

# 超硬磨料砂轮修整与激光修整新进展

410082 (长沙) 湖南大学机械与汽车工程学院激光研究所 陈根余 谢小柱 李力钧 刘劲松  
(香港) 香港理工大学制造工程系 容锦泉

**摘要** 本文介绍了超硬磨料砂轮修整的现状和特点,指出超硬磨料砂轮修整的关键和亟待解决的问题。重点介绍一种很有前途的修整技术——激光修整,分析了其国内外近年来的研究情况。作者用声光调Q YAG激光对树脂结合剂CBN砂轮进行了修锐试验,得出了声光调Q YAG激光适宜修锐树脂结合剂砂轮的结论。对今后的超硬磨料砂轮激光修整的发展方向作了展望:建立材料热去除模型和气体动力学模型,完善激光修整机理的研究;实现激光整形和修锐过程同时进行;深入研究激光精密修整技术;开发成形砂轮激光修整技术;开发自适应控制修整系统,实现激光在线修整;提高修整效率。

**关键词** 超硬磨料砂轮 激光修整 声光调Q YAG激光 现状 展望

**ABSTRACT** The current situation and characteristics of superabrasive wheels dressing are recommended in this paper. Keys of superabrasive wheels dressing and dressing problems to be solved are presented. A promising dressing technique——Laser Dressing is emphasized. Study on Laser Dressing at home and abroad in recent years has been analyzed. Dressing experiments are made on resin-bonded CBN wheels with opto-acoustic Q-switched YAG Laser. A conclusion is made that opto-acoustic Q-switched YAG Laser is adaptive to dress resin-bonded CBN wheel. Prospects of Laser Dressing on superabrasive wheels in the future are as follows: establishment of thermohydrodynamics model; improvement on study of dressing mechanism; implementation of laser truing and dressing simultaneously; deep study on Laser Precision Dressing; development of Laser profile dressing; development of adaptive controlled dressing system; implementation of on-line Laser Dressing and improvement of dressing efficiency.

**KEYWORDS** superabrasive wheels, Laser Truing and Dressing, Opto-acoustic Q-switched YAG Laser, current situation, prospect

## 0 前言

金刚石和立方氮化硼(CBN)砂轮统称为超硬磨料砂轮,两者在适应性方面具有互补性:金刚石砂轮适于磨削硬、脆有色金属和硬质合金、光学玻璃、陶瓷、宝石等高硬度、高脆性的非金属材料;CBN砂轮适于磨削淬硬钢、耐热合金和高硬度、高韧性的金属材料。由于其优良的磨削性能,广泛应用于航空、汽车、医学、电子、建材等领域,并成为精密和超精密磨削、高速高效磨削、难加工材料磨削、成形磨削、磨削自动化等技术的基础。

超硬磨料砂轮在国外发达国家应用广泛,特别是由于CBN磨料具有高的耐热稳定性,仅次于金刚石的硬度,使得CBN砂轮成为提高经济效益和实现节能、高效、精密、自动化等的重要工具而得到重点发展。在我国,金刚石砂轮得到了较广泛的应用,而CBN砂轮由于制造、修整、成本和对机床要求较高等方面的原

因,应用情况不很理想。

超硬磨料砂轮的种类繁多,各有特点。通常按结合剂种类对其划分,如表1示。

表1 超硬磨料砂轮的种类及其特性

	多层可修			单层	
	树脂结合剂砂轮	陶瓷结合剂砂轮	金属结合剂砂轮	电镀砂轮	钎焊砂轮
结合剂类型	树脂	陶瓷	金属	(金属)	金属
制作工艺	热压固化	高温烧结	粉末冶金	常温电镀	高温钎焊
气孔	无	有	无	—	—
结合强度	不高	高	高	不高	高
修整	困难、整形后需修锐	容易	困难、整形后需修锐	不需修整	无需修整
其它	不耐温 易老化	耐温 耐腐蚀	耐温 导热性好	磨料裸露高度约20~30%	磨料裸露高度约70~80%

