

文章编号: 1001-3806(2011)06-0721-04

## 砂轮激光修整设备及参量选择的研究

孙康健<sup>1</sup>, 陈根余<sup>1,2\*</sup>, 余春荣<sup>1</sup>, 卜纯<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 激光研究所, 长沙 410082; 2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

**摘要:** 为了选择合适的激光设备及参量, 以便提高激光修整砂轮效率和精度, 采用300W氙灯抽运YAG普通脉冲激光器、80W声光调Q YAG脉冲激光器对青铜金刚石砂轮进行了单脉冲和连续脉冲烧蚀试验, 借助于显微镜分析了激光作用后砂轮表面的微观形貌, 并通过理论推导, 得出一组公式, 在考虑砂轮修整精度和效率的前提下, 有效地缩小激光器及参量的选择范围, 有助于针对不同的砂轮选择更为合适的激光参量进行更有效的修整。结果表明, 声光调Q YAG脉冲激光器比氙灯抽运普通YAG脉冲激光器单脉冲能量小、脉冲频率高、脉宽窄、峰值功率高, 更适合用于砂轮的高精度、高效率修整。

**关键词:** 激光技术; 激光烧蚀; 激光修整; 设备; 参量; 青铜金刚石砂轮

**中图分类号:** TN249; TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.001

## Selection of equipment and parameters used in laser turing and dressing grinding wheels

SUN Kang-jian<sup>1</sup>, CHEN Gen-yu<sup>1,2</sup>, YU Chun-rong<sup>1</sup>, BU Chun<sup>1</sup>

(1. Laser Research Institute, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Single-pulse and continuous-pulse ablation was carried on bronze-bonded diamond grinding wheels with 300W xenon lamp pumped YAG pulsed laser and 80W acoustic-optic Q-switched YAG pulsed laser respectively, in order to choose appropriate laser equipment and parameters for improving the efficiency and accuracy of grinding wheel turing and dressing. The morphology of the wheel surface after laser irradiation was analyzed by means of stereo microscope. Through theoretical derivation, a formula was obtained to reduce the option range of laser and parameters effectively under the premise of guaranteeing the accuracy and efficiency. It helps choose appropriate laser parameters for turing and dressing different grinding wheels more effectively. Compared with xenon lamp pumped YAG pulsed laser, acoustic-optic Q-switched YAG pulsed laser has lower single pulse energy, higher pulse frequency, narrower pulse width, higher peak power, so it is more suitable for high accuracy and efficiency turing and dressing of grinding wheels.

**Key words:** laser technique; laser ablation; laser turing and dressing; equipments; parameters; bronze-bonded diamond grinding wheel

### 引言

近年来, 由于超硬磨料砂轮具有优异的磨削性能, 在硬、脆有色金属和硬质合金、光学玻璃、陶瓷、宝石等高硬度、高脆性非金属材料的磨削中得到了广泛应用。其中, 金属结合剂超硬磨料砂轮由于其结合剂强度高、把持力强、有利于提高磨削速度, 在应用中占有重要地位, 主要用于成型磨削、精密磨削和超精密磨削。但

是, 金属结合剂超硬磨料砂轮在磨削时易糊塞, 需要定时修整, 而超硬磨料的高硬度性, 使得修整非常困难, 在一定程度上限制了其应用。通常采用普通砂轮磨削法、游离磨料研磨法等机械方法对其进行修整, 修整效率低、成本高, 且昂贵的超硬磨料损耗严重。由于金属结合剂超硬磨料砂轮具有导电特性, 因此电火花修整、双电极接触放电修整和在线电解修整等修整技术在实际中得到不同程度的应用, 取得较好的效果, 但这些技术存在一些缺点<sup>[1-4]</sup>。因此, 开发新型的超硬磨料砂轮修整技术一直是人们研究的热点。

激光修整技术与众多的新型修整技术相比有其突出的优势, 因此近年来一直被国内外学者深入研究<sup>[5-10]</sup>。如印度学者用YAG普通脉冲激光器修整Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和SiC砂轮, 研究了不同激光参量、工艺参量对

基金项目: 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题资助项目(61075005)

作者简介: 孙康健(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光微细加工技术方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: hdgychen@163.com

