

文章编号: 1001-3806(2006)05-0486-04

激光焊接金刚石锯片的研究现状

黄开金¹, 林 鑫², 胡木林¹, 谢长生¹, 陶曾毅¹

(1. 华中科技大学 国家模具重点实验室, 武汉 430074; 2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘要: 从激光焊接金刚石锯片的焊接过渡层材料成分、焊接工艺和焊接产品检测 3 个方面对该方法的国内外现状进行了综述。选作刀头过渡层材料成分的元素包括单元素(如 CoNi)、双元素(如 FeCoFeNiCoNiFeCu)和 3 元素(如 FeCoNiFeCoCu)3 种。结果表明, 含钴元素的过渡层激光焊接性能优异; 金刚石锯片的激光焊接工艺较为成熟; 目前需要 100% 检测激光焊接锯片的强度; 对激光焊接过程的机理和数值模型研究、过渡层预合金粉末以及在线质量检测技术研究不够。因此今后的研究重点应该围绕这些问题展开。

关键词: 激光技术; 激光焊接; 金刚石锯片; 过渡层; 焊接工艺; 焊件检测

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A

Development of laser welding diamond saw blade

HUANG Kai-jin¹, LIN Xin², HU Mu-lin¹, XIE Chang-sheng¹, TAO Zeng-yi¹

(1. The State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Mould Technology, HUST, Wuhan 430074, China; 2. National Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract The development of laser welding diamond saw blade including backing layer composition, welding process and welding product test is reviewed. The backing layer composition is consisted of single element such as Co and Ni, or two elements such as FeCoFeNiCoNiFeCu, or three elements such as FeCoNiFeCoCu, and the backing layer including Co element is suitable for the laser welding. The laser welding process of diamond saw blade is advanced. The welding products should be tested especially for welding strength. The current problems are lacking in the mechanism and numerical model of laser welding, the prealloyed powder of backing layer and the online quality test technique. The above problems should be focused on in the future study.

Key words laser technique; laser welding; diamond saw blade; backing layer; welding process; welding products test

引 言

金刚石锯片广泛应用于石材加工、建筑施工、高速公路和飞机场跑道等领域的切割或切缝。传统的电镀、钎焊和烧结制造方法存在不同的缺点, 如电镀和钎焊的结合强度低、冷压烧结只适合小锯片等, 而激光焊接金刚石锯片工艺是 20 世纪 80 年代发展起来的、较传统高频加银片钎焊焊接金刚石锯片工艺先进的新型制造技术, 由于它具有不崩齿、安全可靠、高温强度高、能实现高速自动化生产、无需后续加工、干湿切割均可等优点, 因此, 很快在美、日、韩、中和欧洲等地得到推广应用, 如美国的 Norton 公司和 Western Saw 公司、英国的 Nimbus 公司、德国的 Dr. Fritsch 公司、意大利的 Sintris 公司和 Robosintris 公司、韩国的 Diex 公司和 Elwa 公司、中国的华工科技、团结激光、金石凯激光、

济南铸锻所、郑州磨料磨具磨削研究所等单位均能提供金刚石锯片激光焊接机^[1-10]。下面将从激光焊接金刚石锯片的焊接过渡层成分设计、焊接工艺和焊接产品性能测试 3 个方面对该方法的国内外现状进行综述。

1 焊接过渡层材料成分

金刚石锯片由钢基体和圆弧形刀头两部分组成。钢基体以碳钢和合金钢为主, 如 38CrMoAl, 30CrMoV, 40Cr, 45, 65Mn, 30CrMo, 28CrMo, 20CrMo, AISI4135, 50Mn2V 等^[10-12], 但适用于激光焊接金刚石锯片的基体材料一般应选用高强度特种低碳合金钢, 传统的 40Cr 和 45 钢因基体强度不够容易变形而不主张使用; 传统的 65Mn 高碳钢因在激光焊接基体热影响区部位容易产生大量的高脆性针状马氏体也不主张使用。刀头为铜基、铁基、镍基、钴基、钨基和铝基粉末掺金刚石热压烧结成型^[13,14]。如何将二者可靠地焊接在一起, 是激光焊接金刚石锯片工艺的关键技术之一。为了避免刀头中金刚石颗粒在激光焊接高温下石

