

皮秒激光加工的微织构对碳化硅润湿性的影响

徐昊¹, 钱伟^{2,3}, 花银群^{1,2,3}, 叶云霞^{3,4}, 戴峰泽³, 蔡杰^{2,3}

(江苏大学 1. 新材料研究院; 2. 先进制造与现代装备技术研究所; 3. 机械工程学院; 4. 微纳光电子与太赫兹技术研究所, 镇江 212013)

摘要: 为改善碳化硅的表面润湿性能, 本研究利用脉冲激光加工表面处理和化学改性分别改善了碳化硅的表面形貌和表面能。实验选用皮秒激光加工方式构造表面微织构, 利用激光共聚焦显微镜分析了微织构的微观形貌, 并进一步分析了烧蚀形态与激光自身特性和加工参数之间的联系。研究发现, 激光加工效果以烧蚀为主, 重熔为辅, 而由于碳化硅烧蚀阈值和激光能量在光斑中的高斯分布特性, 形成的微织构的烧蚀凹槽呈倒三角形。此外, 选用的氟硅烷修饰剂使碳化硅表面从亲水表面转变为疏水表面; 通过改变加工参数获得不同微织构并进行氟硅烷修饰后, 碳化硅表面接触角最大提高到 157°, 达到了超疏水效果。为了进一步探讨微织构对疏水性的影响原理, 提出了一个基于实际形貌参数的固液接触角模型。该模型阐释了接触角随微织构特征参数变化的机制, 固、气、液两两之间的接触面积影响了表面润湿性, 这为寻找具有最佳疏水性能的微织构提供了新的理论指导。

关键词: 碳化硅; 微织构; 疏水性; 皮秒激光加工

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

Effects of Micro Texture Processed by Picosecond Laser on Hydrophobicity of Silicon Carbide

XU Hao¹, QIAN Wei^{2,3}, HUA Yinqun^{1,2,3}, YE Yunxia^{3,4}, DAI Fengze³, CAI Jie^{2,3}

(1. Institute for Advanced Material, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Advanced Manufacturing and Modern Equipment Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 4. Institute of Micro-Nano Optoelectronics and Terahertz Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To enhance the surface morphology and surface energy of silicon carbide to improve its surface wetting properties, picosecond pulsed laser surface treatment and chemical modification techniques were used, respectively. Additionally, a confocal laser microscope was used to analyze the microfabrication microstructure and the relationship between ablation pattern, laser properties, and processing parameters. Results demonstrated that ablation and remelting were the dominant factors influencing the laser processing effect. An inverted triangle-shaped ablation groove was observed due to ablation threshold of silicon carbide and Gaussian distribution of laser energy in the spot. Fluoroalkyl silane modifier used in the experiments could transform the silicon carbide surface from hydrophilic to hydrophobic. By varying processing parameters of pulsed laser treatment, contact angle of the modified silicon carbide surface increased to a maximum of 157°. To better understand the effect of micro-textures on hydrophobicity, we developed a

收稿日期: 2023-02-14; 收到修改稿日期: 2023-04-05; 网络出版日期: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(51641102) National Natural Science Foundation of China (51641102)

作者简介: 徐昊(1997-), 男, 硕士研究生. E-mail: 1574686698@qq.com

XU Hao (1997-), male, Master candidate. E-mail: 1574686698@qq.com

通信作者: 花银群, 教授. E-mail: huayq@ujs.edu.cn

HUA Yinqun, professor. E-mail: huayq@ujs.edu.cn

solid-liquid contact angle model based on the actual morphological parameters which elucidated the mechanism of contact angle variation with characteristic parameters of micro-textures, providing theoretical guidance for finding micro-textures with optimal hydrophobic performance.

Key words: silicon carbide; micro-texture; hydrophobicity; picosecond laser processing

随着人类社会的发展, 先进生产方法制造的高纯度、低粒度的陶瓷材料已经不能够满足人们对材料性能日益增长的需求。因此, 对陶瓷材料进一步加工在特定方面获得更强的性能, 已成为陶瓷材料的一个研究方向。碳化硅(SiC)是一种具有高硬度、低膨胀、耐腐蚀^[1-2]的陶瓷材料, 可作为天文望远镜的结构件^[3], 也可作为涂层广泛应用于船舶和航空等领域^[4]。然而, 碳化硅的亲水特性使其表面容易产生污垢和结冰, 从而缩短涂层寿命。因此, 通过加工改善碳化硅的表面性能已成为提高碳化硅应用性能关键。

自然界中, 荷叶表面的微观纹理使其具有超疏水性, 这种现象也促进了微织构方向上的超疏水性研究。在碳化硅表面制备微织构是改善其表面性能的有效手段, 因为微织构不仅对摩擦效果有较大影响^[5-6], 还对润湿性能也有明显改善。当材料表面与液体的接触角超过 150° , 即被称为超疏水表面, 具有自清洁和抗凝冰等优异性能^[7-8]。

随着技术的发展, 微织构的加工方法也越来越多。传统的铣削加工可以获得微米级的微织构, 而电火花加工和电化学加工可以获得纳米级的微织构^[9-11]。此外, 对于硬而脆的材料, 在超声振动辅助铣削和脉冲激光烧蚀构建微织构的同时还能避免产生明显的热效应。相比之下, 脉冲激光烧蚀在加工速度、适用材料和可控性方面具有更大优势, 它可以很轻易地加工像 SiC 一类难以切割和刻蚀的材料。另外, 由于加工速度快和工件变形小, 脉冲激光加工有利于控制加工形状^[12-14]。

