

## 纳秒激光制备 Fe 基非晶合金涂层表面织构的疏水性研究

许俊杰<sup>1,2</sup>, 康嘉杰<sup>1,3,4,✉</sup>, 岳文<sup>1,3</sup>, 周永宽<sup>1</sup>, 朱丽娜<sup>1,3</sup>, 付志强<sup>1,3</sup>, 余丁顺<sup>1,3</sup>

1 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083

2 中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095

3 中国地质大学(北京)郑州研究院, 郑州 451283

4 浙江清华柔性电子技术研究院, 浙江 嘉兴 314000

利用冷喷涂技术在 35CrMo 钢基体上制备了 Fe-Cr-Mo-C-B-Y 体系非晶涂层, 通过纳秒脉冲激光构造了规则排布的乳突、点阵和凹槽结构。结果表明: 涂层的表面特征随激光织构的结构及间距的变化而变化。高通量脉冲激光作用下, 涂层表面沿激光路径产生更大的凸起物, 同时在凸起物上覆盖着由熔融粒子飞溅形成的颗粒物。织构表面同时存在织构、颗粒物、抛光表面三种结构。经过激光加工处理后的涂层表面具有优异的疏水性, 与去离子水和钻井液的接触角分别提升至  $(151.6 \pm 0.3)^\circ$  和  $(145.9 \pm 0.4)^\circ$ 。随着点阵及凹槽织构间距的增加, 涂层表面的润湿性从超疏水转向疏水, 在间距最大时转变为亲水; 乳突织构的间距变化对疏水性影响较小, 即使间距增大到  $300 \mu\text{m}$  时涂层表面依旧能保持疏水性; 同时涂层表面表现出疏水稳定性及低粘附性。

关键词 冷喷涂 Fe-Cr-Mo-C-B-Y 非晶涂层 表面织构 疏水性

中图分类号: TG142 文献标识码: A

## Study on Hydrophobicity of Surface Texture on Fe-based Amorphous Alloy Coating Treated by Nanosecond Laser

XU Junjie<sup>1,2</sup>, KANG Jiajie<sup>1,3,4,✉</sup>, YUE Wen<sup>1,3</sup>, ZHOU Yongkuan<sup>1</sup>, ZHU Lina<sup>1,3</sup>, FU Zhiqiang<sup>1,3</sup>, SHE Dingshun<sup>1,3</sup>

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

2 Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

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

4 Institute of Flexible Electronics Technology of Tsinghua, Jiaying 314000, Zhejiang, China

Fe-Cr-Mo-C-B-Y amorphous coatings were prepared on 35CrMo steel by cold spraying (CS) technique. The mastoid-like, dot and groove surface texture structures with regular arrangement were constructed by nanosecond laser. The result show that the surface characteristics of the coating vary with the laser texture structure and spacing. Under the action of high flux pulsed laser, the coating surface produces larger protrusions along the laser path, and the protrusions are covered with particles formed by the splashing structure of molten particles. Texture surface has texture, particle and polished surface at the same time. Besides, the coating surface after laser processing has excellent hydrophobicity, and the contact angle with deionized water and drilling fluid increase to  $(151.6 \pm 0.3)^\circ$  and  $(145.9 \pm 0.4)^\circ$  respectively. With the increase of lattice and groove texture spacing, the wettability changes from superhydrophobic to hydrophobic, and becomes hydrophilic when the spacing is maximum. The spacing change of mastoid-like texture has little effect on hydrophobicity, and even if the spacing increases to  $300 \mu\text{m}$ , the coating surface can still keep hydrophobic. At the same time, the coating surface showed hydrophobic stability and low adhesion.

Key words cold spray, Fe-Cr-Mo-C-B-Y amorphous coating, surface texture, hydrophobicity

## 0 引言

非晶合金常被用于航空航天设备、生物医学设备、精密设备等领域<sup>[1-2]</sup>。自 1960 年被发现以来<sup>[3]</sup>, 非晶合金一直是尖端的研究之一。与传统的晶体合金相比, 非晶态合金由于没有晶界、位错等晶体缺陷, 表现出优越的物理、化学和力学性能, 如超高强度、独特的延伸率和柔韧性、优异的耐腐蚀性和耐磨性等。然而非晶合金有限的玻璃成形能力 (GFA) 和固有的脆性严重限制了其工程应用。但通过热喷涂技术 (包括 HVOF<sup>[4]</sup>、HVAF<sup>[5-6]</sup>、等离子喷涂<sup>[7]</sup>、爆炸喷涂<sup>[8]</sup> 和冷喷涂<sup>[9]</sup>) 制备非晶涂层可以克服上述问题, 此类技术成为材料表面防护的有效途径。