作者简介: 黄开金 (1968-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光应用和纳米材料应用方面的研究。

Email: huangkaijin@163.net

收稿日期: 2005-09-29; 收到修改稿日期: 2006-03-14

墨化(人造金刚石的碳化温度为 $740^{\circ}\text{C} \sim 838^{\circ}\text{C}$ ^[15])和因刀头与钢基体的热膨胀相差过大而产生焊接裂纹,通常需要在刀头内侧设置一层无金刚石颗粒的过渡层(见图 1)^[12],其厚度在 $1.0\text{mm} \sim 2.0\text{mm}$ ^[10 11 15~20]范围内,其中过渡层与刀头则是通过冷压成型 + 热压烧结工艺连接在一起。激光焊接时,过渡层与钢基体焊接在一起,因此,刀头过渡层材料的选取严重影响激光焊接金刚石锯片的外观和焊缝强度。

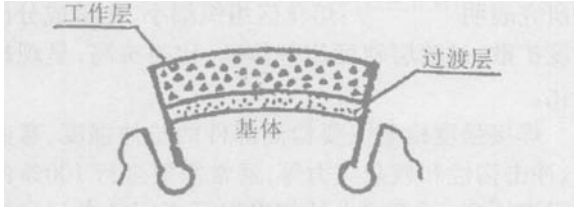


图 1 含过渡层的激光焊接刀头

根据激光焊接金刚石锯片使用性能与生产工艺的要求,激光焊接刀头过渡层须满足下列要求^[12 17]:足够高的焊接强度、良好的焊缝质量、合理的配方组分、最优的烧结温度和低廉的成本。

目前选作刀头过渡层材料(包括最近发展起来的预合金粉末)成分的元素可分为单元素(如 Co Ni)、双元素(如 FeCo FeNi CoNi FeCu)和 3 元素(如 FeCoNi FeCoCu) 3 种情况^[10 12 17],但过渡层中不能含有低熔点金属如锡等元素,原因在于这些元素容易蒸发与汽化而产生气孔,但可加入少量的起固溶强化、增加耐磨性和减少焊接气孔作用的 Mn 和 Cr 元素。大量的实际配方表明^[10 12 18 21, 22]: Co 作为过渡层材料成分是十分有利的,因为钢基体和钴基材料之间能形成 Co 和 Fe 的无限固溶体,实现钢基体与过渡层之间良好的冶金结合,但因价格因素则必须设法减少或降低其用量,这也是过渡层材料配方研究的主要目标。

现在常见的过渡层粉末材料(包括预合金粉末)有德国 Dr Fritsch 公司的 V13-500, V25-898, V20-503(主要成分为 Fe Co), V7-599, V11-699(主要成分为 Fe Ni), V2-699(主要成分为 Co Ni), V6-790, V21-790(主要成分为 Ni)和 V30-589(主要成分为 Co)^[10 12 17];法国 Eurotungstene 公司的 NEXT100(主要成分为 Co Fe Cu), NEXT200(主要成分为 Co Fe Cu)和 NEXT300(成分为 $\text{Co } 25\%$, $\text{Fe } 72\%$, $\text{Cu } 3\%$)^[10 17];德国 BASF 公司的羰基 $\text{FeCu } 15\%$ 与 $\text{FeCu } 25\%$ ^[12];比利时 Umico 公司的 Cobalite HDR 过渡层预合金粉末($\text{Co } 27\%$, $\text{Cu } 7\%$, $\text{Fe } 66\%$)^[10 17];中国华工科技的 AW 1, AW 1-2, AW 1-3, AW 5, AW 6, AW 8, AW 8-1 过渡层预合金粉末(主要成分为 Co Fe Cu 和少量的 Ni)^[10 17]。

应该指出的是,预合金粉末已经成为激光焊接金刚石锯片用过渡层粉末材料的发展方向之一^[17, 23],原

因有:(1)预合金粉末所采用的雾化喷粉制造工艺能够保证成分的均匀性,有利于烧结制品的抗压和抗弯强度的提高;(2)可降低烧结温度和缩短烧结时间,特别是采用超细或纳米预合金粉末时效果更明显;(3)有利于预合金化元素的多样化和含钴量的降低。