已有研究表明, 微织构可以改善碳化硅表面的疏水效果。马春红团队^[15]应用激光加工各种微织构的加工沟槽具有不同的高度、宽度和间距, 并且碳化硅表面的疏水性随着表面粗糙度的增加而增大。赵美云团队^[16]对不同种类的微织构做了更详细的研究, 他们采用激光雕刻机在陶瓷表面加工了一系列的微织构, 发现不同种类的微织构对表面性能的影响不同。相比之下, 柱状纹理不仅可以改善陶瓷表面的疏水性, 而且可以提高陶瓷的抗冻性和耐磨性。此外, 在理论研究方面, 王树涛团队^[17]根据固体和液体的接触状态, 总结了五种固液接触的模

型。Wenzel 模型是指液体完全填满沟槽的状态, 而 Cassie 模型则是指沟槽中没有液体的状态。还有一种模型介于 Cassie 模型和 Wenzel 模型之间, 即只有一部分液体进入凹槽。除了这三个模型之外, 还有两个模型是特殊的固液接触状态: 一个是“莲花”状态, 因与莲花表面接触相似而得名; 另一个是“壁虎”状态, 液体交错填满凹槽, 这种形态经常出现在纳米管表面。在 Wenzel 模型和 Cassie 模型的基础上, Bico 等^[18]做了很多计算和对比实验, 他们将影响接触角的因素分为两个无量纲参数, 即表面粗糙度和沟槽比, 沟槽比指的是沟槽面积和接触面面积之间的比率。目前有许多理论模型用于计算疏水角, 并用来解释微织构对接触角的影响, 但没有模型研究形态特征参数和疏水角之间的关系, 无法从微织构对疏水角进行预测并对改善微织构提出建议。

本研究利用皮秒激光在碳化硅上加工一系列的微织构, 探讨了影响润湿性能的表面形态学参数, 并研究了皮秒激光对碳化硅表面的烧蚀作用原理和氟硅烷(FAS)对碳化硅表面润湿性改性的作用原理。并且实验还分析了沟槽形态和沟槽比例对疏水性的影响, 并提出涉及具体形貌参数的接触角模型, 在对接触性能改良原理做出解释的同时进一步预测了其它形貌的接触角, 从而指导微织构的改良方向。

1 实验方法

1.1 碳化硅样品准备

实验选择在 2020°C 下常压烧结的碳化硅块作为样品, 块体材料的纯度为 98.5%, 密度为 3.12 g/cm^3 。为了消除原始平面形状和附着杂质的影响, 使用 300 目($48\ \mu\text{m}$)的金刚砂纸将碳化硅块平面打磨平整, 并清洗干燥。

1.2 微织构制备及形貌表征

实验采用皮秒激光加工系统制备微织构, 它由机械运动系统、除尘和供气系统、冷却系统、光路控制系统和皮秒激光源组成(图 1(a)), 其光斑直径为 $15\ \mu\text{m}$, 波长为 355 nm 。每个样品上激光加工区

域的尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 并采用单向面扫的方式加工网状路径, 如图 1(b)。在激光微结构加工过程中, 加工频率为 200 kHz , 每个样品扫描 10 次。根据使用的激光能量和扫描速度, 样品分为 A、B、C 三组, 每组的加工间隔从 $64\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐增大到 $500\text{ }\mu\text{m}$, 如表 1 中所示。此外, R 组是没有微结构的原始表面样品组, 包括不再经过化学修饰的 R-0 和随后需要进行化学修饰的 R-1。

利用 BRUKER D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪 (XRD) 检测激光加工后碳化硅表面的相组成变化情况, 检测范围为 $2\theta=10^\circ\sim 90^\circ$, 对应的检测速度为 $5^\circ/\text{min}$ 。此外, 采用 VK-X250 型激光共聚焦显微镜分析微观形态, 通过其配备的多文件分析软件

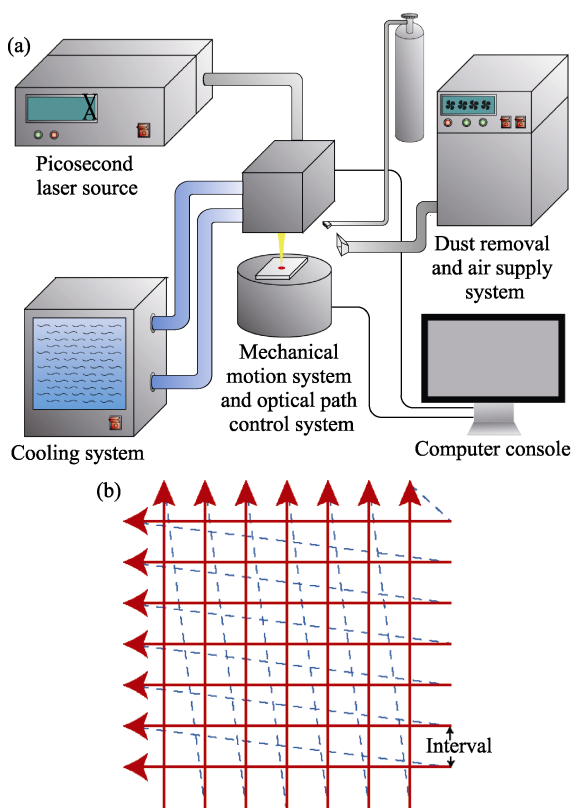


图 1 激光加工系统(a)及其加工路径(b)
Fig. 1 Laser processing system (a) and corresponding processing paths (b)