非晶合金涂层由于具有优良的耐蚀和耐磨综合性能, 在地质钻探装备的钻杆、钻铤、钻头钢体等易损关键部件的表面防护领域得到了关注与应用, 为了解决上述部件在钻井液

中的防泥包问题, 需要赋予非晶合金强化层以良好的表面疏水性。受自然界的启发, 目前已研究出水接触角 (WCA) 大于  $150^\circ$ 、水滑动角 (WSA) 小于  $10^\circ$  的超疏水表面<sup>[10]</sup>, 并已广泛应用于自洁、防腐、防水、生物医学仪器、海洋防污等领域<sup>[11-12]</sup>。例如, 在聚合物、玻璃、碳纳米管、硅纳米线等基材上可以制造出超疏水表面, 但存在硬度低、易侵蚀、易破坏等问题<sup>[13-16]</sup>。另外为了获得超疏水表面, 通常需要进行化学修饰来降低表面自由能。低表面自由能改性剂包括各种硅烷偶联剂、硬脂酸和氟硅烷<sup>[17]</sup>等, 但由于这些低表面能改性剂存在成本较高、稳定性较差等缺点, 限制了其在实际生产中的广泛应用。

对于非晶合金涂层来说, 非晶导热机制依赖于分子的碰撞, 晶体导热机制是晶格的振动和电子的漂移, 材料的温度和压力直接反映材料分子的密度和热运动, 粒子之间的结晶态比非晶态更接近。因此, 非晶合金的热导率较低, 激

基金项目: 国家自然科学基金 (52175196, 41872183); 装备发展部重点项目 (61409230614)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (52175196, 41872183) and the Pre-research Program in National 14th Five-Year Plan (61409230614).

✉ kangjiajie@cugb.edu.cn

21120134-1

DOI: 10.11896/cldb.21120134

Copyright © 2022 by Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光刻蚀非晶合金表面容易形成微纳米结构<sup>[18]</sup>。迄今为止, 大多数报道的工作都依赖于成本高、结构复杂的超快(Femto/Pico-second)激光器<sup>[19-20]</sup>。然而, 对于工业应用来说, 纳秒激光成本低, 并且处理速度更快, 在工程应用领域具有广阔的前景。

本工作采用冷喷涂(Cold spray, CS)技术在35CrMo钢基体上制备了Fe-Cr-Mo-C-B-Y体系非晶合金涂层, 并通过纳秒脉冲激光构造了规则排布的点阵、凹槽和乳突结构。对涂层的微观形貌进行表征, 并测量不同织构表面的静态接触角。通过改变织构形态及尺寸, 分别研究Fe-Cr-Mo-C-B-Y非晶合金涂层与水 and 钻井液的疏水性能, 并对其疏水机理进行了分析。

## 1 实验

### 1.1 试验材料与制备方法

本工作采用的铁基非晶涂层的制备方法及性能在课题组前期论文中已经报道<sup>[21]</sup>。实验中所采用的是加工中心LASER S 1000 U纳秒脉冲激光设备(Laser surface Texture, LST)。激光织构前, 需对涂层表面进行抛光、清洗和干燥处理。采用不同目数(400目、800目、1 200目、1 500目、2 000目)的SiC砂纸依次打磨, 最后通过抛光布添加0.5 μm金刚石抛光膏抛光至镜面, 在无水乙醇中进行超声处理以清除表面污渍。

通过纳秒脉冲光纤激光器(Ytterbium)的模型软件3D CAD设计规则排布的乳突、点阵和凹槽织构, 且设计的乳突、点阵、凹槽织构的直径均为100 μm, 各结构中心间距分别设置

表2 钻井液成分(质量分数, %)

Table 2 Drilling fluid composition (mass fraction, %)

Component	Sodium base slurry	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	KCl	XC	PAC-LV	XY-27	PAC-HV
Content	1—3	3—5	5—10	0.1—0.3	0.3—0.5	0.3—0.5	0.4—0.6

## 2 结果与分析

### 2.1 表面微观结构

如图1所示, 用纳秒激光制造的乳突织构(Mastoid-like texture)、点阵织构(Dot texture)和凹槽织构(Groove texture)表现出双尺度图案, 即由烧蚀产生的周期性微凹和由再沉积的熔融材料导致的周期性微凸起。

