

文章编号: 0258-7025(2007)04-0569-05

高功率 CO₂ 激光钎焊金刚石颗粒

杨卫红, 唐霞辉, 秦应雄, 刘天明, 阮海洪

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 采用高功率横流 CO₂ 激光扫描钎料合金与金刚石颗粒。研究了激光工艺参数对钎焊层结合性能及金刚石热损伤的影响, 分析了钎焊层与金刚石结合机制及金刚石颗粒在激光作用下的热损伤机制。研究表明, 激光功率和扫描速度是影响金刚石热损伤及表面浸润的主要因素。在氩气保护下, 粉末厚度为 0.5 mm, 激光光斑直径 $\phi 3$ mm, 功率为 800 W, 扫描速度为 8.39 mm/s 时, 可获得金刚石颗粒、钎料合金、金属基体三者具有最佳结合性能的钎焊层。合金粉末对金刚石颗粒浸润良好, 并发生冶金化学反应, 生成 TiC 和 SiC。当激光输入能量太高时, 金刚石颗粒开始与外界的氧发生氧化反应, 在自由能方程中的气体分压下, 金刚石一直氧化, 直到与氧化物处于平衡状态。这一过程表现为金刚石颗粒石墨化, 逐步氧化烧损变成气体。

关键词 激光技术; 高功率 CO₂ 激光; 激光钎焊; 金刚石颗粒; 结合机制; 热损伤

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

High Power CO₂ Laser Brazing of Diamond Grits

YANG Wei-hong, TANG Xia-hui, QIN Ying-xiong, LIU Tian-ming, RUAN Hai-hong

(*Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*)

Abstract High power transverse flow CO₂ laser was used to scan the brazing alloy and diamond grits. The influence of laser technological parameters on brazing layer combination performance and diamond grits thermal damage was researched, and the thermal damage mechanism of laser brazed diamond and the combination mechanism of brazing layer and diamond grits were analyzed. The research results showed that laser power and scanning speed were the main factors for diamond thermal damage and surface wetting. On the conditions of 0.5 mm brazing layer thickness, argon shield, 800 W laser power, and 8.39 mm/s scanning speed, the best combination performance among the diamond grits, brazing alloy and metallic base can be achieved. Brazing alloy wetted the diamond grits well and reacted with them to form TiC and SiC. Under high laser energy input, oxidation take place between diamond grits and oxygen outside, diamond would be oxidized all along on the condition of branch gas pressure about free equation until the balance established between diamond and oxide, during this process, diamond grits would be carbonized or burn out and gasified.

Key words laser technique; high power CO₂ laser; laser brazing; diamond grits; combination mechanism; thermal damage

1 引言

单层金刚石工具具有效率高、损耗低、结合强度高特点, 在硬脆材料加工、牙科工具、电子器件衬底加工等行业具有广泛的应用前景^[1], 单层钎焊取

代常规金刚石工具制造方法已开始成为国内外研究的热点。2002 年 A. Trenker 等采用高真空炉中加热方法进行钎焊^[2], 在钎焊过程中分别采用了镍基活性钎料和铬基钎料来实现金刚石与基体的结合,

收稿日期: 2006-09-06; 收到修改稿日期: 2006-11-08

基金项目: 湖北省自然科学基金(2005ABA314)资助项目。

作者简介: 杨卫红(1976—), 女, 天津人, 硕士研究生, 主要研究领域为高功率横流气体激光器及其应用。

E-mail: rose7636@163.com

导师简介: 唐霞辉(1963—), 男, 湖南人, 教授, 主要从事气体激光器、激光加工以及金刚石工具激光焊接等方面的研究工作。E-mail: txh1116@hust.edu.cn