2 焊接工艺

金刚石锯片的激光焊接属于不同厚的异种材料焊接,影响其焊接质量的因素很多,包括焊前准备、激光光束质量、激光功率、焊接速度、焦点位置、激光束偏移量、激光束的入射角、保护气体流量等,而目前有关这方面的研究应该说是比较成熟的。

2.1 焊前准备

一是刀头(含过渡层)与钢基体的配合间隙必须控制在 0.1mm 以下,以减少漏光损失;二是刀头(含过渡层)和钢基体在焊前均应除油、除锈、除油脂,以减少气孔的产生。

2.2 激光光束质量

目前国内外激光焊接金刚石锯片所用激光器主要为 $100\text{W} \sim 5000\text{W}$ 的 CO_2 激光器。其模式多为基模、准基模或者低阶模。因为光束模式越高,发散角越大,光束质量越差,进而影响焊接熔深和焊接形状^[16]。由于国产 CO_2 激光器的光束质量和稳定性还存在一些问题,因此,国内生产激光焊接金刚石锯片厂家所用激光器多为进口。

2.3 激光功率

激光功率的大小决定了激光焊接金刚石锯片的焊接厚度和焊接速度^[24],进而决定生产效率。通常在投资许可范围里,应该购买高功率的 CO_2 激光器,以便能一次完成锯片焊接,从而提高生产效率。

2.4 激光焊接速度

当激光功率一定时,焊接速度决定了焊接深度,进而影响焊接强度。焊接速度过快,一方面熔深浅,另一方面熔池中的气体来不及逸出,焊缝中就存在大量气孔,有效承载面积减小,焊接强度降低;焊接速度过慢,一方面过渡层烧损严重,另一方面热影响区增大,组织粗化严重,也使焊接强度降低。在保证焊接深度的前提下,应该选择高的焊接速度,以提高生产效率,降低成本。

2.5 离焦量的选择

离焦量严重影响金刚石锯片的焊接熔深。大量的研究结果表明^[10 11 15 16 18 20, 24]:激光焊接金刚石锯片时,一般采用负离焦,且离焦量约为板厚的 $1/3$ 此时获得的熔深最大。由于激光焊接金刚石锯片属于小孔效应焊接机制,而小孔的形成常伴有明显的声、光特

征,若未形成小孔,则焊接火苗是橘红色或白色;若形成小孔,则焊接火苗为蓝色,并伴有爆炸声,故常据此确定和调整离焦量^[24]。

2.6 惰性保护气体

激光焊接金刚石锯片时需要使用惰性保护气体,其作用有:避免焊件的氧化;保护聚焦透镜,避免受到金属蒸气污染和融化液滴的溅射;吹散激光焊接过程中可能产生的等离子体。有关惰性保护气体涉及保护气体种类选择、流量大小控制、吹气方式3个问题。

根据焊接质量和气体成本的要求,一般选用氩气。气体流量大小的控制与喷嘴口径、喷嘴与工件距离有关。气流量太小,起不到保护作用,焊缝氧化严重,呈脆性^[25];气流量太大,一方面周围的空气反而被裹进焊接熔池,焊缝照样氧化严重,另一方面,大的气流量会吹翻焊接熔池,使得焊接过程的稳定性被破坏,焊缝成型性差,焊接强度降低。实际中常采用侧吹氩气的方法来吹散等离子体^[16 18 20 22]。

2.7 激光束偏移量与激光束入射角

激光焊接金刚石锯片时,由于刀头比基体厚(见图2,其中 α 为光束倾斜的角度, Δ 为激光束的偏移量, h 为离焦量, s 为工件厚度),以及刀头过渡层的粉末材料特性(因过渡层不可避免存在孔隙,且极易吸收空气中水分而产生焊接气孔),因此要求激光束偏向基体一侧,并保持一定的偏移量,同时也要倾斜一定角度,以获得最佳角焊效果。

