

文章编号: 0258-7025(2007)03-0432-06

# 高功率 CO<sub>2</sub> 激光焊接三明治金刚石锯片

钟如涛, 唐霞辉, 秦应雄, 谢涛, 李正佳

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 利用 DC025 扩散冷却板条(SLAB)激光器系统地研究了激光焊接三明治金刚石锯片的焊接缺陷和焊接工艺。结果表明焊接缺陷主要表现为焊缝中大量的气孔和较多的铜,降低了焊缝强度。气孔来源于基体里黏接剂、油污与粉末冶金刀头的共同作用,采用正面熔透1/2,反面完全熔透的焊接方式和提高焊接速度来减少气孔缺陷。铜来源于基体里铜板的熔化,当激光偏向刀头时,铜的含量降低。 $\phi 350$  mm三明治锯片合适的焊接参数为激光偏移量 0~+0.20 mm,正面焊接线能量为 25~40 J/mm,且激光功率低于1000 W;反面焊接线能量为 80~150 J/mm,且激光功率高于1500 W;此时焊缝铜的质量分数为0.2%~1.1%,焊接气孔较少,焊缝抗弯强度满足 EN13236 安全标准。

**关键词** 激光技术;激光焊接;三明治金刚石锯片;粉末冶金;焊接缺陷

**中图分类号** TG 456.7;TN 249 **文献标识码** A

## Higher Power CO<sub>2</sub> Laser Welding Technology for Sandwich Diamond Saw

ZHONG Ru-tao, TANG Xia-hui, QIN Yin-xiong, XIE Tao, LI Zheng-jia

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

**Abstract** Laser welding technology and defect of sandwich diamond saw are systemically researched with RofinDC025 laser. The result indicates that a mass of porosities and more Cu are the main welded defect in the welding. The porosities produced by the action together of impurities in the interlayer and powder metallurgy material can be reduced mostly when welding depth is body's 1/2 in one side and body's 100% in another side or improving the welding speed. The Cu that produced by the melting Cu plate in the body can be reduced when the lasering lean to the diamond segment. The right welding parameters of  $\phi 350$  mm sandwich saw are that the laser offset is 0~+0.20 mm, in one side the welding line energy is 25~40 J/mm with the laser power under 1000 W, in another side the welding line energy is 80~150 J/mm with the laser power excess 1500 W. Under this optimization condition, the content of Cu is about 0.2%~1.1% in the welded zone, the porosities are less, and the welded blend intensity is up to EN13236 safety standard.

**Key words** laser technique; laser welding; sandwich diamond saw; powder metallurgy; welded defect

## 1 引言

金刚石圆锯片在工作时产生很大噪声,给操作工人和周边环境造成很大危害,低噪声环保型金刚石圆锯片已成为未来的发展方向。三明治锯片由于

它特殊的结构,能够很大程度地降低噪声<sup>[1,2]</sup>,因此得到了越来越广泛的使用。在室温下声频范围内,铜的损耗因数为  $2 \times 10^{-3}$ ,钢的损耗因数为  $(1 \sim 6) \times 10^{-4}$ ,铜相对于钢是一种阻尼材料,成为约束阻尼层,在弯曲变形过程中,阻尼层受上下两面板的约束

收稿日期:2006-08-09;收到修改稿日期:2006-11-03

基金项目:国家“十五”科技攻关项目(2002BA217C)资助课题。

作者简介:钟如涛(1967—),男,湖北荆门人,博士研究生,主要从事高功率气体激光器及其加工技术的研究。

E-mail: zrt67@sina.com

导师简介:李正佳(1945—),男,湖南临湘人,教授,博士生导师,主要从事高功率固体激光器、激光加工技术、激光生物医学和医用激光设备等的研究。E-mail: zhjli@mail.hust.edu.cn

