

皮秒激光铝合金黑色标刻实验与理论建模分析

刘福康, 李建美*

山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061

摘要 使用皮秒激光时,通过改变激光标刻参数,可以在铝合金表面得到不同对比度的黑色图案。通过激光扫描显微镜对实验标刻样本表面进行测量,并通过电磁波理论建模对皮秒激光打黑机理进行分析。研究发现,激光标刻样本宏观基体表面存在微纳尺度的最大高度值不同的密集峰谷形貌。样本表面微纳峰谷形貌的最大高度值越大,表面反射率越低,从而形成对比度较大的黑色图案。通过样本灰度值得到的对比度与理论建模得到的对比度几乎一致,这证实上述机理是激光打黑铝合金的主要原因。

关键词 皮秒激光标刻; 黑色图案; 反射率; 对比度; 电磁波

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223165

Experimental and Theoretical Modeling Analysis of Picosecond Laser Black Marking of Aluminum Alloys

Liu Fukang, Li Jianmei*

Key Laboratory of High Efficiency and Clean Machinery Manufacturing of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China

Abstract When using picosecond lasers, black patterns of varying contrasts are obtained on the surface of aluminum alloys by changing the laser marking parameters. In this study, the surface of experimental marking samples is measured using a laser scanning microscope, and the mechanism of picosecond laser blackening is analyzed through the theoretical modeling of electromagnetic waves. Consequently, a dense peak-valley morphology with different maximum height values on the micro-nano scale is formed on the surface of the laser marking samples. The results indicate that a larger maximum height of the micro-nano peak-valley morphology on the sample surface causes a lower surface reflectivity and the formation of black patterns with higher contrasts. Additionally, the contrast obtained using the sample gray value is almost equal to that obtained via theoretical modeling, which proves that the above phenomenon is the main reason for the laser blackening of aluminum alloys.

Key words picosecond laser marking; black pattern; reflectivity; contrast; electromagnetic wave

1 引言

近年来随着激光技术的发展,激光直接零部件标识(Direct part marking, DPM)技术的应用越来越广泛,该技术已广泛应用于电子与半导体制造、航空航天制造、汽车零部件制造、制药和医疗保健等行业的产品质量追溯与管理^[1]。与其他打标方法相比,激光打标具有速度快、可靠性高、清洁度高、灵活性强、免耗材加工等优点,因此对于激光打标技术的需求迅速增长^[2]。铝合金在工业生产中的应用非常广泛,如在航空航

天^[3]、海洋装备^[4]、汽车^[5]等领域。皮秒激光器的超短脉冲持续时间短,其能够在几乎没有热影响的情况下完成标刻。近年来,国内外学者针对激光标刻金属做了很多研究:李夏霜等^[6]研究了光纤激光工艺参数对直接标刻在铝合金表面的Data Matrix码的对比度的影响;伊焯^[7]研究了纳秒激光工艺参数对铝表面标刻效果的影响;任乃飞等^[8]研究了纳秒激光不同扫描方式对铜打黑效果的影响。一些学者研究光纤激光与Nd:YAG激光工艺参数对金属标刻对比度的影响^[9-11];Dywel等^[12]研究了激光扫描速度与脉冲频率对

收稿日期: 2022-11-25; 修回日期: 2023-01-05; 录用日期: 2023-01-13; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 山东省重点研发计划(公益类)资助项目(2019GGX104098)

通信作者: *ljianmei@sdu.edu.cn

金属铝标刻表面反光性能的影响,得到高反射率纳米结构表面;Roy 等^[13]研究 Nd:YVO₄ 激光工艺参数对标刻宽度、标刻深度的影响;Sun 等^[14]研究了飞秒激光的激光离焦量与脉冲次数对钛合金标刻的影响,得到低反射率、高对比度的图案;黄永光等^[15]利用飞秒激光在钛合金表面以不同工艺参数标刻出不同颜色,并分析表面结构对颜色的影响。激光能量与材料的作用机制复杂,不同类型激光与不同材料的着色作用机理不同^[6,8,16-17]。Li 等^[18]通过调整飞秒激光工艺参数,在金属表面实现低反射率结构,并揭示结构吸光原理。Chen 等^[19]利用不同脉冲数制备周期性表面,显著降低了反射率。经皮秒脉冲激光标刻,铝合金表面呈现不