图2显示了不同间距点阵织构的二维形貌和横截面轮廓图, 随着织构间距的增加, 织构的深度及尺寸均有所减小, 深度从220 μm减小至150 μm。且当织构间距为300 μm时, 织构表面表现出类似抛光表面的平坦光滑的特征, 其原因是当激光织构的间距增大到300 μm时, 激光作用于涂层表面的热效应会被缓和, 从而导致表面织构的尺寸减小。激光加工点阵织构周围的堆积物约10 μm, 增加了织构表面的粗糙度。

由于织构之间的光滑表面随着织构间距的增加而扩大, 织构表面的粗糙度也会随间距的增大而减小(间距最大时依旧是光滑表面的几倍), 如图3所示。表面粗糙度是决定固体表面润湿性的关键, 粗糙度的变化会对表面疏水性产生较大的影响<sup>[22]</sup>。

图4为激光织构后CS涂层表面的微观形貌图。从图4

为150 μm、200 μm、300 μm。激光织构的参数如表1所示。

表1 激光加工参数

Table 1 Laser processing parameters

Parameter	Value
Pulse width/ns	100
Rated frequency/kHz	85
Pulse energy/mJ	0.5
Mean power/kW	37.5
Spacing time/μs	13.33
Spacing distance/μm	20

### 1.2 表征方法

采用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS, Germany)和X射线能谱分析仪(EDS, Oxford, England)来观察和分析涂层的微观形貌和元素种类、分布信息。扫描电镜使用SE2信号通道、15 kV工作电压。采用三维白光干涉表面形貌仪(NexView, ZYGO, America)测量涂层的三维形貌。

测试介质选用去离子水和钻井液, 采用角接触测量仪(OCA25, Dataphysics, Germany)分别测量其与涂层表面的静态接触角。钻井液配方选用储层段低、伤害低的摩阻钻井液体系配方, 钻井液成分如表2所示。每个样品随机选取五个位置, 用针管将一滴5 μL的液滴滴在样品表面, 待液滴稳定后, 测量其接触角, 以五个位置的平均值作为静态接触角的实际值。采用高速摄像机(Photron FASTCAM)记录水滴滴落的过程, 验证织构表面疏水能力的持久性。

中可以看出, 激光处理后的涂层表面分别表现出周期性的点阵、凹槽和乳突图案。点阵和凹槽织构内壁较为光滑, 周围围绕着一层粗糙的层状结构。这是由于纳秒范围内的激光图案化是一个热过程, 高通量脉冲激光在CS涂层表面扫描时, 短时间内释放出巨大能量, 涂层表面的瞬时高温使得部分涂层被蒸发、熔化并向外溢出, 不断地堆积在激光扫描以外的区域。脉冲持续时间的延长使得熔融物的体积增加, 从而产生沿激光路径更大的凸起物, 同时在凸起物上覆盖着由熔融粒子飞溅结构形成的颗粒物。织构表面同时存在织构、颗粒物、抛光表面三层次结构<sup>[23]</sup>。

### 2.2 疏水性能

图5显示了37.5 W激光功率下, 去离子水和钻井液在CS涂层不同激光织构后的静态接触角(S1、S2和S3分别表示间距D=150 μm、200 μm和300 μm)。结果发现, 激光织构后的抛光样品在不同织构下具有不同的润湿性。钻井液作为一种含有大量降滤失剂的粘性悬浮液, 具有较大的表面张力, 同时其中的溶质增加了钻井液的重力, 因此与去离子水测得的接触角相比, 润湿溶液为钻井液时的接触角较小<sup>[24]</sup>。Fe基非晶合金涂层在光滑的表面下是亲水的<sup>[25]</sup>, 激光织构后, CS涂层表面与去离子水的接触角(DWCA)和与钻井液的接触角(DFCA)分别提升至(151.6±0.3)°和(145.9±0.4)°,



