

文章编号: 1001-3806(2016)06-0907-05

激光微织构用吸光涂层正交工艺试验研究

孙建国, 李 胜, 何镇盐, 华希俊*, 张培耘, 符永宏, 纪敬虎

(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了提高金属表面激光吸收率及激光微织构加工表面质量, 采用 W-71s 型喷枪在试样表面分别喷涂黑漆、水玻璃和黄料, 并用 Nd:YAG 激光器对其进行激光微凹坑加工。与无涂层试样相比, 激光加工水玻璃和黄料涂层试样表面蚀除凹坑体积都增加, 其凹坑边缘熔渣体积都减少, 其中, 黄料涂层试样表面蚀除凹坑体积增加了 29.4%; 在此基础上, 利用正交试验法探讨水玻璃和黄料的配比以及厚度对激光微织构加工表面蚀除凹坑体积和凹坑边缘熔渣体积的影响。结果表明, 吸光涂层的厚度控制在 0.1mm 左右, 黄料含量 17%、水玻璃含量 18% 的涂料为最优涂料配方; 正交试验表中最优试样表面蚀除凹坑体积相比无涂层试样增加了 70.6%, 其凹坑边缘熔渣体积减少了 16.2%。该工艺显著提高了激光吸收率和激光加工表面质量。

关键词: 激光技术; 激光微织构加工; 吸光涂料; 凹坑体积; 熔渣体积; 正交试验

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.027

Study on orthogonal processing experiment of light absorbing coatings for laser micro-dimple

SUN Jianguo, LI Sheng, HE Zhenyan, HUA Xijun, ZHANG Peiyun, FU Yonghong, JI Jinghu

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to improve the laser absorption rate of metal surface and processing surface quality of laser micro-dimple, W-71s type spray gun was used to spray black paint, water glass and yellow material on the surface of samples, respectively. Then, the samples were processed by Nd:YAG laser. Compared with the uncoated specimens, the dimple volume increased and slag volume decreased respectively, around the dimples of specimen surface coated with water glass and yellow material. Dimple volume of the sample coated with yellow material increased by 29.4%. On the basis, the influence of thickness and formula of water glass and yellow material on dimple volume and slag volume of laser processing surface were discussed by orthogonal experimental method. The results show that when the thickness of absorb light coating is about 0.1mm, the content of yellow material is 17% and the content of water glass is 18%, the coating formulation is optimal. Compared with the uncoated sample, dimple volume of the best sample in orthogonal table increased by 70.6% and the corresponding slag volume around the dimple decreased by 16.2%. The study indicates that laser absorption rate and laser processing quality on the surface can be significantly improved.

Key words: laser technique; laser micro-dimple processing; light absorbing coating; dimple volume; slag volume; orthogonal experiment

引 言

激光技术广泛应于各行各业,特别是精密零件加工处理中有着不可替代的作用^[1-5]。一般光滑金属表面对激光的吸收率较低^[6-7],极大地影响了对激光能量

的利用效率。为此,许多学者采取各种有效的方法来
提高材料对激光的吸收率。YANG, JI 和 CHEN 等
人^[8-10]发现外加电场或磁场可增加金属材料的激光吸
收率。也有学者发现材料表面粗糙度对激光吸收率有
重要影响^[11-13]。此外,涂层技术因其操作简单、效果
明显而得到广泛应用。涂层的种类很多,国内外许多
学者在比较了碳素墨汁、胶体石墨、磷酸盐膜等涂层的
试验结果后,普遍认为磷酸盐膜的吸收效果较好,但是
磷化处理会带来严重的环境污染问题。为此,有些学
者通过配制混合氧化物涂料^[14]来提高其对激光的吸
收率。然而以上大多为应用于激光热处理,对于激光
微织构加工的预处理的报道极少。FU 等人^[15]发现激

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375211; 51175233);江苏省工业支撑项目资助项目(BE2014115);江苏省大学生创新计划资助项目(201410299002Z)

作者简介:孙建国(1988-),男,硕士研究生,现主要从事固体润滑及激光技术应用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xjhua@ujs.edu.cn

收稿日期:2015-08-16;收到修改稿日期:2015-10-29

光加工水玻璃涂层表面质量优于无涂层表面,然而其并未给出表面质量的评定指标,未进一步研究涂层对激光表面蚀除凹坑体积或凹槽体积的影响。本文中基于对比几种不同涂层材料对激光加工的影响,采用正交试验配制混合涂层,研究其对激光表面微结构凹坑体积和表面质量的影响,对涂层作用机制进行探讨。