实验所得高温钎焊金刚石工具的磨削性能和使用寿命比电镀金刚石工具优异得多。2004年F. A. Khalid等采用高真空炉中加热方法对镀覆过渡元素Ti, Cr的金刚石颗粒在900℃进行钎焊, 结果金刚石颗粒与合金粉末发生化学反应, 在金刚石颗粒表面形成碳化物^[3]。国内南京航空航天大学进行过单层金刚石工具的高频感应、真空电阻炉的钎焊研究, 获得的钎焊样品中金刚石和钎料粉末之间具有较高的结合强度^[4,5]。

激光钎焊原理是利用激光加热局部受热快的特点, 在短时间内将合金粉末熔化, 随着激光光斑的移开, 熔池靠粉末自身的热传导, 并快速冷却, 金刚石在高温环境下暴露的时间短, 有效地控制了金刚石石墨化。2002年台湾科技大学S. F. Huang等采用450 W的基模CO₂激光, 以Cu-15Ti-10Sn合金作为钎料, 在氩气保护下进行激光钎焊, 激光照射时间为10 s, 钎焊过程中的最高温度为980℃, 获得了直径为7 mm, 厚度为70 μm的钎焊层^[6]。但是, 由于激光功率低, 基模能量太集中, 金刚石表面形成的TiC颗粒不连续, 界面反应不充分, 金刚石易碳化。本文采用多模高功率CO₂激光, 在氩气的保护下大面积扫描金刚石表面, 以克服文献^[6]的缺陷, 并对钎料合金的最佳钎焊工艺、界面结合机制等内容进行深入研究。

2 实验材料和方法

2.1 材料

金刚石颗粒: 采用粒度40/45, ISD1600的优质金刚石。钎焊材料: 采用Cu-Sn-Ni-Ti-Si为组分的钎料, 质量分数为Cu:65%, Sn:15%, Ni:15%, Ti:2.5%, Si:2.5%, 基体材料为45#钢。

2.2 设备及工艺参数

实验装置采用HGL-2000型横流电激励CO₂激光器, 输出功率为2 kW多模, 聚焦透镜焦距250 mm, 焦点直径φ3 mm, 钎焊实验示意图如图1。激光工艺参数: 激光功率700~900 W, 扫描速度7~10 mm/s, 离焦量-1~1 mm, 线能量70~120 J/mm, 直线扫描方式。

2.3 分析测试设备

用扫描电子显微镜(SEM), 能谱仪(EDS)和X射线衍射(XRD)仪等检测设备, 分析金刚石与钎料合金结合界面及金属基体与钎料合金结合界面的成分及结构, 观察钎焊层表面及微观形貌。

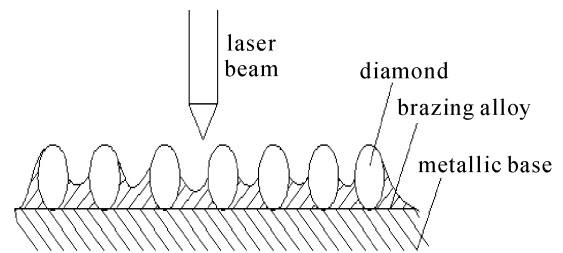


图1 钎焊实验示意图

Fig. 1 Schematic illustration of brazing experiment

3 实验结果与讨论

3.1 工艺参数的影响

3.1.1 离焦量

在金属粉末与基体能够熔合(激光功率800 W, 扫描速度8.4 mm/s)的基础上, 选择不同的离焦量进行钎焊, 结果如图2所示。从焊样形貌看出, 负离焦时钎焊层粉末的延展性好^[7], 与基体结合牢固, 钎焊层表面金刚石颗粒保存良好, 如图2(a)所示。正离焦时金刚石颗粒没有与基体形成牢固结合, 如图2(b)所示。出现这种差别的原因是, 采用负离焦时, 基体与合金粉末界面处激光能量密度大于粉末层激光能量密度, 基体表面温度高于粉末层温度(基体熔点高于粉末熔点), 这样既保证了基体与合金粉末的充分熔合, 又降低了金刚石所在环境的温度, 减少了金刚石的热损伤。采用正离焦时恰好相反, 基体表面温度低于粉末温度, 基体与合金粉末可能熔合不充分, 并造成金刚石颗粒的高温烧损, 机械性能

