



表面技术

Surface Technology

ISSN 1001-3660, CN 50-1083/TG

《表面技术》网络首发论文

题目：不同载荷对 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层摩擦学性能的影响
作者：周永宽，康嘉杰，岳文，付志强，朱丽娜，张晓惠
网络首发日期：2022-03-11
引用格式：周永宽，康嘉杰，岳文，付志强，朱丽娜，张晓惠. 不同载荷对 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层摩擦学性能的影响[J/OL]. 表面技术. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20220310.1657.004.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

不同载荷对 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层摩擦学性能的影响

周永宽¹, 康嘉杰^{1,2,3*}, 岳文^{1,3}, 付志强^{1,3}, 朱丽娜^{1,3}, 张晓惠⁴

1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083

2. 浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江嘉兴 314000

3. 中国地质大学(北京)郑州研究院, 河南郑州 451283

4. 杭州电子科技大学人文艺术与数字媒体学院, 浙江杭州 310018

摘要: 目的 为提高深地钻探钻具关键零部件的抗磨性能。方法 采用超音速火焰喷涂技术(HVOF)制备了 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层。采用 X 射线衍射仪对高熵合金粉末和涂层的相组成进行研究, 采用扫描电子显微镜对高熵合金粉末及涂层的微观结构进行分析, 使用维氏显微硬度计测得涂层的显微硬度, 采用摩擦磨损试验机对涂层在不同载荷下的磨损行为进行研究。采用 SEM 和 EDS 对磨痕表面进行分析, 采用 XPS 技术分析了磨痕元素成分, 利用三维白光干涉形貌仪测量涂层磨损体积和表面粗糙度。结果 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层结构致密, 相结构为 BCC 相, 显微硬度达 (536±34) HV_{0.2}, 约为 35CrMo 钢基体的两倍 (278±20) HV_{0.2}; 随着载荷的增加, 涂层的摩擦系数减小、磨损率增大; 将涂层与基体的磨损率相对比, 相同载荷下 (6N) 涂层的磨损率约为基体的 41%; HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的磨损失效机制如下: 低载荷下 (2N) 主要为氧化磨损伴随着轻微的磨粒磨损。高载荷下 (4N、6N) 受到反复剪切应力出现疲劳磨损。结论 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层具有良好的抗磨性能, 可以有效减轻磨损, 有望应用于深地钻探钻具关键零部件的表面防护。

关键词: HVOF; AlCoCrFeNi; 高熵合金涂层; 抗磨性能

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A

Effect of loads on tribological properties of HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating

ZHOU Yongkuan¹, KANG Jiajie^{1,2,3*}, YUE Wen^{1,3}, FU Zhiqiang^{1,3}, ZHU Lina^{1,3}, ZHANG Xiaohui⁴

1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2. Institute of Flexible Electronics Technology of Tsinghua. Zhejiang, Jiaxing, 314000, China

3. Zhengzhou Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou 451283, China

4. School of Media and Design, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

ABSTRACT: The exploration and development of deep and ultra-deep oil and gas resources is an important part of the future energy strategy, and the drilling equipment will be inevitably worn during operation. Using advanced surface engineering technology to strengthen the surface of key vulnerable parts of deep drilling tools can effectively improve drilling efficiency, prolong service life and ensure the operation safety of drilling equipment. At present, there are many studies on the wear properties of the AlCoCrFeNi bulk high entropy alloy, but there are relatively few studies on the wear properties of the AlCoCrFeNi high entropy alloy coating prepared by thermal spraying technology under different loads, especially in the application of key parts of deep drilling tools. In this paper, the AlCrFeCoNi high entropy alloy coating were prepared on 35CrMo steel by High Velocity Oxygen Fuel (HVOF), and then the phase composition of HVOF sprayed AlCrFeCoNi high entropy alloy powder and coating was studied by X-ray diffractometer (XRD). The particle size of the AlCrFeCoNi high entropy alloy powder was measured by a

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52175196); 装备发展部重点项目 (61409230614); 中央高校基本科研业务费项目 (265QZ2021008)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52175196), the Pre-Research Program in National 14th Five-Year Plan (Grant No. 61409230614), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No.265QZ2021008)

作者简介: 周永宽 (1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为热喷涂涂层磨损机制的研究。

Biography: ZHOU Yongkuan (1993—), Male, Doctor, Research focus: Wear mechanism of thermal spray coating.

通信作者: 康嘉杰 (1984—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为表面工程和机械摩擦学。

Corresponding author: KANG Jiajie (1984—), Male, Doctor, Professor, Doctoral tutor, Research focus: Surface engineering and mechanical tribology.