1 试验设备及研究方法

1.1 涂层材料

黄料又名“吸光涂料”,呈黄色,由苏州大学激光加工中心生产。黑漆是三和自动喷漆,黑色,由广东三和化工科技有限公司生产。水玻璃又名“硅酸钠”,透明液体,由青岛优索化学科技有限公司生产。

1.2 设备及方法

试样材料为 GCr15 轴承钢,经高温淬火与回火处理后试样表面硬度为 60HRC ~ 65HRC,抛光处理后粗糙度 $R_a = 0.1\mu\text{m}$ 。制备单一涂料及按 $L_9(3^4)$ 正交试验表制备复合涂料,采用 W-71s 型喷枪,控制枪口到试样表面距离为 40cm 左右,对试样进行喷涂,单一涂料涂层厚度控制为 0.1mm 左右,并置于室温下自然风干,因素水平表见表 1。采用二极管抽运 Nd:YAG 激光器对涂层试样进行激光微结构加工,设置重激光复频率为 1600Hz,电流为 18A,其中激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 70ns,激光额定功率为 15W,激光脉冲最高重复频率为 50kHz。利用金相试样抛光机并配合粒径为 $0.5\mu\text{m}$ 的氧化铝抛光粉对激光微结构加工后的试样表面进行抛光处理。采用美国 Veeco 公

Table 1 Factors and levels

levels	A	B	C
	thickness/mm	yellow material/%	water glass/%
1	0.1	17	6
2	0.2	34	12
3	0.3	51	18

Table 2 Parameter of orthogonal test

levels	outer diameter/ μm	inner diameter/ μm	depth/ μm	height/ μm	$V_1/10^{-5}\text{mm}^3$	score-1	$V_2/10^{-5}\text{mm}^3$	score-2	overall score
1	122.5	85.0	8.80	0.47	2.5	7.8	0.29	7.0	22.6
2	118.8	82.0	7.85	0.42	2.1	5.5	0.24	6.8	18.8
3	118.4	90.2	8.90	0.68	2.9	10.0	0.31	6.7	26.7
4	112.0	84.1	8.50	0.54	2.4	7.2	0.23	7.9	22.3
5	120.0	81.3	6.90	0.83	1.8	3.8	0.51	3.7	11.3
6	117.0	86.0	8.00	1.40	2.3	6.6	0.69	1.0	14.2
7	98.8	77.0	6.80	0.33	1.6	2.7	0.1	9.9	15.3
8	99.8	71.8	6.41	0.25	1.3	1.0	0.09	10.0	12.0
9	109.6	77.5	5.90	0.40	1.4	1.6	0.19	8.5	11.7

司生产的 WYKO-NT1100 表面形貌 3 维测量仪对微凹坑的加工形貌进行观测。测试参量为凹坑内径、外径、深度和熔高,如图 1 所示。

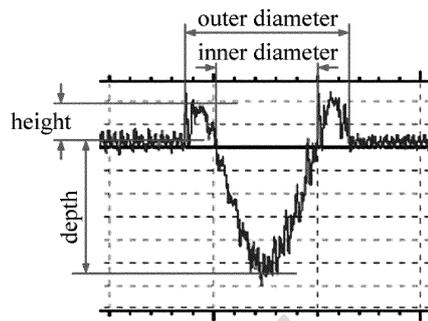


Fig. 1 Measuring parameters of dimple morphology

1.3 数据处理方法

为了更好地表征涂料对激光加工的影响,将凹坑等效为球冠体,其体积计算公式为: $V_1 = \pi(3hD_1^2 + 4h^3)/24$,其中, h 为凹坑深度, D_1 为凹坑内径。因为抛光后熔渣尖角基本被抛平,因此将熔渣部分等效为正方体,其体积计算公式为 $V_2 = \pi H(D_2^2 - D_1^2)/4$,其中, D_2 为凹坑外径, H 为熔渣高度。为了综合考虑涂层对激光的吸收率以及对表面加工质量的影响,对蚀除凹坑体积指标和凹坑边缘熔渣体积指标,采用多指标公式评分法^[16]来综合表征激光微结构加工效率和表面加工质量。激光加工形貌参量及评分如表 2 所示。具体如下:对于凹坑体积指标 V_1 ,3 号试样为 $2.9 \times 10^{-5}\text{mm}^3$,排在第 1 名,给 10 分;8 号试样为 $1.3 \times 10^{-5}\text{mm}^3$,排在最后,给 1 分;对于熔渣体积指标 V_2 ,8 号试样为 $0.09 \times 10^{-5}\text{mm}^3$,排在第 1 名,给 10 分;6 号试样为 $0.69 \times 10^{-5}\text{mm}^3$,排在最后,给 1 分。对其它试样各指标值的得分,视其与该指标优秀值的差异按比例打分。考虑到凹坑体积指标较熔渣体积重要,取凹坑体积指标权数为 2,熔渣体积指标权数为 1,固其评分公式为:评分 = $2 \times \text{凹坑} + \text{熔渣}$ 。