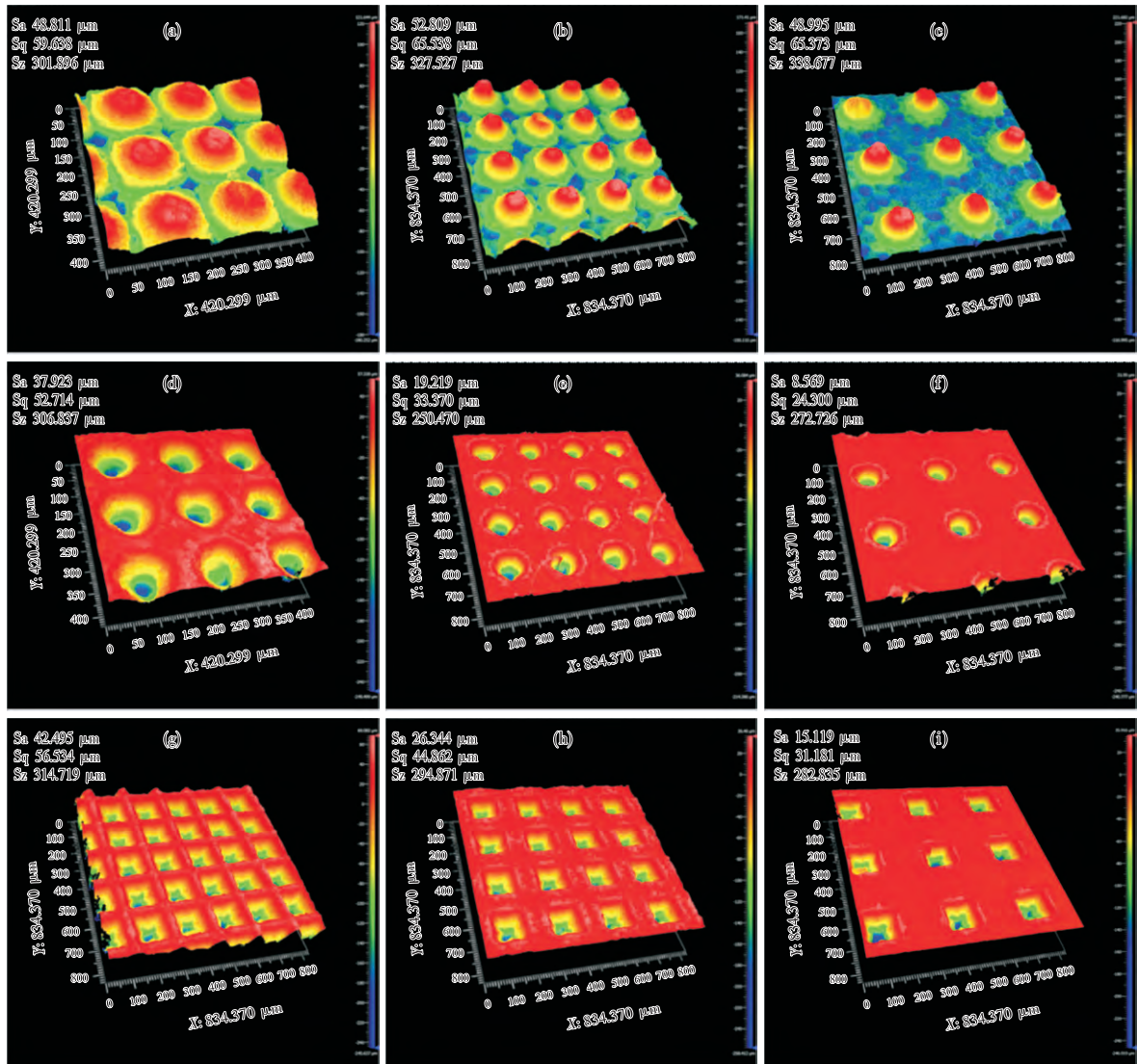


图 1 不同间距和图案设计的激光加工表面的三维形貌: (a—c) 乳突结构, 间距分别为 150  $\mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}$  和 300  $\mu\text{m}$ ; (d—f) 点阵结构, 间距分别为 150  $\mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}$  和 300  $\mu\text{m}$

Fig. 1 Three dimensional morphologies of laser machined surfaces with different spacing and pattern design: (a—c) mastoid-like texture with spacing of 150  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  and 300  $\mu\text{m}$ ; (d—f) dot texture with spacing of 150  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  and 300  $\mu\text{m}$ ; (g—i) groove texture with spacing of 150  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  and 300  $\mu\text{m}$