laser particle size analyzer. The microstructure of the powder and coating was analyzed by scanning electron microscope (SEM) and the microhardness of the coating was measured by a Vickers microhardness tester. The wear behavior of HVOF sprayed AlCrFeCoNi high entropy alloy coating under different loads was studied by a friction and wear tester. The worn surface of AlCrFeCoNi high entropy alloy coating was analyzed by SEM and EDS. The elemental composition of the worn surface was analyzed by XPS and the wear volume and surface roughness (Ra) were measured by a three-dimensional white light interference. The results show that HVOF sprayed AlCrFeCoNi high entropy alloy powder is mainly spherical and has good fluidity. The particle size distribution of the powder is 20-60 μm . The HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating is well bonded with the substrate, showing a typical mechanical bonding, and the coating thickness is about 330 μm . The microstructure of the coating is compact and the phase structure is BCC phase. The average microhardness of the coating (536 ± 34) $\text{HV}_{0.2}$ is about twice that of the 35CrMo steel substrate (278 ± 20) $\text{HV}_{0.2}$. With the increase of load, the friction coefficient decreases and the wear rate increases; Comparing the wear rate of the coating with that of the substrate, the wear rate of the coating is about 41% of the substrate under the same load (6N). The wear failure mechanism of HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating is as follows: under low load (2N), it is mainly oxidative wear accompanied by slight abrasive wear. Besides, under high loads (4N, 6N), fatigue wear occurs when HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating subjected to repeated shear stress. The wear surface of the coating is composed of various oxides, which can effectively reduce the wear. In summary, HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating has good wear resistance and can effectively provide protection for 35CrMo steel substrate, which is expected to be applied to key parts of drilling tools in deep drilling.

Key words: HVOF; AlCoCrFeNi; High entropy alloy coating; Wear resistance

深部、超深部油气资源勘探开发是未来能源战略的重要组成部分，而钻探装备在运行过程中不可避免地承受各种各样的磨损，比如钻杆接头与套管的磨损^[1]、钻柱与井壁的摩擦^[2]、岩屑对涡轮钻具的磨损^[3]等，导致钻进效率下降甚至威胁作业安全。因此需要开发高可靠性的抗磨材料来提高深地钻探钻具关键易损零部件的抗磨性能，采用先进的表面工程技术对深地钻探钻具关键易损零部件表面进行强化，可以有效减轻磨损失效、提高钻进效率、延长服役寿命和保障钻探装备的作业安全^[4-6]。

高熵合金 (High Entropy Alloys, 简称 HEAs) 作为一种新型的固溶体合金，自提出以来就受到人们的广泛关注^[7]。它具有高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应和“鸡尾酒”效应，由于这四大效应使得高熵合金具有较高的强度和硬度，具有作为抗磨材料的潜在价值^[8,9]。Co、Cr、Fe、Ni 等元素原子半径相近，分别为 1.26、1.27、1.27 和 1.24 \AA 、易形成 FCC 结构，是高熵合金中较为常见的组合以及“基合金”，而 Al 元素具有较大的原子半径 (1.43 \AA)，而原子半径相差越大，晶格畸变程度越大，固溶强化作用越大，因此 AlCoCrFeNi 高熵合金具有较高的硬度、强韧性和抗磨损性能^[10,11]。

目前已有不少关于 AlCoCrFeNi 高熵合金摩擦磨损性能的研究，张爱军等^[12]研究了 AlCoCrFeNi 高熵合金在不同温度下的摩擦磨损性能，发现合金在 25 和 200 $^{\circ}\text{C}$ 时磨损机制主要为磨粒磨损，400、600 和 800 $^{\circ}\text{C}$ 时为磨粒磨损、粘着磨损和塑性变形。JOSEPH 等^[13]对 Al_xCoCrFeNi 高熵合金在不同温度进行销盘式摩擦磨损，AlCoCrFeNi 的磨损性能随着温度的升高而显著增强，磨损机制从室温下的磨粒磨损转为 600 $^{\circ}\text{C}$ 以上的氧化磨损和分层磨损。但使用热喷涂技术制备高熵合金涂层及其磨损性能的研究相对较少^[14,15]。超音速火焰喷涂(High Velocity Oxygen Fuel, 简称 HVOF)是一种重要的热喷涂工艺，且制备的涂层相较等离子喷涂技术结构更加致密、氧化物较少、结合强度高^[4,16,17]。LOBEL 等^[18]对 HVOF 制备的 AlCoCrFeNiTi 高熵合金涂层的抗磨性能进行研究，在热喷涂过程中，晶格参数发生了轻微的变化。与镀铬样品相比，抗磨性得到了提高。SRIVASTAVA 等^[19]制备的超音速火焰喷涂 FeCoCrNi₂Al 高熵合金涂层的显微硬度为 (600 ± 30) $\text{HV}_{0.2}$ 。CHEN 等^[20]研究了超音速火焰喷涂 Al_{0.6}TiCrFeCoNi 高熵合金涂层在不同温度下的磨损行为，发现涂层在不同温度下的磨损机制主要是磨粒磨损，疲劳磨损程度随实验温度的升高而增大。此外在试验温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ 时，摩擦反应热起重要作用，导致涂层在该温度下的摩擦系数最低。

目前对 AlCoCrFeNi 块体高熵合金的磨损性能研究很多，但对使用热喷涂技术制备的 AlCoCrFeNi 高熵

合金涂层在不同载荷下的磨损性能的研究还相对较少，尤其在深地钻探钻具关键零部件上的应用更是鲜有研究。因此本文采用超音速火焰喷涂技术（HVOF）制备了 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层。研究了涂层的微观形貌及相组成，测试了涂层的显微硬度，采用摩擦磨损试验机对涂层在不同载荷下的磨损行为进行了研究，探讨 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的滑动磨损行为及失效机理。

