

文章编号: 1001-3806(2017)04-0498-05

不同吸光涂层对激光微织构加工性能影响研究

华希俊, 丁积霖, 张培耘, 郝静文, 孙建国, 符永宏
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了提高激光微织构加工效率和改善微织构加工质量, 采用 W-71s 型喷枪在 GCr15 轴承钢表面分别喷涂用黑漆、水玻璃、黄料、磷酸锌和石墨制备的涂层。利用 Nd:YAG 激光加工机对其进行激光微织构加工, 使用 3 维形貌分析仪对微凹坑的形貌进行了检测。结果表明, 与无涂层试样相比, 采用水玻璃和黄料涂层试样表面蚀除凹坑体积均增加, 凹坑边缘熔渣体积均减少, 其中黄料涂层表面蚀除凹坑体积增加了 29.4%, 水玻璃涂层凹坑边缘熔渣体积减少了 64.9%; 在一定条件下, 复合涂层相比单一涂层具有更好的激光加工性能, 其中黄料与水玻璃复合涂层的性能最为显著, 与未经涂层的相比, 凹坑蚀除体积增加了 47.1%, 凹坑边缘熔渣体积减少了 43.2%。这一结果对提高激光微织构加工效率、改善微织构加工质量具有一定的指导意义。

关键词: 激光技术; 吸光涂料; 形貌检测; 复合涂层; 凹坑体积; 熔渣体积

中图分类号: TH117.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.04.008

Influence of different light absorbing coating on property of laser surface texturing

HUA Xijun, DING Jilin, ZHANG Peiyun, HAO Jingwen, SUN Jianguo, FU Yonghong

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

Abstract: In order to improve machining efficiency and the surface quality of laser surface texturing for metal surface, the W-71s type spray gun was used to spray black paint, water glass, yellow material, zinc phosphate and graphite on the surface of GCr15 bearing steels respectively. Then, the samples were processed by Nd:YAG laser. Finally, the morphology of material was measured by 3-D morphology analyzer. The experimental results show that compared with uncoated specimens, the removing volume and slag volume around the dimple of specimen surface coated with water glass and yellow material increase and decrease respectively. The removing volume of the sample coated with yellow material increases by 29.4% and the slag volume of specimen surface coated with water glass decreases by 64.9%. Compared with single coating, some composite coating has better laser surface texturing performance. The composite coating with water glass and yellow material has great laser surface texturing performance. Compared with uncoated specimens, the removing volume increases by 47.1%, the slag volume decreases by 43.2%. The result is very instructive to improve the machining efficiency and surface quality of laser surface texturing.

Key words: laser technique; light absorbing coating; morphology detection; composite coating; dimple volume; slag volume

引 言

激光微织构技术可优化接触表面的摩擦学特性, 提高零部件性能并延长使用寿命, 已在发动机气缸、刀具、机械密封、滑动轴承套等领域得到重视^[1-4]。激光微织构的实现主要是利用了激光与材料的热化学反应, 其中基体材料能否对激光热量进行有效的吸收至

关重要。然而一般金属材料对激光有着很高的反射率, 室温下钛合金对 1.054 μm 波长的钕玻璃激光反射率达到 90% 以上^[5-6], 因此, 改善材料在激光微织构加工中的吸光性能对科研和经济都有很重要的意义。

经研究发现, 在加工之前通过对金属表面涂覆相应的涂料能够有效提高材料表面对激光的吸收^[7-9]。传统的吸光涂料有碳素墨汁、磷化剂等, 但存在吸光率低、气味刺鼻和清理困难问题^[10-11]。近年来, 研究人员以复合型金属氧化物为骨料研制了新型吸光涂料^[12-13], 与传统涂料相比, 不仅能有效地提高激光吸收率, 而且环境友好、易清除。但目前研究的大多数涂料都是针对于激光热处理工艺^[14], 而对激光微织构加工用吸光涂料的研究报道极少。作者所在课题组尝试用黑漆、硅油和石英水玻璃 3 种表层涂料进行试验, 发

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375211); 江苏省工业支撑资助项目(BE2014115); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20130524)

作者简介: 华希俊(1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事激光表面改性与摩擦学设计、固体润滑等方面的研究。