同对比度的黑色图案,对此现象作用机理的研究较少。

针对上述问题,本文采用皮秒激光器,通过改变参数来对铝合金材料表面进行标刻实验,采用激光扫描显微镜对表面形貌进行测量,根据实验从微观方面对激光打黑铝合金进行研究,并通过软件以理论建模的方式对不同对比度的黑色图案的成因进行分析验证。

2 基本原理

2.1 实验材料

选用的实验标刻材料为尺寸为 150 mm×150 mm×2 mm 的 6061 拉丝铝合金板,材料表面品质较好,仅对其进行超声清洗,其具体化学成分如表 1 所示。

表 1 6061 铝合金成分组成

Table 1 Composition of 6061 aluminum alloy

Element	Si	Fe	Mg	Zn	Cr	Cu	Ti	Mn	Al
Mass fraction / %	1.1	0.7	0.6	0.25	0.25	0.25	0.15	0.15	residue

2.2 实验设置

使用 Nd:YAG 皮秒激光器,其实验功率为 15 W,单脉冲能量为 152.37 μJ,波长为 1064 nm,重复频率为 100 kHz,脉宽为 10 ps,光斑直径为 50 μm,焦距为 200 mm。通过调整激光标刻重叠率与激光扫描间隔在焦平面上对材料进行标刻,最终得到不同对比度的黑色图案。对标刻后的样本用激光扫描显微镜进行测量,并分析表面形貌。

激光标刻重叠率计算公式为

$$\Phi = (1 - \frac{v}{df}) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: v 为激光扫描速度; d 为激光光斑直径; f 为激光重复频率。

3 分析与讨论

3.1 激光标刻重叠率与扫描间隔对表面打黑效果的影响

图 1 为在入射光线与水平面夹角为 30°的光照条

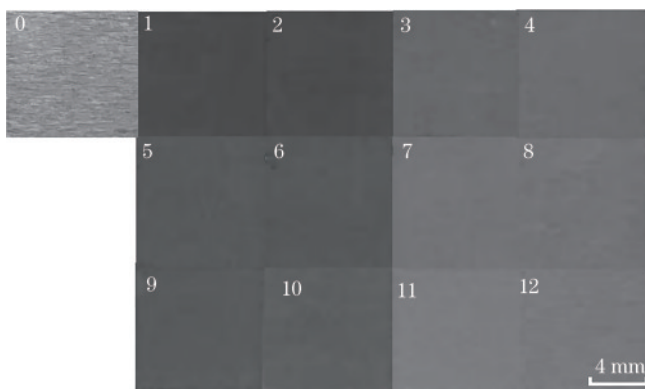


图 1 激光标刻样本与未标刻基体样本的灰度图像

Fig. 1 Grayscale images of laser-marked samples and unmarked substrate sample

件下垂直拍摄的未标刻的铝合金材料(样本 0)与标刻样本(样本 1~12)照片的灰度图像。铝合金基体材料本身对光具有很高的反射率,其图像的灰度值较大。观察其他样本,发现在不同激光标刻参数下标刻得到与基体对比度不同的黑色图案。

用表面对比度来衡量金属表面激光打黑效果,对比度越大说明打黑效果越好,打黑效果会严重影响标识读取效果。表面对比度的具体计算方式为

$$c = \frac{c_1 - c_2}{c_2}, \quad (2)$$

式中: c_1 为未标刻表面灰度值; c_2 为标刻区域表面灰度值。

为分析激光标刻表面打黑效果与激光标刻重叠率以及扫描间隔之间的关系,采用激光扫描显微镜对标刻表面进行测量,得到数据,通过计算得出标刻表面对比度,具体数值如表 2 所示。通过观察表 2 中 3 组样本 1~