收稿日期: 2011-04-11; 收到修改稿日期: 2011-04-25

修整效果的影响;日本学者用调Q YAG激光器修整树脂结合剂  $Al_2O_3$  砂轮,研究了连续激光修整对砂轮表面变质层的影响;德国学者用YAG普通脉冲激光器修整树脂结合剂 CBN 砂轮,提出激光从切向对砂轮整形、径向修锐的观点;上海交通大学的研究人员用YAG普通脉冲激光器对树脂结合剂 SiC 砂轮作了修锐实验;西北工业大学的研究人员用YAG普通脉冲激光器修整树脂、青铜结合剂金刚石砂轮和树脂结合剂 CBN 砂轮;南京航空航天大学的研究人员用  $CO_2$  激光器普通脉冲修整树脂金刚石砂轮片。

作者主要针对普通脉冲和调Q脉冲激光对青铜金刚石砂轮的烧蚀效果进行研究,并通过理论推导得出一种选择激光器及参量的方法,针对不同砂轮的修整,可有效地缩小参量选择范围,在保证修整精度的前提下,尽可能地提高修整效率。

## 1 激光修整超硬磨料砂轮的原理及特点

激光修整过程包括修锐和整形两个部分。

**激光修锐原理<sup>[1]</sup>:**利用光学系统把激光束聚焦成极小的光斑,并作用于砂轮表面,可在瞬间内使砂轮局部表面的结合剂材料熔化、气化。在相同的激光作用时间内,由于超硬磨粒与结合剂材料的物理性能差别很大,超硬磨粒材料达到熔点所需要的激光功率比结合剂材料高几个数量级,通过控制激光加工参量,可以有选择性地去除结合剂材料,而不损伤超硬磨粒,使磨粒突出,并在砂轮的表面形成容屑空间,从而达到修锐的目的。

**激光整形原理<sup>[1]</sup>:**在激光修锐的基础上,进一步提高激光束的功率密度,激光光束会使砂轮表面局部区域上瞬间产生更高的温度。此高温不仅会使砂轮的结合剂材料熔化、气化,而且还会在砂轮的磨粒上气化形成“微坑痕(纹路)”,部分去除磨粒,使砂轮的表面外轮廓发生变化。

采用激光修整砂轮具有以下优点:(1) 适应性广:激光修整砂轮基于热作用,可适应各种结合剂和磨粒的砂轮修整;(2) 易获得良好地形地貌:激光热作用区域小,能得到较大的容屑空间和合适的磨粒凸出高度;(3) 易获得较理想的精度:通过对激光的控制,可得到较高的修整精度;(4) 是一种绿色加工技术,不存在修具钝化报废的情况,具有可重复利用性,不使用修整液;(5) 有利于延长砂轮的使用寿命:激光修整可选择性去除磨粒或结合剂,有利于节省材料。

当然,激光修整也存在它的弱点。由于激光不像其它的机械修整工具有明确的外轮廓和“刀尖”,使得在修整过程中激光的参量选择很难把握。要想

获得良好的修整效果,必须选择合适的激光器和适当的激光参量。而不同激光与砂轮的作用效果有所不同,因此,其参量的选择也应根据不同的激光进行相应的改变。

## 2 试验与分析

### 2.1 试验方案

目前用于修整金属结合剂超硬磨料砂轮研究的激光主要是YAG激光和  $CO_2$  激光。而大多数学者都采用YAG脉冲激光进行修整研究,这是因为:(1) YAG激光比  $CO_2$  激光在修整金属结合剂砂轮上更有优势,  $CO_2$  激光器输出  $10.6\mu m$  波长红外光, YAG激光器输出波长为  $1.06\mu m$ ,短波长对金属表面的吸收有利,以青铜金刚石砂轮为例,其结合剂主要成分为铜粉、锡粉和镍粉,它们在室温下对特定波长下的吸收率如表1所示;(2) 脉冲激光比连续激光在修整砂轮上更有优势,连续激光修整砂轮时热积累影响大,磨粒易损伤,修整过程难以控制,修整后砂轮易磨损,而脉冲激光烧蚀时有利于散热,热影响小,能减小磨料损伤,获得较好的地形地貌。

Table 1 Absorption rate of the specific wavelength laser at room temperature

	YAG ( $1.06\mu m$ )	$CO_2$ ( $10.6\mu m$ )
absorption rate of Cu	0.30 ~ 0.50	0.015
absorption rate of Ni	0.26	0.03
absorption rate of Sn	0.19	0.034

本试验中选用两种比较有代表性的YAG脉冲激光器分别对青铜金刚石砂轮进行单脉冲和连续脉冲烧蚀试验,并对试验结果进行分析,结合理论推导得出一种方法,用于选择合适的激光器及参量对砂轮进行修整。其中氙灯抽运普通YAG脉冲激光器是由电源调制的连续功率高、单脉冲能量大、脉冲频率低、峰值功率小的激光器, YAG声光调Q脉冲激光器是声光调Q开关调制的连续功率低、单脉冲能量小、脉冲频率高、峰值功率高的激光器。