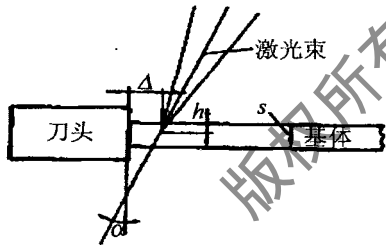


图2 激光束入射位置示意图

大量的研究表明^[10 11 15 16 18~21 24 26]:焊缝中的气孔量与激光束偏移量密切相关,合适的偏移量可以减少焊缝中的气孔,从而提高焊接强度。偏移量太大,焊缝外观很漂亮,但刀头过渡层未焊上或焊得很少,实为虚焊;偏移量太小,气孔多,影响外观质量,也降低焊接强度。另外,角焊时,为避免发生激光束垂直入射时,光束被凸起的过渡层遮挡,激光束需要倾斜射向焊接部位。总之,只有在合适的入射角和偏移量下,钢基体材料首先熔化,然后依靠熔化的钢基体材料再加热熔化刀头过渡层材料,由于过渡层中的钴和钢基中的铁可形成无限固溶体,因此钢基体就可与刀头过渡层形成良好的冶金结合。目前激光束偏移量的合适值为0.1mm~0.3mm;激光入射角的合适值则为 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。

3 焊件检测

对于激光焊接的金刚石锯片而言,需要进行外观、显微组织和焊接强度等参量的检测。外观检测主要检测是否存在焊接宏观缺陷如孔洞、裂纹、咬边和未焊透等,通常需要进行100%的检测,国内的XIA等人^[27]进行了这方面的研究;显微组织检测主要检测焊接部位的化学成分、显微组织和相结构的变化,目前国内外的研究表明^[19 21, 22 28]:融化区组织细小、化学成分出现梯度扩散、过渡层硬度比基体低,比刀头高,呈现梯度变化。

焊接强度检测主要检测焊件的拉伸强度、弯曲强度、冲击韧性和残余应力等,通常需要进行100%的焊接强度检测,而且国内外都发展了不同的专门检测工具,如德国的SPE623焊接强度检测机^[10]和中国的扭力扳手^[29]。目前对于焊件的残余应力检测基本未涉及,而焊接后的残余应力大小及分布严重影响金刚石锯片的使用寿命。

此外,国内外的学者也逐步研究了一些在线或无损检测技术^[30~33],以便根据焊接深度或是否存在焊接缺陷来判断焊接质量,但离实用化还存在一些距离。

4 存在的主要问题及发展方向

4.1 存在的主要问题

(1)目前,对激光焊接金刚石锯片的焊接工艺研究较多,而对焊接熔池的温度场、流场、质场、应力场和焊接过程的机理方面的研究较少,即未开展建立激光焊接金刚石锯片过程的数理模型研究。由于金刚石锯片激光焊接属于不同厚的异种材料(粉末冶金材料/钢)焊接,其焊接过程是十分复杂的,要全面理解其机理,就需要借助计算机数值模拟技术来研究这种异质材料焊接熔池的温度场、流场、质场和应力场,而有关这方面的研究很少,这就导致过渡层配方和钢基体材料任何一方发生改变,就需要事先进行大量的工艺研究,费神费力,降低了新产品的开发速度,满足不了市场需要快速反应的要求。

(2)对金刚石锯片胎体和过渡层粉末预合金化的研究不够深入,有关纳米预合金化粉末更是空白。尽管目前国内外也开发出一些预合金粉末,但品种少,满足不了市场需要。而使用预合金粉末有利于防止金属结合剂制品在烧结过程中低熔点金属过早流失与偏析,提高烧结制品的致密性、均匀性、弹性极限和屈服强度,增强对金刚石的把持力^[10]。此外,纳米材料的熔点较同材质的微粉和块体的低,故使用超细或纳米预合金粉末可降低烧结温度和烧结时间,减少金刚石的热损伤,提高对胎体材料中金刚石的把持力,也可显

著提高激光焊缝强度和消除焊接缺陷^[23]。

(3)对专用金刚石锯片刀头胎体和过渡层材料配方研究较少。随着切割对象的多样化,不同的切割对象对金刚石锯片有不同的技术要求,这就要求进行专用的金刚石锯片刀头和过渡层材料配方研究,而这方面只有 HE 等人^[34,35]进行了初步的研究。