表 2 激光标刻样本工艺参数与样本对比度

Table 2 Process parameters and contrast of laser marking samples

No.	Overlap rate Φ / %	Scanning interval / μm	Contrast c
1	98	20	0.48
2	98	25	0.47
3	98	50	0.29
4	98	75	0.26
5	97	20	0.40
6	97	25	0.39
7	97	50	0.22
8	97	75	0.21
9	96	20	0.39
10	96	25	0.36
11	96	50	0.17
12	96	75	0.14

4、5~8、9~12 的数据发现,每组数据中的对比度皆随扫描间隔的增加而减小,这意味着铝合金表面打黑效果变差。在实验条件下,可以发现当激光扫描间隔为 50 μm 时,表面对比度突变,而扫描间隔 < 50 μm 或 > 50 μm 时,所对应的对比度变化较小。分析样本 1、5、9 数据,发现随着激光标刻重叠率的减小,样本的对比度减小,激

光打黑效果也在变差,其他样本数据也有同样的规律。

3.2 表面宏观形貌对打黑效果的影响

为分析标刻表面形貌对打黑效果的影响,通过激光扫描显微镜拍摄标刻表面图片并测量标刻表面截面形貌。图 2 为激光标刻重叠率为 98% 时不同扫描间隔的样本表面图片。

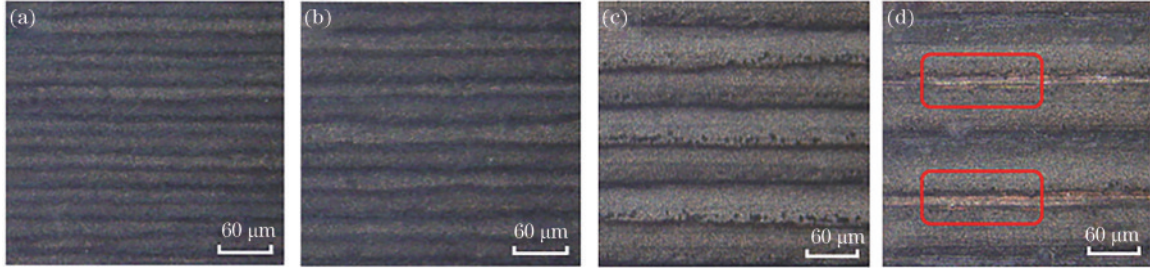


图 2 激光标刻重叠率为 98% 时不同扫描间隔的样本表面。(a) 20 μm; (b) 25 μm; (c) 50 μm; (d) 75 μm

Fig. 2 Sample surfaces at different scanning intervals when laser marking overlap rate is 98%. (a) 20 μm; (b) 25 μm; (c) 50 μm; (d) 75 μm

观察图 2 发现:在本实验设置的激光参数下,当激光标刻间隔为 20、25、50 μm 即扫描间隔小于激光光斑直径时,材料表面完全被标刻处理;当激光标刻间隔达到 75 μm,即扫描间隔大于激光光斑直径时,金属表面存在未标刻到的区域。未标刻到的区域存在金属原表面,导致表面对光线的反射能力增强,这不利于表面呈现黑色效果。在其他激光标刻重叠率的样本中也存在着同样的问题。

20~70 μm 的不同扫描间隔样本的宏观表面截面形貌图。对比 4 个截面发现:在实验激光参数的条件下,扫描间隔为 75 μm 时,样本表面起伏程度最大,为 8 μm;扫描间隔为 25 μm 时,样本表面起伏程度最小,为 3 μm。对比表 2 中的样本对比度发现:样本对比度随着扫描间隔的增大而减小,然而样本表面的起伏程度随着扫描间隔的增大而先减小后增大。其余样本也存在此规律。由此可以得出,激光标刻表面宏观起伏增大,不会使表面对光线的吸收增加,即不会增加样本的黑色程度。