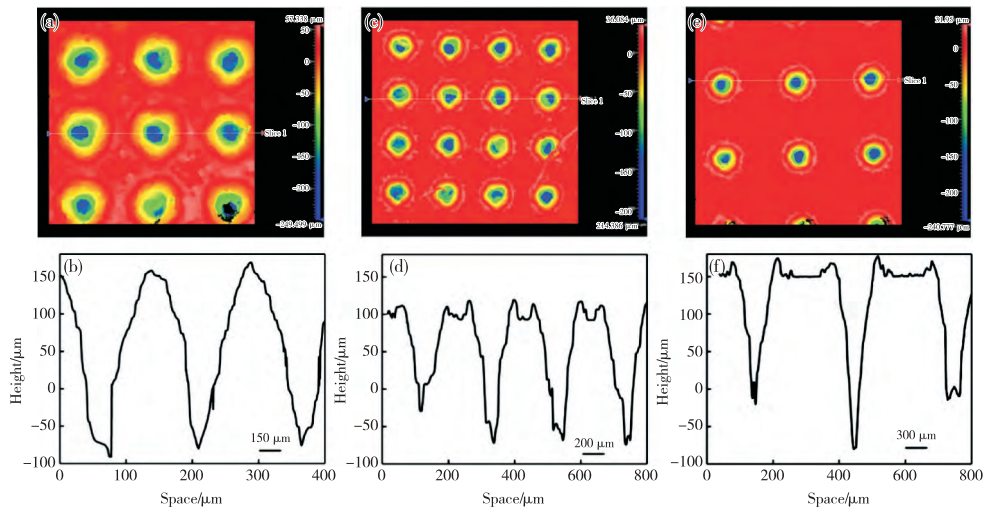


图 2 不同间距点阵结构的二维形貌和横截面轮廓图: (a, b) 150  $\mu\text{m}$ ; (c, d) 200  $\mu\text{m}$ ; (e, f) 300  $\mu\text{m}$

Fig. 2 Two dimensional morphologies and cross-sectional profile of dot texture with different spacing: (a, b) 150  $\mu\text{m}$ ; (c, d) 200  $\mu\text{m}$ ; (e, f) 300  $\mu\text{m}$

且随着点阵及凹槽结构间距的增加, 润湿性从超疏水转向疏水, 在间距最大时转变为亲水。对于乳突结构而言, 使用去离子水和钻井液时的接触角均大于 145°, 涂层表面具有优异的疏水性。

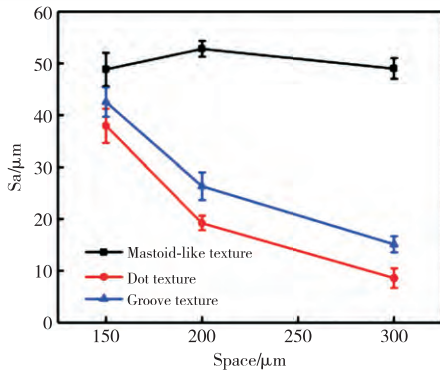


图3 CS涂层粗糙度与结构间距的关系  
Fig.3 Relationship between CS coating roughness and texture spacing

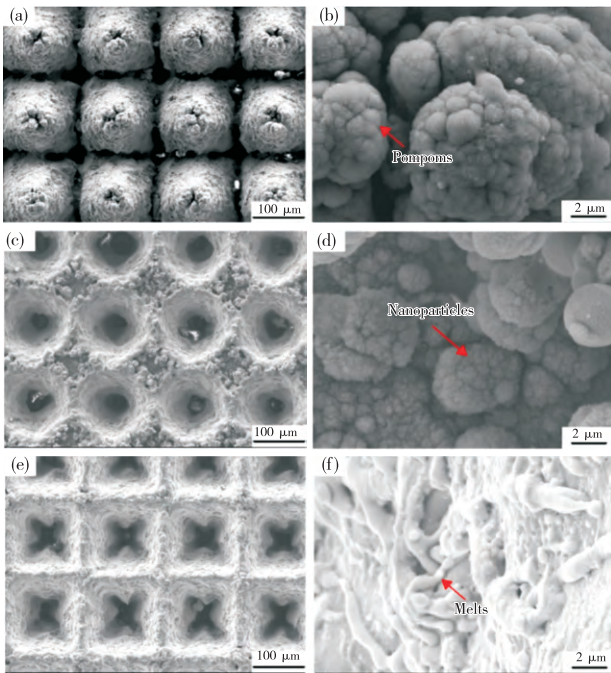


图4  $D=150\ \mu\text{m}$  的 CS 涂层结构的 SEM 表面形貌: (a, b) 乳突结构; (c, d) 点阵结构; (e, f) 凹槽结构  
Fig.4 SEM surface morphologies of CS coating texture with spacing of  $150\ \mu\text{m}$ : (a, b) mastoid-like texture; (c, d) dot texture; (e, f) groove texture