(4)激光焊接金刚石锯片在线质量检测技术的研究较少。目前采用 100% 抽检方法,费时费力,工人劳动强度大,因此,需要借鉴其它激光焊接工件的在线质量监测技术,发展适合于激光焊接金刚石锯片的在线质量监测技术,即根据激光焊接金刚石过程中的声、光信号特征判断焊接质量的好坏,减少或省去焊后的检验工作,从而节约成本,增加企业的经济效益。

4.2 发展方向

正是激光焊接金刚石锯片存在以上 4 方面的问题,因此,今后的研究方法应该围绕这 4 个方面展开,即开展专用激光焊接金刚石锯片胎体或过渡层材料配方的研究、开展新型超细或纳米预合金粉末的研究、开展激光焊接金刚石锯片的机理研究,特别是开展激光焊接金刚石锯片过程中的温度场,流场,质场和应力场的研究和开展激光焊接金刚石锯片过程的在线质量监测技术的研究。事实上,只有全面理解了激光焊接金刚石锯片的机理,才可能据此开发出新的在线质量监测技术;只有掌握了预合金粉末的理论,才可能开发出新型超细或纳米预合金粉末以及更好地利用新型超细或纳米预合金粉末开发出专用的金刚石锯片。

参 考 文 献

- [1] HERBERT S. Laserwelded blade is key to trenching update [J]. Industrial Diamond Review, 1983, 43(499): 293~296
- [2] SCHNEIDER W. Laserwelding instead of brazing [J]. Industrial Diamond Review, 1985, 45(510): 242
- [3] MORIN W. Laser makes it better [J]. Industrial Diamond Review, 1988, 48(528): 206
- [4] HERBERT S. Nimbus laser lights the way ahead [J]. Industrial Diamond Review, 1988, 48(528): 215~216
- [5] VEGLIO O. Dialaser blades from piazza [J]. Industrial Diamond Review, 1989, 49(534): 213
- [6] WEBER G. Laserwelding of diamond tools [J]. Industrial Diamond Review, 1991, 51(544): 126~128
- [7] CLAUSSER G, VALLEA. Laserwelding explained [J]. Industrial Diamond Review, 1987, 47(522): 207~208
- [8] SMITH A. Dry-cutting saws allow pile cutting in cold weather [J]. Concrete Construction, 1989, 34(7): 653~654
- [9] UGUES D, GRANDEM A, ROSSO M. Cutting diamond tools optimized laserwelding procedures to bond the segments to the steel core [A]. Proceedings of the 3rd International Powder Metallurgy Conference [C]. Ankara Turkish Powder Metallurgy Association, 2002, 507~516
- [10] TANG X H. Laserwelding of diamond tools [M]. Wuhan Huazhong University of Science and Technology Press, 2004, 4~9, 101, 160, 167, 184 (in Chinese).
- [11] YAO J H, CHEN L. Study of laserwelding technology on diamond circular saw blade [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(8): 761~764 (in Chinese).
- [12] JIANG R Ch. Selection and research of backing powder composition for laserwelding saw blade [J]. Jewelry Science and Technology, 2003, 15(1): 8~12 (in Chinese).
- [13] GUO ZhM, SONG Y Q, CHEN H X *et al*. Superhard materials and tools [M]. Beijing Metallurgical Industry Press, 1996, 73~74 (in Chinese).
- [14] SUN Y Ch, LIU Y B, WANG Q Sh. Metallurgical base of diamond tools [M]. Beijing Chinese Construction Industry Press, 1999, 78~93 (in Chinese).
- [15] ZHU H H, TANG X H, ZHU G F. Research of welded seam strength of laserwelded diamond saw [J]. Laser Technology, 1998, 22(5): 273~276 (in Chinese).