### 2.2 试验结果与分析

**2.2.1 300W 氙灯抽运普通YAG脉冲激光器单脉冲烧蚀青铜金刚石砂轮试验** 该激光器最大输出功率300W,脉冲宽度  $0.1ms \sim 50ms$ ,脉冲频率  $1Hz \sim 200Hz$ 。

激光修整砂轮是基于气化去除材料的原理,需要较高的激光功率密度,为此本试验中选用低脉冲频率( $1Hz$ )、窄脉宽( $0.3ms$ )、并在离焦量为0以及  $0.5MPa$  氩气保护的条件下,抽运电流  $I$  从  $40A$  逐渐升高到  $210A$ ,得到  $45J$  到  $160J$  的单脉冲能量  $E$ ,对青铜金刚

石砂轮进行单脉冲烧蚀试验。体视显微镜观察试验结果见图1。

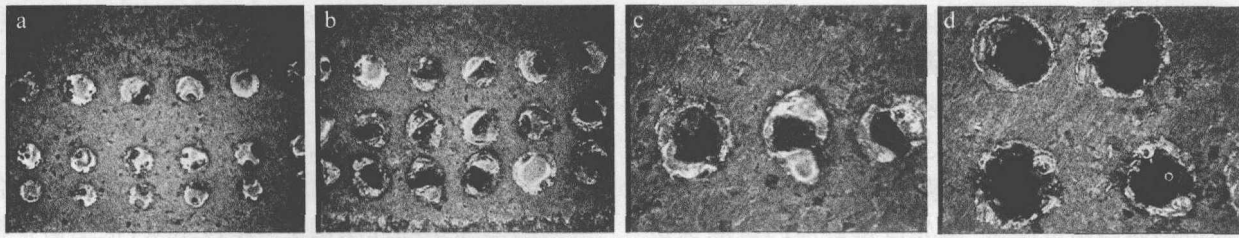


Fig. 1 Pictures of ablation experiments of single-pulse ablation on bronze-bonded diamond grinding wheels with 300W xenon lamp pumped YAG pulsed laser  
a— $I_{u,m,d} = 40A, 50A, 60A, E_{u,m,d} = 45J, 50J, 55J$ , magnification  $n = 40$  b— $I_{u,m,d} = 70A, 80A, 90A, E_{u,m,d} = 61J, 67J, 74J$ , magnification  $n = 40$  c— $I = 140A, E = 122J$ , magnification  $n = 80$  d— $I = 210A, E = 160J$ , magnification  $n = 80$

观察图1a~图1d可以发现:(1)当 $I$ 为40A, 50A, 60A, 70A时,得到单脉冲能量 $E$ 为45J, 50J, 55J, 61J。此时,青铜结合剂只是略有融化,并未发生气化,几乎没有产生材料去除;金刚石磨粒表面略微变黑,没有明显的材料去除;(2)当 $I$ 为80A和90A时,得到单脉冲能量 $E$ 为67J, 74J。此时,砂轮表面开始出现小孔,且深宽比较大,但在小孔的周围有明显的环形山丘状青铜结合剂熔融物,材料去除量很少,大部分结合剂以熔融物的形式凝固在小孔周围;金刚石磨粒表面明显变黑,但仍没有明显的材料去除;(3)当 $I$ 为140A和210A时,得到单脉冲能量 $E$ 为122J和160J。此时,砂轮表面出现深宽比非常大的小孔,青铜结合剂产生明显的气化去除。金刚石磨粒表面呈深黑色,有明显的气化去除现象。尤其当 $I = 210A$ 时,青铜结合剂几乎没有熔融物残留,与金刚石磨粒一起被完全气化去除。

分析发现,氙灯抽运YAG普通脉冲激光器不适合

用于青铜金刚石砂轮的修整。原因主要为:(1)该激光器光斑太大,烧蚀形成小孔直径在0.5mm到1mm,不利于砂轮的高精度修整;(2)该激光器脉冲宽度为毫秒级,在抽运电流较低时,虽具有较高的单脉冲能量,但峰值功率不高,易形成大量的结合剂熔融物。在抽运电流较高时,虽然可以达到气化去除材料的峰值功率密度,但单脉冲能量过大,易形成深宽比过大的小孔。这将对砂轮材料产生极大的浪费,降低砂轮的使用寿命,也不利于提高修整精度。