1 实验材料和方法

采用真空熔炼和高压气雾法制备了 AlCoCrFeNi(各元素原子比为 1:1:1:1:1)高熵合金粉末材料，原料中含纯 Al(≥ 99 wt%)、Co(≥ 99 wt%)、Cr(≥ 99 wt%)、Fe(≥ 99 wt%)和 Ni(≥ 99 wt%)。35CrMo 作为常见的钻杆材料，采用其作为基体，在喷涂前，先对基体进行喷砂，然后用丙酮超声清洗。采用 GTV MF-P-HVOF-FP-K 2000 HVOF 系统喷涂 AlCoCrFeNi，HVOF 喷涂工艺参数如表 1 所示。

表 1 HVOF 喷涂工艺参数

Table 1 HVOF spraying process parameters

Process parameters	Hydrogen flow rate	Oxygen flow rate	Nitrogen flow rate	Spray distance	Powder feed rate
Values	580 slpm	190 slpm	20 slpm	230 mm	40 g/min

采用激光粒度分析仪（MALVERN, Mastersizer 2000, England）对高熵合金粉末进行粒径测试，采用 X 射线衍射仪(XRD, D8 Advance, Bruker, Germany)对高熵合金粉末和涂层的相组成进行研究，衍射角度 2θ 设置在 $20^\circ\sim 90^\circ$ 范围内，扫描速度 $4^\circ/\text{min}$ 。高熵合金粉末及涂层的微观结构及成分通过配备 X 射线能谱仪（EDS）的扫描电子显微镜（MERLIN Compact, ZEISS, Germany）分析，涂层的孔隙率通过灰度法测得。使用维氏显微硬度计（MICROMET-6030, Buehler, America）在抛光样品的横截面测量涂层的显微硬度，载荷 1.96 N，保载时间 15s。

采用摩擦磨损试验机(UMT-TriboLab, Bruker, Germany)对 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层进行滑动磨损试验。采用直径 6 mm 的 Si_3N_4 球作为对磨球，磨痕长度 5 mm，滑动频率 4 Hz，磨损时间 60 min，法向载荷分别为 2N、4N 和 6N。在测试之前，对涂层进行研磨抛光，采用 SEM 和 EDS 对磨痕表面进行分析。利用三维白光干涉形貌仪（NeXView, ZYGO, America）测量涂层磨损体积和表面粗糙度（ R_a ）。

采用公式（1）计算涂层的磨损率^[21]：

$$Q = \frac{V_w}{NS} \quad (1)$$

式中 Q 为磨损率($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)， V_w 为磨损体积(mm^3)， N 为施加载荷(N)， S 为总滑动距离(m)。

2 结果与讨论

2.1 相组成、显微形貌和力学性能

图 1 为 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金粉末和涂层的 XRD 图谱。粉末和涂层均表现出 BCC 相^[13,20]，表明 AlCoCrFeNi 高熵合金在 HVOF 喷涂过程中具有较高的相稳定性。值得注意的是，HVOF 涂层的峰值比粉末的峰值更宽，这主要归因于热喷涂过程的极高的粒子冷却速率，在喷涂过程中，将细小颗粒加热到高温，然后以 $10^6\sim 10^7\text{K/s}$ 的速率冷却，使涂层中出现细小晶粒^[22]。

图 2 (a) 为 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金粉末的宏观形貌，粉末颗粒主要呈球形，具有良好的流动性，利于喷涂过程中粉末铺展。某些颗粒外部附着有小卫星。卫星球的存在是由于雾化过程中存在气流涡旋以及不同尺寸的颗粒具有不同的冷凝速率和飞行速度导致的^[23,24]。从粉末放大图可以看到颗粒表面形成的树枝晶，熔滴冷却时最初在熔滴表面形核，然后沿着生长方向成为树枝状。树枝晶的形成可能会引起元素的偏析^[25]。粉末的粒径分布如图 2 (b) 所示， $20\sim 60\ \mu\text{m}$ 的粒径有利于 HVOF 喷涂过程中粉末的熔化和形成致密的涂层。图 2 (c) 和 (d) 分别为 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层截面的宏观及微观形貌，可以发现涂层与基体结合良好，呈典型的机械结合，涂层厚度约为 $330\ \mu\text{m}$ ，并且涂层内部结构致密紧凑，无明显孔洞和成分偏析，通过灰度法测得涂层的孔隙率约为 2.1%，喷涂涂层表面的粗糙度值（ R_a ）约为 $8.5\ \mu\text{m}$ 。

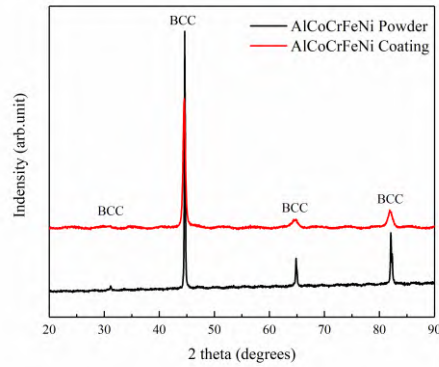


图 1 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金粉末和涂层的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy powder and coating