涂层表面的疏水稳定性至关重要,因此对间距为  $200\ \mu\text{m}$  的乳突结构进行了稳定性测试。图6显示了  $0\sim 60\ \text{min}$  内冷

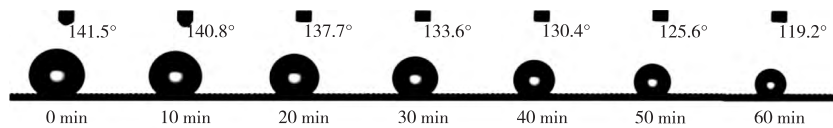


图6 CS涂层乳突结构表面疏水角的变化  
Fig.6 Change of hydrophobic angle on mastoid-like texture surface of CS coating

除了测量激光烧蚀表面的接触角之外,还通过使水滴从一定高度自由下落到物体表面来进行水滴弹跳实验,以进一

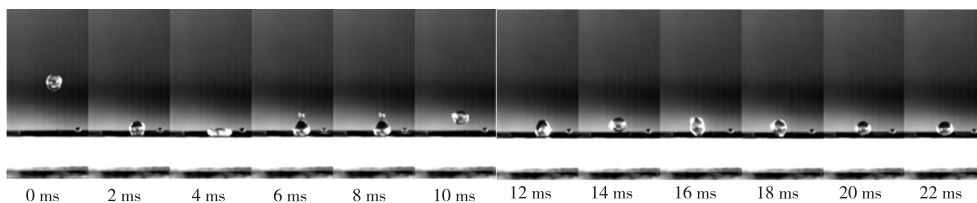


图7 水滴在间距为  $200\ \mu\text{m}$  的 CS 涂层乳突结构表面的反弹行为  
Fig.7 Rebound behavior of water droplets on mastoid-like texture surface of CS coating with spacing of  $200\ \mu\text{m}$

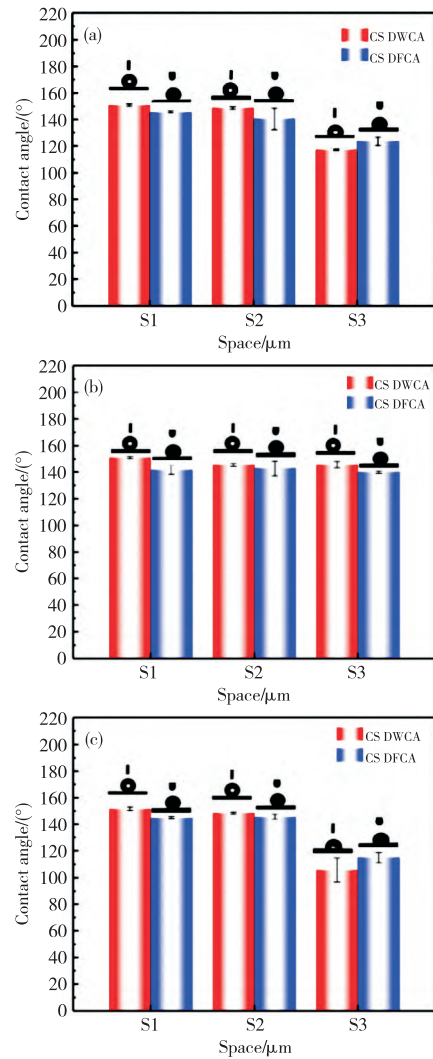


图5 去离子水和钻井液在 CS 涂层表面不同激光结构后的静态接触角: (a) 乳突结构; (b) 点阵结构; (c) 凹槽结构  
Fig.5 Static contact angle of deionized water and drilling fluid after different laser textures on CS coating surface: (a) mastoid-like texture; (b) dot texture; (c) groove texture

步表征超疏水表面。图7显示了水滴在间距为  $200\ \mu\text{m}$  的乳突结构表面的反弹行为。结果表明,水滴可以从结构表面反



弹,表现出低黏附性。

### 2.3 疏水机理

织构的覆盖率因具有不同的间距和图案设计表现出较大差异<sup>[23]</sup>。式(1)一式(3)分别为乳突织构、点阵织构和凹槽织构的覆盖率计算公式,计算结果如表 3 所示。

$$R = 1 - N^2 r^2 \pi / l^2 \quad (1)$$

$$R = \frac{N^2 r^2 \pi}{l^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{N^2 d^2}{l^2} \quad (3)$$