图 3 为激光标刻重叠率为 98% 时,峰谷宽度范围为

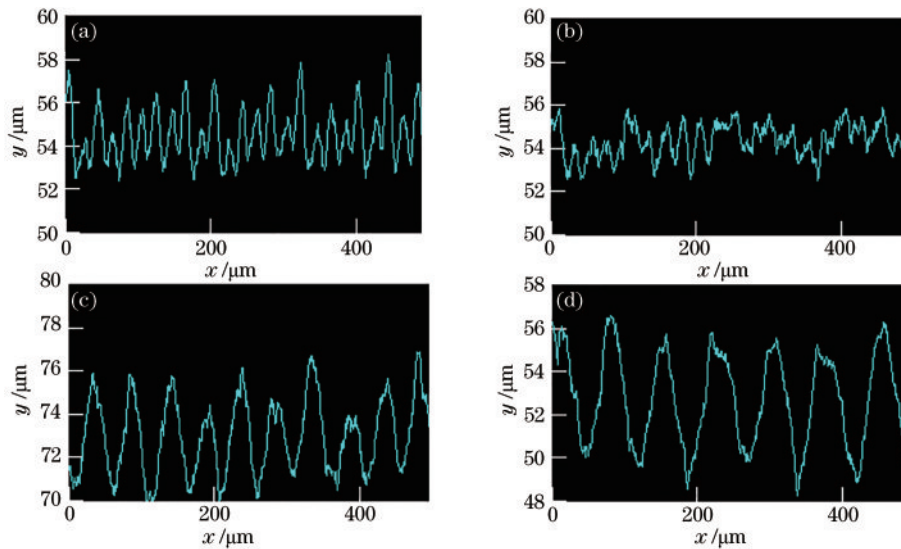


图 3 激光标刻重叠率为 98% 时不同扫描间隔样本宏观表面截面形状。(a) 20 μm; (b) 25 μm; (c) 50 μm; (d) 75 μm

Fig. 3 Cross section shapes of sample surfaces at different scanning intervals when laser marking overlap rate is 98%. (a) 20 μm;

(b) 25 μm; (c) 50 μm; (d) 75 μm

3.3 表面微观形貌对打黑效果的影响

为进一步研究影响激光标刻表面形貌对表面黑色程度的影响,采用 3D 激光扫描显微镜对标刻样本表面进行测量,获得 3D 表面图像数据。根据公式计算表面最大高度值,计算公式为

$$H_z = H_p + H_v, \quad (3)$$

式中: H_p 为基准长度上的最高峰值; H_v 为基准长度上的最低谷值。

图 4 为不同样本表面对光线的反射效果的示意图。最大高度值不同的标刻表面对光线的反射效果不

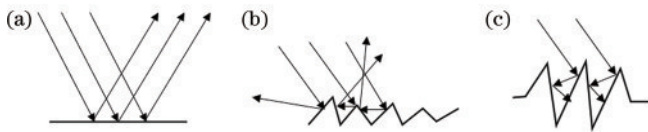


图 4 不同表面的光线反射示意图。(a)未标刻金属表面;(b)最大高度值小的标刻表面;(c)最大高度值大的标刻表面
Fig. 4 Diagrams of light reflection of different surfaces. (a) Unmarked metal surface; (b) marked surface with small H_z value; (c) marked surface with large H_z value

同。如图 4(a)所示,理想平整金属表面对光线的反射效果强,几乎所有反射光线的方向都相同,从而形成亮的视觉效果。如图 4(b)所示,激光标刻表面的最大高度值较小时,部分反射光线的方向相似,从而形成较暗的视觉效果。如图 4(c)所示,由于表面峰谷微结构的

最大高度值较大,绝大多数反射光线被吸收,产生“光阱”效应,从而形成对比度大的黑色表面。皮秒激光对金属标刻的作用机制是将光能转换为热能:激光照射在金属表面,金属中的电子吸收光子使电子能量升高,进而使其温度升高,电子又将能量传输给晶格,最终使得物质能量升高,产生烧蚀效果,最终形成黑色表面。