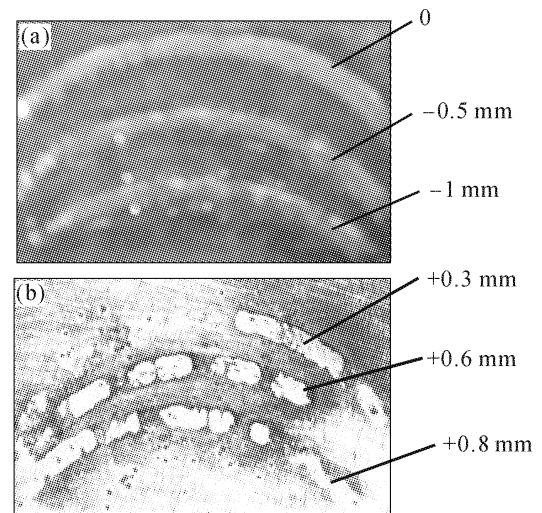


图2 不同离焦量下钎焊层的表面形貌

(a) 负离焦(1×); (b) 正离焦(1×)

Fig. 2 Brazing layer appearance by different defocused distance

(a) negative defocused distance (1×);

(b) positive defocused distance (1×)

变差,容易脱落。

3.1.2 激光功率

保持离焦量 -1 mm(以下实验都采用此离焦量)、扫描速度 8 mm/s,调整激光功率在 700 ~ 900 W 范围内变化,所得钎焊试样表面形貌如图 3 所示。

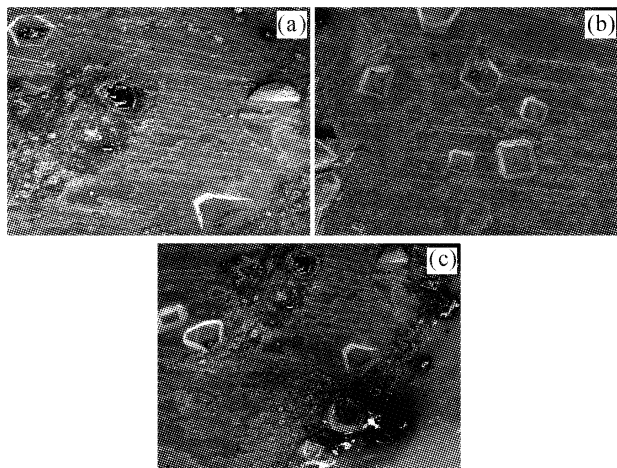


图 3 不同激光功率下钎焊层的表面形貌

Fig. 3 Brazing layer morphology by different laser power

(a) $P = 700 \text{ W}$ (100 \times); (b) $P = 800 \text{ W}$ (100 \times);
(c) $P = 900 \text{ W}$ (100 \times)

如图 3(a) 所示,激光功率为 700 W 时,试样钎焊层表面不光滑,合金粉末与基体组织结合不紧密。这是因为激光功率偏低,合金粉末流动性差,合金元素与金刚石颗粒的化学冶金结合不能充分进行,导致基体无法牢牢固定金刚石颗粒。激光功率提高到 800 W 时,钎焊层形貌如图 3(b) 所示,钎焊层表面光滑,金刚石颗粒保存完好,看不到金刚石颗粒脱落的痕迹。说明此功率能够提供足够的能量使液相合金与金刚石颗粒之间发生化学冶金结合,避免金刚石高温石墨化。如图 3(c) 所示,激光功率提高到 900 W 时,钎焊层表面大部分金刚石颗粒损伤严重,钎焊层表面留下金刚石颗粒烧损后的小孔。