不能有伸缩变形,而产生较大的剪切形变。因而可以更多地耗散振动能量,把振动能量转化为热能,从而有效地降低锯片切割时的噪声。

对于普通金刚石锯片的激光焊接,文献[2~12]进行了详细、广泛的研究。但三明治锯片由于基体的特殊结构决定了其焊接工艺与普通锯片不同,主要与三个方面有关:1) 夹层材料与外层材料特性的不同,不同材料对激光的吸收与反射特性不一样,在相同的激光条件下,材料吸收激光的能量不一样,再加上材料的物理特性比如熔点、结晶温度的差异,焊接接头处情况极为复杂,给焊接带来了很大困难;2) 三明治材料各层之间不是冶金结合,而有缝隙,缝隙中的一些黏结剂和油污很难消除。在焊接过程中出现气孔和夹渣,危害焊缝的质量;3) 铜作为三明治基体的夹层材料,激光焊接后,铜在焊缝中的含量对焊缝性能有很大的影响。

本文采用 DC025 扩散冷却板条(SLAB)激光器进行三明治锯片激光焊接实验研究;探讨消除气孔、夹渣等焊接缺陷的方法;控制铜在焊缝中的含量。获得具有最佳焊缝外观及焊缝强度的工艺方法。

## 2 实验条件

### 2.1 设备

实验设备及方法如图 1 所示。采用德国 LSM240 全自动激光焊接机,如图 1(a)所示,激光发生器为 Rofin 公司 DC025 型扩散冷却板条激光器,最大功率为 2500 W,激光模式为基模,近似圆形光斑。激光光束质量如图 1(b)所示<sup>[13]</sup>,纵坐标  $r$  表示测量光束半径,横坐标  $z$  表示测量点距离出光口的距离,反射聚焦焦距为 150 mm。

### 2.2 方法

三明治锯片基体与金刚石刀头的焊接如图 1(c)所示,实验中主要研究激光功率、焊接速度、光束偏移量对焊缝质量的影响,固定激光焊接参数为<sup>[3~9]</sup>:光束倾斜 10°,离焦量 -0.6 mm;用氩气对焊缝进行保护,轴吹保护气流量 30 L/min,侧吹保护气流量 25 L/min。

### 2.3 材料

选取  $\phi 350$  mm 的三明治锯片作为实验材料,其三明治基体中间夹层为 0.1 mm 的纯铜板,上、下层各为 1.1 mm 30CrMo 的钢板。金刚石刀头设 1.5 mm 激光焊接层,材料为 Fe, Co, Ni 粉末烧结,焊前外表去油污处理。

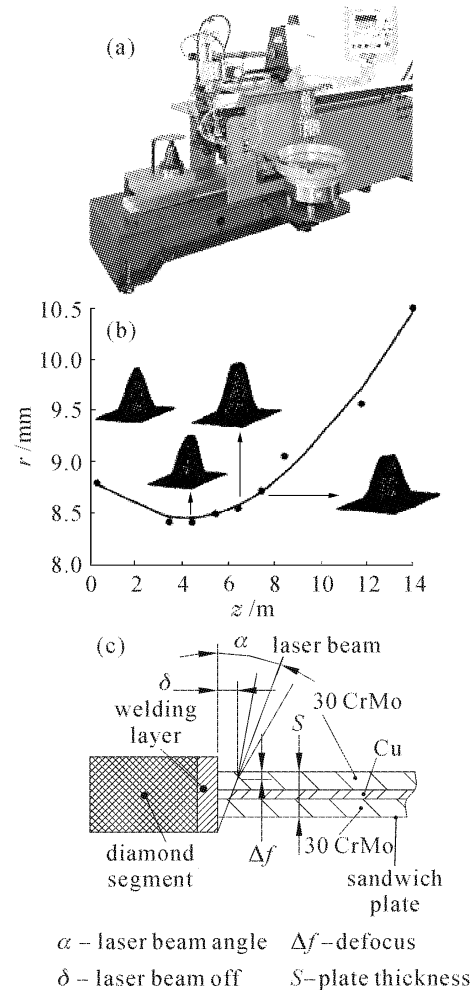


图 1 实验设备及方法

(a) 激光焊接设备; (b) 光束质量; (c) 激光焊接原理

Fig. 1 Experimental equipment and principle

(a) laser welding equipment; (b) laser beam quality;