图 5 为激光标刻重叠率为 98% 时不同扫描间隔样本的表面形貌图。观察图 5 发现,不同扫描间隔样本的表面形成不同的表面形貌。表 3 所示为不同激光标刻参数下的样本对比度与最大高度值,分析表 3 中的数据发现:样本 1 的最大高度值最大,为 73.58 μm ,其对比度也最大,为 0.48,所呈现的黑色效果最好;样本 12 的最大高度值最小,为 23.48 μm ,对比度为 0.14,所呈现的黑色效果最差。在不同激光标刻参数下,样本表

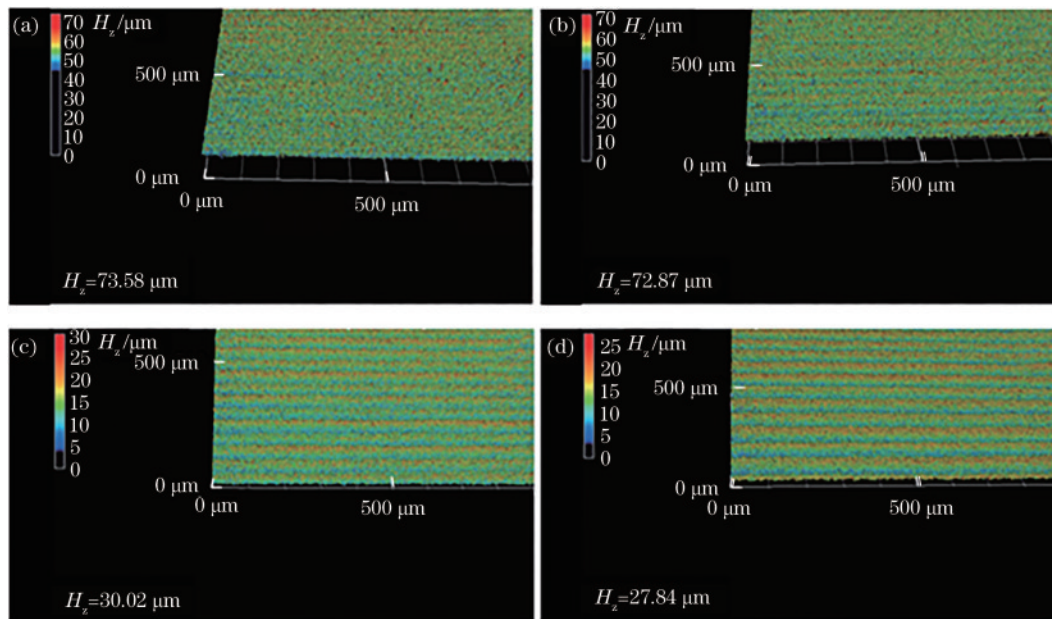


图 5 激光标刻重叠率为 98% 时不同扫描间隔样本的表面形貌图。(a) 20 μm ; (b) 25 μm ; (c) 50 μm ; (d) 75 μm
Fig. 5 Surface topographies at different scanning intervals when laser overlap rate is 98%. (a) 20 μm ; (b) 25 μm ; (c) 50 μm ; (d) 75 μm

表 3 不同激光标刻参数下样本表面的最大高度值与对比度

Table 3 H_z value and contrast of sample surfaces under different laser marking parameters

No.	Contrast c	Maximum surface height $H_z/\mu\text{m}$	Scanning interval μm	Overlap rate $\Phi/\%$
1	0.48	73.58	20	98
2	0.47	72.87	25	98
3	0.29	30.02	50	98
4	0.26	27.84	75	98
5	0.40	71.35	20	97
6	0.39	69.01	25	97
7	0.22	28.49	50	97
8	0.21	26.50	75	97
9	0.39	69.91	20	96
10	0.36	66.46	25	96
11	0.17	26.48	50	96
12	0.14	23.48	75	96

