

不同温度真空热处理对 FeCrMoCBy 非晶合金涂层 组织结构与摩擦学性能的影响研究

李润杰¹, 章昕怡¹, 康嘉杰^{1,2}, 岳文^{1,2}, 梁健³, 付志强^{1,2}, 朱丽娜^{1,2}, 张然⁴

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)郑州研究院, 河南 郑州 451283;

3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;

4. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006)

摘要: 深部地质钻探过程中, 复杂的井下工况对钻具的钻探性能以及可靠性提出了苛刻的要求。钻具钢体表面涂层具有耐磨耐蚀性的非晶涂层可以有效提高其服役寿命。其中 Fe 基非晶合金涂层因其优异的耐腐蚀抗磨损性能、较强的非晶形成能力等优势, 具有重要的应用价值和较好的经济效益。本文通过大气等离子喷涂技术 (Air Plasma Spray, APS) 在 35CrMo 基体上制备得到成分为 $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ (at.%) 的非晶合金涂层, 并对其进行不同温度的真空热处理, 探究了不同温度热处理对涂层基本性能和磨损失效机制的影响。结果表明: 涂层经过真空热处理之后, 生成的大量硬质相和成分均匀化使得涂层抗磨损性能提高; 且随着热处理温度的提高, 涂层磨损率逐渐减小。与未经热处理和 750 °C 热处理的涂层相比, 经过 850 °C 热处理之后的涂层具有最佳的抗磨损性能, 磨损率仅为未经热处理的 Fe 基非晶涂层的 16.7%。热处理前后涂层的失效机制均为粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损和氧化磨损。

关键词: 大气等离子喷涂; Fe 基非晶涂层; 真空热处理; 摩擦磨损

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)S1-0061-09

Effect of vacuum heat treatment on microstructure and tribological properties of FeCrMoCby amorphous alloy coatings at different temperatures

LI Runjie¹, ZHANG Xinyi¹, KANG Jiajie^{1,2}, YUE Wen^{1,2},
LIANG Jian³, FU Zhiqiang^{1,2}, ZHU Lina^{1,2}, ZHANG Ran⁴

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

2. Zhengzhou Research Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou Henan 451283, China;

3. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

4. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: In deep geological drilling, complex downhole conditions raises demanding requirements on drilling performance and reliability of drilling tools. Wear-resistant and corrosion-resistant amorphous coating on the surface of

收稿日期: 2021-05-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.S1.010

基金项目: 国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题三“高性能薄壁绳索取心钻杆研制”(编号: 2018YFC0603403); 国家自然科学基金面上项目“深海钻具腐蚀冲蚀磨损失效规律及其防护机理研究”(编号: 41772389); 国家自然科学基金面上项目“冰层取心钻具表面防覆冰超疏水涂层及其耐久性”(编号: 41872183)

作者简介: 李润杰, 男, 汉族, 1994 年生, 硕士研究生在读, 机械工程专业, 主要从事喷涂技术及钻具防护方面的研究

通信作者: 康嘉杰, 男, 汉族, 1984 年生, 工学博士, 博士生导师, 教授, 从事表面工程、再制造工程和机械摩擦学相关研究工作

drilling tool steel can effectively improve its service life. Among them, Fe based amorphous alloy coating has important application value and good economic benefits because of its excellent corrosion resistance and wear resistance, strong amorphous formation ability and other advantages. An amorphous alloy coating composed of $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ (at.%) was prepared on the 35CrMo substrate by air plasma spraying (APS) technology, and subjected to vacuum heat treatment at different temperatures. The effects of heat treatment at different temperatures on the basic properties and wear failure mechanism of the coatings were investigated. The results showed that vacuum heat treatment produced a large amount of hard phase and homogenized the composition; thus, improving the wear resistance of the coating. With the increase of heat treatment temperature, the coating wear rate decreases gradually. Compared with the coating either without heat treatment or with 750°C heat treatment, the coating with heat treatment at 850°C had the best wear resistance, and the wear rate was only 16.7% of that of Fe based amorphous coating without heat treatment. Failure mechanisms of the coatings either with or without heat treatment all include adhesion wear, abrasive wear, fatigue wear and oxidation wear.

Key words: air plasma spraying; Fe based amorphous coating; vacuum heat treatment; friction and wear

0 引言

近年来,我国加大了对非常规油气资源的勘探开发力度。作为一种重要的非常规能源,页岩气备受关注。提高页岩气勘探效益,降低钻井成本,是石油企业面临的重要课题。研究发现,在坚硬的强磨损腐蚀性地层钻进过程中,由于井下压强和温度过高,导致钻具服役寿命减少或失效。因此,在钻具钢体表面制备具有高耐磨性的涂层,对保证钻探设备的服役安全性、提高钻井效率和控制成本具有十分重要的经济意义与工程应用价值^[1-7]。

