

激光织构对 Fe 基非晶合金涂层润湿性的影响研究

许俊杰¹, 苏娟¹, 康嘉杰^{*1,2}, 岳文^{1,2}, 梁健^{1,3},
付志强^{1,2}, 朱丽娜^{1,2}, 王成彪^{2,4}

(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:为提高页岩油气钻进过程中钻头表面的耐磨性能及防泥包性能,采用冷喷涂(CS)和超音速火焰喷涂(HVAF)技术在35CrMo钢基体上制备了 $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ 非晶合金涂层,并利用紫外激光制备了涂层的疏水表面,利用扫描电子显微镜(SEM)、X射线能谱仪(EDS)、X射线衍射仪(XRD)测试分析了涂层的微观结构和力学性能,利用接触角测量仪表征涂层的润湿性,并分析其润湿机理。结果表明:利用CS技术制备的Fe基非晶合金涂层结构更加致密,非晶质量分数达到90%,且具有更好的热稳定性。激光过程中的熔融物快速冷却在涂层表面形成纳米尺寸级别的凝结核以及团聚物形成微纳复合结构,在激光扫描次数为7次时,CS涂层表面水接触角最高,具有良好的疏水性。

关键词:页岩油气;钻头;耐磨性能;钻头泥包;Fe基非晶合金涂层;激光织构;润湿性;冷喷涂;超音速火焰喷涂
中图分类号:P634.4⁺1;TE921⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)04-0021-08

Effect of laser texture on wettability of Fe-based amorphous alloy coating

XU Junjie¹, SU Juan¹, KANG Jiajie^{*1,2}, YUE Wen^{1,2}, LIANG Jian^{1,3},
FU Zhiqiang^{1,2}, ZHU Lina^{1,2}, WANG Chengbiao^{2,4}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. Zhengzhou 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 order to improve wear resistance and anti-balling of the drill bit during shale oil and gas drilling, $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$ amorphous alloy coatings were prepared on 35CrMo steel substrates by cold spraying (CS) and high velocity air fuel (HVAF) spraying with the hydrophobic surface of coatings made by UV laser. The microstructure and mechanical properties of the coatings were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), X-ray energy spectrometer (EDS) and X-ray diffractometer (XRD), a contact angle meter was used to characterize the wettability of the coating, and the wetting mechanism was analyzed. The results showed that the Fe-based amorphous alloy coating prepared by CS technology had a denser microstructure and better thermal stability with the amorphous mass fraction up to 90%. The melt in the laser process rapidly cooled on the surface of the coating to form nano-sized

收稿日期:2020-10-22; 修回日期:2021-01-27 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.04.003

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“深海钻具腐蚀冲刷磨损失效规律及其防护机理研究”(编号:41772389)、“冰层取心钻具表面防覆冰超疏水涂层及其耐久性”(编号:41872183);装备预研教育部联合基金青年人才基金项目“发动机缸体强化延寿涂层设计制造技术”(编号:6141A02033120)

作者简介:许俊杰,男,汉族,1996年生,硕士研究生在读,机械工程专业,从事非晶涂层疏水性的研究,北京市海淀区学院路29号,8813059399@163.com。

通信作者:康嘉杰,男,汉族,1984年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,从事表面工程、再制造工程和机械摩擦学相关研究工作,北京市海淀区学院路29号,kangjiajie@cugb.edu.cn。

引用格式:许俊杰,苏娟,康嘉杰,等.激光织构对Fe基非晶合金涂层润湿性的影响研究[J].钻探工程,2021,48(4):21-28.

XU Junjie, SU Juan, KANG Jiajie, et al. Effect of laser texture on wettability of Fe-based amorphous alloy coating[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):21-28.

condensation and agglomerates to form a micro-nano composite structure. With 7 laser scans, the CS coating had the highest water contact angle on the surface, which represented good hydrophobicity.

Key words: shale oil and gas; drill bit; wear resistance; balling of the drill bit; Fe-based amorphous alloy coating; laser texture; wettability; cold spraying; high velocity air fuel spraying

0 引言

随着工业经济的快速增长,我国对油气资源的需求也急剧增加,目前我国过高的油气对外依存度已经成为了国家发展能源系统安全的“短板”。我国非常规油气资源储量丰富,致密气、页岩油气、煤层气等非常规天然气地质资源量是全国天然气总地质资源量的近2倍,开发非常规油气资源已成为解决我国能源安全问题的有效途径。泥页岩具有表面积大、空隙小、结构复杂、易溶胀等特性,在钻进过程中钻头极易产生“泥包”现象,即在钻进过程中会产生泥质岩屑,在遇水后不能及时排离孔底而被包在钻头表面。且无论采用什么样的钻头,都会有“泥包”现象产生,导致停钻或卡钻等孔内事故的发生。因此,为保证钻探的安全性和可靠性,制造钻探设备的材料性能尤其是表面性能正面临着严苛的要求和巨大的挑战。为了解决钻头“泥包”问题,本领域研究人员采取的方法之一是在钻头钢体表面制备涂层,通过喷涂技术制备出疏水性和耐磨性均优良的涂层,以解决钻头“泥包”问题和服役持久发展性问题^[1-7]。