2 实验结果与分析

2.1 不同涂层激光微织构单因素试验

图2示出了不同表面涂层的实物图。图3~图6中示出了不同表面涂层的凹坑形貌,其对应的凹坑形

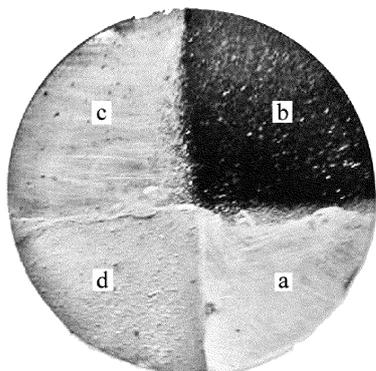


Fig. 2 Physical map of different surfaces

a—uncoated b—black paint c—water glass d—yellow material

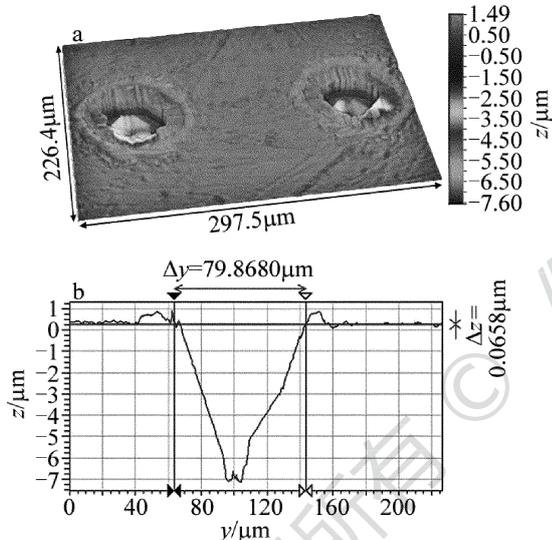


Fig. 3 Morphology of surface without coatings

a—morphology of dimple b—the profile of dimple

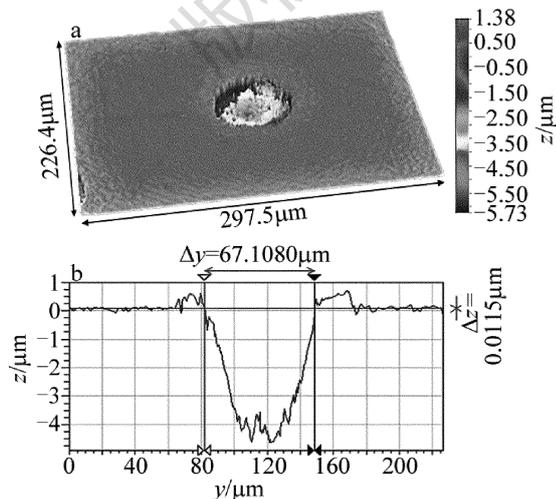


Fig. 4 Morphology of surface coated with black painting

a—morphology of dimple b—the profile of dimple

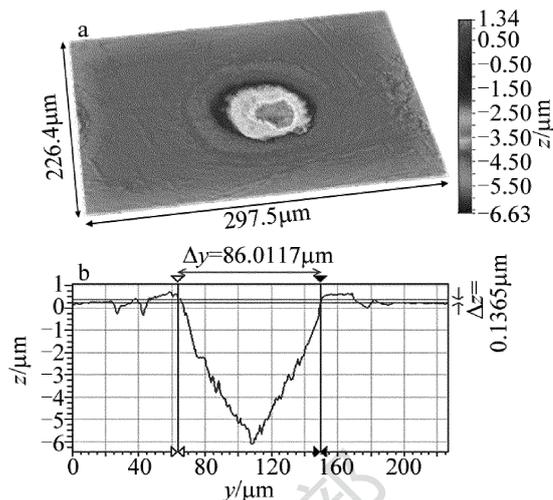


Fig. 5 Morphology of surface coated with water glass

a—morphology of dimple b—the profile of dimple

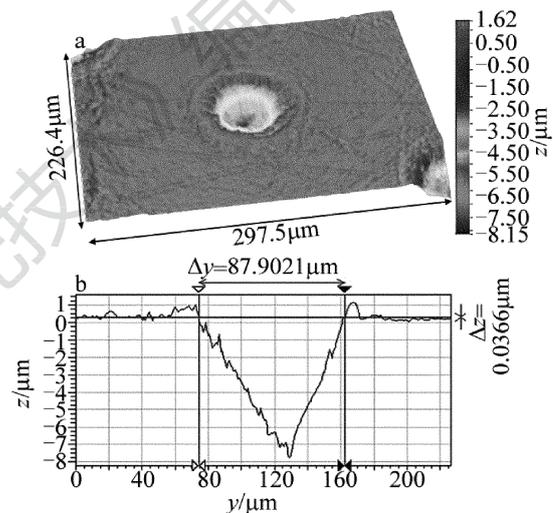


Fig. 6 Morphology of surface coated with yellow material

a—morphology of dimple b—the profile of dimple

貌参量见表3。由表3可知,黄料涂层表面蚀除凹坑体积增加了24.9%,其凹坑边缘熔渣体积减少了43%;水玻璃涂层表面蚀除凹坑体积增加了5.9%,其凹坑边缘熔渣体积减少了64.9%。而较未涂层试样表面,黑漆涂层虽然提高了试样表面质量,但减少了凹坑的直径以及深度,从而使得凹坑体积减少。黄料和水玻璃涂层表面可以吸收大部分的激光能量并传递到基体表层,使得凹坑内径和深度变大,从而使得凹坑体积增大。另外,涂层可以抑止重熔金属产生的毛刺、表面不洁等情况,从而使得熔渣体积减少。此外,黄料涂层的凹坑体积相比水玻璃更大,说明相比水玻璃,黄料可以更好地吸收激光能量并传递到基体。