热喷涂技术能够制备出优异的表面功能涂层,可赋予材料表面耐腐蚀、耐磨损、抗高温氧化、抗疲劳等优异性能。等离子喷涂技术作为热喷涂技术的一种,其具有焰流温度高、对基体热影响小、涂层平整、厚度可控、孔隙率低、喷涂参数可优化等优点,因此是制备非晶合金涂层常用工艺^[8-12]。

非晶合金具有短程有序长程无序的特殊结构,不存在晶界、位错等微观缺陷,也不存在成分偏析和第二相,与传统晶态合金相比,具有高强度、高弹性极限、优异的耐磨性能和耐蚀性能等,成为表面防护的理想材料之一^[13-15]。其中,Fe基非晶合金有着较高的显微硬度和良好的耐磨耐蚀性,以及制备工艺成熟和较低的材料成本等优势,在石油工程、深海钻探、建筑行业等领域具有较大的应用潜力^[16-19]。Yasir等^[20]将20%的 Al_2O_3 颗粒剂混合到 $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 非晶合金粉末中,制备具有高耐磨性、耐腐蚀性的非晶合金涂层。Liang等^[21]研究了高温(玻璃转

化温度(T_g)以下)空气环境和真空环境对 $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{20}\text{Mo}_{10}\text{W}_4\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 非晶合金涂层磨损性能的影响。研究发现,真空条件下,涂层的磨损率从20°C时的 $2.71 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 降至400°C时的 $1.44 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,相应的主要磨损机制是由磨粒磨损伴随着轻微的分层和粘着磨损,转换为分层和粘着磨损的结合。在大气条件下,涂层发生了氧化反应,使涂层从20°C时的磨损率 $1.44 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加到400°C时的 $6.43 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。大气中的高温磨损机制主要包括分层磨损、粘着磨损和强化氧化磨损。Huang等^[22]将APS所制备的 $\text{Fe}_{42.87}\text{Cr}_{15.98}\text{Mo}_{16.33}\text{C}_{15.94}\text{B}_{8.88}$ 非晶合金涂层在1 mol/L H_2SO_4 溶液中进行电化学腐蚀测试,发现与921A钢和Ti6-Al4-V合金相比,Fe基非晶涂层具有更低的腐蚀电流密度和较高的腐蚀电位,即Fe基非晶合金涂层有更好的耐腐蚀性能。目前,对Fe基非晶合金涂层耐磨损和耐腐蚀性能的研究较多,但对真空热处理后Fe基非晶合金涂层磨损性能的研究较少。

本文采用等离子喷涂技术制备了 $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ (at.%)的Fe基非晶合金涂层,对涂层进行了不同温度下的真空热处理,并进行摩擦磨损实验,研究不同温度下真空热处理对Fe基非晶合金涂层的硬度与抗磨损性能的影响,并对磨损失效机制进行了探究。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

喷涂前将Fe基非晶粉末放在80℃的烘箱中保温4h,降低粉体的团聚程度。粉体表面干燥,保证粉末流动性。在喷涂之前需对基体进行净化处理、粗化处理(喷砂)和预热处理,以增加涂层与基体表面的结合强度。最后在基体表面制备出厚度约为400 μm的Fe基非晶涂层,具体喷涂工艺参数如表1所示。

表1 等离子喷涂工艺参数

工艺参数	具体数值	
电源	功率/kW	39.7
	电流/A	450
	电压/V	88.5
供应气体	氩气流量/(L/min)	50
	氢气流量/(L/min)	7
喷枪	速度/(L/min)	15.0
	供料限温/℃	11.5
	回流限温/℃	30.9
	冷却功率/kW	20.3

1.2 真空热处理

采用真空热处理炉(HTVO-1200,中国沈阳科友公司)对涂层进行真空热处理。温度分别为750℃和850℃,保温时间为1h,以获得不同晶化程度的涂层试样。在热处理加热、保温和冷却过程中,借助于分子泵将炉内的真空度维持在 1×10^{-4} Pa左右。当温度降至100℃以下时,关闭分子泵和机械泵,样品随炉冷却到室温。

1.3 摩擦磨损试验

涂层的往复式滑动摩擦磨损实验采用UMT多功能磨损试验机(UMT-3,CETR公司,美国)进行测试,选择线性滑动模块作为夹具,对APS制备的Fe基非晶涂层以及经过750℃、850℃热处理之后的涂层进行干摩擦磨损试验,温度为25℃,相对湿度约为20%。采用直径为6mm的 Si_3N_4 磨球,每次实验均换用新磨球。各项试验参数如表2所示。为了减少实验误差,试验重复3次,取平均值作为最终的摩擦系数和磨损率。磨损率由公式 $Q = \frac{V_w}{NS}$ 计算得到,其中 Q 为磨损率(单位: $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), V_w 是由磨痕截面轮廓积分得到的磨损体积(单位:

mm^3), N 和 S 分别表示施加的载荷(单位:N)和总行程距离(单位:mm)。

表2 摩擦磨损实验参数

对磨球直径/mm	频率/Hz	载荷/N	时间/min	冲程/mm
6	10	10	30	2

1.4 表征方法

采用X射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)来分析合金粉末物相组成和热处理之后涂层的非晶程度;用ImageJ2x软件对涂层截面进行灰度处理,计算涂层的孔隙率;用维氏硬度计测量涂层显微硬度;用摩擦磨损试验机测试热处理后涂层的摩擦学性能;利用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)和能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)对磨损前后的涂层进行表征;用白光三维形貌仪对磨损后涂层表面三维形貌进行表征,并计算出磨损体积和磨损率。