非晶合金(也称为金属玻璃)是在利用超急冷凝固技术制备过程中,熔融状态合金凝固时原子来不及有序排列结晶,因此得到的合金拥有像玻璃一样的长程无序结构——不存在晶态合金的晶粒和晶界。其中Fe基非晶合金以其超高的强度和硬度、优异的防腐耐磨性能、原料成本相对低廉等优势,在矿山、钻井等装备的表面防护领域得到了广泛应用。激光蚀刻作为一种传统的材料去除工艺,已经成为非晶合金微加工的主要研究方向。由于非晶的缺乏晶界等特性,有着较低的导热系数,并且独特的长程无序、短程有序的原子的非均匀性,使得易在非晶态合金表面构造微纳米结构^[8-12]。

为了探究Fe基非晶合金涂层的润湿性,Zhang等^[13]利用HVOF技术在高碳钢(AISI 1045)上沉积了高疏水性Fe基非晶合金涂层。经溅射镀膜处理后再用十二烷基硫醇($C_{12}H_{26}S$)改性,涂层的水接触角 $>150^\circ$,滚动角 $<16^\circ$ 。Fe基非晶合金涂层也表现

出超高硬度,优异的耐腐蚀性,并具有明显的自洁效果。Qiao等^[14]等在Q235钢基材上制备了水接触角和滚动角分别为 $154^\circ \pm 2^\circ$ 和 $4^\circ \pm 1^\circ$ 的超硬超疏水铁基非晶合金涂层。超疏水涂层的制造过程是使用具有不同喷涂功率的等离子喷涂来构建适当的表面特征,然后使用FAS17进行表面化学改性以获得较低的表面能。喷涂后的涂层需要进行化学修饰才能获得较好的疏水性。

此外激光织构加工参数对非晶合金的润湿性也有很大影响。通过调整激光加工织构间距和激光扫描速度等操作参数,可以在非晶合金表面通过激光刻蚀制备出各种微观结构,如凹状微观结构和线性微槽等。Fornell等^[15]观察到不同强度的表面激光处理可以调节 $Cu_{47.5}Zr_{47.5}Al_5$ 非晶合金表面的润湿性。同样,Jiao等^[16]报道,不同模式的纳秒(ns)激光加工纹理可以改变Zr基非晶合金的润湿性,其中表面粗糙度发挥了重要作用。最近,Huang等^[17]在氮气中通过激光刻蚀法制备了非晶合金表面的分层结构,铸态非晶合金经研磨抛光后的光滑表面WCA仅为 96° ,而经激光蚀刻后分层结构的表面的WCA大于 140° 。

本研究针对非常规油气资源钻探过程中钻头钢体的“泥包”问题,通过冷喷涂(CS)和超音速火焰喷涂(HVAF)技术制备了 $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2$ 非晶合金涂层,分析了涂层的相组成、微观结构、孔隙率以及显微硬度,进行了涂层在不同加工参数下的激光织构,对涂层的润湿性等进行了分析,探讨了织构化 $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2$ 非晶合金涂层的润湿机理。

1 试验条件及方法

1.1 涂层制备

实验选用的原料为高纯氩气雾化工艺生产的 $Fe_{48}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2$ (%,原子分数)非晶粉末,粉末粒 $10\sim 60\ \mu m$,其中筛选出 $10\sim 30\ \mu m$ 的非晶粉末用于冷喷涂技术制备涂层,筛选出 $20\sim 60\ \mu m$ 的粉末原料用于超音速火焰喷涂制备涂层,并在HVAF粉末原料中按1:1的比例加入直径为 $40\sim 70\ \mu m$ 的

Al₂O₃陶瓷颗粒,以避免喷涂过程中熔融液滴因为快速冷却而堵塞枪口,同时也可提升涂层的致密性。基体材料为35CrMo钢,试片尺寸为50 mm×15 mm×5 mm,并对试样进行1 mm×45°倒角以防止在实验过程中产生应力集中导致涂层开裂。

采用德国Impact公司Impact 5/11型喷涂设备进行冷喷涂,采用美国Kermetico公司的喷涂设备进行超音速火焰喷涂,喷枪型号为AK-06。2种制备技术的工艺参数如表1所示。喷涂前,对35CrMo钢试样进行去油污和喷砂粗化处理,以粗砂喷涂表面,改善涂层与基体的结合强度。喷砂材料为粒径250~800 μm的金刚砂,参数为:爆破压力80 kPa,爆破时间30 s,喷砂距离30 mm。