E-mail: xjhua@ujs.edu.cn

收稿日期: 2016-07-29; 收到修改稿日期: 2016-08-25

现涂料可以抑制重熔金属生成毛刺,改善表面加工质量,其中水玻璃涂料的效果最为显著^[15]。鉴于此,本文中通过对比研究几种吸光涂层的单一涂层以及其复合涂层对激光加工形成微织构的凹坑体积和表面质量的影响,并对涂层的作用机制进行探讨,为激光微织构加工用吸光涂层的推广应用提供依据。

1 实验条件及研究方法

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。磷酸锌呈白色,由济宁佰一化工有限公司生产。分散剂是白色粉末,型号 EBS,由济南宇舜化工生产。酚醛树脂是黄色片状颗粒,由河北成丰树脂化工有限公司生产。

1.2 试样加工与制备

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 $R_a = 0.1\mu\text{m}$,如图 1 所示。采用 W-71s 型喷枪将涂料喷涂到试样表面,控制喷涂距离约为 40cm,涂层厚度控制为 0.1mm 左右,并置于室温下自然风干,制备单一涂料涂层及复合涂料涂层,如图 2 所示。

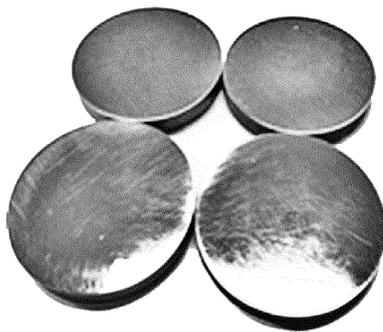


Fig. 1 Test sample of craft

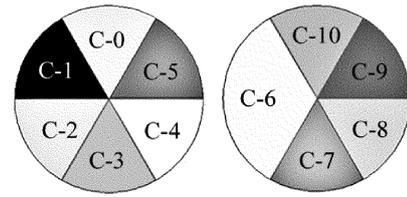


Fig. 2 Physical map of different surface

试样表面激光微织构加工采用本课题组自主研发的二极管抽运 Nd:YAG 激光加工机,如图 3 所示。激光加工参量设置为激光重复频率为 1600Hz,抽运电流为 18A,脉冲重复次数 3 次,加工形成的表面微凹坑阵列如图 4 所示。激光织构完成后,配合使用粒径为 0.5 μm 的氧化铝抛光粉对试样表面进行轻微抛光处理。



Fig. 3 Laser texturing equipment

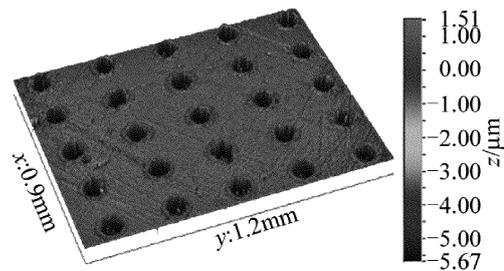


Fig. 4 Array of dimple morphology

1.3 实验设备及方法

采用美国 Veeco 公司生产的 WYKO-NT1100 非接触光学轮廓仪对微织构凹坑内径 D_1 、外径 D_2 、深度 H

Table 1 Parameters of dimple morphology

| number | coating type | inner diameter $D_1/\mu\text{m}$ | outer diameter $D_2/\mu\text{m}$ | height $h/\mu\text{m}$ | depth $H/\mu\text{m}$ | dimple volume $V_1/10^{-5}\text{mm}^3$ | slag volume $V_2/10^{-5}\text{mm}^3$ |
|--------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|---|---|
| C-0 | none | 79 | 114 | 0.70 | 7.0 | 1.73 | 0.37 |
| C-1 | black paint | 67 | 100 | 0.40 | 6 | 0.83 | 0.17 |
| C-2 | water glass | 86 | 110 | 0.36 | 6.0 | 1.75 | 0.13 |
| C-3 | yellow material | 87 | 110 | 0.60 | 7.4 | 2.22 | 0.21 |
| C-4 | zinc phosphate | 77.5 | 108 | 0.4 | 5.8 | 1.38 | 0.18 |
| C-5 | graphite | 56 | 102.5 | 0.4 | 5.9 | 0.74 | 0.23 |
| C-6 | water glass + zinc phosphate | 86 | 110 | 0.5 | 5.7 | 1.66 | 0.18 |
| C-7 | water glass + black paint | 85.5 | 118.1 | 1 | 6.8 | 1.97 | 0.52 |
| C-8 | yellow material + water glass | 88.3 | 108.2 | 0.7 | 8 | 2.48 | 0.21 |
| C-9 | yellow material + black paint | 79 | 108.6 | 0.2 | 6.8 | 1.68 | 0.09 |
| C-10 | yellow material + zinc phosphate | 84.5 | 117 | 0.8 | 6.8 | 1.92 | 0.41 |