2 试验结果与讨论

2.1 粉末与涂层的表征

Fe基非晶合金粉末的表面形貌如图1所示,可以看到Fe基非晶粉末大部分呈现球形或近球形,少部分呈现椭球形和棒状,表明其具有较好的流动性。大部分粉末的表面比较光滑,但也有少数粉末表面存在不均匀的孔隙。其原因可能是合金中存在杂质,雾化后残留在粉末表面;也可能是由于杂质气体和粉末在气体雾化腔中相互作用而形成的杂质层。在图中看不到明显的团聚现象,但由于粉末在潮湿环境中易团聚,喷涂前将粉体进行干燥处理,从而减少团聚现象,有利于粉体的流动。

Fe基非晶合金粉末和APS制备的涂层的XRD图谱如图2所示。可以看出,在 $2\theta = 40^\circ \sim 50^\circ$ 之间两者均有明显的非晶漫散射峰即“馒头峰”的存在,

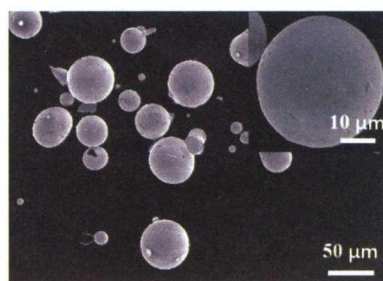


图1 Fe基非晶合金粉末的微观形貌

这表明了合金粉末和涂层主要为非晶相,并且APS适用于制备非晶涂层^[23]。

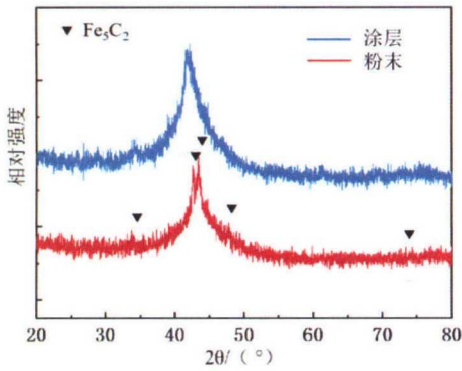


图2 Fe基非晶合金粉末和APS涂层的XRD图谱

利用ImageJ2x软件对涂层截面做多次选区,进行灰度处理,计算得到APS涂层的孔隙率为2.7%。由图3(a)涂层截面SEM图可以看出,涂层与基体结合良好,没有明显的裂纹等缺陷;基材表面经过喷砂处理,形成凹凸不平的表面,涂层部分嵌入基材凹槽,涂层与基材相互咬合,两者结合紧密。

随着到达基体表面的粉末数量的增加,扁平颗粒会层层叠起来形成涂层。粉末与基体碰撞后,在展开和扩散过程中飞溅,导致粉末沉积不完全,从而产生细小的孔隙和裂纹,如图3(b)(c)所示。此外,如图3(d)所示,在喷涂过程中熔融粉末会与大气环境中的O元素接触,涂层缺陷会进一步加剧O元素的富集。

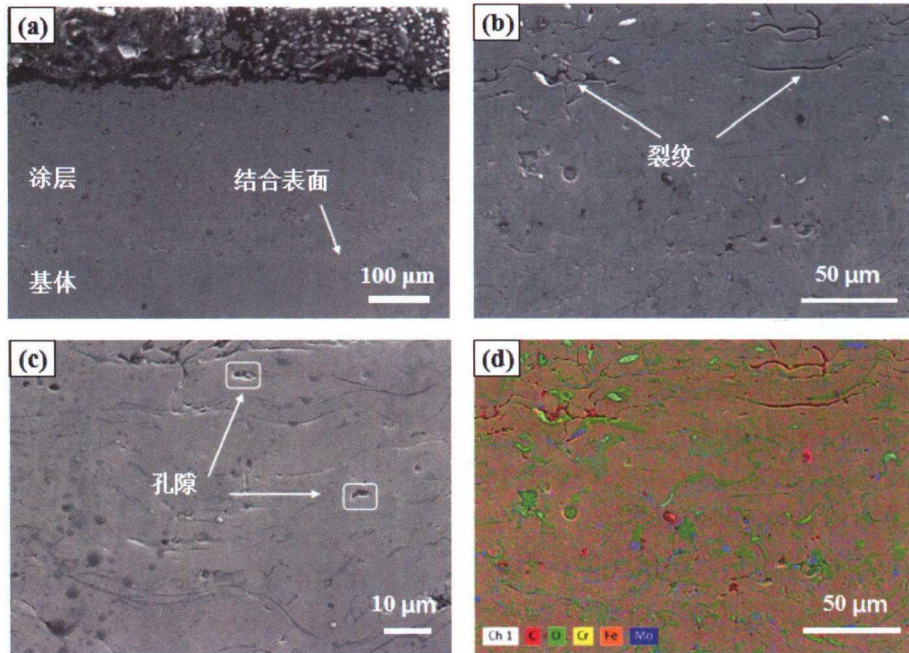
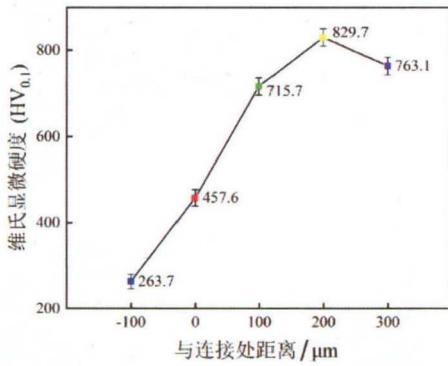