表1 冷喷涂和超音速火焰喷涂工艺参数

Table 1 Process parameters of cold spraying and HVAF spraying

冷喷涂工艺参数		超音速火焰喷涂参数	
载气	氮气	压缩空气流量/psi	91
气压/MPa	4.5	燃气流量/psi	100
温度/°C	900	氮气流量/(L·min ⁻¹)	22
喷涂距离/mm	20	氢气流量/(L·min ⁻¹)	30
送粉率/(r·min ⁻¹)	3	喷涂距离/mm	200
		进料率/(g·min ⁻¹)	100
		横移速度/(m·ms ⁻¹)	500

注:1 psi=6.895 kPa。

1.2 涂层表征

采用场发射扫描电子显微镜(SEM, ZEISS, 德国)观察FeCrMoCBY非晶粉末和涂层的微观形貌,并使用X射线能谱仪(EDS)分析涂层的化学成分。采用X射线衍射仪(XRD, Rigaku D/max-2500, 日本)对粉末和涂层进行物相分析,入射线为Cu Kα射线,扫描角度为20°~80°,扫描模式选用连续扫描,扫描频率为4°/min。利用MDI-Jade 6.0软件计算粉末和涂层的非晶含量。使用灰度法测量涂层的孔隙率,并利用ImageJ2x软件评估孔隙率值。采用热重法和差热分析法(DTA-TG; STA 449 F3, Netzsch, 德国)进行表征,使用氩气作为惰性保护气氛,升温速率10 K/min,温度范围为323~1373 °C。

1.3 微纳结构制备及表征

加工前先对涂层进行表面预处理,涂层经打磨抛光后分别用丙酮、无水乙醇超声清洗。实验采用

世纪镭杰明公司提供的一体式紫外激光加工设备,激光加工的具体参数如表2所示。微织构选择了点阵结构,扫描次数5、7、9次。据此制造出包括抛光表面在内的4个表面,依次命名为smooth、P1、P2、P3。利用接触角测量仪(Harke, SPCA-X3, 中国)测量室温下的静态接触角,每个样品选取5个测量点,取测量值的平均值,水滴的体积统一为5 μL。利用共聚焦显微镜(OLS4100, OLYMPUS, 日本)测量涂层的三维形貌及表面粗糙度(Ra)值,利用场发射扫描电子显微镜(SEM, ZEISS, 德国)和X射线能谱仪(EDS)表征激光照射后涂层的表面微观形貌和化学成分。

表2 激光加工参数

Table 2 Parameters of surface textures

波长/ nm	重复频率/ kHz	速度/ (mm·s ⁻¹)	脉宽/ ns	电流/ A
355	30	1000	<100	1

2 结果与讨论

2.1 粉末表征

2.1.1 微观外貌

图1为FeCrMoCBY非晶粉末的显微形貌。由图1可见,绝大多数粉末呈球形或椭球形,表面光滑,有一些小颗粒依附在大颗粒粉末上。这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,小尺寸粉末颗粒会在气体涡流的作用下悬浮在气流中,在与尺寸较大的粉末颗粒碰撞后而形成粘附结构^[18]。

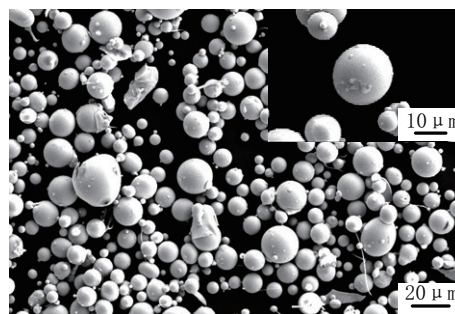


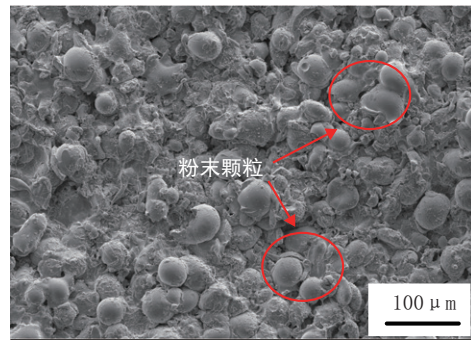
图1 FeCrMoCBY非晶粉末显微形貌

Fig.1 SEM image of FeCrMoCBY amorphous powders

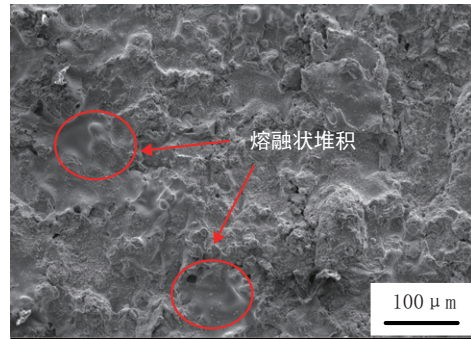
图2为FeCrMoCBY非晶合金涂层表面的微观形貌。由图2(a)可见,冷喷涂涂层表面由部分变形的粉末颗粒堆积而成,原因是冷喷涂过程中粉末颗