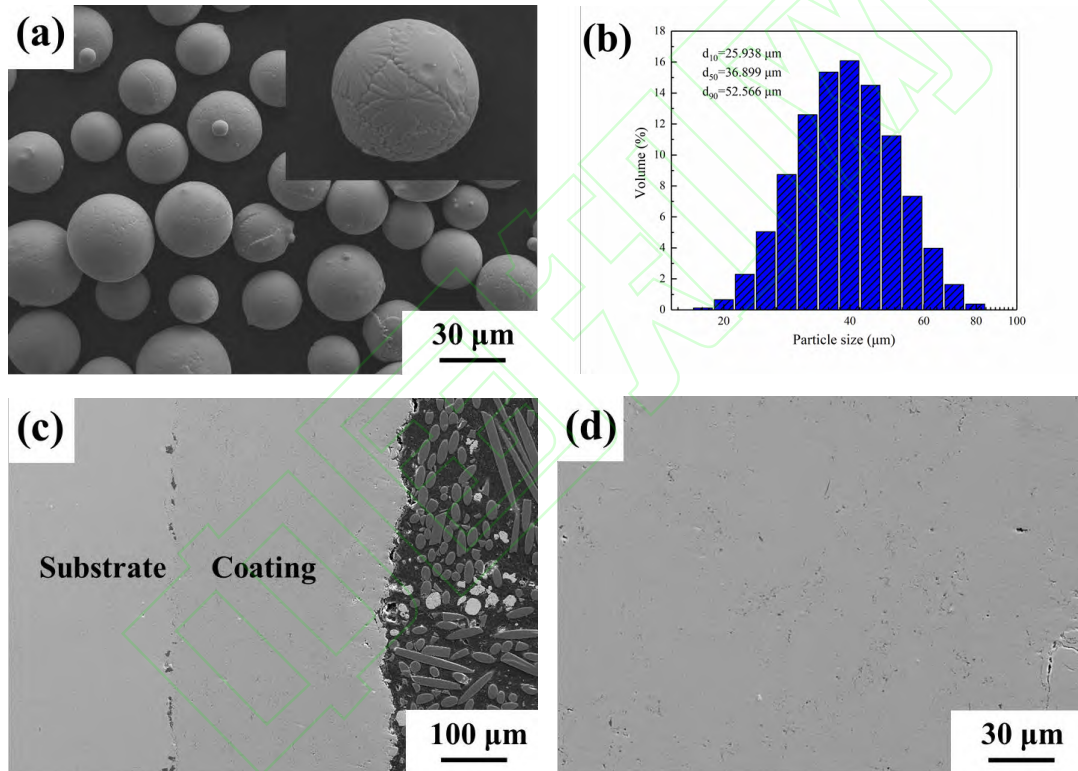


图 2 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金粉末和涂层的显微形貌: (a) 粉末整体形貌及微观形貌; (b) 粉末粒径分布; (c) 涂层截面整体形貌; (d) 涂层截面微观形貌

Fig. 2 SEM of HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy powder and coating. (a) Overall morphology and microstructure of powder; (b) Particle size distribution of powder; (c) Overall morphology of cross section; (d) Microstructure of cross section

图 3 为 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层随深度分布的显微硬度, 随着与涂层和基体界面距离的增大, 显微硬度逐渐增大并逐渐稳定。这是由于距离界面越远, HVOF 过程中受基体硬度的影响就越轻微, 到一定距离后 (150 μm) 显微硬度值基本稳定, 将稳定的显微硬度值取平均数作为涂层的平均显微硬度, 则涂层平均显微硬度(536 ± 34) $\text{HV}_{0.2}$ 约为 35CrMo 钢基体(278 ± 20) $\text{HV}_{0.2}$ 的两倍。材料的抗磨性往往与其显微硬度成正比^[26,27]。

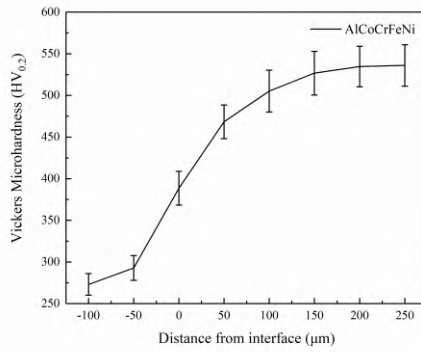


图 3 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层随深度分布的显微硬度

Fig. 3 Microhardness of HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating with depth

2.2 磨损行为及机理分析

为了研究载荷对 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层磨损性能的影响，分别在 2N、4N 和 6N 载荷下进行了磨损试验。图 4 (a) 显示了涂层在不同载荷下的摩擦系数与滑动时间的关系。整个摩擦系数随时间变化曲线可分为初始阶段和稳定阶段。在初始阶段，光滑的涂层表面受摩擦作用被破坏，同时开始产生磨屑，使得涂层粗糙度急剧增大，因此摩擦系数增大。随着磨损时间的延长，涂层与对磨副的接触面逐渐平整化，摩擦系数趋于稳定，磨损进入稳态阶段。从图 4 可以看出，涂层在大约 1200s 后进入稳定状态，而基体在 100s 后即进入稳定状态。取磨损进入稳定磨损阶段以后的摩擦系数平均值为平均摩擦系数，载荷为 2、4、6N 的平均摩擦系数分别为 0.85、0.79 和 0.74。随着载荷的增大，涂层的平均摩擦系数降低，这是由于随着载荷的增大，涂层与对磨副的接触界面产生大量摩擦热，导致表面发生软化，而且生成的磨损产物可以起到减摩的作用^[5]，故摩擦系数随载荷增大而降低。此外，对 35CrMo 钢基体也进行了载荷为 6N 的摩擦磨损实验，基体的平均摩擦系数 (0.91) 高于涂层的平均摩擦系数。从图 4 (b) 可以发现，随着载荷的增大，HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层磨损率逐渐增大，这与其磨损机理有关^[28]。将涂层与基体的磨损率相对比，相同载荷下涂层的磨损率约为基体的 41%。