面的最大高度值不同,对应的对比度也不同,所呈现的黑色效果不同。不同激光标刻样本表面的最大高度值越大,对比度越大,即样本呈现的黑色效果越好。

3.4 模型建立及结果分析

利用 COMSOL 软件与麦克斯韦电磁波理论对激光标刻表面反射率研究进行建模分析,电磁波方程设置为

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right), \quad (7)$$

式中: \mathbf{E} 表示电场强度; \mathbf{B} 表示磁感应强度; ρ 表示电荷密度; \mathbf{J} 表示电流密度; ϵ_0 和 μ_0 分别表示真空中的介电常数和磁导率; t 表示时间。

为节省计算时间、减少计算量,对模型进行简化,采用 2D 模型进行计算。选取样本轮廓的一部分,并将左右边界设置为周期性边界进行建模。将顶部材料设置为空气,将底部材料设置为铝合金。几何模型及边界设置如图 6 所示。将空气折射率实部设置为 1,将空气折射率虚部设置为 0;将铝合金折射率实部设置为 1.2,将铝合金折射率虚部设置为 5.5。不同样本模型如图 7 所示,根据激光扫描显微镜测量的标刻样本表面形貌的最大高度值与峰谷宽度的平均值进行几何尺寸设置,具体表面几何数值如表 4 所示

研究标刻表面对光线的反射效果,研究波长范围为 360~760 nm。为保证计算的精度,将模型划分为三角形网格,将网格最大尺寸设置为最小波长的 1/4,即最大为 90 nm。

样本 1、6、11 这 3 个样本的激光标刻参数不同,呈现出明显不同的黑色效果。选取未标刻基体样本 0 与

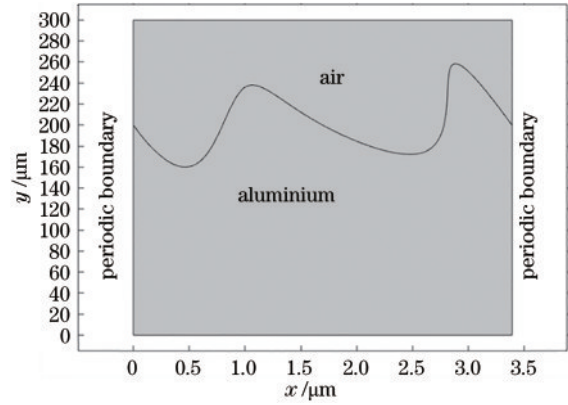


图 6 几何模型

Fig. 6 Geometric model

表 4 不同样本的表面几何参数

Table 4 Surface geometry parameters of different samples

No.	Maximum surface height $H_z / \mu\text{m}$	Peak valley width / μm
0	6.44	3.8
1	73.58	1.2
6	69.01	1.3
11	26.48	1.5

标刻样本 1、6、11 这 3 个具有代表性的样本进行建模分析。为与实验拍摄图片角度统一,此处的入射电磁波与水平面的夹角为 30° 。不同样本表面反射率的计算结果如图 8 所示。分析图 8 中的曲线,发现样本 0 即未标刻金属基体的反射率最高,样本表面最亮。在标刻样本中,样本 1 的反射率最低即样本表面最黑,样本 11 的反射率最高即样本表面黑色程度最低。可以看出,随着表面最大高度值的增大,样本反射率降低。为进一步对比理论结果与实验结果,根据得到的反射率计算出样本理论对比度,将其与实验结果对比。理论对比度的计算公式为