3.1.3 扫描速度

保持激光功率 800 W,调整扫描速度在 7 ~ 10 mm/s 范围内变化,所得钎焊样微观形貌如图 4,可以看出,三种扫描速度均能使合金粉末固结在金属基体上,不同的扫描速度下钎焊层的形貌有明显区别。扫描速度较低时,电镜下焊样表面金刚石颗粒晶形存在缺陷,形状不完整,有些地方有金刚石颗粒烧损后留下的小孔,但钎焊层表面合金却熔化充分,组织致密,如图 4(a) 所示。这是由于扫描速度慢,激光与粉末层的作用时间过长,合金液相对金刚石颗粒造成侵蚀及高温作用下金刚石发生石墨化转

变。随着扫描速度的升高,钎焊层表面形貌明显改善,金刚石颗粒保存良好,与基体之间结合紧密,只有极少部分金刚石颗粒受到损伤,如图 4(b) 所示。说明这一扫描速度下液相合金中的元素充分扩散,与金刚石颗粒表面发生浸润及化学冶金结合,同时也避免金刚石高温下停留时间过长,引起液相合金对金刚石颗粒侵蚀及金刚石自身石墨化。扫描速度再提高,试样钎焊层表面存在少许金刚石颗粒,有些金刚石颗粒与基体结合不紧密,钎焊层表面留下脱落后印迹,如图 4(c) 所示。原因是扫描速度过快,激光束与钎焊层的作用时间短,钎焊层的升温时间短,冷却速度快,内部原子的扩散过程落后于结晶过程,合金均匀化不充分,形成先析出相具有枝晶状的非平衡组织,即“团聚”现象,影响钎料层对金刚石的把持力。

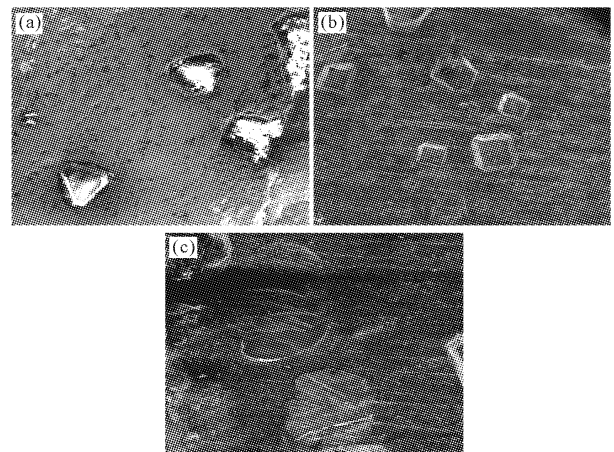


图 4 不同扫描速度下钎焊层的表面形貌 (100 \times)

Fig. 4 Brazing layer morphology by different scanning speed (100 \times)

(a) $v = 7.18 \text{ mm/s}$; (b) $v = 8.39 \text{ mm/s}$; (c) $v = 10 \text{ mm/s}$

3.1.4 线能量

激光功率、扫描速度与钎焊层性能密切相关。定义激光输入线能量为 $W = P/v$ (P 为输入激光功率, v 为光束扫描速度),激光输入线能量能直观地反映单位时间内光束辐射给钎焊层的能量,它是激光能量有否被有效利用的重要参数。由表 1 可知,激光输入线能量在一定范围时,可以得到金刚石保存完好的钎焊样品,激光输入线能量偏低(低于 90 J/mm)时,金刚石颗粒来不及与液相合金发生浸润和化学冶金结合,基体对金刚石颗粒把持不牢;当激光输入线能量过高(高于 98 J/mm)时,金刚石进行石墨化转变或被烧损。

按照 $W = P/v$ 及实验结果,当 $W = 95 \text{ J/mm}$ ($P = 780 \sim 820 \text{ W}$, $v = 8.3 \sim 8.4 \text{ mm/s}$) 时,可以得到