粒保持固态,在其运动速度超过临界速度时,颗粒与基体的界面产生绝热剪切不稳定性,从而使颗粒发生严重的塑性变形并沉积在工件表面^[19]。图2(b)为超音速火焰喷涂涂层表面形貌,可以看出涂层表面呈熔融状堆积,表面的未融颗粒较少,整体较为完整。

图3为FeCrMoCBY非晶合金涂层截面整体和局部的微观形貌。由图3(a)可看出,冷喷涂涂层无明显裂纹,与基体结合良好,涂层厚度约为900 μm 。从图3(b)中可以看到涂层内部存在一些小孔隙,原因是沉积过程中颗粒的不完全结合^[20]。在涂层与基体的结合界面发现涂层与基体相互咬合,说明涂层的沉积机理为机械沉积。利用ImageJ2x软件对涂层截面进行多次选区,并进行灰度处理,得到的涂层孔隙率约为1.3%,说明涂层结构致密。图3(c)为超音速火焰喷涂涂层,涂层呈层层堆叠状结构,属于典型的热喷涂层状结构。涂层与基体的界面清晰,涂层厚度约为180 μm 。涂层孔隙率测得约为5.3%,因 Al_2O_3 颗粒在ImageJ2x软件拟合过程中被认定为孔隙,因此实际的孔隙率 $<5.3\%$ 。主要有2个原因会导致孔隙的产生:一是层层堆叠的层状结构会产生大孔隙,二是熔融液滴因冷却收缩部分

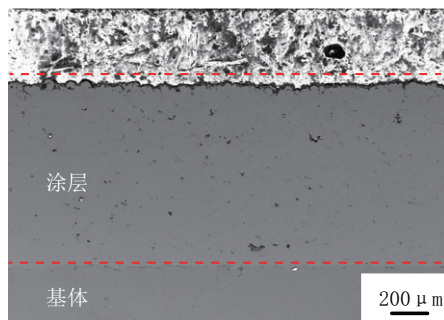


(a) CS涂层

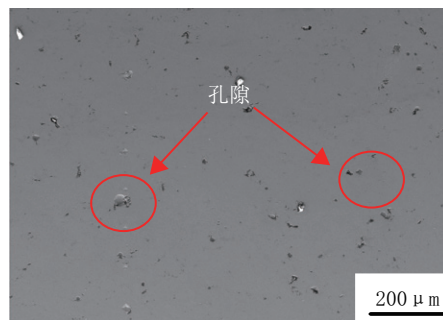


(b) HVOF涂层

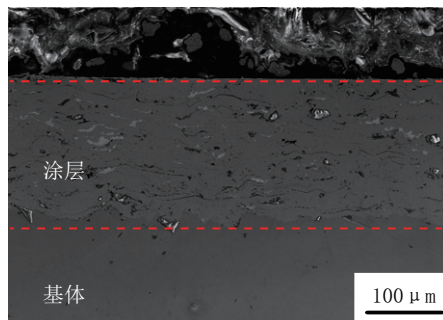
图2 FeCrMoCBY非晶合金涂层表面的微观形貌
Fig.2 SEM images of FeCrMoCBY amorphous alloy coating