- [16] YIN J H, YIN Sh, YE H Y *et al*. Laserwelding process of diamond saw blade [J]. Powder Metallurgical Technology, 1999, 17(4): 248~252 (in Chinese).
- [17] LIL B, TANG X H, QIN Y X *et al*. Developing status of pre-alloyed backing powder used in laserwelded diamond tools [J]. Diamond and Abrasive Engineering, 2005(2): 56~60 (in Chinese).
- [18] HUANG Q Ch, LIU J H, LU S H *et al*. Laserwelding of diamond saw blade [J]. Laser Journal, 2004, 25(2): 19~20 (in Chinese).
- [19] JIN X Zh, LIL B. Application of laserwelding in the diamond circular saw blade [J]. Mechanical Technologist, 1999(6): 9~10 (in Chinese).
- [20] TANG ZhH, YANG H N, PAN R J. Research of laserwelding circular saw blade [J]. Diamond and Abrasive Engineering, 2002(2): 17~18 (in Chinese).
- [21] ZHU H H, TANG X H, ZHU G F *et al*. Study of equipment and technology of laserwelding for diamond saw blade [J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 141~144 (in Chinese).
- [22] PARK J W, LEE C H, CHUNG N H. Weldability of CoNi sintered alloys and carbon steel [J]. Diamond and Abrasive Engineering, 2000(5): 13~18 (in Chinese).
- [23] CAI F H, TANG X H, QIN Y X *et al*. The research trends of the pre-alloyed powder used in diamond tools [J]. Diamond and Abrasive Engineering, 2004(5): 77~80 (in Chinese).
- [24] SHI X Q, LIL B. Experimental study of technological parameters laserwelding on the diamond tools [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(4): 379~383 (in Chinese).
- [25] BARATTA A, MARLOTH, R T, ES-SAD O S *et al*. Strengthening laserwelds in diamond cutting tools [A]. Microstructural Science Proceedings of the 31st Annual Technical Meeting of the International Metallographic Society [C]. New York: ASM, 1998, 26, 171~176
- [26] XIA J H, YIN Sh, YE H Y *et al*. Effect of beam alignment on laserwelding quality of diamond saw blade [J]. Laser Technology, 1999, 23(4): 248~251 (in Chinese).
- [27] XIA J H, YIN Sh, YE H Y *et al*. Analysis of defects and fracture surfaces of laserwelding diamond saw blade [J]. Journal of Synthetic Crystals, 1999, 28(1): 79~83 (in Chinese).
- [28] XIA J H, YIN Sh, YE H Y *et al*. Composition, microstructure and properties of welded joint of diamond saw blade by laserwelding [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(suppl 1): 209~213 (in Chinese).
- [29] TANG X H, ZHOU J X, REN J H *et al*. New theory and method for testing laserwelding strength of diamond tools [J]. Diamond and Abrasive Engineering, 2004(1): 24~26 (in Chinese).