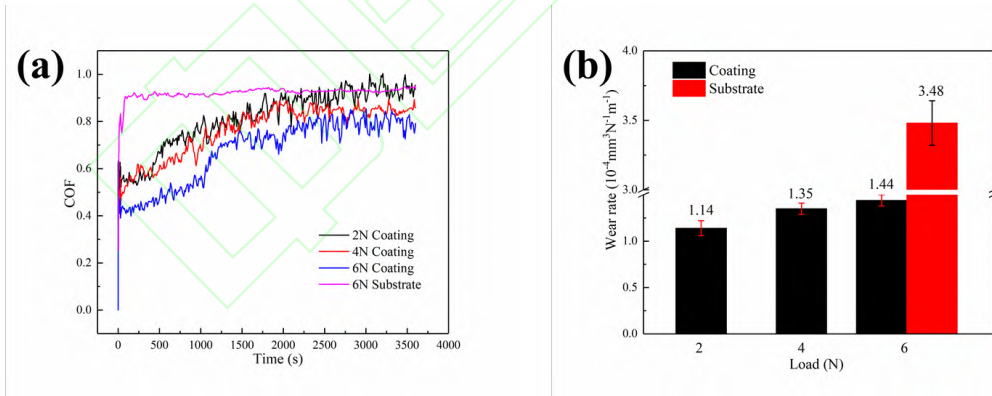


图 4 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层在不同载荷的 (a) 摩擦系数; (b) 磨损率

Fig. 4 HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating under different loads. (a) Friction coefficient; (b) Wear rate

表 2 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的平均摩擦系数

Table 2 Average friction coefficient of HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating

Load (N)	2	4	6
Average COF	0.85±0.05	0.79±0.04	0.74±0.04

图 5 为不同载荷下 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的磨痕表面形貌。随着载荷的增大，涂层接触应力增大，磨损更加严重，因此磨痕宽度增大。涂层在 2N 时磨痕较窄且较浅，涂层发生一定的塑性变

形，磨痕表面以氧化为主并伴有轻微犁沟。在磨损过程中由于 Si_3N_4 对磨副硬度较高^[21]，首先对涂层产生研磨作用产生犁沟，此外在磨损过程中，由于磨损热效应涂层发生氧化现象^[13]；载荷为 4N 时，受到较大的接触应力，涂层在往复摩擦磨损过程中发生局部分层现象；载荷为 6N 时，由于循环载荷的作用，分层部分受反复剪切应力而发生剥落，这种失效可归因于疲劳磨损。随着载荷的增大，涂层磨损失效形式发生变化，磨损加剧，因此磨损率增大。对图 5 中标记点处打 EDS，元素含量见表 3。可以发现涂层在氧化、分层及剥落区域氧含量显著增加，证明该区域生成氧化产物^[20]。在犁沟区域的氧含量较低，氧化现象不明显。因此涂层的磨损失效机制为：低载荷下（2N）主要为氧化磨损伴随着轻微的磨粒磨损。高载荷下（4N、6N）出现疲劳磨损。