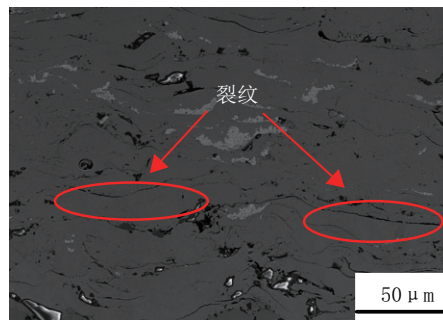
(a) CS涂层截面整体



(b) CS涂层微观形貌



(c) HVOF涂层截面整体



(d) HVOF涂层微观形貌

图3 FeCrMoCBY非晶合金涂层截面的显微形貌

Fig.3 SEM images of FeCrMoCBY amorphous alloy coating section

而使得气体未排出形成小孔隙^[21]。图4为超音速火焰喷涂涂层截面的EDS能谱分析,其验证了涂层中大量Al₂O₃未融颗粒的存在。

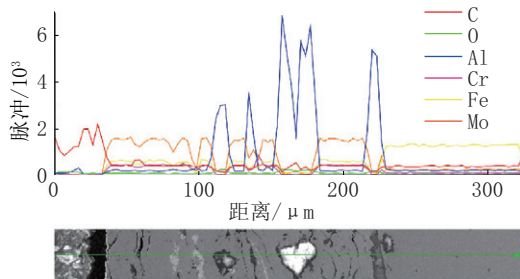


图4 HVAF涂层截面的EDS能谱图

Fig.4 EDS energy spectrum of HVAF coating section

2.1.2 微机形貌

FeCrMoCBY非晶粉末和涂层的物相组成如图5所示。分析粉末的XRD表征结果图5(a)可以发现,冷喷涂原料粉末和超音速火焰喷涂原料粉末在 $2\theta=40^\circ\sim 50^\circ$ 区域内有明显的宽包峰,冷喷涂粉末在非晶峰中还重叠着一些晶态衍射峰,说明粉末是非晶与晶体共存的复合结构。超音速火焰喷涂粉末在 $2\theta=40^\circ$ 附近存在Mo₂B、Mo₂C晶态衍射峰。从图5(b)中可以发现,冷喷涂涂层的XRD图谱中没有明显的晶态衍射峰,并利用MDI-Jade 6.0软件拟合计算后发现涂层的非晶含量约为90%,具有较高的非晶含量。超音速火焰喷涂涂层拟合计算后发现涂层的非晶含量约为85%,原因是在喷涂过程中温度过高而有部分结晶相Fe₂C、 α -Fe和Al₂O₃析出。

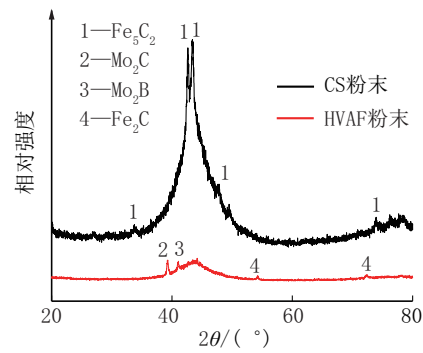
2.1.3 DTA曲线分析

图6为Fe基非晶合金涂层的DTA曲线。从图6可以看出2种技术制备的涂层均有明显的非晶放热峰,冷喷涂涂层和超音速火焰喷涂涂层晶化温度分别约为687℃和668℃,当温度高于晶化温度时涂层的非晶相会发生转变,这代表冷喷涂涂层表现出比超音速火焰喷涂涂层更好的热稳定性。

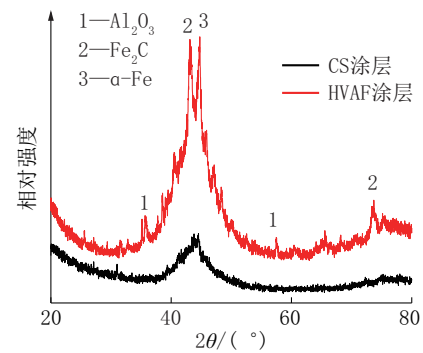
2.2 涂层的疏水性能

2.2.1 涂层润湿性表征与分析

接触角是表征材料表面润湿性的常用指标。表3为不同激光织构扫描次数下涂层表面的水接触角测量值,CS涂层和HVAF涂层在激光织构后的疏水角均有了明显的提升,扫描次数的改变导致了涂层润湿性的变化。



(a)粉末



(b)涂层

图5 FeCrMoCBY非晶粉末和涂层的XRD分析图谱
Fig.5 XRD patterns of CS FeCrMoCBY amorphous powders and coatings

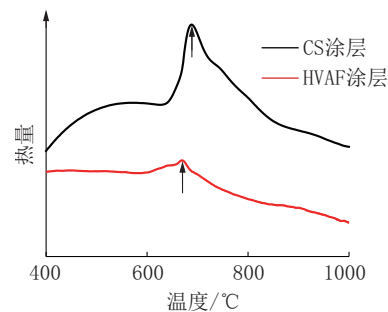


图6 FeCrMoCBY非晶合金涂层的DTA曲线
Fig.6 DTA curves of FeCrMoCBY amorphous alloy coating

表3 不同激光织构扫描次数下涂层表面的水接触角
Table 3 Water contact angle of coating surface at different numbers of laser weaving scans (°)

名称	Smooth	P1	P2	P3
CS涂层	78.6±2.0	111.9±3.7	132.5±1.4	120.0±1.6
HVAF涂层	81.5±3.4	125.1±3.8	127.7±1.2	119.2±3.8