式中: $R$  为织构的覆盖率; $N$  为织构个数; $r$  为织构半径/边长, $\mu\text{m}$ ; $l$  为表面边长, $\mu\text{m}$ 。

表 3 不同织构(乳突、点阵和凹槽)的覆盖率与接触角

Table 3 Coverage and contact angle of different textures (mastoid-like, dot and groove)

Texture type		$D=150 \mu\text{m}$	$D=200 \mu\text{m}$	$D=300 \mu\text{m}$
Mastoid-like texture	$R$	0.804	0.913	0.951
	DWCA of CS coating/ $^\circ$	151.1 $\pm$ 0.3	145.6 $\pm$ 1.1	145.7 $\pm$ 2.5
	DFCA of CS coating/ $^\circ$	141.5 $\pm$ 3.3	142.9 $\pm$ 5.6	139.8 $\pm$ 0.8
Dot texture	$R$	0.196	0.087	0.049
	DWCA of CS coating/ $^\circ$	150.9 $\pm$ 0.8	148.9 $\pm$ 0.9	117.3 $\pm$ 0.4
	DFCA of CS coating/ $^\circ$	145.6 $\pm$ 0.7	140.5 $\pm$ 8.2	123.5 $\pm$ 3.2
Groove texture	$R$	0.25	0.11	0.0625
	DWCA of CS coating/ $^\circ$	151.6 $\pm$ 0.3	148.5 $\pm$ 0.7	105.7 $\pm$ 8.9
	DFCA of CS coating/ $^\circ$	144.9 $\pm$ 0.8	145.7 $\pm$ 1.8	114.9 $\pm$ 3.8

从表 3 中可以看出,对于点阵、凹槽织构而言,接触角随织构覆盖率的降低而急剧减小,而覆盖率的降低对乳突织构的接触角影响较小。同时去离子水的接触角和钻井液的接触角基本与覆盖率  $R$  成正比。

材料表面润湿性优异的两个关键因素是合适的表面特征和较低的表面能。目前已建立两种适用于粗糙表面的不同湿润模型:Wenzel 模型和 Cassie-Baxter 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<sup>[26]</sup>。喷涂涂层表面未经激光织构处理时,表面和水填充结构上只会出现一些波纹,如图 8a 所示。当抛光表面进行激光织构处理后,表面出现粗糙结构,因此水可以部分进入结构,如图所示 8b 所示,此时的过渡态可以称为 Cassie-Wenzel 状态。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。当激光织构间距为  $150 \mu\text{m}$  时,织构涂层表面呈现出典型的多模态粗糙结构并覆盖有一层金属氧化物,在液滴与粗糙表面之间形成了复合界面,并且在液滴与表面之间存在小气泡。空气的存在减小了固液接触面积,有利于接触角的增加,如图 8c 所示,可以称为 Cassie 状态<sup>[27]</sup>。Cassie-Baxter 模型公式如下:

$$\cos\theta_c = f_1 \cos\theta - f_2 \quad (4)$$

式中: $\theta_c$  为液滴在粗糙表面上的接触角( $^\circ$ ); $\theta$  为液滴在同种

材料的理想表面上的接触角( $^\circ$ ); $f_1$ 、 $f_2$  分别为固-液接触面和气-液接触面在复合接触面中所占的比例,即  $f_1 + f_2 = 1$ 。将通过覆盖率与接触角公式计算得到的数值代入 Cassie-Baxter 模型公式,可知间距为  $150 \mu\text{m}$  时,固液接触面积最小,此时织构表面的疏水性最好。

### 3 结论

(1) 涂层表面经激光织构处理后与去离子水和钻井液的接触角分别增加到  $(151.6 \pm 0.3)^\circ$  和  $(145.9 \pm 0.4)^\circ$ 。同种织构,间距越小,水接触角越大。其中乳突织构的水接触角均大于  $145^\circ$ ,涂层表面表现出了优异的疏水性能。