(c) laser welding principle

## 3 实验结果与分析

### 3.1 焊接缺陷

根据普通金刚石锯片的焊接工艺参数<sup>[3~9]</sup>,选取激光偏移量 -0.25 (偏向基体为负,偏向刀头为正),固定参数不变,进行  $\phi 350$  mm 锯片全熔透焊接。焊缝外观如图 2(a)所示,焊缝表面有气孔、飞溅、塌陷。沿焊缝纵向去掉刀头,在焊缝纵截面存在较多气孔,比普通激光焊接锯片产生的气孔明显地多和大,如图 2(b)所示,减小了焊缝有效承载面,焊缝强度较低。

对焊缝进行电子探针微区成分检测和铜元素线扫描,结果分别见图 3(b)和表 1。焊缝里铜的质量分数为 2.34% (表 1),沿扫描线均匀分布(图 3(b))。由文献[14,15]可知,当高强钢焊缝中铜的质量分数在 0.15%~0.85% 时,对焊缝能起到强化和韧化作

用,但当铜的质量分数超过1.2%时,其焊缝韧性都有不同程度的降低,且随着铜含量的增加,韧性继续降低,易产生裂纹。因此,此焊缝强度及韧性较低,脆性较大。

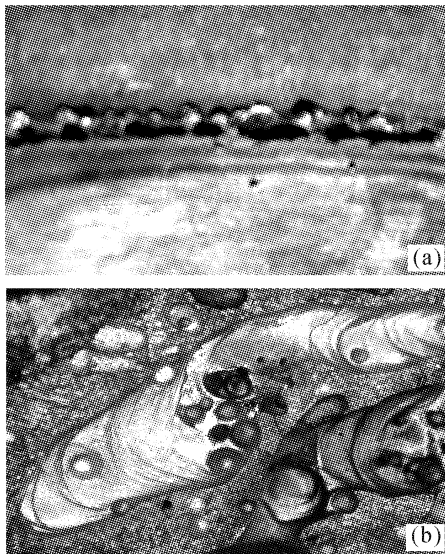


图 2 焊缝缺陷照片  
(a) 外观缺陷(2×);(b) 焊缝纵截面(20×)

Fig. 2 Photos of welding defect

(a) surface defect (2×); (b) vertical sections welding (20×)

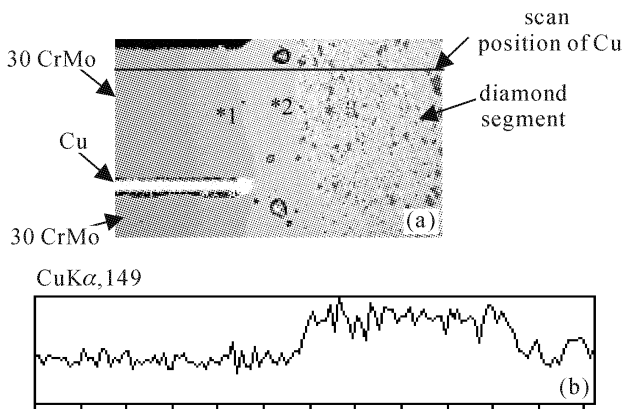


图 3 焊缝成分分析

(a) 成分检测位置(25×);(b) Cu 元素线分布

Fig. 3 Chemical composition analysis of welding

(a) analysis position of chemical composition (25×);  
(b) line distribution of Cu

表 1 焊接各区域的成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of welded zone (%)

Si	Cr	Mo	Fe	Co	Ni	Cu
0.41	1.54	0.97	76.77	9.40	8.57	2.34

$w(\text{Si}) / \%$

### 3.2 气孔的产生

普通锯片的激光焊接焊缝里的气孔主要来源于粉末冶金刀头里的孔隙<sup>[10,11]</sup>。但在三明治锯片基体里有铜、黏接剂和油污等低熔点物质,在焊接时更

容易产生气孔。如图 4 所示,对气孔产生的主要原因进行了焊接研究。取中间夹层分别含铜和黏接剂的锯片基体与粉末冶金刀头进行单面熔透焊接,图 4(a),(b)分别为焊缝纵截面照片,对比分析照片,说明气孔产生的主要原因与基体里的黏接剂和油污有关。