图3 Fe基非晶合金涂层截面形貌(a-c)和截面元素扫描图(d)

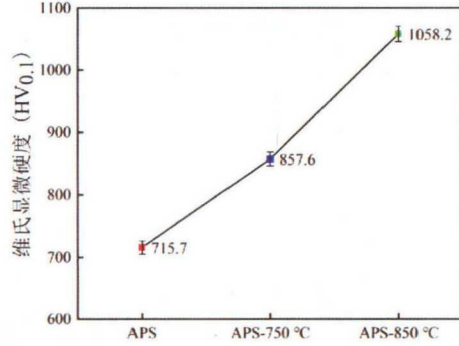
图4显示了涂层、基体及界面的显微硬度数据。可以看出,显微硬度从基体到涂层存在一定的梯度变化。界面处的硬度约为457.6 HV_{0.1},非晶合金涂层的硬度可达829.7 HV_{0.1},而基体的硬度只有263.6 HV_{0.1},涂层硬度是基体硬度的3倍左右。涂层显微硬度的变化主要是由于随着喷涂层数的叠加,会导致孔隙率的增大,并且温度应力差的缘故,涂层上表面易产生缺陷。APS-750 °C和APS-850 °C相较于APS涂层硬度都有大幅度的提高,APS-750 °C硬度约为869.1 HV_{0.1},而APS-850 °C硬度可达1058.9

HV_{0.1},约为APS平均硬度的1.4倍。由于涂层在热处理之后有大量硬质结晶相出现,从而导致其硬度增加,因此对涂层进行真空热处理可以改善其机械性能。

图5是Fe基非晶合金涂层的差热分析(DSC)曲线。从涂层的DSC曲线可以看出,涂层有两个连续的放热峰,在696 °C时有第一个峰值,表示涂层在这温度附近开始由非晶态转变为纳米晶或晶态。667~715 °C这个温度区间为涂层的晶化区间。715 °C以上为涂层晶粒的增大区间,在740 °C附近有



(a) 等离子喷涂制备的Fe基非晶合金涂层和基体的硬度分布



(b) 真空热处理前后涂层的维氏硬度

图4 涂层、基体及界面的显微硬度数据

一个较弱的放热峰,表明此温度区间可能有新相析出。涂层的晶化起始温度大约为 $667\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明涂层在低于此温度时不会发生晶态的转变,证明本研究中APS制得的Fe基非晶合金涂层具有良好的热稳定性^[24]。

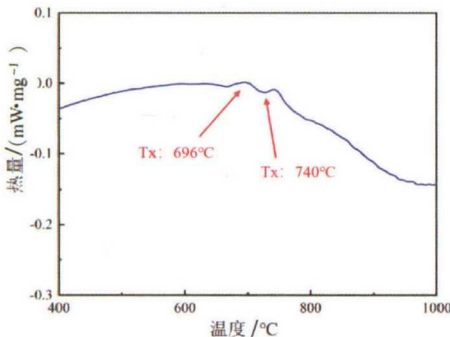


图5 Fe基非晶合金涂层的DSC曲线

2.2 热处理后涂层的表征

涂层真空热处理之后的XRD图谱如图6所示。可以看到,热处理之前的涂层在 $2\theta = 40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 之间有较为明显的非晶衍射峰,而 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理之后的涂层出现了很多尖锐晶态衍射峰,“馒头峰”消失,这表明涂层有大量晶体相形成。这一结果与差热分析(DSC)曲线得到的涂层在 $696\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近开始由非晶态转变为晶态的结论吻合。形成的晶相主要有 FeB_4O_7 、 FeYC_2 、 Fe_{17}Y_2 、 Fe_7Y 、 $\text{Fe}_5\text{Y}_3\text{O}_{12}$ 等。