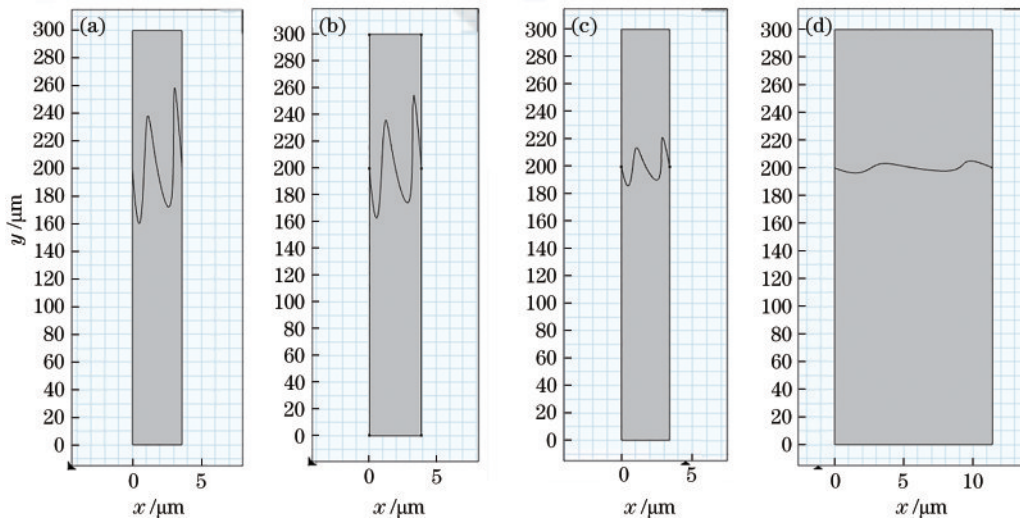


图 7 不同样本的几何模型图。(a) 样本 1; (b) 样本 6; (c) 样本 11; (d) 样本 0

Fig. 7 Diagrams of geometric models of different samples. (a) Sample 1; (b) sample 6; (c) sample 11; (d) sample 0

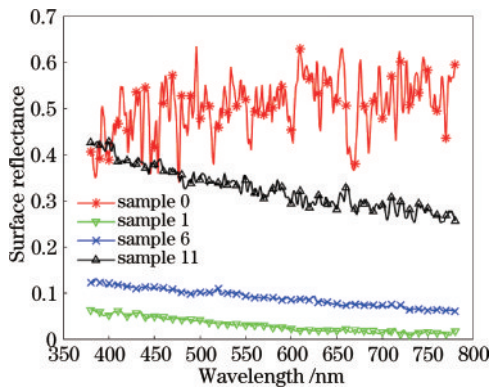


图 8 不同样本的表面反射率

Fig. 8 Surface reflectance of different samples

$$c_r = R_{\max} - R_{\min}, \quad (8)$$

式中: R_{\max} 为基体反射率; R_{\min} 为标刻样本反射率。

表 5 所示为样本实验对比度与理论对比度数据。分析表 5 中的数据, 发现实验数据与理论数据的误差率最大为 6%, 因此实验与理论计算得出的结果较为符合。通过理论建模的方式对激光表面打黑成因进行分析验证, 进一步确认表面出现不同程度黑色效果是标刻表面形成的不同最大高度值的微观锥形峰谷形貌导致的。

表 5 实验对比度与理论对比度数据及误差率

Table 5 Statistics and error rate of experimental and theoretical contrasts

No.	Experimental contrast c	Theoretical contrast c_r	Error rate / %
1	0.48	0.47	2
6	0.39	0.41	5
11	0.17	0.18	6

4 结 论

皮秒激光打黑铝合金的主要原因是在激光标刻过程中, 材料表面形成不同最大高度值的微纳尺寸峰谷形貌, 该形貌能够降低材料表面对光线的反射率, 从而形成黑色标刻表面。实验结果与理论值几乎一致, 这证实了上述现象, 而标刻表面宏观的起伏程度几乎不会对打黑效果产生影响。在一定条件下, 激光打黑效果随着激光标刻重叠率的减小而减弱, 随着扫描间隔的增大而减弱, 且当扫描间隔增大到一定程度时, 标刻表面存在未被标刻的原始金属表面, 从而影响表面打黑效果。

参 考 文 献

[1] Kibria G, Doloi B, Bhattacharyya B. Predictive model and process parameters optimization of Nd: YAG laser micro-turning of ceramics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1): 213-229.