2.2 正交试验

图7中示出了各因素对表面蚀除凹坑体积及凹坑边缘熔渣体积的影响。从图中可以看出:随着厚度的增加,凹坑体积减少,熔渣体积先增大后减小。其主要

Table 3 Parameters of dimple morphology

coating type	outer diameter/ μm	inner diameter/ μm	depth/ μm	height/ μm	slag volume/ 10 ⁻⁵ mm ³	dimple volume/ 10 ⁻⁵ mm ³
uncoated	114	79	7.0	0.70	0.37	1.7
black paint	100	86	6.0	0.40	0.17	0.8
water glass	110	86	6.0	0.36	0.13	1.8
yellow material	110	87	7.4	0.60	0.21	2.2

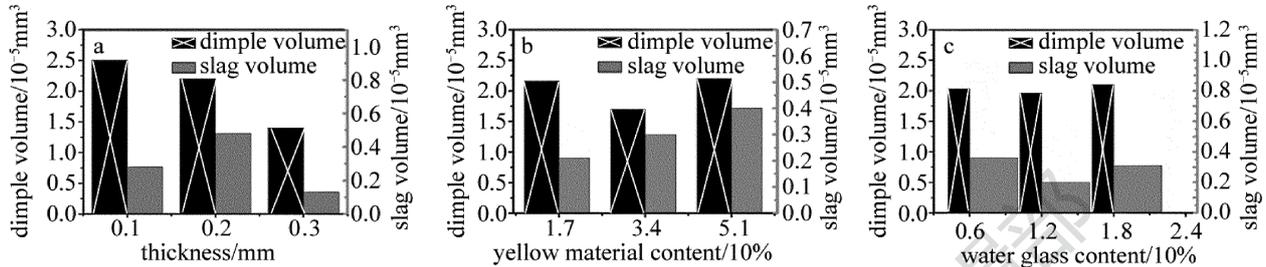


Fig. 7 Effect of various factors on the volume of dimple and slag
a—thickness b—yellow material c—water glass

原因在于:涂层越厚,其消耗的激光能量越多,并且影响了向基体的传热,从而使更多的激光能量以热量的形式向周围环境辐射和对流而散失。随着黄料的增加,凹坑体积先减少后增加,熔渣体积不断增加。黄料含量为 17% 和 51% 时,其对光的吸收能力较强,且后者优于前者。随着水玻璃的含量增加,凹坑体积先略有减小再增大,熔渣体积先减少后增加。由表 2 与表 3 可知,相比无涂层试样,1 号~6 号试样的表面蚀除凹坑体积都增加,其中,3 号试样表面蚀除凹坑体积增加了 70.6%,增幅最大,说明其对激光吸收率最大。除了 5 号和 6 号试样,相比无涂层试样,其它试样表面凹坑边缘熔渣体积都有不同程度的减少,其中 9 号试样凹坑边缘熔渣体积减少了 75.7%,表面加工质量最好。