超硬磨料砂轮修整技术是修整技术的新领域。修整技术发展至今,修整工具已形成种类丰富的系列家族,许多新的修整工具是高科技产品,修整技术的发展

趋于高精、高效及自动化,给超硬磨料砂轮的修整带来了新课题<sup>[1]</sup>。由于密实型结合剂(目前包括树脂和金属结合剂)对磨料把持力强,超硬磨料又是迄今为止最硬的材料,所以在使用之初和磨损后很难整形,难以达到满意的砂轮精度。成形磨削往往采用金属结合剂砂轮,要达到所需的修整精度,十分困难。要达到精密磨削所要求的修整精度,则更是严峻的挑战。密实型结合剂砂轮的修整控制难。目前所用的修整方法大体可分为修磨法和电加工法,都存在局限性,寻找新的修整方法成为各国学者研究的目标。激光修整作为一种非接触修整法,避开力的作用和硬接触,基于热的熔化和气化机理,无疑是有发展前途的修整技术,但需进一步深入开展多方位研究。

### 1 密实型结合剂超硬磨料砂轮修整现状及亟待解决的问题

密实型结合剂超硬磨料砂轮的修整,通常分为整形和修锐两个工序。整形是对砂轮进行微粒去除,使砂轮达到所要求的几何精度;修锐是去除磨粒间的结合剂,使磨粒间有一定的容屑空间,并使磨刃凸出结合剂之外,形成切削刃。

树脂结合剂金刚石砂轮整形通常采用滚压整形法、磨削整形法、车削法。滚压整形法所用的整形砂轮为绿色碳化硅与白色氧化铝陶瓷结合剂砂轮,其粒度根据超硬磨料砂轮的粒度选择。由于依靠剪切力修整,所以对机床的刚度要求较高,而整形精度不高,容易整形过头。磨削整形法所用的工具为GC、WA修整块或修整砂轮,但这种方法同样整形精度不高。

树脂结合剂CBN砂轮的整形除了滚压整形法、磨削整形法外,通常采用金刚石工具法、软钢修整法。单颗粒的金刚石修整笔不宜用于CBN砂轮的修整,因CBN砂轮很快会把修整笔磨损,形成磨损小平面,影响修整工作并有可能损坏砂轮。金刚石成形块或金刚石砂轮整形CBN砂轮能达到较好的效果,多用于精密成形修整,这种方法效率精度较高,而且整形工具磨损小。金刚石滚轮整形同样具有效率高,整形精度高的优点,但由于其价格昂贵,大批生产时使用才经济。软钢修整法刚开始时有振纹和烧伤出现,效率很低。

金属结合剂超硬磨料砂轮主要用于成形磨削和精密、超精密(微粉)磨削,但磨削时砂轮易糊塞,需定时修整,修整较树脂结合剂砂轮更难。目前,金属结合剂超硬磨料砂轮的整形除了采用制动式修整器、GC、WA修整块或修整砂轮修整外,由于金属结合剂具有导电的特点,可采用电加工的方法修整。比如电解法、电火花法等。电解法效率高,精度不高。电火花法效率比

电解法低,精度高。但两种修整法都需专门的设备,操作不易掌握。而电解—电火花综合法仅适用于小型复杂成型砂轮,精度虽高,成本太高。

为了改进整形精度不高的问题,日本学者研究出了GC杯形砂轮研磨修整法,其修整机理如下:修整过程从杯形砂轮上脱落下来的磨粒对金刚石磨粒和结合剂桥的冲击以及研磨作用产生修整效果。脱落下来的磨粒越大,修整效率越高,而金刚石表面越粗糙。由于依靠从GC杯形砂轮上脱落磨料与金刚石砂轮的研磨作用,因此对密实型金刚石砂轮修整时,即可整形,也可同时修锐,但修整工具耗损严重。

超硬磨料砂轮修锐方法多。油石修锐方法简单、方便、受限制的条件少,但修锐时油石消耗很快。研磨法简单易行,但效率低。磨粒喷射法、液压喷射法修锐后表面状态合理,磨削性能好,但需专用的设备,污染较严重。磨削法修锐后,砂轮表面有许多沟槽,影响砂轮的磨削性能。为此,研究人员对已有的修整法进行改进,如游离磨粒辅助磨块修整(Stick-aided Loose Abrasive Dressing method, SLAD method),同时还发展许多新的修锐方法,如砂带修锐法、超声波修锐法等。