2.3 Fe基非晶涂层的摩擦学性能

对APS、APS- $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、APS- $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 涂层进行滑动摩擦磨损试验之后,使用三维白光形貌仪对磨痕进行分析,观察磨痕的形貌信息并计算出磨痕体积及磨损率,从而进一步表征涂层的抗磨损性能,测试

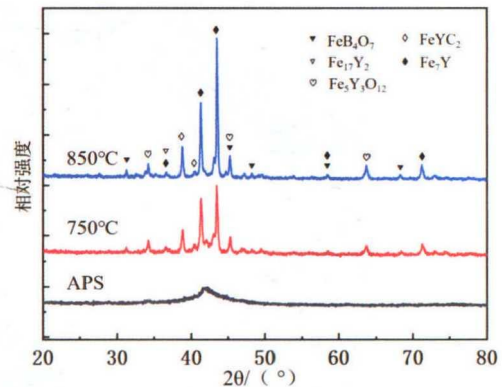


图6 Fe基非晶合金涂层热处理前后的XRD图谱

结果如图7所示。表3为不同涂层磨痕的深度和宽度。对涂层进行真空热处理之后,磨痕的宽度和深度都有不同程度的减少,且热处理温度越高,磨痕越浅。这表明热处理提高了涂层的抗磨损性能,这与热处理之后涂层物相的变化有直接关系。经过 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理之后的涂层出现了大量硬质相,即Fe的碳化物等,理论上增加了涂层的硬度,从而提高了其抗磨损性能。

表3 不同Fe基非晶合金涂层的磨痕宽度和深度

样品	APS	APS- $750\text{ }^{\circ}\text{C}$	APS- $850\text{ }^{\circ}\text{C}$
宽度/ μm	21.85	8.70	4.93
深度/ μm	798.51	601.08	557.38

图8为涂层真空热处理前后摩擦系数随时间的变化曲线。由图可知,在初始阶段,由于涂层的表面粗糙度以及与对磨球的接触面积较大,摩擦系数出现剧烈抖动,APS涂层的摩擦系数最大,APS- $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最小。这主要是由于热处理后涂层的硬度高