图 8、图 9、图 10 示出了正交表 4 中较优的涂层配方试样 3 三维形貌图。相比无涂层试样,1 号、3 号及 4

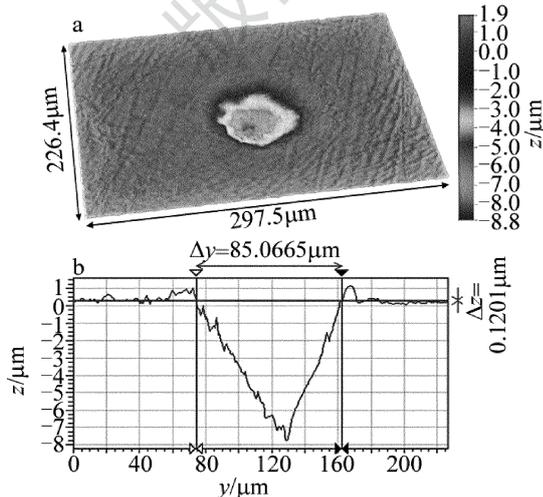


Fig. 8 Morphology of No. 1 sample surface
a—morphology of dimple b—the profile of dimple

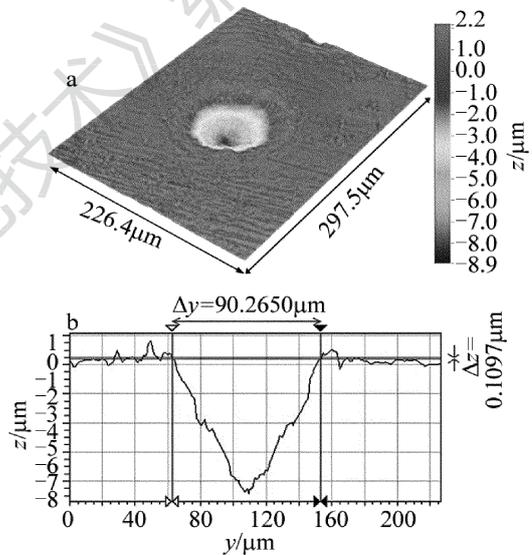


Fig. 9 Morphology of No. 3 sample surface
a—morphology of dimple b—the profile of dimple

号试样表面蚀除凹坑体积分别增加了 47.1%, 70.6%, 23.5%, 其凹坑边缘熔渣体积分别减少了 21.6%, 16.2%, 35.1%。其中 3 号试样为正交表中最优试样,其显著提高了表面蚀除凹坑体积,较明显地改善了激光微织构加工表面质量。

以综合得分最大值为原则,得到表 4 所示的正交试验结果统计表。表 4 中, k_1, k_2 和 k_3 表示各因素水平指标求和平均值。

A, B, C 的最优组合为 $A_1B_3C_3$, 即厚度为 0.1 mm, 黄料和水玻璃含量分别为 17% 和 18%。

根据极差大小,判断三因素对试样表面凹坑形貌特征的影响程度。由表 4 可知: $R_A > R_B > R_C$, 则各因素对试样表面凹坑形貌特征影响的主次顺序为:厚度 > 黄料 > 水玻璃。

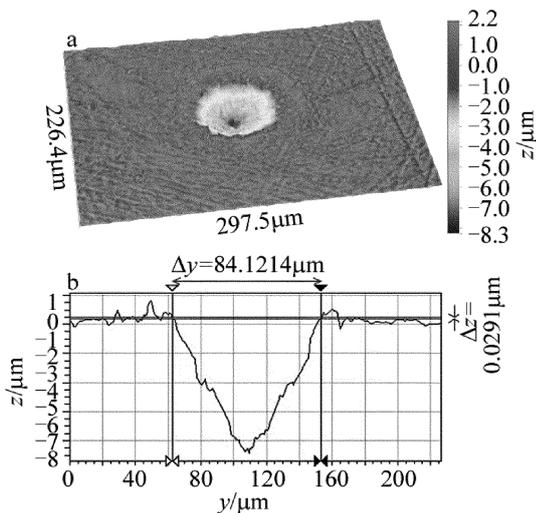


Fig. 10 Morphology of No. 4 sample surface
a—morphology of dimple b—the profile of dimple