金刚石颗粒、合金粉末及基体三者熔合良好的钎焊层,如图 5(a),(b)所示,钎焊层组织致密,金刚石颗粒保存完好,与基体结合牢固。

表 1 激光线能量

Table 1 Laser specific energy

Laser power /W	Scanning speed /(mm/s)	Laser specific energy /(J/mm)
850	11	77.2
800	10	80.0
750	9.12	82.2
820	8.70	94.0
850	9.12	93.2
800	8.39	95.3
850	7.86	108.1

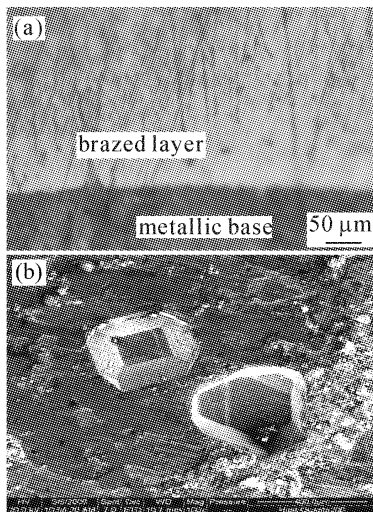


图 5 钎焊层微观组织(a)(200×)及表面形貌(b)(100×)

Fig. 5 Microstructure (a) (200×) and morphology (b) (100×) of brazed layer by $W = 95 \text{ J/mm}$

3.2 粉末结合性能及金刚石表面生成物

通过对实验结果的对比分析,初步确定了金刚石颗粒、钎料合金、金属基体三者结合良好的最佳工艺参数,即负离焦量1 mm,激光功率800 W,扫描速度8.39 mm/s,线能量95 J/mm。为了研究此参数下所得试样的微观结合情况,对钎焊试样表面及侧面做电镜扫描观察形貌和成分分析,如图 6 所示。

如图 6(a)所示,正面看金刚石颗粒与合金钎料结合紧密,说明合金钎料与金刚石颗粒之间浸润良好。金刚石颗粒呈微黄色的半透明状,晶粒完整,无裂纹,上表面有少量小坑。这是由于高温环境中,合金液相中的 Ni, Si 和 Ti 在形成对金刚石颗粒表面浸润的同时也与金刚石中的 C 发生互溶,对金刚石颗粒表面造成侵蚀。在其表面形成小坑,引起表面

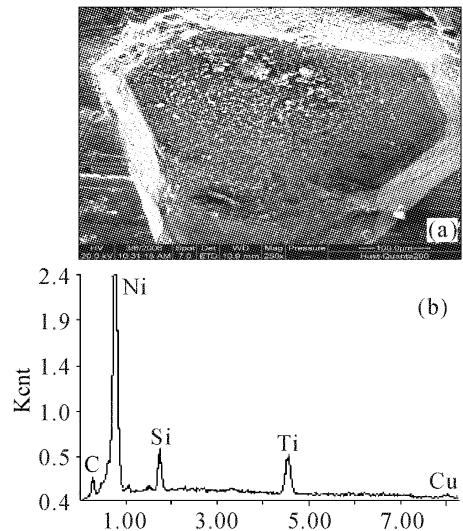


图 6 金刚石颗粒表面微观形貌(a)(250×)及侧面电镜扫描(b)

Fig. 6 SEM morphology for surface (a) (250×) and side-scanning of diamond grit (b)