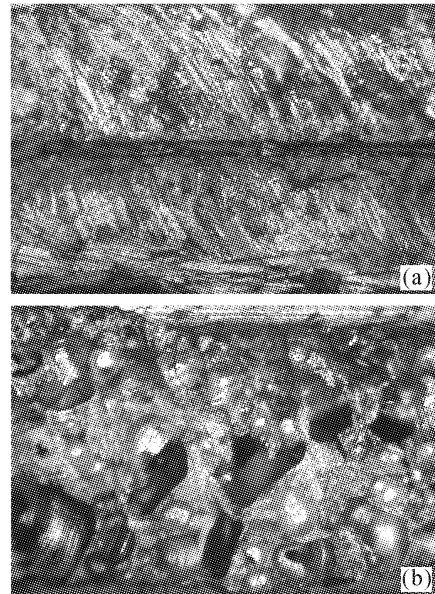


图 4 气孔成因分析的焊缝纵截面照片(20×)  
(a) 含铜的基体;(b) 含黏接剂的基体

Fig. 4 Photos of vertical sections welding for analysis of porosity formation (20×)  
(a) with Cu; (b) with cement

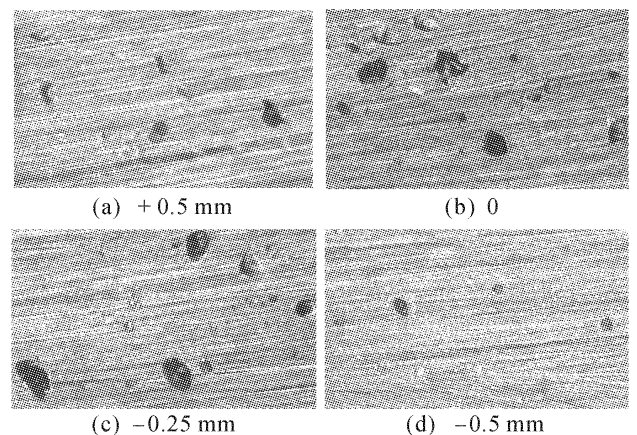


图 5 不同偏移量时的焊缝横截面照片(10×)  
Fig. 5 Photos of vertical sections of welds at different offset (10×)

又分别在不同激光偏移量下对三明治锯片进行焊接,图 5(a)~(d)分别是激光偏移量为+0.5 mm,0,-0.25 mm,-0.5 mm时的焊缝纵截面照片。从照片可看出激光偏移-0.5 mm时气孔最少,+0.5 mm时较多,0 和-0.25 mm时最多且两种偏移量下差别不大。说明三明治锯片激光焊接

焊缝中大量气孔是基体里的黏接剂、油污与粉末冶金刀头共同作用的结果,且受粉末冶金刀头影响更大。

### 3.3 焊接工艺对气孔倾向的影响

首先对正反两面分别进行熔透 1/2 的焊接,对于  $\phi 350$  mm 锯片正面焊接线能量 25~40 J/mm,且激光功率低于 1000 W。图 6(a)所示为焊缝横截面照片。从图中可看到,首先焊接的一面气孔较多、较大,后焊接的断面组织致密,基本没有气孔。弯曲强度检测时反面强度明显大于正面。分析原因:正面焊接时,锯片里的黏接剂和油污受热被蒸发气化,一部分逸出,一部分在正面焊缝组织里形成气孔。反面焊接时,由于正面焊接的预热、净化作用,焊接区域的低熔点物质已较少,所以形成致密的焊缝组织。

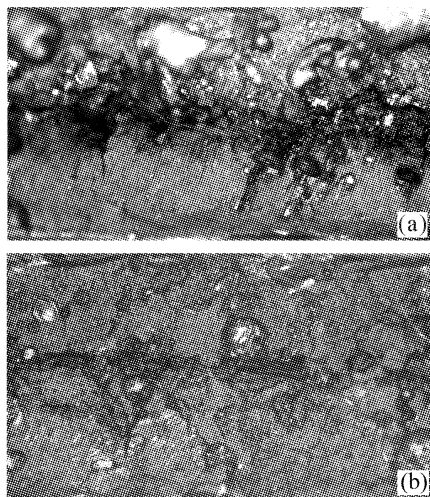


图 6 两种方法焊接时的横截面图(20 $\times$ )