2.2.2 80W YAG声光调Q脉冲激光器连续脉冲烧蚀青铜金刚石砂轮试验 该激光器最大输出功率80W,脉冲宽度 $10\mu s \sim 140\mu s$ ,脉冲频率 $200Hz \sim 60kHz$ 。

为了获得较高的峰值功率密度并兼顾烧蚀效率,试验在脉冲频率 $f = 5000Hz$ 、离焦量为0和0.5MPa氩气保护的条件下,抽运电流 $I$ 从12A逐渐升高到22A,对青铜金刚石砂轮进行连续脉冲扫描烧蚀试验。体视显微镜观察试验结果见图2。

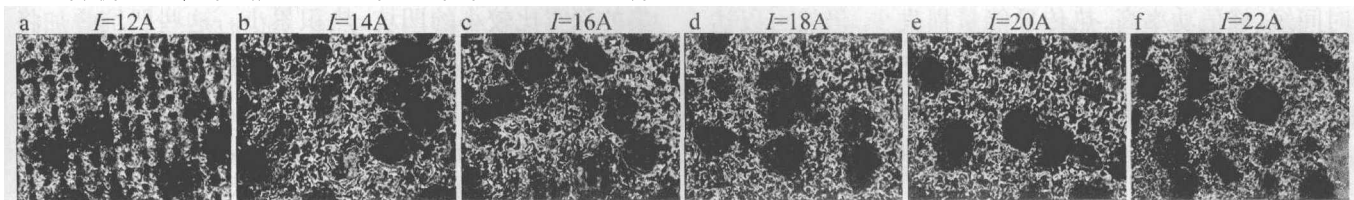


Fig. 2 Pictures of ablation experiments of continuous-pulse ablation on bronze-bonded diamond grinding wheels with 80W acoustic-optic Q-switched YAG pulsed laser (magnification  $n = 120$ )

观察图2a~图2f可以发现:(1)当 $I = 12A$ 时,单脉冲能量明显不足,砂轮表面呈网纹状,材料去除量少,磨粒突出结合剂高度不明显;(2)当 $I$ 从14A逐渐升高到18A时,青铜结合剂去除明显,金刚石磨粒突出结合剂高度较高,砂轮表面修整质量较好,尤其在 $I = 16A$ 时,金刚石磨粒突出结合剂高度最高,且金刚石磨粒形态最好,没有出现严重的碳化现象;(3)当 $I > 18A$ 时,金刚石磨粒被严重的去除,突出结合剂高度明显减小。

分析发现,在合适的参量下,YAG声光调Q脉冲激光器比较适合用于青铜金刚石砂轮的修整。其优点主要为:(1)该激光器光斑很小,烧蚀凹坑直径最小可

达 $60\mu m$ ,这一点对砂轮的高精度修整非常有利;(2)该激光器脉冲频率高,最高可达60kHz,可有效弥补其光斑直径小对修整效率造成的影响;(3)该激光器脉冲宽度为微秒级,激光峰值功率高,可以使青铜结合剂和部分金刚石磨粒直接气化去除,砂轮表面没有熔融物残留;(4)该激光器单脉冲能量小,最大只有0.4J,因此烧蚀凹坑深度小,有利于节约砂轮的材料,提高其使用寿命,有利于提高修整精度。

### 2.3 激光参量选择的理论推导

通过上述的试验分析,认为YAG声光调Q脉冲激光器比氙灯抽运YAG普通脉冲激光器更适合用于砂轮修整的初步结论。但要在保证修整精度的前提下

尽可能地提高修整效率,通过理论计算确定最理想的激光参量组合,可以大大减小试验盲目性和试验次数。

由上述试验结果发现,在激光修整砂轮过程中,并不是激光功率和单脉冲能量越大越好,否则就会出现图1d中的现象,烧蚀凹坑过大过深,影响修整的精度。要在保证修整精度的情况下尽可能地提高修整效率,就必须根据修整精度要求,事先设定烧蚀凹坑的理想半径 $r$ 和理想深度 $h$ ,得到理想的单脉冲材料去除体积 $V$ :

$$V = \pi r^2 h \quad (1)$$

再根据不同材料对不同激光吸收率 $a$ 的不同,以及材料的气化温度 $T$ ,得出所需单脉冲激光能量 $Q$ :