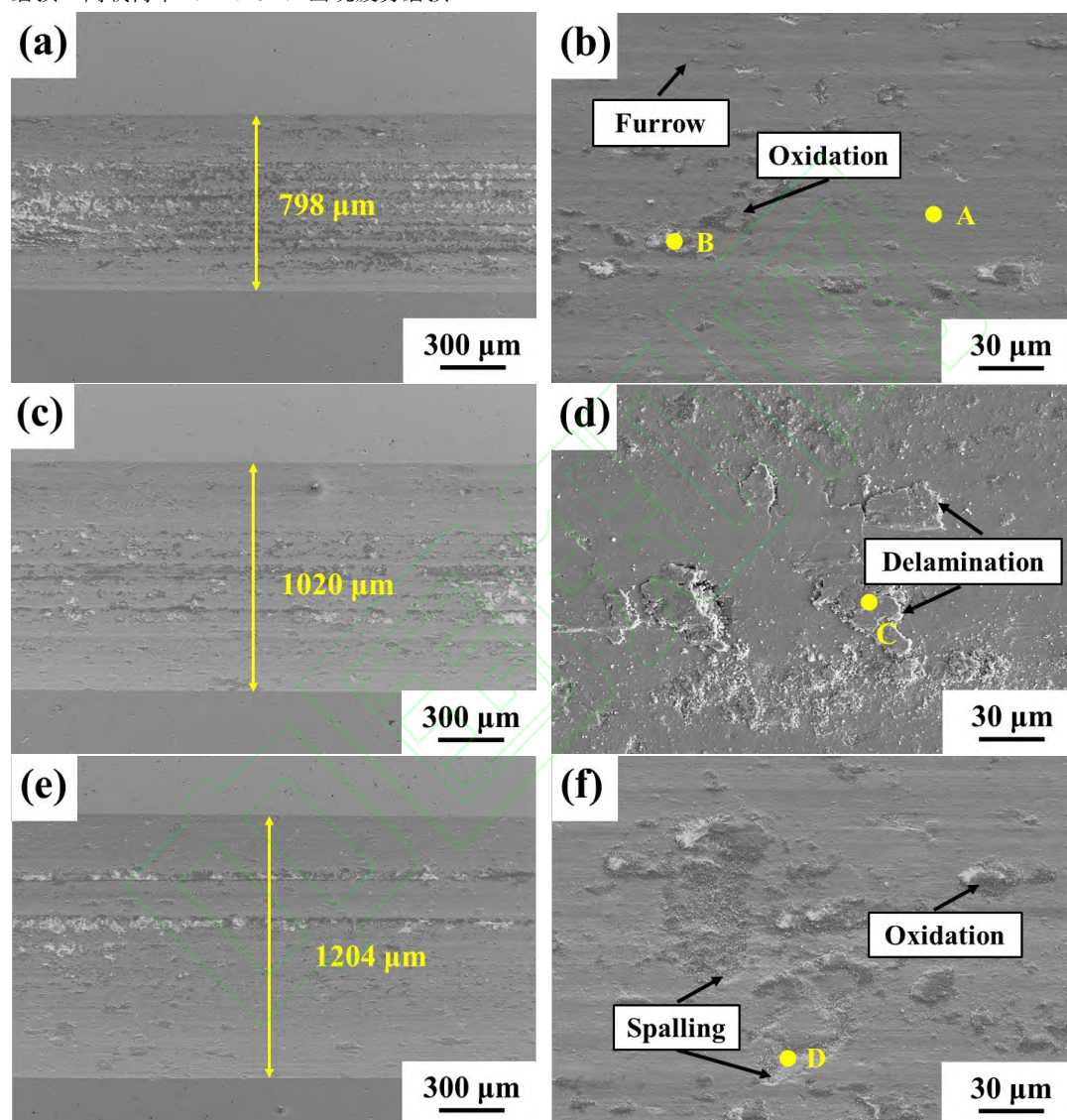


图 5 不同载荷下 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层表面的磨损形貌：(a-b) 2N；(c-d) 4N；(e-f) 6N

Fig. 5 Wear morphologies of HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating surface under different loads. (a-b) 2N; (c-d) 4N; (e-f) 6N

表 3 图 5 中标记点处的元素含量（原子百分比）

Table 3 Element content (atomic percentage) at marked points in Fig. 5

Element	Al	Co	Cr	Fe	Ni	O
Furrows(A)	18.17	20.19	18.65	21.23	20.42	1.34

Oxidation(B)	10.21	10.26	11.15	10.34	11.01	47.03
Delamination(C)	13.08	13.02	12.37	12.64	12.31	36.58
Spalling(D)	12.32	12.38	12.18	12.11	11.07	39.94

为了进一步揭示磨痕区域元素的化学结合状态,对磨损部位进行了 XPS 分析,如图 6 所示。结果表明, HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的磨损表面由各种氧化物组成,包括 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 CoO 、 Co_3O_4 、 Cr_2O_3 、 Fe_2O_3 、 NiO 、 Ni_2O_3 等,氧化产物有效地减轻磨损^[29,30]。同时,还发现 AlNi_x 相,金属间化合物可以抵抗塑性变形,阻止磨粒的产生,从而使涂层拥有良好的抗磨性能^[31]。