Table 4 Results of orthogonal test

levels	thickness /mm	yellow material	water glass	overall score
1	A ₁ (0.1)	B ₁ (17%)	C ₁ (6%)	22.6
2	A ₁ (0.1)	B ₂ (34%)	C ₂ (12%)	18.8
3	A ₁ (0.1)	B ₃ (51%)	C ₃ (18%)	26.7
4	A ₂ (0.2)	B ₁ (17%)	C ₂ (12%)	22.3
5	A ₂ (0.2)	B ₂ (34%)	C ₃ (18%)	11.3
6	A ₂ (0.2)	B ₃ (51%)	C ₁ (6%)	14.2
7	A ₃ (0.3)	B ₁ (17%)	C ₃ (18%)	15.3
8	A ₃ (0.3)	B ₂ (34%)	C ₁ (6%)	12
9	A ₃ (0.3)	B ₃ (51%)	C ₂ (12%)	11.7
k ₁	22.700	20.067	16.267	
k ₂	15.933	14.033	17.600	
k ₃	13.000	17.533	17.767	
R	9.700	6.034	1.500	
optimal case	A ₁	B ₁	C ₃	
order	A > B > C			

综合以上数据和分析,黄料含量 51%、粘结剂含量 18% 的涂料为最优涂料配方,在进行喷涂时,厚度控制在 0.1mm 左右。

3 结论

(1)相比无涂层试样,黄料和水玻璃涂料可以显著提高对激光的吸收率,且表面加工质量得到提高,其中,黄料性能最佳,蚀除凹坑体积增加了 29.4%,凹坑边缘熔渣体积减少了 43%。

(2)由正交试验可知,黄料含量 17%、粘结剂含量 18% 的涂料为最优的涂料配方,喷涂时,涂层厚度控制在 0.1mm 左右。

参考文献

- [1] GAO Sh Y, XU Ch, YANG Y Q, *et al.* Optimization algorithm of galvanometer scanning laser marking for Chinese characters [J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 790-793 (in Chinese).
- [2] LI X Ch, ZHANG Y K. Effect of laser shock times on electrochemical performance of AZ31 magnesium alloy [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 466-470 (in Chinese).
- [3] PAN J X, TANG X H, SHENG L M, *et al.* Refraction effect of light-induced plasma during high-power diode laser processing [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 557-561 (in Chinese).
- [4] YIN Zh Y, QIANG X W, WANG Y F, *et al.* Research of laser diode beam collimation based on astigmatism surface microlens [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 458-461 (in Chinese).
- [5] ZHOU C, ZHANG L, CHEN G Y, *et al.* Prediction and optimization algorithm of process parameters for laser dressing grinding wheels [J]. Laser Technology, 2015, 39(3): 320-324 (in Chinese).
- [6] LU J, NI X W. Reciprocity between laser and material physics[M]. Beijing:China Machine Press,1996:18-25 (in Chinese).
- [7] OUYANG H W, LIU Zh M, HUANG Sh Ch, *et al.* Laser scanning to fabricate spherical powder by "balling effect" [J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 572-575 (in Chinese).
- [8] YANG D C, LIU J H. Effect of outer magnetic field on laser beam welding penetration depth [J]. Laser Technology, 2001, 25(5): 347-350 (in Chinese).
- [9] CHEN J, ZHANG Q L, YAO J H, *et al.* The effect of external applied electric field on the laser absorption metal materials [J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 121-123 (in Chinese).
- [10] CHEN J, ZHANG Q L, YAO J H, *et al.* Influence of surface roughness on laser absorptivity [J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 624-627 (in Chinese).
- [11] TAN L K. Wave length roughness light scattering [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2003, 16(2): 37-39 (in Chinese).
- [12] HUANG Y, YANG F, LIANG G. Using in-situ technique to determine laser absorptivity of Al-alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5): 449-453 (in Chinese).
- [13] GENG G G. Design and optimization for light absorption for laser heat treatment [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011:46-56 (in Chinese).
- [14] YUAN Y F. Analysis of multi-target orthogonal experiment [J]. Journal of Hubei Automotive Industrial Institute, 2005, 19(4): 53-56 (in Chinese).
- [15] FU Y H, HUA X J, TAO G N, *et al.* Experimental study on technical parameters of laser-surface-micro-textured friction units [J]. Applied Laser, 2006, 26(5):295-298 (in Chinese).