图7为不同激光织构扫描次数与接触角的关系。从图中可以发现,Fe基非晶合金涂层在光滑的表面下是亲水的,2种喷涂技术制备的涂层接触角均接近 80° ,超音速火焰喷涂涂层表面存在较多的孔隙而表现出略高的接触角^[22]。由同型微织构的接触角与扫描次数的相互关系可知,接触角随扫描次数的增加呈先增大后减小的趋势,在扫描次数为7次时CS涂层的接触角达到 $132.5^\circ \pm 1.4^\circ$,明显提升了涂层表面的疏水性。扫描次数的增加会提高同一织构的高度,当扫描次数较少时,织构的深度不足以困住足够多的空气以支撑液滴,因此有部分液滴会与粗糙表面充分接触从而接触角较小。而在扫描次数从7次增加到9次时,接触角变化不大。但随着扫描次数的增加,涂层表面会发生严重烧蚀,产生大量的裂纹,织构加工质量下降,因此激光扫描次数为7是最佳参数。

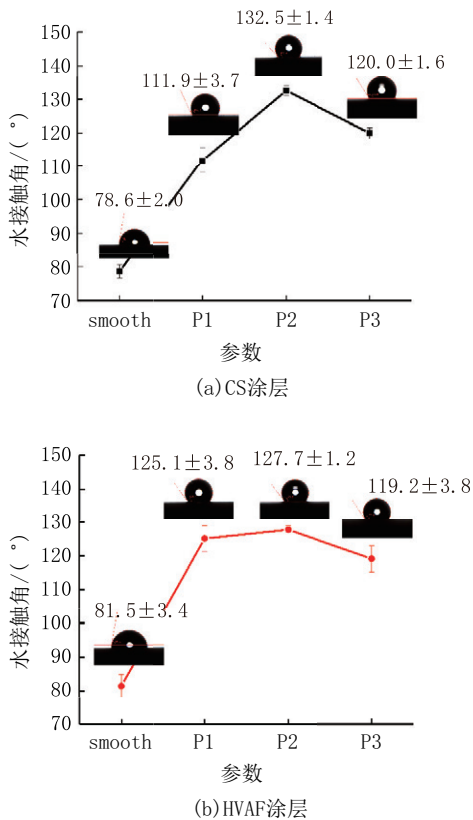


图7 不同激光织构扫描次数与接触角的关系
Fig.7 Relationship between contact angles and scan numbers by laser

2.2.2 润湿机理分析

材料表面润湿性的2个最关键因素是合适的表面特征和较低的表面能。目前已建立2种适用于粗糙表面的不同湿润模型。在Wenzel模型中,表面粗糙度的增加会使亲水表面变得更加亲水,使疏水表面变得更加疏水^[23]。而Cassie-Baxter模型中,液滴处于未将沟槽完全填充的状态,空气被困在液滴与粗糙表面之间形成“气垫”,形成固-液-气三相复合接触界面^[24]。“点阵”结构的形成方式是激光加工的定点辐射。点阵的大小由激光填充控制,其深度从中心向边缘递减。

图8为CS涂层扫描次数为7次时的三维形貌图,并测得其表面粗糙度 R_a 为 $8.254 \mu\text{m}$ 。涂层表面粗糙度的增加使得涂层变得更加疏水。

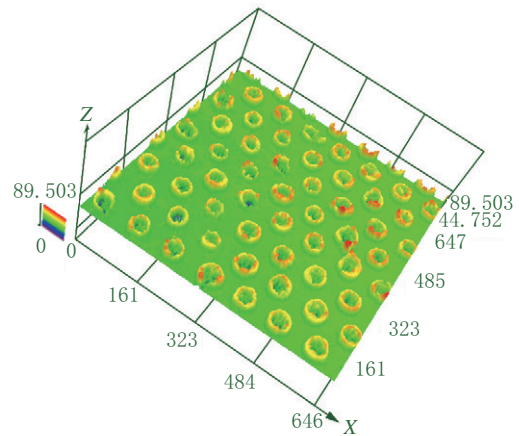


图8 CS涂层激光微织构三维形貌

Fig.8 3D morphology of CS coating by laser weaving

从图9(a)可以发现,激光辐射后的涂层表面出现均匀分布的点阵微织构,可以和未织构的区域结构相区分。在激光加工过程中,材料通过熔化和烧蚀过程被去除,形成需要周期性的织构图案。由于气化效应,激光加工后的涂层表面形成了具有明显孔洞和凸起的理想分层结构^[25]。图9(c)为加工后的涂层表面高倍形貌图,可以明显看出,激光处理后的涂层表面呈现出典型的多模态粗糙结构,表面有大量微/纳米尺度的凝结物和乳头状物,并且可清晰地识别出球状的颗粒和团聚体,不规则的聚集物随机地堆积在表面,微纳复合结构的形成提升了疏水性^[26]。同时,凸起物的存在提高了表面的气密性,并可困住更多的空气,有利于接触角的增加。