[2] Shivakoti I, Kibria G, Pradhan B B. Predictive model and parametric analysis of laser marking process on gallium nitride material using diode pumped Nd: YAG laser[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 58-70.

[3] 张丽娇. 航空航天高强铝合金材料应用及发展趋势研究[J]. 新材料产业, 2021(3): 7-11.

Zhang L J. Study on application and development trend of aerospace high strength aluminum alloy materials[J]. Advanced Materials Industry, 2021(3): 7-11.

[4] 刘占先. 铝合金材料在船舶与海洋工程装备中的应用[J]. 船舶物资与市场, 2021, 29(6): 47-48.

Liu Z X. Application of aluminum alloy materials in ships and marine engineering equipment[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2021, 29(6): 47-48.

[5] 周飞, 陈安红, 郑蔚光, 等. 铝合金螺栓在新能源电驱动总成上的应用[J]. 汽车与新动力, 2021, 4(3): 62-65.

Zhou F, Chen A H, Zheng W G, et al. Application of aluminum alloy bolts in new energy electric drive assembly[J]. Automobile and New Powertrain, 2021, 4(3): 62-65.

[6] 李夏霜, 何卫平, 雷蕾, 等. 激光标刻二维码工艺及最优参数域研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703006.

Li X S, He W P, Lei L, et al. Process and optimal parameter domain of laser marking two-dimension code [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 0703006.

[7] 伊焯. 纳秒脉冲激光标刻 Al99.7 铝机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.

Yi X. Research on mechanism of nanosecond pulse laser marking on Al99.7 aluminum ingots surface[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.

[8] 任乃飞, 林康, 张志研, 等. 利用纳秒激光提高铜表面吸光率的研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0303004.

Ren N F, Lin K, Zhang Z Y, et al. Research on light absorption enhancement of copper by nanosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0303004.

[9] Qi J, Wang K L, Zhu Y M. A study on the laser marking process of stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(1/2/3): 273-276.

[10] Lazov L, Teirumnieks E, Karadzhev T, et al. Influence of power density and frequency of the process of laser marking of steel products[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 116: 103783.

[11] Leone C, Bassoli E, Genna S, et al. Experimental investigation and optimisation of laser direct part marking of Inconel 718[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 111: 154-166.

[12] Dywel P, Chorobinski M, Szczesny R, et al. The enhanced light diffuse reflection of laser marking Al substrate for the back reflector purpose[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107371.

[13] Roy A, Kumar N, Das S, et al. Optimization of pulsed Nd:YVO₄ laser marking of AISI 304 stainless steel using response surface methodology[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 5244-5253.

[14] Sun X Y, Wang W J, Mei X S, et al. Controllable dot-matrix marking on titanium alloy with anti-reflective

- micro-structures using defocused femtosecond laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 115: 298-305.
- [15] 黄永光, 刘世炳. Ti-6Al-4V 合金表面微纳米结构的超快激光制备及其反射光谱响应[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3133-3137.
- Huang Y G, Liu S B. Preparation and reflection spectra response of Ti-6Al-4V alloy surface with ultrafast laser micro-nano-structuring[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 3133-3137.
- [16] Janos Richter L, Beckmann C M, Ihlemann J. UV laser generated micro structured black surface on commercial TiO₂-containing glass[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 601: 154231.
- [17] Cheng J F, Zhou J, Zhang C, et al. Enhanced laser marking of polypropylene induced by “core-shell” ATO@PI laser-sensitive composite[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 167: 77-85.
- [18] Li X, Li M, Liu H J. Effective strategy to achieve a metal surface with ultralow reflectivity by femtosecond laser fabrication[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(5): 051401.
- [19] Chen L, Liu Z L, Guo C, et al. Nanosecond laser-induced controllable periodical surface structures on silicon[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 013802.