(a) 正面熔透 1/2,反面熔透 1/2;(b) 正面熔透 1/2,反面全熔透

Fig. 6 Photos of cross section with two methods (20 $\times$ )

(a) welding depth 1/2 in one side, welding depth 1/2 in another side; (b) welding depth 1/2 in one side, welding depth 100% in another side

another side

鉴于以上结果,采取正面进行熔透 1/2 的焊接,反面进行完全熔透的焊接,图 6(b)所示为焊缝横截面照片,从图中看到气孔数量、体积明显变小。原因是:除了实验一的原因外气孔在全部焊缝断面重新进行了分配;其次反面全熔透焊接时产生的小孔效应有助于部分气体溢出。

由于粉末冶金刀头对气孔的影响更大,减少粉末冶金材料的焊接气孔具有更重要意义。在激光焊接工艺中,激光焊接功率和速度对粉末冶金材料焊接气孔的影响很大<sup>[16]</sup>,通过降低激光功率提高焊接速度减少金属蒸气的形成,气孔数降低,随着激光功率增加,气孔数增加。据推测,功率增加,熔化金属

被加热到很高温度,产生金属蒸气,熔池中液体金属变得不稳定,产生湍流。

### 3.4 偏移量对铜稀释率的影响

要降低焊缝中铜元素的含量,只有减少基体中铜的熔化量。通过改变激光焊接偏移量可以降低焊缝中铜的含量。对不同偏移量焊缝进行电子探针元素含量分析,铜的含量如表 2 所示。当激光偏向刀头 0 时,焊缝中铜的质量分数降低到 1.1%;偏向刀头 0.25 mm 时,焊缝中几乎已无铜存在。因此为了使铜在焊缝中起到强化韧化作用,激光偏移量应控制在 0~+0.20 mm 范围内。

表 2 焊缝铜的含量

Table 2 Cu composition of welded zone

Offset /mm	$w(\text{Cu}) / \%$
-0.25	2.34
-0.15	1.90
0	1.10
+0.05	0.85
+0.15	0.40
+0.20	0.20
+0.25	0

### 3.5 焊接线能量

偏移量为 +0.1 mm,其他参数不变,分别采用不同的激光功率和焊接速度对  $\phi 350$  mm 三明治金刚石锯片进行了一组焊接实验。图 7 为根据实验数据确定的激光焊接热输入范围图。

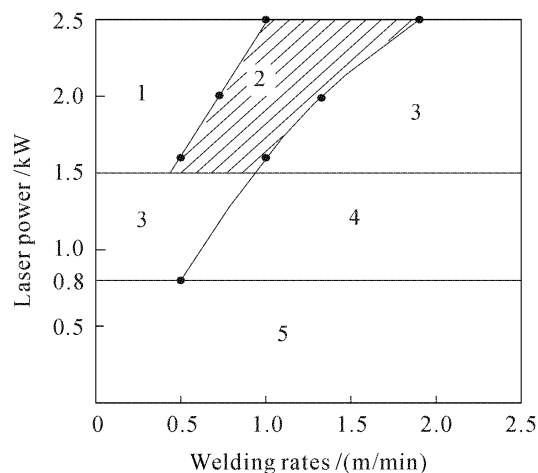


图 7 焊接参数范围

Fig. 7 Range of welding parameters

图 7 中把参数分成五个区域:1,2 为焊透区,3,4 为未焊透区,5 为不能焊接区。受激光深熔焊接时最小功率密度阈值的限制,焊透的激光功率应在

1500 W以上,否则,就算再降低焊接速度来提高焊接热输入也很难焊透。图7中1,2区都可得到单面焊接的熔透焊缝,但1区的焊接热输入太大,热影响区和焊缝变宽,影响接头力学性能。3,4区不能得到单面焊接的熔透焊缝。2区为最合适单面焊透区域,焊接线能量80~150 J/mm,有强烈、稳定的等离子体产生,焊接稳定,声音清脆。此现象与文献[17]的研究结果一致,焊接后刀头比较干净,焊缝成形好,表面少量气孔。为了提高生产效率,缩小焊缝热影响区,获得较细的晶粒,在保证焊透的前提下应选用较小的焊接线能量。