上“褶皱”^[6]。对金刚石侧面进行电镜扫描做成分分析,其结果如图 6(b)所示,金刚石颗粒侧面主要是由 Ni, Si 和 Ti 等成分组成, C 和 Cu 的成分较低。从理论上讲,电镜扫描是对金刚石颗粒的侧面进行的,此处应存在大量的碳元素,而实际上碳原子含量却偏少。说明合金粉末中的 Ni, Si, Ti 与金刚石颗粒发生了良好浸润,黏附在金刚石颗粒的侧面上,一部分与金刚石颗粒发生了冶金化学反应,生成了 TiC 和 SiC^[8],也黏附在金刚石颗粒的侧面上,覆盖电镜扫描区域,使 C 的组成的很大成分是化合状态的 TiC 和 SiC 及少量 C 单质,所以 C 整体成分偏低。钎料中的 Cu 和 Sn 合金元素由于熔点低,很难与金刚石颗粒浸润,也不会与之发生化学反应,所以作成分扫描时它们的成分很少,甚至没有。此现象说明,合金粉末与金刚石颗粒之间结合良好,不但产生良好浸润,而且发生了冶金化学反应。

3.3 金刚石热损伤机制

金刚石被加热到某温度时所发生的状态及其力学性能的变化,取决于金刚石的品质及加热时周围的介质^[9],表 2 为金刚石在不同介质环境下受热升温时存在的状态。

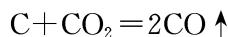
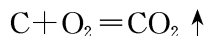
根据表 2 及激光钎焊过程所需功率范围,钎焊过程中金刚石颗粒处于被氧化阶段。钎焊开始阶段,主要是钎焊层的升温,达到一定温度后,金刚石颗粒开始与外界的氧发生氧化反应。外界的氧表现为外部环境存在的氧、粉末材料内部空隙的氧和高温钎焊时金刚石颗粒高温氧化分解生成的 CO₂ 含

表 2 金刚石在不同介质中发生质变的温度范围

Table 2 Temperature range for diamond change at different medium

Temperature / °C	Medium	State
720	Oxygen	Oxidation
850	Atmosphere	Oxidation
750~800	Iron or iron-alloy	Decompose iron
1500~1600	Vacuum and inert gases	Partly graphite
2100	Vacuum and inert gases	Entirely graphite

量, 反应为:



氧化反应的标准生成自由能可以表示为气体的分压

$$\text{与氧气反应: } \Delta G_{O_2}^0 = -RT \ln P_{O_2},$$

$$\text{与 CO}_2 \text{ 反应: } \Delta G_{CO_2}^0 = -RT \ln \frac{P_{CO}}{P_{CO_2}},$$

其中 R 为气体常数; T 为绝对温度; P_{O_2} , P_{CO_2} 为气氛中各气体的分压。

在自由能方程中的气体分压下, 金刚石会一直氧化, 直到金刚石与氧化物处于平衡状态, 这一过程表现为金刚石颗粒氧化烧损变成气体或部分氧化, 被氧化的金刚石颗粒尖角部位产生裂纹或孔洞, 机械性能急剧下降, 如图 7(a) 所示。这种裂纹的金刚石在工具使用过程中也会提早破坏。为有效控制金刚石被氧化, 钎焊过程中应控制其与外部环境中的氧接触, 实验中的保护气装置已经达到了这一目的, 金刚石颗粒氧化程度较小, 只是从钎焊前的透明体变成半透明体, 晶型完整, 无热损伤迹象^[10], 如图 7(b) 所示。

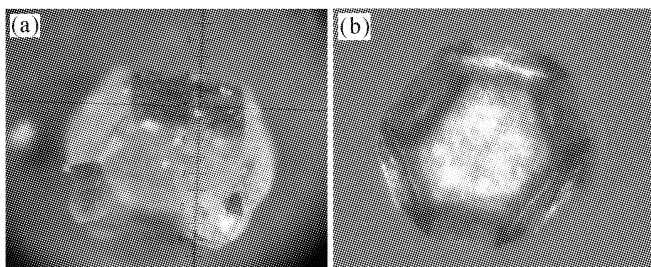


图 7 钎焊后有(a)和无(b)热损伤的金刚石颗粒(100×)

Fig. 7 Brazed diamond with (a) and without (b) heat damage (100×)