(2) 涂层表面经激光织构后呈现出典型的多模态粗糙结构,微-纳复合结构的形成可以增大接触角,界面间存储的空气使织构涂层具有较好的疏水稳定性和低黏附性。

(3) 通过调节激光织构参数可以在涂层表面形成不同的微纳结构,随着织构间距的减小,织构表面由 Cassie-Wenzel 状态转化为 Cassie 状态。

### 参考文献

- Korkmaz S, Kariper I A. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, 527, 119753.
- Li N, Chen W, Liu L. *JOM*, 2016, 68, 1246.
- Klement W K, Willens R H, Duwez P. *Nature*, 1960, 187, 869.
- Guo Y, Koga G Y, Jr A M J, et al. *Materials & Design*, 2016, 111, 608.
- Luo Q, Sun J Y, Wu X Y, et al. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 334, 253.
- Huang F, Kang J J, Yue W, et al. *Materials Reports A: Review Papers*, 2018, 32(11), 3789 (in Chinese).  
黄飞, 康嘉杰, 岳文, 等. *材料导报:综述篇*, 2018, 32(11), 3789.
- Kumar A, Nayak S K, Sarkar K, et al. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 397, 126058.
- Xie L, Xiong X, Zeng Y, et al. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 366, 146.
- Su J, Kang J J, Yue W, et al. *Materials Science and Technology*, 2019, 35(8), 1.
- Roach P, Shirtcliffe N J, Newton M I. *Soft Matter*, 2008, 4, 224.
- Feng L, Li S H, Li Y S, et al. *Advanced Materials*, 2002, 14, 1857.

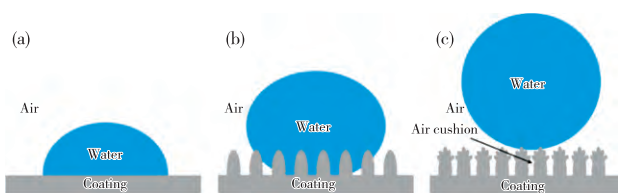


图 8 涂层表面处理前后的状态模型:(a) Wenzel 状态;(b) Cassie-Wenzel 状态;(c) Cassie 状态

Fig. 8 State model before and after coating surface treatment: (a) Wenzel state; (b) Cassie-Wenzel state; (c) Cassie state

- 12 Zheng Y M, Gao X F, Jiang L. *Soft Matter*, 2007, 3, 178.
- 13 Liu F J, Wang L, Su Q, et al. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 131, 16948.
- 14 Xu M, Feng Y, Li Z L, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 781, 1175.
- 15 Li Z Z, Wang B, Qin X M, et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6, 13747.
- 16 Choi C H, Ko D H, Park B, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 358, 1594.
- 17 Li H F, Wang Y B, Chen Y, et al. *Materials Letters*, 2010, 64, 1462.
- 18 Williams E, Lavery N. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247, 73.
- 19 Luo X, Liu W J, Zhang H J, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15), 146 (in Chinese).  
罗晓, 刘伟建, 张红军, 等. *中国激光*, 2021, 48(15), 146.
- 20 Bai X, Chen F. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1), 218 (in Chinese).  
白雪, 陈烽. *光学学报*, 2021, 41(1), 218.
- 21 Xu J J, Kang J J, Yue W, et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, 573, 121136.
- 22 Pan R, Zhang H J, Zhong M L. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2), 121 (in Chinese).  
潘瑞, 张红军, 钟敏霖. *中国激光*, 2021, 48(2), 121.
- 23 Li J, Zhao S C, Du F, et al. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(5), 86 (in Chinese).  
李晶, 赵世才, 杜锋, 等. *材料工程*, 2018, 46(5), 86.
- 24 Qiao J, Zhu L N, Yue W, et al. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 334, 429.
- 25 Xu J J, Su J, Kang J J, et al. *Drilling Engineering*, 2021, 48(4), 21 (in Chinese).  
许骏杰, 苏娟, 康嘉杰. *钻探工程*, 2021, 48(4), 21.
- 26 Wenzel R N, Robert N. *Transactions of the Faraday Society*, 1936, 28(8), 988.
- 27 Cassie A, Baxter S. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, 40, 546.  
(责任编辑 汪芸竹)



许骏杰, 2018年6月和2021年6月于中国地质大学(北京)获得工学学士学位和硕士学位。主要从事非晶涂层超疏水性能方面的研究。



康嘉杰, 2013年在中国地质大学(北京)获工学博士学位, 2016年英国帝国理工学院访问学者。现为中国地质大学(北京)工程技术学院教授、博士研究生导师、机械工程系主任, 中国机械工程学会表面工程分会青年学组副主任委员, 中国机械工程学会摩擦学分会青年论坛组委会委员。迄今发表论文120余篇, 其中SCI论文60余篇; 授权国家发明专利16项; 主持国家自然科学基金面上项目、北京市自然科学基金面上项目等科研项目10余项。主要从事表面工程和摩擦学方面的研究。