对 $\phi 350$  mm锯片,选取偏移量+0.1 mm,正面焊接速度1.6 m/min,激光功率800 W,焊接线能量约为30 J/mm;反面激光功率2.5 kW,焊接速度1.8 m/min,焊接线能量约为83 J/mm进行焊接,可得到典型的焊缝外观如图8所示。取抗弯强度试样 $35.0\text{ mm}\times 8.0\text{ mm}\times 2.3\text{ mm}$ ,采用EN13236安全标准<sup>[18]</sup>进行抗弯强度检测,抗弯强度 $\sigma_b = \frac{6M_b}{L_s E^2}$ ,其中 $M_b$ 为弯矩, $E$ 为锯片基体厚度, $L_s$ 为刀头长度。对用于固定式和移动式切机的金刚石锯片,破坏性检测要求 $\sigma_b \geq 450\text{ MPa}$ ;非破坏性检测要求 $\sigma_b \geq 225\text{ MPa}$ 。检测结果表明,焊缝抗弯强度达到950 MPa,满足EN13236安全标准。

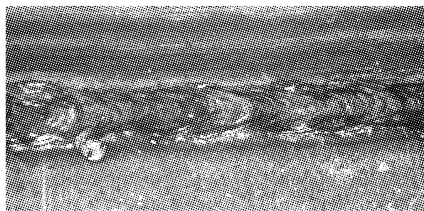


图8 纵向焊缝照片(10 $\times$ )

Fig. 8 Photo of welded vertical sections (10 $\times$ )

## 4 结 论

通过对 $\phi 350$  mm三明治金刚石锯片激光焊接实验研究,得到了合理焊接工艺参数和焊缝性能指标:

1) 三明治金刚石锯片激光焊接缺陷主要表现为焊缝中大量的焊接气孔和较多的铜,极大地降低了焊接强度;采用正面熔透1/2,反面完全熔透的焊接方式和提高焊接速度可以减少气孔缺陷。