5 结束语

激光双面毛化磁盘处理技术的研究始于上世纪 90 年代初,并在上世纪 90 年代中引进国际最大硬盘制造公司——美国希捷公司金属磁盘生产流程中,成为美国希捷公司生产高密度金属磁盘制造过程中必要的加工工艺。该技术不仅能产生精度高(可精确控制磁盘基体表面微观形貌、高度及尺寸)以及重复性、稳定性和一致性好的 CSS 区域,而且,也提高了生产效率,降低生产成本及使用面积。如美国希捷公司采用传统毛化磁盘方法需占用几千平方英尺的大楼,而引入激光毛化磁盘新技术后,所需面积急剧下降到两百平方英尺左右。随着磁盘面密度继续增加;预计 2020 年,磁盘面密度将达到 20 万道/每平方英寸以上,将要求磁头与磁盘间间隙进一步减小而导致激光毛化表面微观形貌、高度及尺寸的精确度、稳定性和一致性的要求更严格,这也是激光超精密微加工磁盘技术所面临的新的挑战。

参 考 文 献

- [1] RANJAN R, LAMBETH D N, TROMEL M. Laser texturing for low-flying high media [J]. JA P, 1991, 69 (8): 5745 ~ 5747.
- [2] BUSHAN B. Magnetic slider/rigid disc substrate materials and disc texturing techniques—status and future outlook [J]. Advances in Information Storage Systems 1993, 5: 175 ~ 209.
- [3] KUOD, GUI I J, MARCHON B. Design of laser zone texture for low glide media [J]. IEEE Transactions on Magnetics 1996, 32 (5): 3753 ~ 3758.
- [4] BAUMGART P, KRAJNOVICH D J, NGUYEN T A *et al*. A new laser texturing technique for high performance magnetic disk drives [J]. IEEE Transactions on Magnetics 1995, 31 (6): 2946 ~ 2951.
- [5] XUAN J J, CHEN G L, LI W. Laser texturing on magnetic recording medium using a crystal material [P]. US Patent 5783797, 1998-07-21.
- [6] PARK H K, KERSTENS P, TAM A C. Issues on high-speed laser zone texturing of magnetic disk substrates with improved quality [J]. IEEE Transactions on Magnetics 1998, 34 (4): 1807 ~ 1809.
- [7] BENNETT T D, KRAJNOVICH D J, GRIGORPOULOS C P. Mechanism in pulsed laser texturing of magnetic disk substrates [J]. Journal of Heat Transfer 1997, 119 (3): 589 ~ 593.
- [8] WAMOTO M, YE M, GRIGORPOULOS C P. Numerical analysis of pulsed laser heating for the deformation of metals [J]. Numerical Heat Transfer Part A: Applications 1998, 34 (8): 791 ~ 804.
- [9] CHEN S C, GAHILL D G, GRIGORPOULOS C P. Melting and surface deformation in pulsed laser surface micro modification of Ni-P disk [J]. Journal of Heat Transfer 2000, 122 (1): 107 ~ 112.
- [10] BALANDIN V, YU D O, BOSTANJOGLO O. Thermocapillary flow excited by focused nanosecond laser pulses in contaminated thin liquid iron film [J]. JA P, 1995, 78 (4): 2037 ~ 2044.
- [11] TAM A C, POUR IK, NGUYEN T A. Experimental and theoretical studies of bump formation during laser texturing of Ni-P disk substrate [J]. IEEE Transactions on Magnetics 1996, 32 (5): 3771 ~ 3773.
- [12] BOSTANJOGLO O, ANK T. Liquid motion in laser-pulsed Al-Co and Au films [J]. Applied Surface Science, 1997, 109 ~ 110: 101 ~ 105.
- [13] TAM T C, BRAYNON J, BAUMGART P. Laser texturing of glass disk substrates [J]. IEEE Transactions on Magnetics 1997, 33 (5): 3181 ~ 3183.
- [14] SHU T R, GRIGORPOULOS C P, GAHILL D G. Mechanism of bump formation on glass substrates during laser texturing [J]. JA P, 1999, 86 (3): 1312 ~ 1316.
- [15] BAUMGART P, LEUNG W P, NGUYEN H V. Process for texturing brittle nonmetallic surfaces such as glass disk [P]. US Patent 5567484, 1996-10-22.
- [16] KUO D, VEIRK S D, RAUCH G. Laser zone texturing on glass and glass-ceramic substrates [J]. IEEE Transactions on Magnetics 1997, 33 (5): 944 ~ 949.
- [17] TENG E, GOH W, ELTOUKHY A. Laser zone texture on alternative substrate disks [J]. IEEE Transactions on Magnetics 1996, 32 (5): 3759 ~ 3761.
- [30] CROSTACK H A, MAASS M. Non-destructive evaluation of seams of laser-welded tools using the CS-eddy current technique [A]. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. New York: IEEE, 1998: 2279 ~ 2283.
- [31] CRUCIANI D, LINGUITI F. Laser welding dissimilar metals as alternative to brazing: experimental results, economical and quality evaluations applications in production line [J]. Proc SPIE, 1990: 1276 ~ 1283.
- [32] ZHUANG Q R, ZHANG W Zh, CHEN W Zh *et al*. Feedback control of laser-welding diamond saw by acoustic signals [J]. Laser Technology, 2001, 25 (3): 170 ~ 173 (in Chinese).
- [33] WANG Zh G. Non-damage measurement of laser-welded diamond circular saw blade [J]. Diamond and Abrasive Engineering 2001 (6): 19 ~ 20 (in Chinese).
- [34] HE Y Y, TANG X H, ZHU G F *et al*. Research of laser-welding saw blade for concrete cutting [J]. Diamond and Abrasive Engineering 2002 (3): 35 ~ 37 (in Chinese).
- [35] HE Y Y, TANG X H, ZHU G F *et al*. Research of laser-welded sharp small saw blade [J]. Diamond and Abrasive Engineering 2002 (4): 25 ~ 26 (in Chinese).

(上接第 489 页)