表 1 皮秒激光加工参数

Table 1 Processing parameters of laser processing

Serial number	Power/W	Speed/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Interval/ μm
A-1~A-10	9	125	64/80/100/125/150/ 200/250/300/400/500
B-1~B-10	6	100	64/80/100/125/150/ 200/250/300/400/500
C-1~C-10	3	50	64/80/100/125/150/ 200/250/300/400/500

(VK-X 系列)可以获得特定区域的三维形态学信息, 进而得到微观形态的具体形状和参数。

1.3 表面化学修饰及润湿性表征

实验选择氟硅烷(FAS)溶液作为改性剂, FAS 全称为十七氟癸基三乙氧基硅烷($\text{C}_8\text{F}_{17}\text{C}_2\text{H}_4\text{-Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$), 使用时用无水乙醇稀释到 1% ^[19], 并加入两滴盐酸作为催化剂。将三组经过微结构加工的样品以及一个原始样品 R-1 放入 FAS 溶液中浸泡 24 h 进行化学修饰, 随后在 120°C 下干燥 4 h, 最终获得表面被氟硅烷包覆的碳化硅块。

碳化硅表面的固液接触角是用来表征表面性能变化的指标, 测量中使用蒸馏水作为接触液体以避免固液间的反应性接触。实验使用 JCY-1 型接触角测量仪器, 它可以记录接触图像, 并有多种接触角测量方法。为了保证测量结果的准确性, 实验采用小尺寸的 34G 针作为滴液的针头, 并采用几何法来测定接触角。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌分析

图 2 显示了激光共聚焦显微镜拍摄的三组样品 (A、B 和 C) 的形貌表面, 从图中可以看到, 烧蚀得到的凹槽网格随着加工路径间隔增加而变得稀疏, 说明即使在微米尺度下, 皮秒激光加工依旧能较好地控制微结构的形态。同时, 烧蚀沟槽形状清晰, 边缘平直, 表面没有产生大量碎屑, 说明实验选择合适的加工功率和加工速度可以抑制加工缺陷^[20]。

此外, 从原始样品 R-0 和表面严重烧蚀的样品 A-1 的 XRD 图谱(图 3)中可以看出, A-1 表面没有因高温氧化而产生大量的二氧化硅^[21], 皮秒激光加工没有生成明显的其他相。6H-SiC 是样品的组成相, 它是一种由无压烧结获得的碳化硅高温相, 相比于原始样品, 激光加工表面 6H-SiC 的衍射峰有所减弱, 这是激光加工降低样品表面结晶度的结果。

在激光加工过程中, 碳化硅吸收激光能量在烧蚀过程中分解升华。实验中使用的皮秒激光能量密度在光斑中按高斯分布, 当激光能量从光斑中心向外传递时, 光斑形状则会保持原有的激光密度分布。同时, 在激光加工过程中, 碳化硅存在一个烧蚀阈值, 只有当能量密度高于烧蚀阈值时, 碳化硅才会被烧蚀, 从而导致激光加工后的沟槽呈现出倒三角形的高斯分布形状, 如图 4(a, b)所示。因此, 实验中选择凹槽深度和凹槽宽度作为微结构研究的特征参数。