$$Q = \frac{V\rho c(T - T_0)}{a} \quad (2)$$

式中, $T_0$ 为室温; $c$ 为比热容; $\rho$ 为砂轮结合剂材料的密度。

然后根据修整效率的要求选择适当的脉冲频率 $f$ ,据此确定合适的激光输出功率 $P$ :

$$P = Qf \quad (3)$$

这样确定的激光输出功率和单脉冲能量是在最理想的假设前提下,即激光脉冲瞬间作用于材料并被吸收,激光烧蚀区域材料不与其它部分发生热交换。但是这种情况在现实中是不存在的。由图1a可以看出,即使单脉冲能量足够大,但是因为脉冲作用时间过长,热传导能量损失大,导致材料没能达到沸点气化去除。而由图2可以看出,即使单脉冲能量低,但是因为脉冲作用时间短、峰值功率高,热传导能量损失少,仍然可以达到良好的气化去除效果。

因此,在确定了上述参量后,还必须尽可能地选择占空比 $d$ 小的激光器,使单脉冲能量在尽可能短的时间内完全作用于材料,得到高的峰值功率 $P_{\max}$ 。由于在相同的单脉冲能量 $Q$ 和占空比 $d$ 的情况下,矩形脉冲的峰值功率最小,因此假设该脉冲为矩形脉冲,得:

$$P_{\max} = \frac{P}{d} \quad (4)$$

要想使材料气化去除,则 $P_{\max}$ 必须满足以下条件:

$$\frac{P_{\max}}{\pi r^2} \geq I_{\min} \quad (5)$$

式中, $I_{\min}$ 为该种材料能够被气化去除的最低激光功率密度。

由于激光烧蚀去除材料是一个复杂的过程,其中包括激光的吸收、能量的转化、热传导、材料的融化、气化、气体动力学等复杂的过程,因此很难通过理论的计算得到一个准确的 $I_{\min}$ 值。所以不同材料对不同激光的 $I_{\min}$ 值一般是通过计算机仿真或者试验的方法获得。

由(1)式~(5)式可以得出:

$$P = \frac{\rho c f \pi r^2 h (T - T_0)}{a} \quad (6)$$

$$d \leq \frac{P}{\pi r^2 I_{\min}} = \frac{\rho c f h (T - T_0)}{a I_{\min}} \quad (7)$$

通过(6)式,无论是修锐还是整形,都可以根据结合剂和磨料的热物理性质确定 $a, \rho, c$ 和 $T$ ,根据修整精度和效率确定 $r, h$ 和 $f$ ,从而粗略地估算出激光的输出功率 $P$ 。然后选择合适的占空比 $d$ 使其满足(7)式的要求,或确定一理想的占空比 $d$ ,根据(7)式的要求对激光输出功率 $P$ 进行修正。虽然该公式忽略了包括等离子体在内的其它因素的干扰,但仍然可以在对不同的砂轮进行修整时,事先估算出所需的各项激光参量范围,再结合一定的试验,选择出最合适的参量组合,达到高精度、高效率的修整目的。

### 3 结论

(1)由于氙灯抽运 YAG 普通脉冲激光器为毫秒级激光器,其脉冲频率低,不利于提高砂轮的修整效率;脉宽较宽、单脉冲能量比较大、占空比大,在烧蚀青铜金刚石砂轮时会形成深宽比很大的小孔,并且小孔直径也较大,热积累大,这对修整精度和表面质量有不良影响。

(2)YAG 声光调 Q 脉冲激光器为微秒级激光器,其脉冲频率较高、单脉冲能量较小、光斑较小、但峰值功率高、占空比小,在烧蚀砂轮时会在砂轮表面形成密集的深宽比较小的凹坑,热积累小。这些凹坑叠加将趋向于均匀的去掉砂轮的一层结合剂和部分磨粒,比较适合用于砂轮的修整。

(3)用于砂轮的修整的激光器,要具备光斑较小、峰值功率较高、单脉冲能量适中、脉冲频率较高、占空比小的特点,容易保证砂轮的修整精度和效率。根据总结的(6)式、(7)式可在保证砂轮修整的精度和效率的前提下,有效地缩小激光器及参量的选择范围。

#### 参 考 文 献

- [1] WANG X K, LIU W G, YING B G. Superabrasive dressing technology development[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 1994(3):30-32(in Chinese).
- [2] WESTKAMPER E. Grinding assisted by Nd:YAG lasers[J]. *Annals of the CIRP*, 1995, 44(1):317-320.
- [3] WANG Q H, TANG Y X, XU J W. Applications of special processing in diamond grinding wheel dressing[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1995, 30(2):15-17 (in Chinese).
- [4] CHEN G Y, XIE X Zh, LI L J, et al. Superabrasive wheels dressing and new development of laser dressing[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2002(2):8-12(in Chinese).