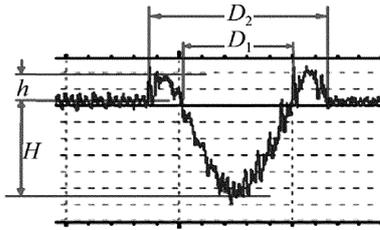


Fig. 5 Measurement parameter of dimple morphology

和熔渣高度 h 进行测量,结果如图 5 所示。为了更好地表征涂料对激光加工的影响,可将凹坑等效为球冠体,其体积计算公式为 $V_1 = \pi(3HD_1^2 + 4H^3)/24$,表面经过抛光处理后熔渣的尖角基本被抛平,因此可将其等效为正方体,体积计算公式为 $V_2 = \pi h(D_2^2 - D_1^2)/4$ 。对凹坑体积和熔渣体积进行计算并统计,结果如表 1 所示。

2 实验结果与分析

2.1 单一涂层激光微织构性能分析

单一涂层表面凹坑蚀除体积和凹坑边缘熔渣体积变化率如图 6 所示,其凹坑形貌如图 7 所示。相比无涂层, C-1, C-4 和 C-5 涂层表面均是凹坑边缘熔渣体积大幅减少,表面蚀除凹坑体积也大幅减少,表明试样表面质量有所提高,而激光微织构加工效率却受到削弱。其中 C-5 涂层(石墨)表面蚀除凹坑体积增加量为 -58.8% ,表面凹坑边缘熔渣体积减少量最大为 37.8% ,与其它单一涂层相比, C-5 涂层不仅表面微织构加工效率最低,加工质量也是最差。这是因为石墨材料的激光吸收效率过高,涂料表层吸收激光产生的大量热量来不及转移至基体材料,导致涂层被烧蚀并蒸发电离生成了对激光微织构加工起屏蔽作用的等离子体,故 C-5 涂层会严重阻碍微凹坑的形成,大大削弱了激光微织构加工效率。

相比无涂层, C-2 涂层表面蚀除凹坑体积增加了 5.9% ,凹坑边缘熔渣体积减少了 64.9% ; C-3 涂层表面蚀除凹坑体积增加了 29.4% ,凹坑边缘熔渣体积减少了 43.2% 。这表明 C-2 和 C-3 涂层不仅大幅提高了激光加工效率,而且显著改善了激光加工表面质量。这是因为 C-2(水玻璃)与基体结合性能好,热传导率高, C-3(黄料)具有很强的吸光性能,所以当激光能量被基体表面的涂层所吸收并转化为热能后,基体表层均可以接收涂层传递来的大量能量,使得基体表层烧蚀形成的凹坑内径和深度变大,从而获得体积更大的微凹坑。同时凹坑边缘的涂层不仅可以抑止金属在重熔的过程中生成毛刺,还可以阻碍在激光烧蚀过程中飞溅出的残渣在基体表面的堆积,有效地控制了熔渣体积。实验表明,相比 C-2 涂层, C-3 涂层可以更好地

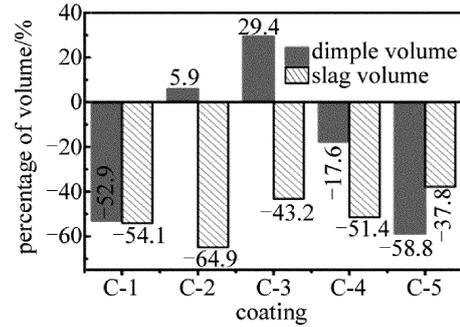


Fig. 6 The change of volume percentage of micro-dimple coated with single material