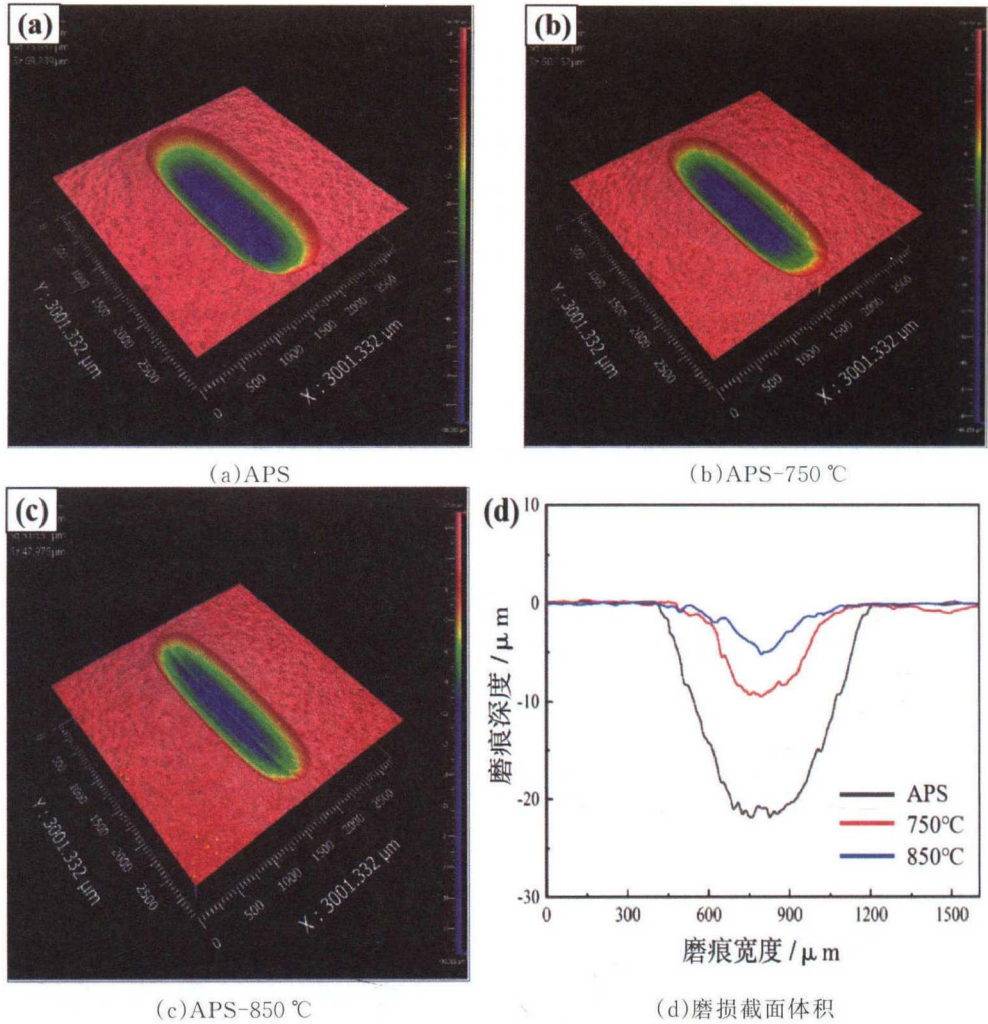


图7 Fe基非晶合金涂层热处理前后磨痕三维形貌和磨痕截面体积

于结晶温度,降低了 Si_3N_4 磨球在滑动磨损过程中压入涂层的深度;另一方面,涂层经过热处理后, FeYC_2 和 Fe_7Y 等硬质相分散分布在塑性较好的35CrMo基材中,降低了其脆性效应。在最后阶段,3种样品的摩擦系数趋于一致,这可能与磨损机理相似有关。

根据施加载荷、行程距离及白光测试得到的磨损体积,可以计算得到不同涂层的磨损率,如图9所示。可以看出APS、APS-750 °C、APS-850 °C涂层磨损率逐渐减小,其中APS 850 °C涂层磨损率仅有 $4.938 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$,为没有经过热处理的APS涂层($29.374 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$)的16.7%,抗磨损性能得到了很大程度的提升,这与三维白光形貌分析及摩擦系数的结果相吻合。

如图10(a)所示,APS涂层的磨损表面存在深

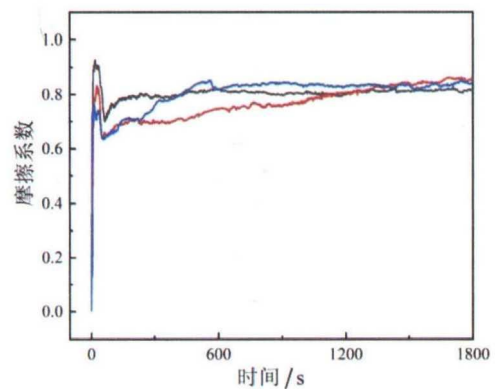


图8 Fe基非晶合金涂层真空热处理前后干摩擦摩擦系数随时间的变化

犁沟,这说明发生了磨粒磨损,由图10(b)可以明显看出,涂层表面还存在裂纹和剥落坑,这是由于在进行摩擦磨损实验的过程中,将磨球压入涂层,使涂层承受复杂的交变应力载荷和涂层材料本身的脆性共

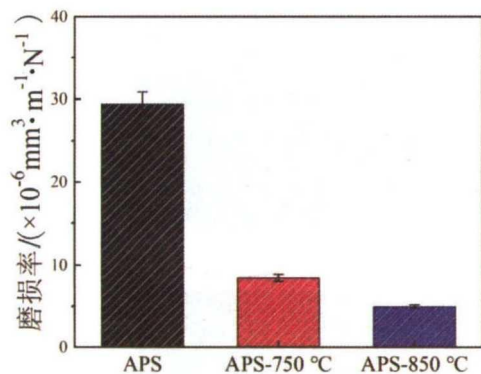


图9 Fe基非晶合金涂层热处理前后的磨损率

同所引起的,所以涂层出现了疲劳磨损。另外,随着实验时间的增加,裂纹也随之增多,裂纹间相互挤压,使部分涂层以碎屑的形式脱离母体,也是犁沟产生的原因之一。图10(b)中还存在部分白亮色区域,众所周知,铁基非晶合金涂层中的Fe、Cr、Mo和其他元素在高温下极易发生氧化^[25]。一般来说,氧化反应主要是氧气向非晶基体的向内扩散,涂层中的缺陷区域,包括孔隙和裂纹会成为氧元素扩散的优先渠道^[26]。由图10(c)可知,亮白色区域是Si、O元素富集区域,表明涂层出现了由Si、O元素组成的氧化层,主要原因是随着滑动条件的变化,摩擦表面接触温度即闪点温度升高,涂层和对磨球之间的接触闪点温度达到并超过玻璃转变温度和结晶温度,进而导致涂层出现氧化磨损和粘着磨损^[27-28]。

如图10(d)、(e)所示,APS-750 °C涂层虽然有几道平行于对磨球滑动方向的犁沟,但相对于APS涂层明显减少。剥落坑的数量和体积在减少这主要由于涂层经过热处理后,硬质相的增加,其弥散强化作用使涂层缺陷得到改善,提高了涂层硬度,抵抗了部分磨粒磨损和疲劳磨损。经过热处理后,O元素在涂层的富集减少,导致氧化层减少,这也是磨粒磨损和氧化磨损减少的原因。

随着热处理温度的升高,如图10(f)、(g)所示,APS-850 °C涂层部分存在区域无明显犁沟现象,裂纹宽度和剥落坑体积相对APS-750 °C涂层进一步减少。纳米晶的析出和硬质相的弥散强化作用是主要原因。从图10(i)可以观察到,热处理温度的提高抑制了O元素的富集和对磨球 Si_3N_4 中Si元素引起的材料转移,氧化磨损和粘着磨损减少。