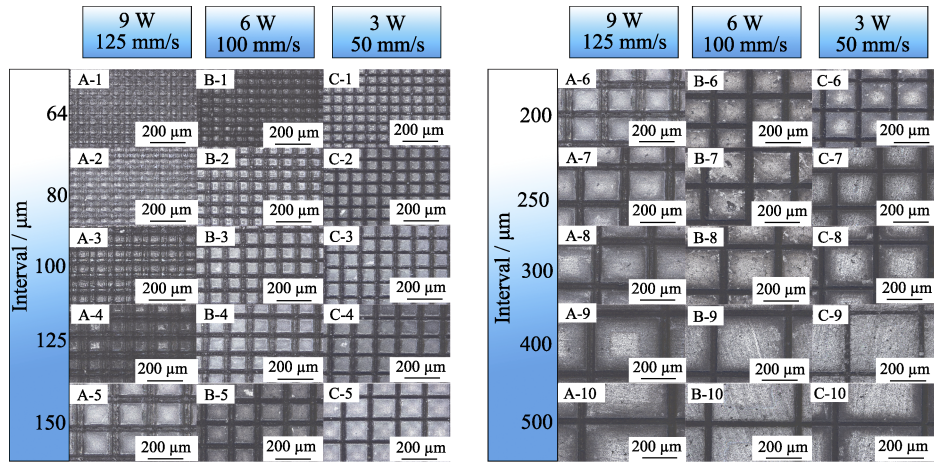


图 2 激光加工后碳化硅表面的微观纹理
Fig. 2 Micro-textures of laser processed SiC surface

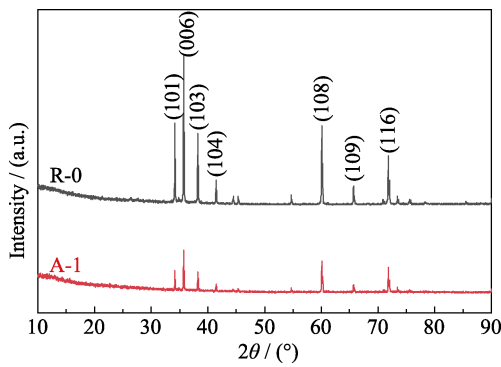


图 3 样品 R-0 和 A-1 表面的 XRD 图谱
Fig. 3 XRD patterns for sample R-0 and A-1

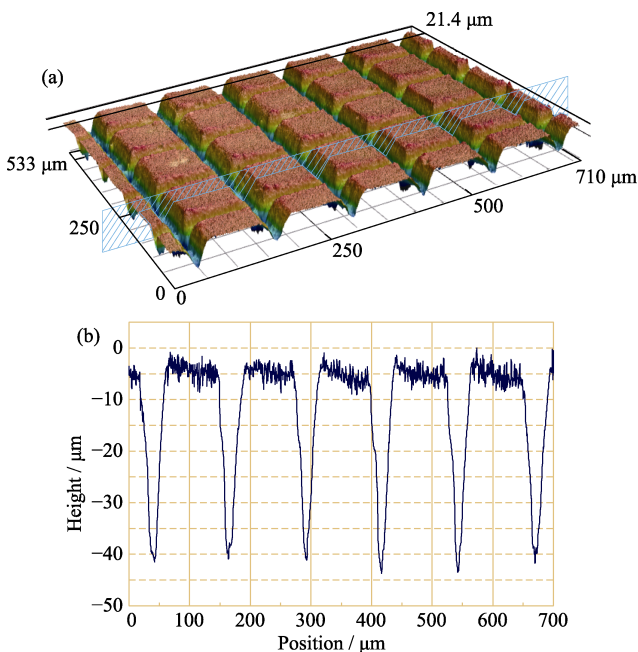


图 4 样品 C-4 表面形貌的 3D 图(a)及其对应的横截面形状 (b)
Fig. 4 Surface morphology of laser confocal 3D model (a) and corresponding cross-sectional shape (b) of sample C-4

从图 5(a)中可以看出, 每组的微织构沟槽深度

几乎是恒定的, 这是因为每一组中的加工参数仅加工间隔有所变化, 当加工间隔保持足够距离时, 每种加工路径在加工时可视为相互独立, 不产生相互影响。随着激光功率从 3 W 增大到 6 和 9 W, 烧蚀程度也应逐渐增加^[22], 但平均沟槽深度却从 42 μm 减小到 30 和 26 μm , 这可以用激光重熔现象来解释。随着激光功率逐渐提高, 激光重熔效应也逐渐加重, 使处于较高位置的材料重新流动到较低位置, 从而减少沟槽的深度^[23]。

从图 5(b)可以看出, 同组样品的激光参数相同, 加工间隔大于 100 μm 的样品的沟槽宽度也几乎保持不变。随着激光能量增大, 达到烧蚀阈值的能量密度区域扩大, 使得每组凹槽的平均宽度依次变宽, 从 42 μm 增大到 50 和 60 μm ^[24]。相比之下, 加工间隔较小的样品产生了峰状微织构(如图 6 所示), 其沟槽宽度与加工间隔相等, 这也是重熔效应的作用。随着凹槽之间凸台的宽度减小, 尖端热效应导致能量集中到狭窄的凸台处, 上侧过于狭窄的凸起被重熔成尖端, 从而使沟槽宽度增加到与加工间隔相等的程度。

2.2 表面接触角分析

比较 R-0 和 R-1 的接触角(图 7(a, b)), 原始碳化硅表面具有较高的表面能使其表现出亲水性, 而 FAS 改性使碳化硅表面的接触角从 60°增大到 128°。在化学改性过程中, 十七氟癸基三乙氧基硅烷 ($\text{C}_8\text{F}_{17}\text{C}_2\text{H}_4\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$) 中的官能团 $-\text{OC}_2\text{H}_5$ 通过水解和脱水缩合相互连接^[25], 同时, 基团 $-\text{OH}$ 可以与 Si 连接(如图 7(c, d)所示), 这意味着 FAS 可以稳定地附着在 SiC 的表面并形成涂层^[26]。另一方面, 硅原子另一侧的基团 $-\text{CF}_3$ 和 $-\text{CF}_2$ 沿着碳化硅的外侧表面分布, 而这两个基团的亲油和疏水特性, 使碳化硅表面获得了较低的表面能, 从亲水表面转变为疏水表面^[27-28]。

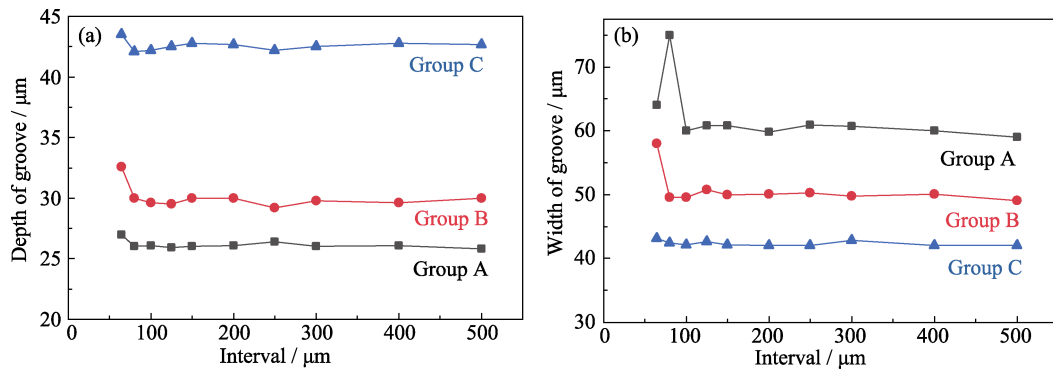


图 5 表面形貌特征参数分析
Fig. 5 Parametric analyses of morphological features
(a) Depth of groove; (b) Width of groove