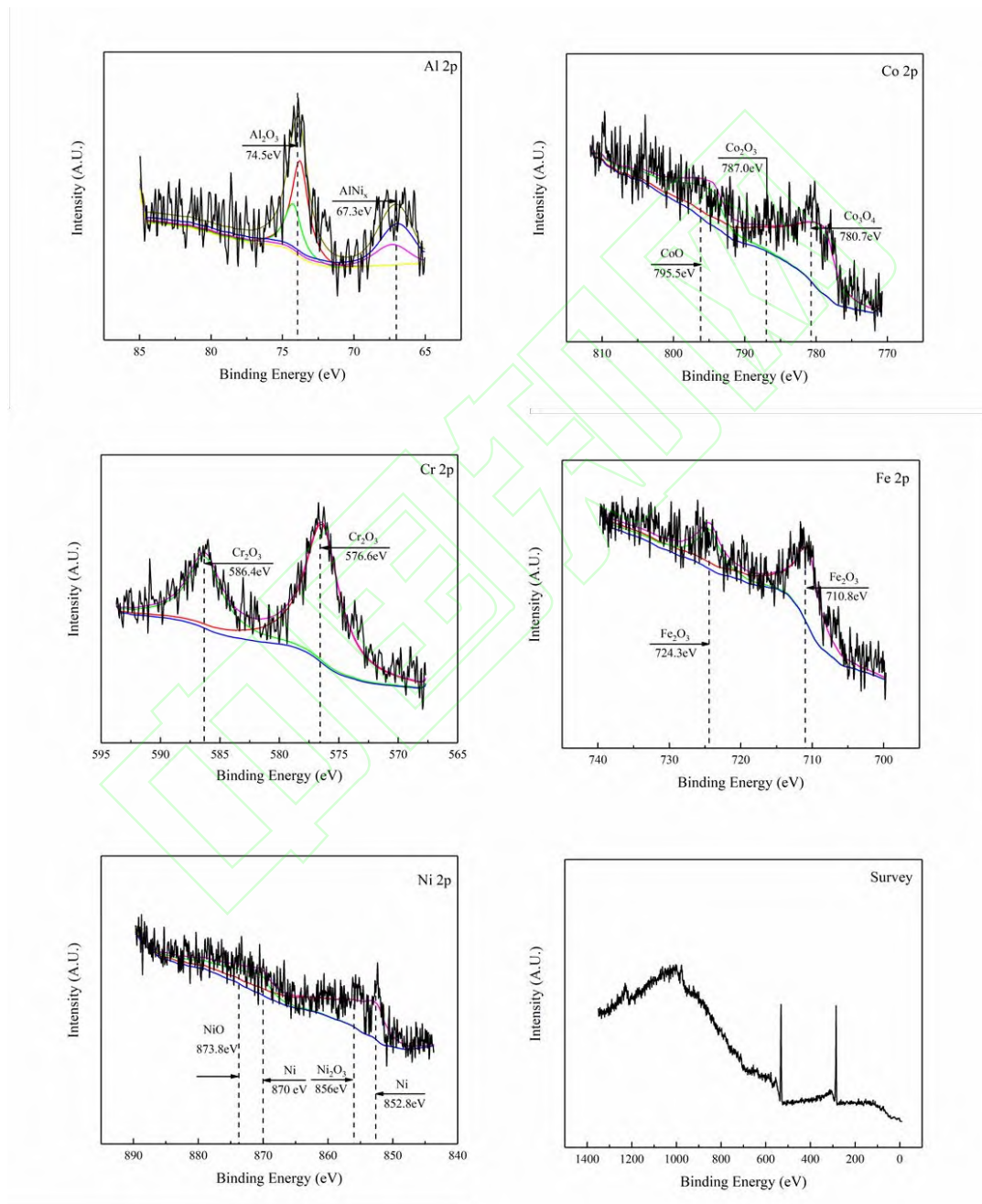


图 6 HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层磨痕的 XPS 分析 (6N)

Fig. 6 XPS analysis of the worn surface of HVOF sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coating (6N)

3 结论

本文研究了 HVOF 喷涂 AlCrFeCoNi 高熵合金涂层的不同载荷下的滑动磨损行为及失效机理,可以

得出以下结论:

(1) HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层结构致密, 相结构为 BCC 相, 显微硬度达 $(536 \pm 34) \text{HV}_{0.2}$, 约为 35CrMo 钢基体的两倍 $(278 \pm 20) \text{HV}_{0.2}$ 。

(2) HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层具有良好的抗磨性能, 并且随着载荷的增加, 涂层的摩擦系数减小、磨损率增大; 将涂层与基体的磨损率相对比, 相同载荷下涂层的磨损率约为基体的 41%。

(3) HVOF 喷涂 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的磨损失效机制如下: 低载荷下 (2N) 主要为氧化磨损伴随着轻微的磨粒磨损。高载荷下 (4N、6N) 受到反复剪切应力出现疲劳磨损。

参考文献:

[1] 高德利, 黄文君, 刘永升, 等. 钻柱力学与套管磨损预测若干研究进展[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(4): 1-9.

GAO De-li, HUANG Wen-jun, LIU Yong-sheng, et al. Some research advances in drill string mechanics and casing wear prediction for well engineering[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2020, 6(4): 1-9.

[2] 王恒, 王磊, 张东清, 等. 干热岩钻井钻具磨损及防磨技术研究[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(6): 47-53.

WANG Heng, WANG Lei, ZHANG Dong-qing, et al. Research on drilling tool wear and anti-wear technology for hot dry rock drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(6): 47-53.

[3] 于浩, 练章华, 程兴莲, 等. 涡轮钻具轴承磨损后力学性质的数值模拟研究[J]. 石油机械, 2015, 43(9): 1-5.

Yu Hao, Lian Zhang-hua, Cheng Xing-lian, et al. Numerical simulation on mechanical properties of worn turbodrill bearing[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(9): 1-5.

[4] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

Xu Bin-shi, Zhu Shao-hua. Theories and Technologies on Surface Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[5] 鞠鹏飞, 张达威, 吉利, 等. 苛刻环境下材料表面防护技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2019, 32(4): 1-16.

JU Peng-fei, ZHANG Da-wei, JI Li, et al. Progress in research of surface protection technology of materials in harsh environment[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(4): 1-16.

[6] 童辉, 韩文礼, 张彦军, 等. 表面工程技术在石油石化管道中的应用及展望[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 195-201.

TONG Hui, HAN Wen-li, ZHANG Yan-jun, et al. Application and prospect of surface engineering technology in petroleum and petrochemical pipelines[J]. Surface Technology, 2017, 46(3): 195-201.

[7] 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.

[8] 张兴华, 孙宇航, 牛牧野, 等. 多元高熵合金摩擦学性能的研究进展[J]. 材料保护, 2019, 52(11): 119-123.

ZHANG Xing-hua, SUN Yu-hang, NIU Mu-ye, et al. Review of tribological properties of multi-principal high entropy alloys[J]. Materials Protection, 2019, 52(11): 119-123.

[9] 董天顺, 刘琦, 李艳姣, 等. 高熵合金涂层的研究现状及展望[J]. 材料保护, 2020, 53(7): 137-141.

DONG Tian-shun, LIU Qi, LI Yan-jiao, et al. Research status and prospect of high entropy alloy coatings[J]. Materials Protection, 2020, 53(7): 137-141.

[10] 韩雨君, 周小平. 火焰喷涂高熵合金增强铜基复合涂层的组织和抗磨性研究[J]. 材料保护, 2021, 54(5): 18-23.