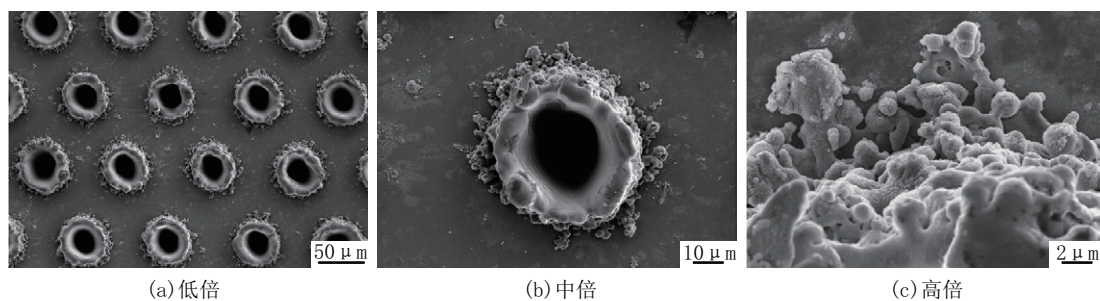


图9 CS涂层激光微织构表面形貌

Fig.9 SEM image of CS coating by laser weaving

图10为涂层表面的EDS能谱。分析发现激光织构后的涂层表面出现了较为明显的O元素峰,在熔融物上的O元素含量明显多于未织构表面,说明激光烧蚀过程导致涂层表面发生了氧化。同时C元素含量比例相对于原始涂层有所增加。激光织构后涂层表面会产生不同氧化,Fe元素会因此形成活

性铁氧化物,放置在大气环境下,会与空气中的 CO_2 发生氧化还原反应,从而导致有机碳材料的沉淀。表面沉积的碳会屏蔽表面从而提高接触角^[27]。因此,激光织构表面接触角的显著增加原因是由于表面结构和化学成分的综合作用。

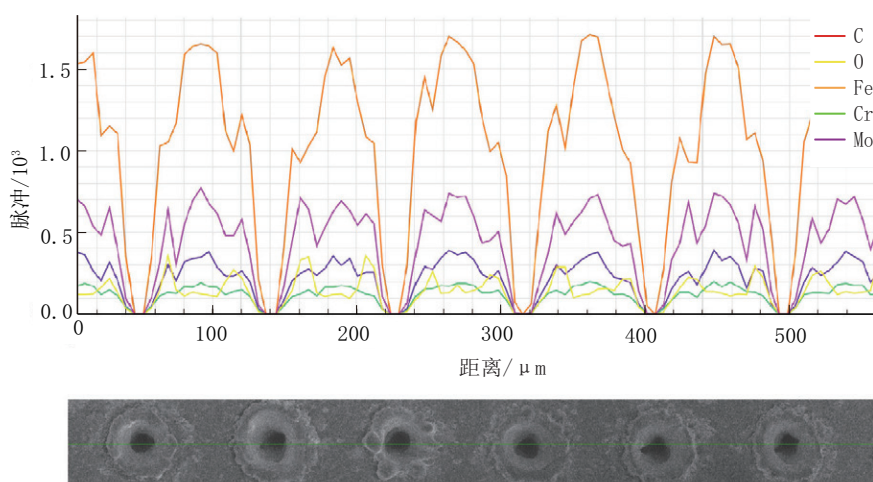


图10 CS涂层激光微织构表面的EDS能谱图

Fig.10 EDS energy spectrum of CS coating by laser weaving

3 结论

(1)相对于超音速火焰喷涂,冷喷涂制备的Fe-CrMoCBY非晶合金涂层的非晶含量更高,约为90%,涂层更加致密,孔隙率约为1.3%,具有更好的热稳定性。

(2)激光织构后,2种涂层的接触角都显著增加,扫描次数对疏水性影响较大,在扫描次数为7次时疏水角最大,具有较好的疏水性。

(3)同样的激光织构参数下2种涂层的接触角相近但存在差异,主体上是由于表面结构和化学成

分的综合作用,点阵织构表面有机碳材料的吸附提升了疏水性。

参考文献(References):

- [1] 李梦,苏义脑,孙友宏,等.高胎体仿生异型齿孕镶金刚石钻头[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(5):1540-1545.
LI Meng, SU Yinao, SUN Youhong, et al. High matrix bionic abnormal shape impregnated diamond bit[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46 (5) : 1540-1545.
- [2] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业70年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.
WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The devel-