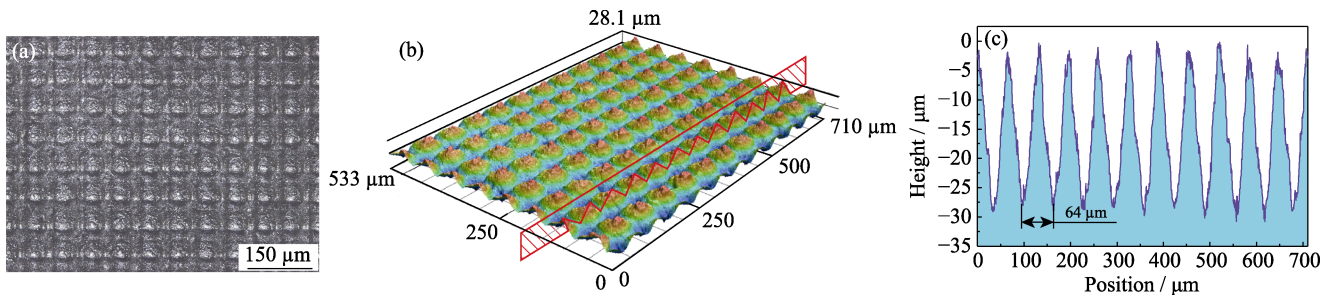


图 6 样品 A-1 表面形貌的图像、3d 图和对应横截面
Fig. 6 Surface morphologies of A-1
(a) Photograph of laser machined reticular micro-texture; (b) Laser confocal 3D model; (c) Cross-sectional shape of (b)

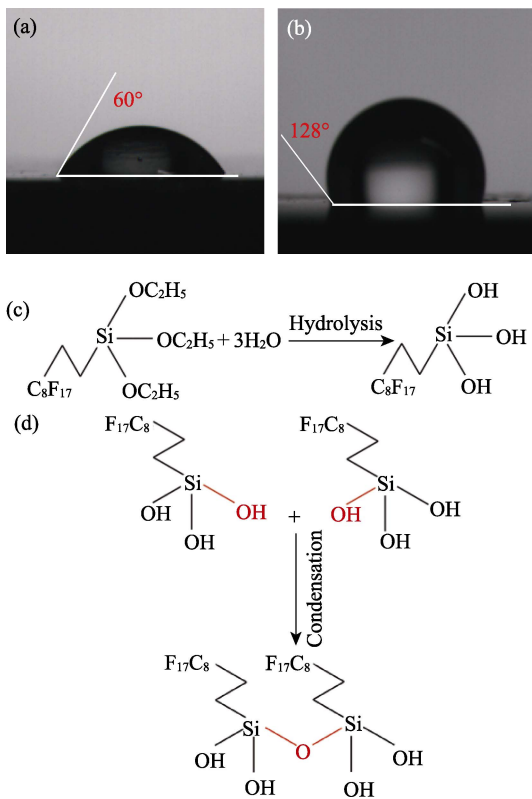


图 7 修饰对接触角的影响及修饰过程中的水解缩合
Fig. 7 Effect of modification on contact angle and its modification principle
(a) Contact angle of R-0; (b) Contact angle of R-1; (c) Hydrolysis of FAS; (d) Dehydration condensation

从图 8 中可以看出, 微结构样品表面的最小固液接触角为 133° , 依旧大于没有微结构原始表面的 128° , 证明碳化硅表面的微结构可以提高其疏水性能。实验中 A、B 和 C 组的最大接触角分别为 156° 、 157° 和 155° , 这些接触角并没有出现在加工间隔最小、微结构最密的情况下。在其他条件不变的情况下, 微结构纹理密度随着加工间隔增加而降低, 导致接触角大小逐渐趋向于原始表面的接触角。但从图 8 中还可以看出, 接触角随着加工间隔增大呈现先增后减的趋势, 只有当各组的加工间隔大于一个特定值时, 接触角才会持续减小并向原始表面接触角靠拢。为了探究这一现象, 本文引入了杨氏方程、Wenzel 模型和 Cassie 模型从理论上进行分析。

杨氏方程研究的是表面影响接触角的因素, 在液体与固体表面接触时, 固、液、气之间的界面力相互平衡, 形成了杨氏接触角 α , 如图 9 所示^[29]。在接触面存在微结构的条件下, 根据水是否渗入微结构, 对杨氏方程进行改良, 得到 Cassie 模型和 Wenzel 模型。在 Cassie 模型中, 水完全不渗入微结构, 在杨氏方程中引入了一个修正量 f_s , 即固液接触面积占总接触面积中的比例。与此相对的 Wenzel 模型中, 水充满了微结构, 在杨氏方程中引入了一个粗糙度变量 R_w , 即实际固液接触面积与微结构投

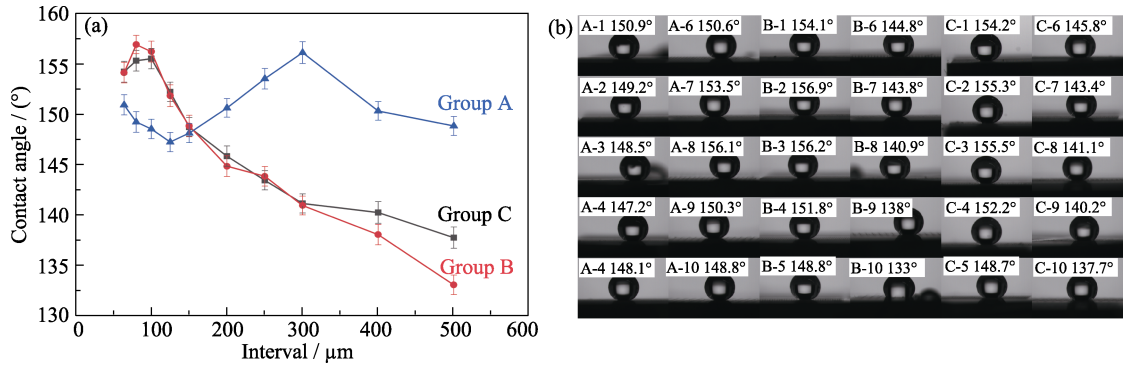


图 8 三组样品的接触角变化和图像

Fig. 8 Statistics and photographs of contact angle for samples

(a) Contact angles of three groups with processing intervals; (b) Contact angle photographs of three groups