2) 焊缝中铜来源于基体里铜板的熔化,当激光偏向刀头焊接时,焊缝中铜的含量降低,强度提高。

3)  $\phi 350$  mm锯片合适的焊接参数:激光偏移刀头0~+0.20 mm,单面熔透的线能量为80~

150 J/mm,且激光功率高于1500 W;单面熔透1/2的线能量为25~40 J/mm,且激光功率低于1000 W;焊缝抗弯强度满足EN13236安全标准。

## 参 考 文 献

- H. Oberle, C. Commaret, R. Magnaud *et al.*. Optimizing resistance spot welding parameters for vibration damping steel sheets [J]. *Welding Journal*, 1998, **77**(1):8~12
- Tang Xiahui. Laser Welding of Diamond Tools [M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2004. 11  
唐霞辉. 激光焊接金刚石工具[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004. 11
- Li Lijun, Shi Xiaoqiang, Jin Xiangzhong *et al.*. Laser welding of diamond saw blades [J]. *Applied Laser*, 1997, **17**(5):194~220  
李力钧, 史晓强, 金湘中 等. 激光焊接金刚石圆锯片的试验研究[J]. *应用激光*, 1997, **17**(5):194~220
- Shi Xiaoqiang, Li Lijun. Experimental study of technological parameters laser welding on the diamond tools [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(4):379~383  
史晓强, 李力钧. 金刚石锯片的激光焊接工艺参数试验研究[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(4):379~383
- Yao Jianhua, Chen Li. Study of laser welding technology on diamond circular saw blade [J]. *Chinese J. Laser*, 2000, **A27**(8):761~764  
姚建华, 陈 俐. 激光焊接金刚石圆锯片工艺研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8):761~764
- Jin Xiangzhong, Li Lijun. Laser welding of diamond saw blade [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition)*, 1999, **26**(3):34~37  
金湘中, 李力钧. 金刚石圆锯片的激光焊接[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 1999, **26**(3):34~37
- Shi Xiaoqiang, Jin Xiangzhong, Luo Wenquan. Laser welding of diamond tools [J]. *Applied Laser*, 1996, **16**(1):25~26  
史晓强, 金湘中, 罗闻泉. 金刚石锯片的激光焊接[J]. *应用激光*, 1996, **16**(1):25~26
- Huang Qiancheng, Liao Jianhong, Liu Songhao *et al.*. Laser welding of diamond saw blade [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(2):19~20  
黄前程, 廖健宏, 刘颂豪 等. 金刚石锯片激光焊接[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(2):19~20
- Li Lijun, Jin Xiangzhong, Hong Lei *et al.*. Laser welding of diamond saw blade [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 1998, (5):5~7  
李力钧, 金湘中, 洪 蕾 等. 金刚石圆锯片的激光焊接[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 1998, (5):5~7
- Xia Jinhua, Yin Sheng, Yei Hongyu *et al.*. Analysis of defects and fracture surfaces of laser welding diamond saw blade [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1999, **28**(1):79~83  
夏锦华, 殷 声, 叶宏煜 等. 金刚石锯片激光焊接缺陷和断口分析[J]. *人工晶体学报*, 1999, **28**(1):79~83
- Xia Jinhua, Yin Shen, Yie Hongyu *et al.*. Effect of beam alignment on laser welding quality of diamond saw blade [J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(4):248~251  
夏锦华, 殷 声, 叶宏煜 等. 光束偏移量对金刚石锯片激光焊接质量的影响[J]. *激光技术*, 1999, **23**(4):248~251
- Zhu Haihong, Tang Xiahui, Zhu Guofu *et al.*. Study of equipment and technology of laser welding for diamond saw blades [J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(3):141~144  
朱海红, 唐霞辉, 朱国富 等. 金刚石圆锯片的激光焊接设备与工艺研究[J]. *激光技术*, 2000, **24**(3):141~144

13 Chen Hong, Li Yu, Zuo Tiechuan *et al.*. Measurement of beam quality for high power slab CO<sub>2</sub> laser [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2005, **31**(3):251~254  
陈虹,李钰,左铁钊等. 大功率 Slab CO<sub>2</sub> 激光器光束质量的测量[J]. 北京工业大学学报, 2005, **31**(3):251~254

14 Li Shaobing, Zhang Junxu. Effect of copper in high-strength alloy steels and weld metals [J]. *Development and Application of Materials*, 2001, **16**(6):39~42  
李少兵,张俊旭. 铜在高强度合金钢及焊缝金属中的作用[J]. 材料开发及应用, 2001, **16**(6):39~42

15 Kai Chen, Zhiyong Wang, Rongshi Xiao *et al.*. Mechanism of laser welding on dissimilar metals between stainless steel and W-Cu alloy [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5):294~296

16 Zhou Jinxin, Tang Xiahui, Zhou Yi *et al.*. Investigation of the porosity defect phenomenon during laser welding of powder metal material [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(6):503~505  
周金鑫,唐霞辉,周毅等. 粉末冶金材料激光焊接的气孔现象研究[J]. 激光技术, 2003, **27**(6):503~505

17 Duan Aiqin, Hu Lunji, Wang Yajun. Research on weld penetration monitoring by laser plasma optical signal in laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):131~134  
段爱琴,胡伦骥,王亚军. 激光深熔焊缝的熔透性监测研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1):131~134

18 British Standard. Safety Requirements for Superabrasives [S]. BS EN13236, 2001



· 广告 ·

## 最佳全球供应商



LBO 专利号: 4,826,283 美国专利号  
88 1 02084.2 中国专利号  
2023845 日本专利号

## FC CASTECH<sup>®</sup>

我司提供以下类型晶体:

- 非线性光学晶体
- 激光晶体
- 声光及电光晶体
- 双折射晶体
- 光折变晶体
- 晶体组件
- X-射线晶体
- 光学件



**BBO**



**BIBO**



**KTP**



**Nd:YVO<sub>4</sub>**



胶合晶体



键合晶体



蓝光组件



光胶晶体

### 福建福晶科技股份有限公司

**FUJIAN CASTECH CRYSTALS, INC.**

地址:福建省福州市杨桥西路155号 邮编:350002  
TEL:86-591-83710533 FAX:86-591-83711593  
http://www.castech.com E-mail: sales@castech.com