由平行于滑动方向的犁沟、剥落坑、裂纹和细小的磨屑痕迹组成,所有现象都表明两个表面之间存在三体磨损和疲劳磨损。观察到的磨损表面特征表明,氧化磨损和磨粒磨损也是主要的磨损机制。综上,可以推断APS涂层热处理前后的磨损机制主要是粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损和氧化磨损。

3 结论

本文对等离子喷涂Fe基非晶合金涂层进行了750 °C和850 °C两个不同温度的真空热处理,并对热处理前后的涂层均进行了往复式滑动摩擦磨损实验,研究了热处理对涂层力学性能、组织结构、摩擦学性能和磨损机制的影响,得到如下结论:

(1)Fe基非晶合金粉末与涂层均为非晶相,涂层较为致密,孔隙率为2.7%。真空热处理后的涂层出现了非晶相向纳米晶和结晶相的转变。APS制备的Fe基非晶合金涂层硬度最高达到829.7 $\text{HV}_{0.1}$,而基体的硬度只有263.6 $\text{HV}_{0.1}$,涂层硬度是基体硬度的3倍左右。涂层经过真空热处理之后,生成了大量硬质相,纳米晶相的弥散强化使得涂层硬度增加,从而提高了其抗磨损性能。850 °C热处理之后的涂层具有最佳的抗磨损性能,仅为 $4.938 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$,为未经热处理的APS涂层($29.374 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{N}^{-1}$)的16.7%。

(2)在摩擦磨损实验过程中,涂层与磨球接触,温度升高,发生粘着磨损和氧化磨损。当涂层硬度无法抵御复杂的应力时,积累到一定程度,便会在这些缺陷处诱发疲劳磨损。随着磨损的继续,疲劳裂纹不断扩展,当其达到临界长度时将向涂层内表面剪切,当不同方向的裂纹相互衔接时便导致了涂层的部分脱落形成剥落坑。

(3)随着热处理温度的增加,硬质相的弥散强化作用使涂层缺陷得到改善,提高了涂层硬度,抵抗了部分磨粒磨损和疲劳磨损,并且抑制了O元素的富集和磨球 Si_3N_4 中Si元素引起的材料转移,氧化磨损和粘着磨损减少。等离子喷涂Fe基非晶合金涂层不同温度真空热处理前后的磨损机制主要是粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损和氧化磨损。

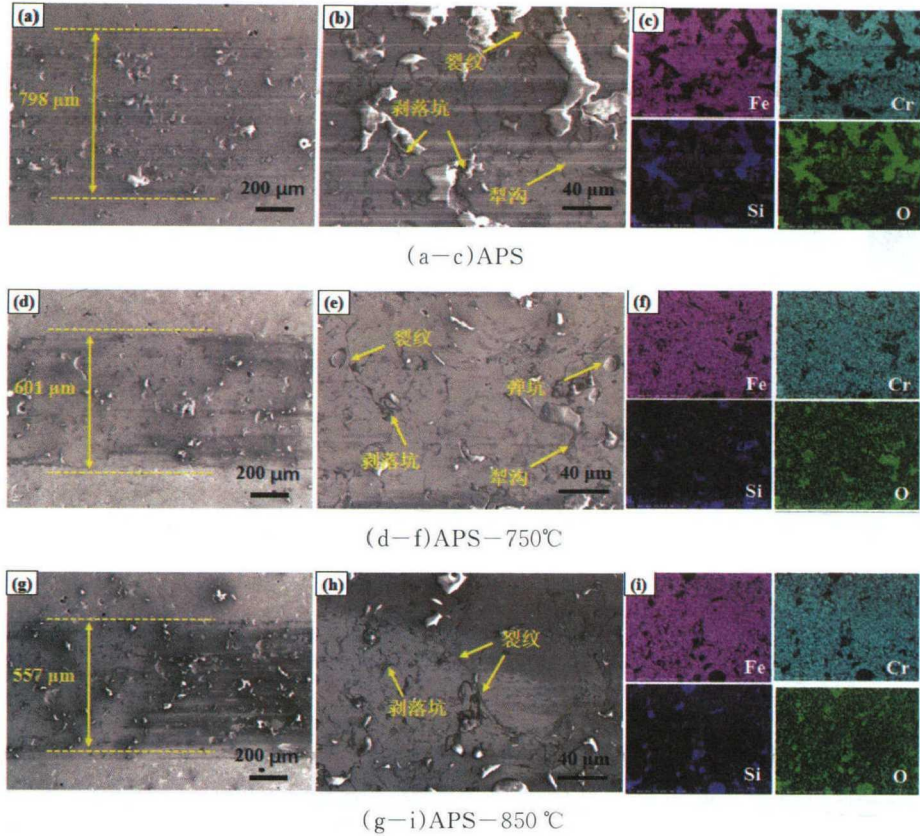


图 12 块石颗粒不同体积比的非均质地层直剪实验对比图

参考文献:

- [1] 孙友宏,郭威,邓孙华.油页岩地下原位转化与钻采技术现状及发展趋势[J].钻探工程,2021,48(1):57-67.
- [2] 吴海霞,沈立娜,李春,等.博孜区块新型表孕镶金刚石全面钻头的研究与应用[J].钻探工程,2021,48(3):101-105.
- [3] 崔金蒙,孟德忠,吴哲,等.钻具切割用聚晶立方氮化硼刀具的摩擦学研究[J].钻探工程,2021,48(3):10-20.
- [4] 王彦祺,龙志平,隆页.页岩气水平井钻井技术研究与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(7):30-33.
- [5] 刘冀.组分对铁基金刚石钻头的力学性能影响研究[J].钻探工程,2021,48(5):47-53.
- [6] 刘晓斌,康嘉杰,岳文,等.HVOF金属陶瓷涂层的冲蚀失效行为研究现状[J].材料报,2018,32(S1):312-316.
- [7] 刘宝林,彭鹏,高德利,等.油气钻探技术中耐磨材料的研究进展[J].硅酸盐通报,2009,28(3):553-557.
- [8] 徐滨士,朱绍华,刘士参,等.表面工程的理论与技术[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [9] Wang Y, Zheng Y G, Ke W, et al. Slurry erosion - corrosion behaviour of high-velocity oxy-fuel (HVOF) sprayed Fe-based amorphous metallic coatings for marine pump in sand-containing NaCl solutions[J]. Corrosion Science, 2011, 53(10): 3177-3185.
- [10] Goudarzi M, Ghaziasadi H. The effect of gas flow rate on structural, mechanical and antibacterial properties of atmospheric plasma sprayed Cu coatings[J]. Physica Scripta, 2021.
- [11] Lal D, Kumar P, Bathe R, et al. Journal Pre-proof Effect of Microstructure on Fracture Behavior of Freestanding Plasma Sprayed 7 wt.% Y_2O_3 Stabilized ZrO_2 [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021.
- [12] Borom M P, Johnson C A, Peluso L A. Role of environment deposits and operating surface temperature in spallation of air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 1996, 86 - 87(96):116-126.
- [13] Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys[J]. Acta Materialia, 2000, 48(1):279-306.
- [14] Gu X J, Poon S J, Shiflet G J. Mechanical properties of iron-based bulk metallic glasses[J]. Journal of Materials Research, 2007, 22(2):344-351.
- [15] Msetra Z, Khitouni N, Sunol J J, et al. Characterization and thermal analysis of new amorphous Co60Fe18Ta8B14 alloy produced by mechanical alloying[J]. Materials Letters, 2021(425 - 428):129532.
- [16] Shen J, Chen Q, Sun J, et al. Exceptionally high glass-forming ability of an FeCoCrMoCBy alloy[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(15):279.
- [17] Ponnambalam V, Poon S J, Shiflet G J. Fe-based bulk me-

- tallic glasses with diameter thickness larger than one centimeter [J]. *Journal of Materials Research*, 2004, 19(5):1320-1323.
- [18] Yavari A R , Lewandowski J J , Ec Kert J . Mechanical properties of bulk metallic glasses [J]. *Mrs Bulletin*, 2007, 32(8): 635-638.
- [19] Lin T J , Sheu H H , Lee C Y , et al. The study of mechanical properties and corrosion behavior of the Fe-based amorphous alloy coatings using high velocity oxygen fuel spraying [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 867:159132.
- [20] Yasir M , Cheng Z , Wei W , et al. Wear behaviors of Fe-based amorphous composite coatings reinforced by Al₂O₃ particles in air and in NaCl solution [J]. *Materials & Design*, 2015, 88(DEC.25):207-213.
- [21] Liang Dandan, Ma Jiang, Cai Yuanfei, et al. Characterization and elevated-temperature tribological performance of AC - HVAF-sprayed Fe-based amorphous coating [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 387:125535.
- [22] Huang Y , Guo Y , Fan H , et al. Synthesis of Fe - Cr - Mo - C - B amorphous coating with high corrosion resistance [J]. *Materials Letters*, 2012, 89:229-232.
- [23] 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.
- [24] Huang F , Kang J J , Yue W , et al. Effect of heat treatment on erosion - corrosion of Fe-based amorphous alloy coating under slurry impingement [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 820:153132.
- [25] Zhang C, Wu Y, Liu L. Robust hydrophobic Fe-based amorphous coating by thermal spraying [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(12):44.
- [26] Yoon S, Lee C, Choi H. Evaluation of the effects of the crystallinity of kinetically sprayed Ni-Ti-Zr-Si-Sn bulk metallic glass on the scratch response [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 449:285-289.
- [27] Ma H. R., Chen X. Y., Li J. W., et al. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance [J]. *Surface Engineering*, 2016.
- [28] Cheng J., Liu D., Liang X., et al. Wear behaviors of arc-Sprayed FeBSiNb amorphous coatings [J]. *Tribology Letters*, 2015.