摩擦因数先升高后降低,涂层摩擦因数先降低后升高;在 200~600 °C 时涂层摩擦因数更小,800 °C 时摩擦因数相当,并且涂层在 600 °C 时摩擦因数最低(0.5);随温度升高,304 不锈钢基底与涂层磨损率先降低后升高,且室温~800 °C 时涂层的磨损率更低,且涂层在 400 °C 时磨损率最低 [1.91×10⁻⁵ mm³/(N·m)],约为基底的 1/3,表明 NiCrAlY/Co 涂层显著改善了 304 不锈钢在室温~800 °C 下的摩擦学性能。

3) 室温~400 °C,304 不锈钢的磨损机制是磨粒磨损和黏着磨损,涂层的磨损机制是磨粒磨损和逐渐减轻的黏着磨损;高温下,304 不锈钢的磨损机制为氧化磨损和塑性变形,涂层的磨损机制为氧化磨损。

参考文献 (References)

[1] LI B, GAO Y M, HAN M M, et al. Microstructure and tribological properties of NiCrAlY-Mo-Ag composite by vacuum hot-press sintering[J]. Vacuum, 2017, 143: 1-6.
[2] XIN B B, YU Y J, ZHOU J S, et al. Effect of copper molybdate on the lubricating properties of NiCrAlY laser clad coating at elevated temperatures [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 313:

- 328-336.
- [3] BOLELLI G, CANDELI A, LUSVARGHI L, et al. Tribology of NiCrAlY+Al₂O₃ composite coatings by plasma spraying with hybrid feeding of dry powder+suspension [J]. *Wear*, 2015, 344: 69-85.
- [4] HE B M, LIU X B, ZHANG F Z, et al. Tribological and oxidation behaviors of TiN reinforced Co matrix composite coatings on Inconel718 alloy by laser cladding [J]. *Tribology International*, 2023, 188: 108781.
- [5] 张松, 王明生, 张开祥, 等. SCH13 钢表面激光熔覆 CoNiCrAlY 合金[J]. *焊接学报*, 2010, 31(5): 49-52.
ZHANG Song, WANG Mingsheng, ZHANG Kaixiang, et al. CoNiCrAlY alloy deposited on surface of SCH13 steel by laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(5): 49-52. (In Chinese)
- [6] 李育, 贺利乐, 叶芳霞. 激光合金化对 304 不锈钢表面磨损性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(8): 128-134.
LI Yu, HE Lile, YE Fangxia. Effect of laser alloying on surface wear performance of 304 stainless steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(8): 128-134. (In Chinese)
- [7] 韩文鹏, 崔功军, 崔昊天, 等. 采煤机滑靴激光熔覆铁镍基涂层的抗磨性能[J]. *润滑与密封*, 2022, 47(11): 82-88.
HAN Wenpeng, CUI Gongjun, CUI Haotian, et al. Wear resistance of laser clad FeNi-based coatings on sliding shoes of shearers [J]. *Lubrication Engineering*, 2022, 47(11): 82-88. (In Chinese)
- [8] CHEN G D, LIU X B, ZHANG F Z, et al. Fabrication and tribological properties of laser cladding WC-Cu/Co-based composite coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 472: 129930.
- [9] 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.
- [10] 李安玲, 屈文红, 宋磊, 等. 304 奥氏体不锈钢摩擦学实验研究 [J]. *机床与液压*, 2020, 48(16): 10-14.
LI Anling, QU Wenhong, SONG Lei, et al. Experimental study on tribological properties of 304 austenitic stainless steel [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(16): 10-14. (In Chinese)
- [11] OUYANG C S, LIUX B, LUO Y S, et al. Preparation and high temperature tribological properties of laser in-situ synthesized self-lubricating composite coating on 304 stainless steel [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 7034-7046.
- [12] LIU Y F, ZHUANG S G, LIU X B, et al. Microstructure evolution and high-temperature tribological behavior of Ti₃SiC₂ reinforced Ni₆₀ composite coatings on 304 stainless steel by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 420: 127335.
- [13] 刘成松, 秦林, 李翠玲, 等. 304 不锈钢表面 Mo 合金化改性层组织结构及耐磨性研究 [J]. *表面技术*, 2014, 43(5): 100-104.
LIU Chengsong, QIN Lin, LI Cuiling, et al. Study on microstructure and wear resistance of Mo surface alloying layer on 304 stainless steel [J]. *Surface Technology*, 2014, 43(5): 100-104. (In Chinese)
- [14] LI Y, LIAN Y, JING F Y, et al. Improvement in the tribological behaviour of surface-nanocrystallised 304 stainless steel through supersonic fine particle bombardment [J]. *Applied Surface Science*, 2023, 627: 157334.
- [15] 王滨盐. 表面改性技术的应用及发展动向 [J]. *国外机车车辆工艺*, 2021(1): 1-5.
WANG Binyan. Application and development trend of surface modification technology [J]. *Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology*, 2021(1): 1-5. (In Chinese)
- [16] REN X Y, ZOU H B, DIAO Q W, et al. Surface modification technologies for enhancing the tribological properties of cemented carbides: a review [J]. *Tribology International*, 2023, 180: 108257.
- [17] CHANG W, XIAO G C, ZHANG H, et al. Microstructure and properties of graphene reinforced co-based composite coating by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 453: 129139.
- [18] 叶宏, 喻文新, 雷临萍, 等. H13 钢激光熔覆 Co 基涂层工艺优化及组织性能 [J]. *金属热处理*, 2016, 41(12): 117-121.
YE Hong, YU Wenxin, LEI Linping, et al. Process optimization of Co-based coating on H13 steel by laser cladding and its microstructure and properties [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(12): 117-121. (In Chinese)
- [19] 崔岗, 韩彬, 张蒙科. 不锈钢表面激光熔覆 Co 基金属涂层工艺研究 [J]. *应用激光*, 2015, 35(4): 397-401.
CUI Gang, HAN Bin, ZHANG Mengke. Study on the process of laser cladding Co-based alloy coating prepared on the surface of stainless steel [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(4): 397-401. (In Chinese)
- [20] 王晓博, 崔功军, 李方舟, 等. 海水环境下 CoCrFeW 合金的摩擦学性能研究 [J]. *机械强度*, 2023, 45(5): 1096-1102.
WANG Xiaobo, CUI Gongjun, LI Fangzhou, et al. Tribological properties of CoCrFeW alloy under seawater condition [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45(5): 1096-1102. (In Chinese)
- [21] 王港, 刘秀波, 刘一帆, 等. 304 不锈钢激光熔覆 Co-Ti₃SiC₂ 自润滑复合涂层微观组织与摩擦学性能 [J]. *材料工程*, 2021, 49(11): 105-115.
WANG Gang, LIU Xiubo, LIU Yifan, et al. Microstructure and tribological properties of Co-Ti₃SiC₂ self-lubricating composite coatings on 304 stainless steel by laser cladding [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(11): 105-115. (In Chinese)
- [22] JIANG C P, ZHANG J, CHEN Y N, et al. On enhancing wear resistance of titanium alloys by laser clad WC-Co composite coatings [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, 107: 105902.
- [23] 易伟, 陈辉, 吴影, 等. 原位 NbC 对激光熔覆 Co 基涂层组织和磨损性能的影响 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0302010.
YI Wei, CHEN Hui, WU Ying, et al. Effect of in situ NbC on microstructure and wear properties of laser cladding Co-based

- coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302010. (In Chinese)
- [24] 梁泽芬, 纳仁花, 林小军, 等. 激光熔覆 Co 基合金/MoSi₂ 复合涂层工艺参数的优化[J]. 材料保护, 2016, 49(10): 72-73.
- LIANG Zefen, NA Renhua, LIN Xiaojun, et al. Optimization of technological parameters of laser cladding Co-based alloy/MoSi₂ composite coatings[J]. Materials Protection, 2016, 49(10): 72-73. (In Chinese)
- [25] 王长亮, 崔永静, 汤智慧, 等. 超级爆炸喷涂镍基钴基涂层高温氧化及摩擦磨损性能[J]. 装备环境工程, 2020, 17(1): 90-96.
- WANG Changliang, CUI Yongjing, TANG Zhihui, et al. High temperature oxidation and friction behavior of nickel based and cobalt based coating deposited by super detonation spray [J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(1): 90-96. (In Chinese)
- [26] CUI G J, YOU S Q, LI F Z, et al. High-temperature wear and friction behavior of Co matrix composites reinforced by MoSi₂ over a wide temperature range [J]. Tribology International, 2023, 189: 108920.

Research on friction and wear properties of high temperature anti-wear NiCrAlY/Co coating

YANG Rongqian^{1,2,3} CUI Gongjun^{1,2,3} YOU Shiquan^{1,2,3} FENG Xiaogang^{1,2,3} LIU Yusong^{1,2,3}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Shanxi Mine Fluid Control Engineering Laboratory, Taiyuan 030024, China)

(3. National-Local Joint Engineering Laboratory of Mine Fluid Control, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to improve the high temperature wear resistance and extend its service life of 304 stainless steel, the high temperature wear-resistant NiCrAlY/Co coating was prepared on the surface of 304 stainless steel by the laser cladding. The morphology, phase composition and microhardness of the coating were analyzed. The tribological properties of 304 stainless steel and NiCrAlY/Co coating at different temperatures (the room temperature to 800 °C) were studied, and the wear mechanism was analyzed. The results show that the coating is metallurgically bonded to the 304 stainless steel substrate; the coating is mainly composed of γ -Co, (Cr, Ni) and AlNi₃ phases; the average microhardness of the coating (303 HV) is about 1.6 times that of the substrate (194 HV); Compared with the substrate, the coating has a smaller friction coefficient at 200-600 °C, the friction coefficient is comparable at 800 °C, and the lowest friction coefficient of the coating is 0.5 at 600 °C. The wear rate of the coating from the room temperature to 800 °C is lower than that of the substrate, and the lowest wear rate is $1.91 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ at 400 °C, which is about 1/3 of the substrate, indicating that the NiCrAlY/Co coating improves the high temperature wear resistance of 304 stainless steel. At medium and low temperatures, the wear mechanism of the substrate is mainly abrasive wear and adhesive wear, and the wear mechanism of the NiCrAlY/Co coating is mainly abrasive wear and gradually slight adhesive wear. At 800 °C, the wear mechanism of the substrate is plastic deformation, and the wear mechanism of the coating is oxidation wear.

Key words: 304 stainless steel; Laser cladding; NiCrAlY/Co coating; High temperature tribological properties

Corresponding author: CUI Gongjun, E-mail: cuigongjun@tyut.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (51775365, U1910212); Fundamental Research Program of Shanxi Province (202303021211163); Research Project of Shanxi Scholarship Council of China (2021-060)

Received: 2023-12-05