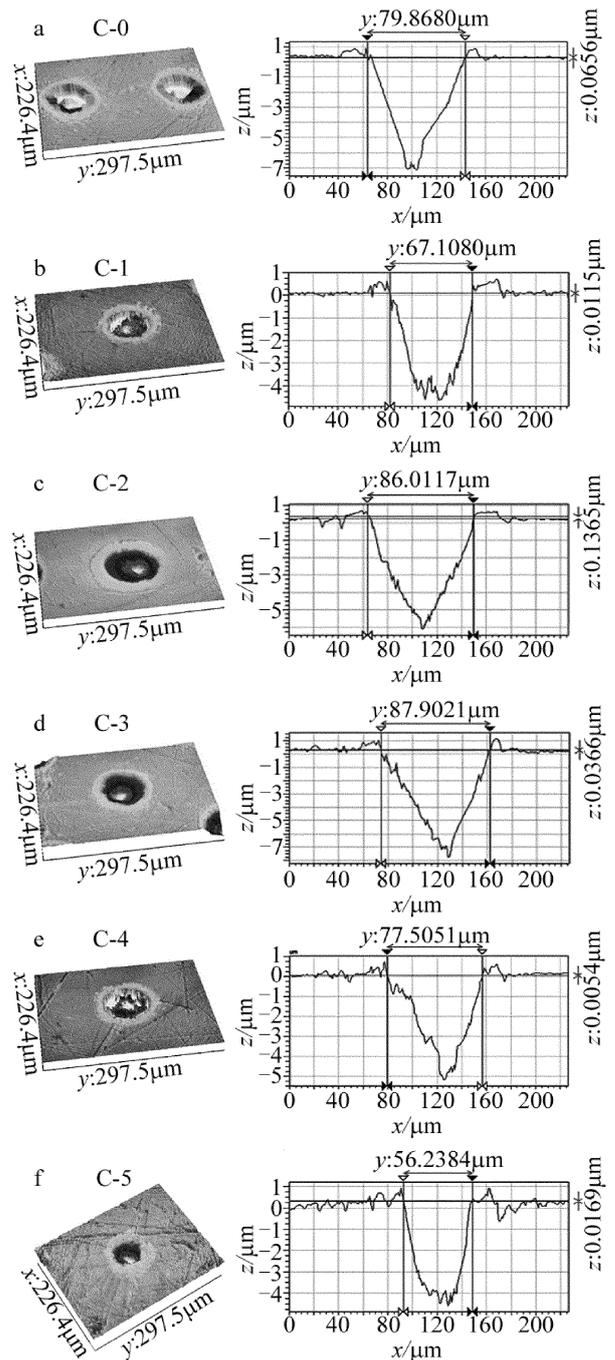


Fig. 7 Morphology of micro-dimple coated with single material

吸收能量并传递到基体。

2.2 复合涂层激光微织构性能分析

复合涂层表面凹坑蚀除体积和凹坑边缘熔渣体积变化率柱状图如图 8 所示,其凹坑形貌如图 9 所示。

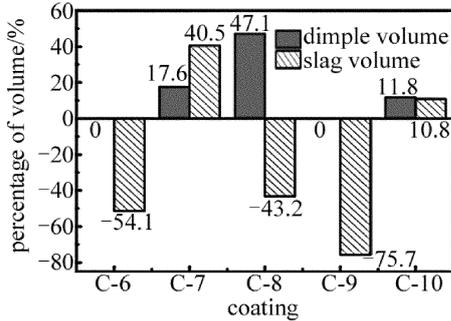


Fig. 8 The change of volume percentage of micro-dimple coated with composite material