HAN Yu-jun, ZHOU Xiao-ping. Study on the microstructure and wear resistance of flame sprayed high entropy

alloy reinforced copper-based composite coatings[J]. *Materials Protection*, 2021, 54(5): 18-23.

[11] 张志彬, 张舒研, 陈永雄, 等. 合金组元与含量对激光熔覆高熵合金涂层的影响研究综述[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(5): 76-91.

ZHANG Zhi-bin, ZHANG Shu-yan, CHEN Yong-xiong, et al. Effects of alloy components and contents on high entropy alloy coatings by laser cladding: a review[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(5): 76-91.

[12] 张爱军, 韩杰胜, 苏博, 等. AlCoCrFeNi 高熵合金的高温摩擦磨损性能[J]. *摩擦学学报*, 2017, 37(6): 776-783.

ZHANG Ai-jun, HAN Jie-sheng, SU Bo, et al. Tribological properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy at elevated temperature[J]. *Tribology*, 2017, 37(6): 776-783.

[13] JOSEPH J, HAGHDADI N, SHAMLAYE K, et al. The sliding wear behaviour of CoCrFeMnNi and Al_xCoCrFeNi high entropy alloys at elevated temperatures[J]. *Wear*, 2019, 428: 32-44.

[14] MU Y K, ZHANG L B, XU L, et al. Frictional wear and corrosion behavior of AlCoCrFeNi high entropy alloy coatings synthesized by atmospheric plasma spraying[J]. *Entropy*, 2020, 22(7): 740.

[15] SHI P Y, YU Y, XIONG N N, et al. Microstructure and tribological behavior of a novel atmospheric plasma sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy matrix self-lubricating composite coatings[J]. *Tribology International*, 2020, 151: 106470.

[16] 吴庆丹, 肖金坤, 张嘎, 等. 热喷涂金属基防滑耐磨涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2018, 47(4): 251-259.

WU Qing-dan, XIAO Jin-kun, ZHANG Ga, et al. Thermal sprayed metal-based non-skid wear-resistant coatings[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(4): 251-259.

[17] 辛蔚, 王玉江, 魏世丞, 等. 热喷涂制备高熵合金涂层的研究现状与展望[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(2): 170-178.

XIN Wei, WANG Yu-jiang, WEI Shi-cheng, et al. Research progress of the preparation of high entropy alloy coatings by spraying[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(2): 170-178.

[18] LOBEL M, LINDNER T, MEHNER T, et al. Microstructure and wear resistance of AlCoCrFeNiTi high entropy alloy coatings produced by HVOF[J]. *Coatings*, 2017, 7(9): 144.

[19] SRIVASTAVA M, JADHAV M, CHETHAN, et al. Synthesis and properties of high velocity oxy-fuel sprayed FeCoCrNi₂Al high entropy alloy coating[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 378: 124950.

[20] CHEN L J, BOBZIN K, ZHOU Z, et al. Wear behavior of HVOF-sprayed Al_{0.6}TiCrFeCoNi high entropy alloy coatings at different temperatures[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 358: 215-222.

[21] SU J, KANG J J, YUE W, et al. Comparison of tribological behavior of Fe-based metallic glass coatings fabricated by cold spraying and high velocity air fuel spraying[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 522: 119582.

[22] ZHOU Z, WANG L, WANG F C, et al. Formation and corrosion behavior of Fe-based amorphous metallic coatings by HVOF thermal spraying[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 204(5): 563-570.

[23] LIU T, LEAZER J, BREWER L. Particle deformation and microstructure evolution during cold spray of individual Al-Cu alloy powder particles[J]. *Acta Materialia*, 2019, 168: 13-23.

[24] GAO C F, XIAO Z Y, ZOU H P, et al. Characterization of spherical AlSi₁₀Mg powder produced by double-nozzle gas atomization using different parameters[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(2): 374-384.

[25] XIAO J K, TAN H, WU Y Q, et al. Microstructure and wear behavior of FeCoNiCrMn high entropy alloy coating deposited by plasma spraying[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 385: 125430.

[26] 刘一帆, 常涛, 刘秀波, 等. 高熵合金涂层的摩擦学性能研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(8): 156-169.

LIU Yi-fan, CHANG Tao, LIU Xiu-bo, et al. Research progress on tribological properties of high entropy alloy coatings[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 156-169.

[27] 周鹏远, 刘洪喜, 张晓伟,等. 轻质高熵合金的研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(2): 13-24.

ZHOU Peng-yuan, LIU Hong-xi, ZHANG Xiao-wei, et al. Research progress of light-weight high entropy alloy[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(2): 13-24.

[28] DENG G Y, Tieu A K, Lan X D, et al. Effects of normal load and velocity on the dry sliding tribological behaviour of CoCrFeNiMo_{0.2} high entropy alloy[J]. Tribology International, 2020, 144: 106116.

[29] MEGHWAL A, ANUPAMA, LUZIN V, et al. Multiscale mechanical performance and corrosion behaviour of plasma sprayed AlCoCrFeNi high entropy alloy coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 854: 157140.

[30] GENG Y S, TAN H, CHENG J, et al. Microstructure, mechanical and vacuum high temperature tribological properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy based solid-lubricating composites[J]. Tribology International, 2020, 151: 106444.

[31] GENG Y S, TAN H, WANG L, et al. Nano-coupled heterostructure induced excellent mechanical and tribological properties in AlCoCrFeNi high entropy alloy[J]. Tribology International, 2021, 154: 106662.