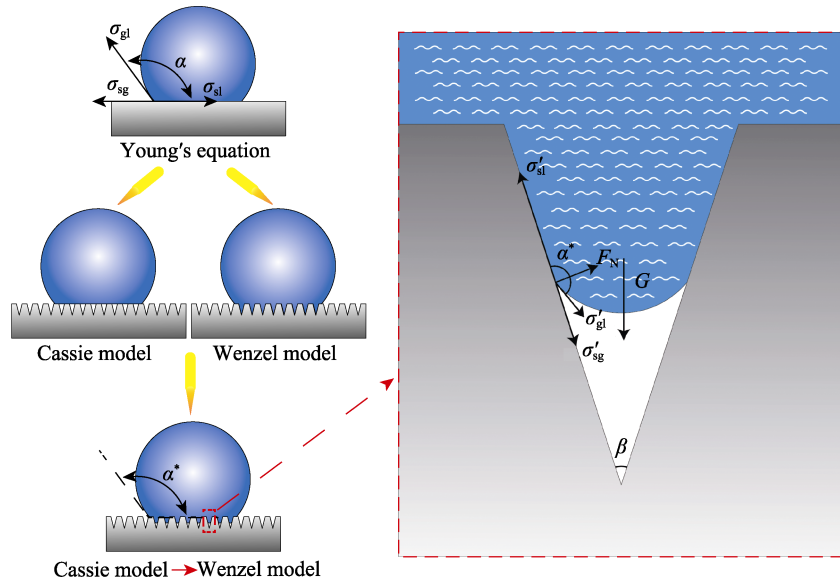


图 9 接触角模型的改良方法和沟槽内渗入水的受力分析

Fig. 9 Improvement of contact angle model and its force analysis of infiltrated water in the groove

影到平面上面积的比例^[30-31]。本研究采用介于 Cassie 模型和 Wenzel 模型之间的过渡模型，并在综合考虑了两种模型的影响因素基础上，提出了过渡模型的修正杨氏方程(公式(1))^[32-34]。

$$\cos \alpha^* = f_s (1 + R_w \cos \alpha) - 1 \quad (1)$$

根据流体力学，液体在同一水平面上的压强是相等的^[35]。因此，当样品水平放置时，在同一微织构中，每个凹槽中液体作用于凹槽的重力是相等的。根据过渡模型，从图 9 中可以看出，凹槽中的液体表面由于重力作用向凹槽底部隆起，同时在界面力和斜面支撑力作用下，液体并没有填满凹槽。因此，液体的重力和凹槽的特征形状是微织构中水渗入深度的决定因素，在液体重力相同的微织构平面中，所有凹槽的接触状态都是相同的。这同时表明对于仅仅凹槽间隔有所变化的同组样品，每条凹槽的接触状态是不变的。

分析微织构形貌，如图 10(a~c)，计算气液接触面积 S_{gl} 、固液接触面积 S_{sl} 和它们的投影面积 S_p ：

$$S_{sl} = d_1 \left[d_1 - 2(2c - c^2) \sqrt{\frac{d_1^2}{4} + h^2} \right] n^2 + 2d_0 \left(2c \sqrt{\frac{d_1^2}{4} + h^2} - d_1 \right) n + d_0^2 \quad (2)$$

$$S_{gl} = (S_{link} - 2C_{part} l_{link}) n^2 + 2C_{part} d_0 n \quad (3)$$

$$S_p = d_0^2 \quad (4)$$

其中， c 是渗透率：

$$c = \frac{h_1}{h_0} \quad (5)$$

同时，公式(1)可以转化为以下形式：

$$\cos \alpha^* = \frac{S_{sl}}{S_{sl} + S_{gl}} \left(1 + \frac{S_{sl}}{S_p} \cdot \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{gl}} \right) - 1 \quad (6)$$

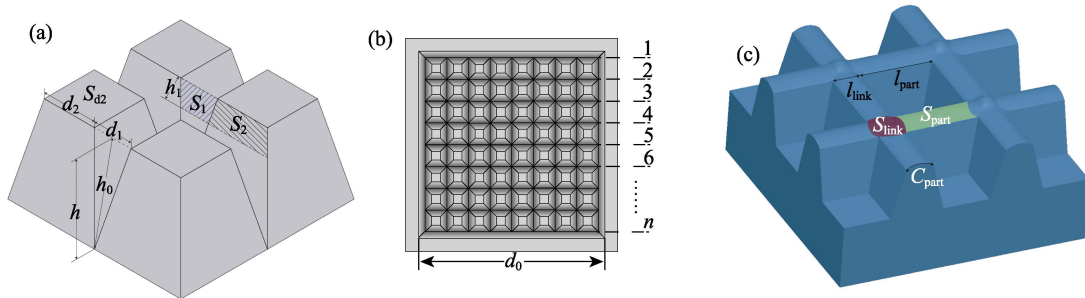


图 10 微观纹理的形态特征参数

Fig. 10 Morphological parameters of micro-texture

(a) Micro grooves; (b) Micro-texture area; (c) Solid-liquid contact area of infiltrated water