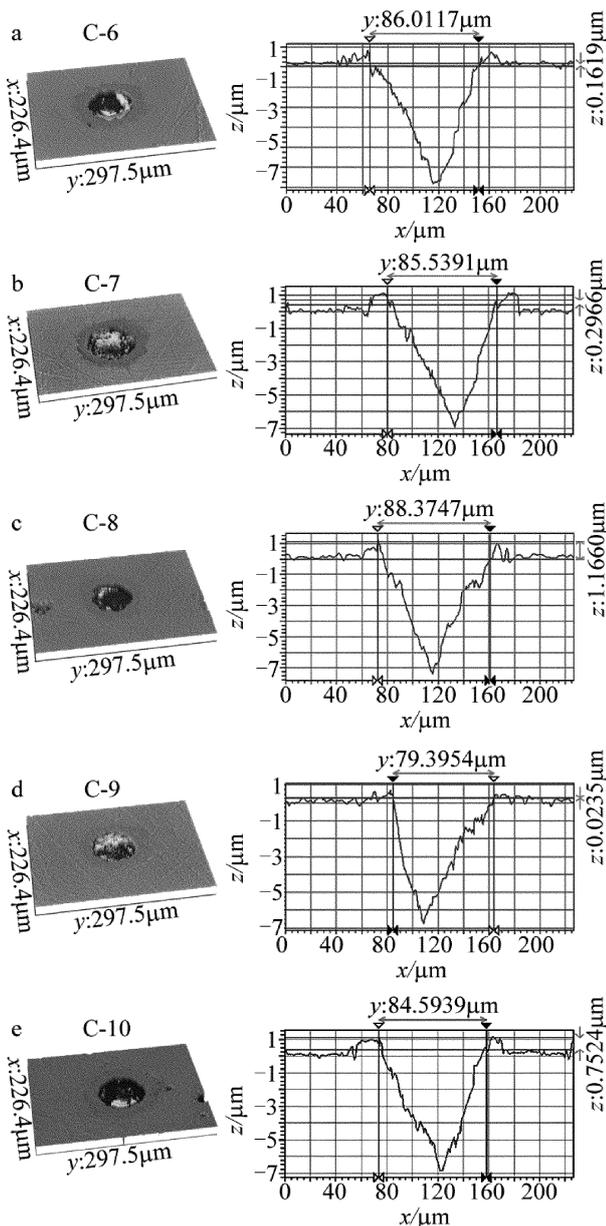


Fig. 9 Morphology of micro-dimple coated with composite material

相比无涂层, C-7, C-8 和 C-10 涂层表面凹坑蚀除体积分别增加了 17.6%, 47.1% 和 11.8%。凹坑边缘熔渣体积分别增大 40.5%, -43.2% 和 10.8%。这表明, 虽然 C-7, C-8 和 C-10 涂层均能提高激光表面微织构加工效率, 但 C-7 和 C-10 涂层会降低激光表面微织构的加工质量, 而 C-8 涂层却能提高微织构加工质量。这是因为 C-8 涂层中的 C-2 材料良好的粘结性与 C-3 材料显著的吸光性表现出“协同”作用, 不仅可以大幅提高激光表面微织构加工效率, 还能显著提高激光表面微织构加工质量。在激光表面微织构加工质量方面, C-7 涂层中的 C-1 材料(黑漆)主要成分是炭黑, 其与 C-2 材料发生反应会产生某种结合界面, 弱化了对熔渣堆积的阻隔作用, 从而使激光表面微织构加工质量得到降低。

相比无涂层, C-6 涂层表面凹坑边缘熔渣体积降低了 51.4%, 大幅改善了激光表面微织构加工质量, 但是其表面凹坑蚀除体积并没有得到提高。这是因为 C-6 涂层是由 C-2 和 C-4 材料(磷酸锌)组成, 而 C-2 材料主要成分是硅酸钠, 遇到 C-4 材料(磷酸锌)发生反应并生成一些吸光性和导热性差的物质, 削弱了复合材料对激光的吸收性能和对热能的传导性能, 故激光表面微织构加工效率没能得到提高。但两者复合产生的结合面结构稳定, 有效阻隔了飞溅落在凹坑周围的熔渣与基体的接触, 使熔渣更容易脱落, 激光表面微织构加工质量得到改善。

2.3 复合涂层与单一涂层的激光微织构性能对比分析

相比单一涂层 C-1 和 C-2, 复合涂层 C-7 表面蚀除凹坑体积分别增加 70.5% 和 11.7%, 而其表面凹坑边缘熔渣体积分别提高了 94.6% 和 105.4%。表明复合涂层 C-7 相比单一涂层 C-1 和 C-2 可以更好地提高激光表面微织构加工效率, 并且其效果高于单一涂层 C-1 和 C-2 之和。这是因为 C-1 材料吸光性能较好, 但由于其粘结性能较差, 影响了激光能量从涂层到基体的传送效率, 而 C-2 具有较好的粘结性能, 使得由 C-1 和 C-2 复合而成的 C-7 涂层同时拥有了良好的吸光性能和粘结性能。故复合涂层既能高效地吸收激光能量, 又能有效地传送热量到达基体, 产生了“1+1>2”的效果, 使得蚀除基体的材料更多, 激光表面微织构加工质量得到大幅度提高。但是在激光表面微织构加工质量方面, C-1 和 C-2 结合生成的新界面在外力作用下容易受到破坏, 激光加工时从凹坑中飞溅出来的熔渣更容易穿透涂层与基体重铸, 并在凹坑周围形成堆积, 故该复合涂层的加工质量与单一涂层相比出现降低。