4 结 论

系统地研究了激光工艺参数对粉末结合及金刚石颗粒热损伤的影响, 分析了钎焊层结合机制及金

刚石热损伤机制, 得出如下结论:

1) 激光功率和扫描速度是影响金刚石热损伤及金刚石表面浸润的主要因素, 粉末厚度 0.5 mm, 激光光斑直径 $\phi 3$ mm, 功率 800 W, 扫描速度 8.39 mm/s 时可获得金刚石颗粒、钎料合金、金属基体三者之间具有最佳结合性能的钎焊层。

2) 合金粉末对金刚石颗粒表面浸润良好, 并在液相环境下与金刚石表面 C 通过互扩散, 发生冶金化学反应生成 TiC, SiC, 使金刚石颗粒与基体紧密连接。

3) 激光钎焊过程中金刚石处于被氧化阶段, 当输入能量太高时, 在自由能方程的气体分压下氧化反应持续进行, 直到反应平衡, 其表现形式为金刚石颗粒石墨化, 并逐步氧化烧损或气化, 因此, 钎焊过程中应严格控制氧含量与激光能量。

参 考 文 献

- 1 Wu Zhibin, Xu Hongjun, Xiao Bing *et al.*. Experimental research of brazing monolayer diamond grinding wheel [J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, **12**(12):1423~1424
武志斌, 徐鸿钧, 肖冰等. 钎焊单层金刚石的实验研究[J]. *中国机械工程*, 2001, **12**(12):1423~1424
- 2 A. Trenker, H. Seidemann. High-vacuum brazing of diamond tools [J]. *Industrial Diamond Review*, 2002, **62**(592):49~52
- 3 F. A. Khalid, U. E. Klotz, H.-R. Elsener *et al.*. On the interfacial nanostructure of brazed diamond grits [J]. *Scripta Materialia*, 2004, **50**(8):1139~1143
- 4 Huang Hui, Zhu Huoming, Xu Ximing. Diamond grain brazing in air [J]. *Welding & Joining*, 2004, (1):35~36
黄辉, 朱火明, 徐西明. 空气中钎焊金刚石磨粒[J]. *焊接*, 2004, (1):35~36
- 5 Guan Yancong, Chen Yuquan, Yao Deming. Research of the soldering and brazing process for diamond abrasive slices [J]. *Machinery Manufacturing Engineer*, 2005, (6):51~52
关砚聪, 陈玉全, 姚德明. 钎焊金刚石磨料片工艺的研究[J]. *现代制造工程*, 2005, (6):51~52
- 6 Chen Hongxin, Jia Tianqing, Huang Min *et al.*. Visible-infrared femtosecond laser-induced optical breakdown of 6H SiC [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):467~470
陈洪新, 贾天卿, 黄敏等. 飞秒激光的波长对 SiC 材料烧蚀的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):467~470
- 7 Zheng Qiguang, Tao Xingzhi, Yang Yang *et al.*. Study on laser deep penetration welding of metallic materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **A18**(2):123~124
郑启光, 陶星芝, 杨杨等. 高功率 CO₂ 激光深穿透焊接的研究[J]. *中国激光*, 1991, **A18**(2):123~124
- 8 Song Yueqing, Sun Yuchao, Yin Sheng *et al.*. Action of carbide former in base materials for diamond tool with Cabalt matrix [J]. *Journal of Synthetic Crystal*, 1993, **22**(1):73~78
- 9 Yanbin Chen, Zhenglong Lei, Lin Wu *et al.*. Influence of shielding gas pressure on welding characteristics in CO₂ laser-MIG hybrid welding process [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1):33~35
- 10 Li Lijun, Jin Xiangzhong, Hong Lei. Laser welding of diamond saw blades [J]. *Applied Laser*, 1997, **17**(5):5~6
李力钧, 金湘中, 洪蕾. 金刚石圆锯片的激光焊接[J]. *应用激光*, 1997, **17**(5):5~6