- opment and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(9):1-31.
- [3] 王彦祺,龙志平.隆页2HF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.
WANG Yanqi, LONG Zhiping. Research and practice on drilling technology of Horizontal Shale Gas Well Longye 2HF[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018,45(7):30-33.
- [4] 孙举,李晓岚,刘明华,等.涪陵页岩气水平井油基钻井液技术[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2016,43(7):14-18.
SUN Ju, LI Xiaolan, LIU Minghua, et al. Oil-based drilling fluids used for Fuling horizontal shale gas well[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016,43(7):14-18.
- [5] 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.
LIU Baolin, PENG Peng, GAO Deli, et al. Research progress of wear resistant materials in oil and gas drilling technology[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2009,28(3):553-557.
- [6] 周永宽,康嘉杰,岳文,等.超音速火焰喷涂金属陶瓷复合涂层的耐磨性能研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(4):72-79.
ZHOU Yongkuan, KANG Jiajie, YUE Wen, et al. Study on wear resistance of HVOF metal ceramic composite coating[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020,47(4):72-79.
- [7] 袁青松,汪超,刘艳杰,等.中牟页岩气区块泥页岩井壁稳定影响因素分析及技术对策[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2018,45(11):12-18.
YUAN Qingsong, WANG Chao, LIU Yanjie, et al. Analysis on the influence factors to mud shale borehole stability in Zhongmu Shale Gas Block and the technical countermeasures[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018,45(11):12-18.
- [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.
XU Binshi, ZHU Shaohua, LIU Shican, et al. Theories and technologies on surface engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [9] 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.
- [10] Su J, Kang J J, Yue W, et al. Review of cold spraying and its use for metallic glass coatings[J]. *Materials Science and Technology*, 2019,35(16):1908-1923.
- [11] Williams E, Lavery N. Laser processing of bulk metallic glass: A review [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017,247:73-91.
- [12] Zhang L, Huang H. Micro machining of bulk metallic glasses: A review[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019,100(1-4):637-661.
- [13] Zhang C, Wu Y, Liu L. Robust hydrophobic Fe-based amorphous coating by thermal spraying [J]. *Applied Physics Letters*, 2012,101(12).
- [14] Qiao J H, Jin X, Qin J H, et al. A super-hard superhydrophobic Fe-based amorphous alloy coating [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018,334:286-291.
- [15] Fornell J, Pellicer E, Garcia-Lecina E, et al. Structural and mechanical modifications induced on $\text{Cu}_{47.5}\text{Zr}_{47.5}\text{Al}_5$ metallic glass by surface laser treatments [J]. *Applied Surface Science*, 2014,290:188-193.
- [16] Jiao Y, Brousseau E, Shen X J, et al. Investigations in the fabrication of surface patterns for wettability modification on a Zr-based bulk metallic glass by nanosecond laser surface texturing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020,283.
- [17] Huang H, Yan J W. Surface patterning of Zr-based metallic glass by laser irradiation induced selective thermoplastic extrusion in nitrogen gas [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017,27(7).
- [18] Gao C F, Xiao Z Y, Zou H P, et al. Characterization of spherical $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ powder produced by double-nozzle gas atomization using different parameters [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019,29(2):374-384.
- [19] Rokni M R, Nutt S R, Widener C A, et al. Review of relationship between particle deformation, coating microstructure, and properties in high-pressure cold spray [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017,26(6):1308-1355.
- [20] Piao Z Y, Zhou Z Y, Xu J, et al. Use of X-ray computed tomography to investigate rolling contact cracks in plasma sprayed Fe-Cr-B-Si coating [J]. *Tribology Letters*, 2019,67(1).
- [21] Zhang S D, Zhang W L, Wang S G, et al. Characterisation of three-dimensional porosity in an Fe-based amorphous coating and its correlation with corrosion behavior [J]. *Corrosion Science*, 2015,93:211-221.
- [22] Zhang C, Guo R Q, Yang Y, et al. Influence of the size of spraying powders on the microstructure and corrosion resistance of Fe-based amorphous coating [J]. *Electrochimica Acta*, 2013,56(18):6380-6388.
- [23] Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1936,28:988-994.
- [24] Cassie A, Baxter S. Wettability of porous surfaces [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944,40:546-551.
- [25] Yang Z R, Zhu C C, Zheng N, et al. Superhydrophobic surface preparation and wettability transition of titanium alloy with micro/nano hierarchical texture [J]. *Materials*, 2020,11(11):2210.
- [26] Jung L, Joon L. Multiphase static droplet simulations in hierarchically structured super-hydrophobic surfaces [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016,30(8):3741-3747.
- [27] Li Z, Zheng Y, Zhao J, et al. Wettability of atmospheric plasma sprayed Fe, Ni, Cr and their mixture coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2012,21(2):255-262.

(编辑 李艺)