相比单一涂层 C-2 和 C-4, 复合涂层 C-6 表面凹坑蚀除体积分别增加了 -5.9% 和 17.6%, 而其表面凹

坑边缘熔渣体积分别提高了 13.5% 和 0。表明复合涂层 C-6 相比单一涂层 C-4 能够显著提高激光表面微织构加工效率,相比单一涂层 C-2 却降低了激光表面微织构加工效率。这是因为复合涂层 C-6 中,C-2 材料的粘结性能良好且能够将激光能量有效地传递到基体表层,而 C-4 材料的吸光性能较差,两种材料的作用相互“抵消”,使得其激光微织构加工效率没有得到明显的提升。在激光表面微织构加工质量方面,复合涂层 C-6 加工质量与单一涂层 C-2 和 C-4 相比并没有得到提高,但与无涂层相比,其表面微织构的加工质量仍然有显著的改善,这说明 C-2 和 C-4 的结合界面仍然可以大幅提高激光表面微织构加工质量。

相比单一涂层 C-2 和 C-3,复合涂层 C-8 表面凹坑蚀除体积分别提高了 41.2% 和 17.7%,而其表面凹坑边缘熔渣体积分别降低了 21.7% 和 0%。表明 C-8 复合涂层相比单一涂层 C-2 和 C-3 可以更好地提高激光表面微织构加工效率,且其效果高于单一涂层 C-2 和 C-3 之和,而激光表面微织构加工质量不会受到影响。这是因为 C-2 具有良好的粘结性能,C-3 又具有很强的吸光性能,使得由 C-2 材料和 C-3 材料复合产生“1+1>2”的效果,使得复合涂层既能大幅提高织构加工效率,同时也能明显改善织构加工质量。

3 结论

(1) 相比于无涂层试样,单一涂层水玻璃和黄料不仅可以大幅提高激光表面微织构加工效率,而且能够显著改善激光表面微织构加工质量。

(2) 在一定条件下,由于不同涂层材料的协同作用,复合涂层相比单一涂层具有更好的激光加工性能。其中,水玻璃与黄料复合性能最佳,与未经涂层的相比,凹坑蚀除体积增加了 47.1%,凹坑边缘熔渣体积减少了 43.2%。

(3) 复合吸光涂层能有效提高零件激光表面加工效率和改善加工质量,在激光微织构加工中具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] HUA X J, SUN J G, ZHANG P, *et al.* Research on discriminating partition laser surface micro-texturing technology of engine cylinder [J]. *Tribology International*, 2016, 98:190-196.
- [2] PENG X D, DU D B, LI J Y. Effect of different section profile micropores on seal performance of a laser surface textured mechanical seal [J]. *Tribology*, 2006, 26(4):367-371 (in Chinese).
- [3] GOLLOCH R, MERKER G P, KESSEN U, *et al.* Benefits of laser-structured cylinder liners for internal combustion engines [C]//14th International Colloquium Tribology. Esslingen, Germany: Technische Akademie Esslingen, 2004, 1: 321-328.
- [4] DENG J, LIAN Y, WU Z, *et al.* Performance of femtosecond laser-textured cutting tools deposited with WS₂ solid lubricant coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 222:135-143.
- [5] KAPLAN A F H. Absorptivity modulation on wavy molten steel surfaces: The influence of laser wavelength and angle of incidence [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(15): 151605.
- [6] 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).
- [7] XU G C. Study of coating on metal surface in laser processing [J]. *Laser & Infrared*, 1997, 27(1):27-29 (in Chinese).
- [8] BARRADAS S, JEANDIN M, BOLIS C, *et al.* Study of adhesion of PROTAL (R) copper coating of Al 2017 using the laser shock adhesion test (LASAT) [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(8):2707-2716.
- [9] MONTROSS C S, FLOREA V, SWAIN M V. The influence of coatings on subsurface mechanical properties of laser peened 2011-T3 aluminum [J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36(7): 1801-1807.
- [10] MA H W, WANG Y, HAN B, *et al.* Manufacture and process optimization of commercial laser absorbing coatings [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2009, 39(6):6-9 (in Chinese).
- [11] ZOU G C, WANG H P, DAI J Q, *et al.* Investigation and development of a new-type-laser-absorbable coat [J]. *Heat Treatment*, 2002, 17(4):21-23 (in Chinese).
- [12] WANG Z M, LI G, QIN S, *et al.* Application of self-made coating agent in laser surface hardening of 65Mn [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2016, 39(1): 101-103 (in Chinese).
- [13] GENG G G, YAO J H, WANG W F, *et al.* Comparative research on absorption properties of different metal oxides for CO₂ laser [J]. *Applied Laser*, 2010, 30(6): 447-450 (in Chinese).
- [14] GENG G G. Design and optimization for light absorption for laser heat treatment [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011:46-56 (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).