(下转第 733 页)

- laser[J]. Applied Laser, 2008, 28(2):155-159(in Chinese).
- [32] VETROVEC J. Compact active laser[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4623:1-12.
- [33] TSUNEKANE M, DASCALU T, TAIRA T. High-power, diode edge-pumped, single-crystal Yb:YAG/ceramic YAG composite microchip Yb:YAG laser for material processing[C]//IEEE Conference on Laser and Electro-Optics CLEO'05. Munich, Germany: IEEE, 2005:1088-1090.
- [34] TSUNEKANE M, TAIRA T. High-power operation of diode edge-pumped, composite all-ceramic Yb:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> microchip laser[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(12):121101/1-121101/3.
- [35] MENDE J, SPEISER J, SPINDLER G, *et al.* Mode dynamics and thermal lens effects of thin-disk lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6871:1-11.
- [36] YAO Zh Y, JIANG J F, TU B, *et al.* Study on diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(s1):15-17(in Chinese).
- [37] YAO Zh Y, JIANG J F, TU B, *et al.* 1.5kW laser diode-pumped Nd:YAG disk laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1):35-38(in Chinese).
- [38] LI Q, CAI Y F, JIANG M H, *et al.* Laser diode array side pumped Nd:YAG thin disk laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7):1793-1797(in Chinese).
- [39] ALBRECHT G F, SUTTON S B, GEORGE E V, *et al.* Solid-state heat capacity disk laser[J]. Laser and Particle Beams, 1998, 16(4):605-625.
- [40] MEI S Sh. Solid-state lasers marching to 100kW[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005(10):2-8(in Chinese).
- [41] JIANG B X, ZHAO Zh W, ZHAO G J, *et al.* Thin disk solid-state lasers and heat capacity solid state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006(3):3-8(in Chinese).
- [42] LI J M. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008(7):16-28(in Chinese).
- [43] ROTTER M, DANE C B. A 10kW solid-state heat-capacity laser system installed at HELSTF white sands missile range[J]. Laser Science & Technology, 2001(12):1.
- [44] ROTTER M, MITCHELL S. Diode-pumped Nd:GGG laser-first light[J]. Laser Science & Technology, 2002(12):1.
- [45] YAMAMOTO B, ROTTER M, MITCHELL S, *et al.* First light from battery powered solid-state heat-capacity laser for missile defence[J]. Laser Science & Technology, 2003(4):1-5.
- [46] JIA W. Solid-state heat capacity laser for battlefield[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(8):702-711(in Chinese).
- [47] CAI Zh, HU H, JIANG J F, *et al.* Kilowatt class laser diodes-pumped solid-state heat capacity laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(2):153-156(in Chinese).
- [48] CAI Zh, JIANG J F, HU H, *et al.* Kilowatt high power heat capacity laser with 3 times diffraction limit[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9):2266-2270(in Chinese).
- [49] WANG Ch, ZHOU Sh H, TANG X J, *et al.* Experimental investigation on 8.7kW laser-diode pumped solid-state heat capacity laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1):77-78(in Chinese).

## (上接第724页)

- [5] CHEN G Y, CHEN G G, HUANG K, *et al.* Study on the accuracy for laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheels[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5):1278-1281(in Chinese).
- [6] WANG X Y, XU Y F, XU W J, *et al.* Experiment and evaluation of laser dressing diamond grinding wheel by side blowing[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(6):725-728(in Chinese).
- [7] CHEN G Y, ZHU D J, PENG K, *et al.* Ablation mechanism of bronze-bonded diamond wheels dressing by pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(4):245-249(in Chinese).
- [8] CHEN G Y, LI L J, MA H L, *et al.* Laser truing and dressing of bronze-bonded diamond wheels by a Q-switched YAG pulse laser[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4):174-179(in Chinese).
- [9] XIE X Zh, CHEN G Y, LI L J. Dressing of resin-bonded super-abrasive grinding wheels by means of acousto-optic Q-switched pulsed Nd:YAG laser[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(5):409-419.
- [10] CHEN M, LI X T, SUN F H, *et al.* Applications of laser technology in the dressing of grinding wheel[J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 2000(9):23-25(in Chinese).
- [11] KANG R K, YUAN J T, SHI X K, *et al.* Study on laser dressing of superabrasive grinding wheels[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2000, 11(5):493-496(in Chinese).