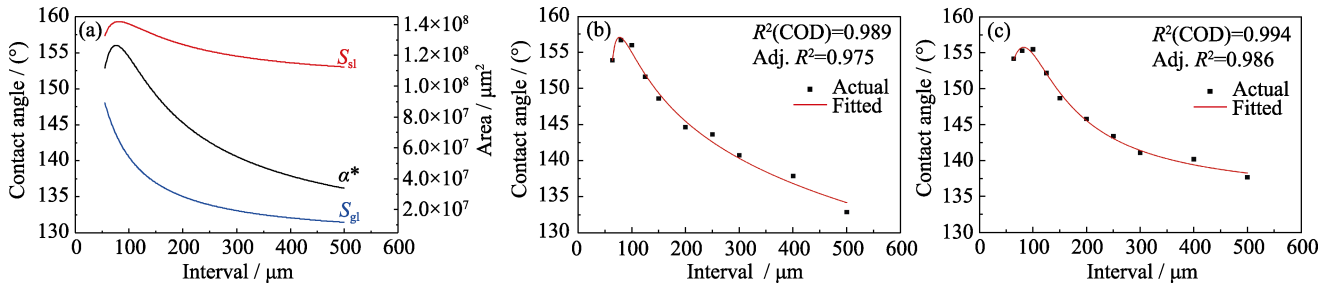


图 11 理论接触角变化和两组样品的拟合预测曲线

Fig. 11 Theoretical contact angle variation and fitted curves

(a) Theoretical variation of contact angle; (b) Fitted curve of variation of contact angle of group B; (c) Fitted curve of variation of contact angle of group C

在充分考虑所有参数关系的条件下, 通过合并常数得到一个更简单的公式, 即公式(7)。

$$\cos \alpha^* = \frac{k_1 n^2 + k_2 n + k_3^2}{k_4 n^2 + k_5 n + k_3^2} \left(1 + \frac{k_1 n^2 + k_2 n + k_3^2}{k_3^2} \right) - 1 \quad (7)$$

根据这个公式, 可以得到在保持单槽形状时接触角 α^* 随区间变化的规律。根据图 8, 代入实际微结构形貌参数分别对 B 和 C 组样品的曲线进行了拟合, 结果见图 11。此外, 该模型还含有一个前提条件, 即凹槽的宽度比相邻激光加工路径的间隔更窄, 因为模型中的凹槽形状不随间隔 d 的变化而变化。 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 、 k_6 和 k_7 由微结构的特征参数决定, 说明同一组样品仅仅改变微结构的间隔符合公式(7)的变化规律, 而加工间隔与 n 的关系符合公式(8):

$$n \approx \frac{d_0}{\text{Interval}} \quad (8)$$

将一组本实验的微结构参数代入接触角模型, 得到接触角变化的理论变化曲线, 如图 11(a)。对比理论曲线和实际接触角的变化, 最大接触角以及接触角的变化趋势和程度都比较相似。通过代入实际微结构凹槽形貌参数并通过拟合优化获得实际的液滴渗入比率, 可以得到与实际接触角变化更加接近的接触角变化曲线(如图 11(b, c)所示)。因此, 可以

认为该接触角模型与实际接触角变化相符合。

通过对该疏水角模型的分析可知, 气液接触面积和固液接触面积增大使疏水性随着加工间隔减小而持续增强。然而, 当加工间隔小于某一定值时, 固液接触面积开始减少。而当固液接触面积减小对疏水性的减弱效果大于固气接触面积增大对疏水性的增强效果时, 表面疏水性开始下降, 这就产生了接触角随着加工间隔减小而先增大后减小的现象。

3 结论

皮秒激光加工可以精确控制 SiC 上加工的微结构的形态, 同时, 合适的加工参数可以获得更精细的微结构。

1)激光加工过程以激光烧蚀为主, 重熔为辅。激光能量的高斯分布, 使烧蚀沟槽呈现倒三角形。同时, 过窄的加工间隔引起的激光重熔效应会增加结构凹槽的宽度, 而过高的激光功率引起的重熔效应又会减少结构凹槽的深度;

2)氟硅烷是修饰碳化硅表面的理想修饰剂, 它能牢固地覆盖在碳化硅表面, 使其从亲水表面转变为固液接触角达 128° 的疏水表面。同时, 微结构可以

进一步提高疏水性能,使固液接触角增加到 157° ,达到超疏水的效果;

3)文中提出的固液接触角模型很好地解释接触角的实际变化规律。微织构通过改变固、气、液两两之间的接触面积来影响接触角的大小。从模型来看,相同凹槽存在一个特定的微织构密度,使接触角达到最大。该模型对如何改良微织构来提高疏水性能提供了理论指导。

参考文献:

- [1] KHADER I, KOPLIN C, SCHRÖDER C, *et al.* Characterization of a silicon nitride ceramic material for ceramic springs. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, **40(10)**: 3541.
- [2] KHADER I, RENZ A, KAILER A, *et al.* Thermal and corrosion properties of silicon nitride for copper die casting components. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, **33(3)**: 593.
- [3] BREYSSE J, CASTEL D, LAVIRON B, *et al.* All-SiC telescope technology: recent progress and achievements. International Conference on Space Optics — ICSSO 2004, 2019: 201.
- [4] SPITSBERG I, STEIBEL J. Thermal and environmental barrier coatings for SiC/SiC CMCs in aircraft engine applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2005, **1(4)**: 291.
- [5] KOUCHAKI S, ROSHANI H, PROZZI J A, *et al.* Evaluation of aggregates surface micro-texture using spectral analysis. *Construction and Building Materials*, 2017, **156**: 944.
- [6] TIEJUN Z, NAN W. Analysis of the research status of surface texture technology. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2020, **49(11)**: 116.
- [7] NEINHUIS C, BARTHLOTT W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany*, 1997, **79(6)**: 667.
- [8] DAVIS A, YEONG Y H, STEELE A, *et al.* Superhydrophobic nanocomposite surface topography and ice adhesion. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, **6(12)**: 9272.
- [9] QU N, CHEN X, LI H, *et al.* Electrochemical micromachining of micro-dimple arrays on cylindrical inner surfaces using a dry-film photoresist. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, **27(4)**: 1030.
- [10] SUN Y, JIN L, GONG Y, *et al.* Experimental evaluation of surface generation and force time-varying characteristics of curvilinear grooved micro end mills fabricated by EDM. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, **73**: 799.
- [11] NAKANO M, KORENAGA A, KORENAGA A, *et al.* Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions. *Tribology Letters*, 2007, **28(2)**: 131.
- [12] OBIKAWA T, KAMIO A, TAKAOKA H, *et al.* Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, **51(12)**: 966.
- [13] SCARAGGI M, MEZZAPESA F P, CARBONE G, *et al.* Friction properties of lubricated laser-microtextured-surfaces: an experimental study from boundary-to hydrodynamic-lubrication. *Tribology Letters*, 2012, **49(1)**: 117.
- [14] ZHAO B, LI P, ZHAO C, *et al.* Fractal characterization of surface microtexture of Ti_6Al_4V subjected to ultrasonic vibration assisted milling. *Ultrasonics*, 2020, **102**: 106052.
- [15] MA C, BAI S, PENG X, *et al.* Improving hydrophobicity of laser textured SiC surface with micro-square convexes. *Applied Surface Science*, 2013, **266**: 51.
- [16] ZHAO M, HE Q, LEI B, *et al.* Preparation of ceramic superhydrophobic surface based on laser engraving technology. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2021, **43(1)**: 107.
- [17] WANG S, JIANG L. Definition of superhydrophobic states. *Advanced Materials*, 2007, **19(21)**: 3423.
- [18] BICO J, THIELE U, QUÉRÉ D. Wetting of textured surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, **206(1)**: 41.
- [19] KANG C, LU H, YUAN S, *et al.* Superhydrophilicity/superhydrophobicity of nickel micro-arrays fabricated by electroless deposition on an etched porous aluminum template. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **203**: 1.
- [20] ZHAI Z, WEI C, ZHANG Y, *et al.* Investigations on the oxidation phenomenon of SiC/SiC fabricated by high repetition frequency femtosecond laser. *Applied Surface Science*, 2020, **502**: 144131.
- [21] FU C, YANG Y, HUANG Z, *et al.* Investigation on the laser ablation of SiC ceramics using micro-Raman mapping technique. *Journal of Advanced Ceramics*, 2016, **5(3)**: 253.
- [22] DENG D, XIE Y, CHEN L, *et al.* Experimental investigation on laser micromilling of SiC microchannels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, **101(1)**: 9.
- [23] TEMMLER A, KÜPPER M, WALOCHNIK M A, *et al.* Surface structuring by laser remelting of metals. *Journal of Laser Applications*, 2017, **29(1)**: 012015.
- [24] ZHAI Z, WANG W, ZHAO J, *et al.* Influence of surface morphology on processing of C/SiC composites via femtosecond laser. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, **102**: 117.
- [25] ZHANG M, ZHU H, XI B, *et al.* Surface hydrophobic modification of biochar by silane coupling agent KH-570. *Processes*, 2022, **10(301)**: 301.
- [26] WU X L, XIONG S J, ZHU J, *et al.* Identification of surface structures on 3C-SiC nanocrystals with hydrogen and hydroxyl bonding by photoluminescence. *Nano Letters*, 2009, **9(12)**: 4053.
- [27] SONG J, ROJAS O J. Approaching super-hydrophobicity from cellulosic materials: a review. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2013, **28(2)**: 216.
- [28] LAW K Y. Definitions for hydrophilicity, hydrophobicity, and superhydrophobicity: getting the basics right. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, **5(4)**: 686.
- [29] SEDEV R. Surface tension, interfacial tension and contact angles of ionic liquids. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2011, **16(4)**: 310.
- [30] CRICK C R, PARKIN I P. Preparation and characterisation of super-hydrophobic surfaces. *Chemistry*, 2010, **16(12)**: 3568.
- [31] HAN T Y, SHR J F, WU C F, *et al.* A modified Wenzel model for hydrophobic behavior of nanostructured surfaces. *Thin Solid Films*, 2007, **515(11)**: 4666.
- [32] WOLANSKY G, MARMUR A. Apparent contact angles on rough surfaces: the Wenzel equation revisited. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, **156(1)**: 381.
- [33] YEN T H, SOONG C Y. Hybrid Cassie-Wenzel model for droplets on surfaces with nanoscale roughness. *Physical Review E*, 2016, **93(2)**: 22805.
- [34] XU X, WANG X. Derivation of the Wenzel and Cassie equations from a phase field model for two phase flow on rough surface. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2010, **70(8)**: 2929.
- [35] NAKAYAMA Y. Introduction to Fluid Mechanics(2nd Edition). Britain: Butterworth-Heinemann, 2018: 25.