为适应新型材料镜面磨削的需要,发展了ELID在线修整(Electrolytic In-process Dressing)技术。ELID磨削技术是对金属结合剂超硬磨料砂轮ELID在线修整的复合磨削技术<sup>[2]</sup>,它有别于电解磨削、电火花磨削。此外,还发展了ECDD电火花接触修整法(Electro-Contact Discharge Energy Dressing)、ECD(Electrochemical In-process Controlled Dressing)电化学在线修整技术等。

砂轮修整的关键在于得到较高的整形精度,良好的地形地貌。整形精度的高低决定磨削工件的尺寸精度和表面质量。良好的地形地貌能保证磨粒有较强的把持力,磨削时有足够的容屑槽,有利于磨削液的进入,防止工件烧伤、糊塞。修整良好的砂轮磨削力低,砂轮耐用度高。

密实型结合剂超硬磨料砂轮的精度保持性好,自身无气孔,靠去除结合剂来获得容屑槽和凸出磨刃,若修整不好,很难发挥超硬磨料优良的磨削性能。超硬磨料砂轮修整中传统修磨法通常基于力的作用,通过剪切和挤压去除磨粒达到整形目的,为非破碎性去除,一定程度影响磨削性能。修整器同时存在磨损,影响整形精度对环境不友好。

随着各种复杂型面零件的加工越来越多,成形磨削在生产中应用日益广泛,对成形砂轮修整提出了很高的要求。目前常用的成形砂轮修整法,按修整廓形原理,可分为近似圆弧法、样板靠模法、金刚石滚轮法,

此外石墨电极电火花修整法也有所应用。为满足修整精度、柔性、可校正性和自动化程度等方面的要求,开发 CNC 修整技术是很有前途的。国外高精度机床基本配备了 CNC 砂轮修整器,但价格昂贵。精密磨削主要使用密实型结合剂超硬磨料砂轮。近年发展的 ELID 在线修整具有加工精度高,表面裂纹少,表面质量好等优点,在镜面磨削中取得了突破,但 ELID 修整法只适用于金属结合剂超硬磨料砂轮,而且需要专门的电源装置,价格较高。

为此,开发低成本、高性能、适应性广、工业化应用的超硬磨料砂轮修整技术是当务之急,特别亟待解决成形砂轮和精密磨削中砂轮的修整问题。开发在线自动修整系统,提高修整效率也是发展的方向。迄今为止,能整形或修锐同时进行的修整方法极少,探求整形和修锐能同时进行的修整方法也是很有意义的。

## 2 激光修整

### 2.1 概述

激光具有单色性好、方向性强、能量密度集中、相干性好等优点。加工用红外激光的光波长而光子能量小,红外光子作用于固体物质,一般只能激发其振转能级,受激电子通过碰撞使晶格振动,导致被辐照物体温度升高,以至熔化或气化,改变材料的组织形态,从而产生各种加工效果。在红外激光作用下的激光加工本质上是一个热作用的过程<sup>[3]</sup>。激光修整有如下特点:

- (1)适应性广,可适应各种结合剂砂轮修整;
- (2)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)非接触加工,没有修整工具的磨损,对环境友好;
- (4)有利于减少砂轮材料的浪费,延长砂轮的使用寿命。

### 2.2 激光修整砂轮的研究现状及发展

由于激光修整具有以上特点,近年来,国内外学者进行了激光修整砂轮研究,取得了一些进展。印度学者<sup>[4-6]</sup>用 YAG 激光器普通脉冲修锐 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiC 砂轮,研究了不同激光参数、工艺参数对修锐效果的影响,研究了修整参数对所修整的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砂轮在干、湿条件下磨削的影响,建立了激光修整 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砂轮表面凹坑的理论模型。日本学者<sup>[7,8]</sup>用 YAG 激光器修锐树脂结合剂的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砂轮,研究了连续激光修整对砂轮表面变质层的影响,研究了调 Q 激光下不同的重复频率、离焦量等对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 砂轮修锐的影响,进行了磨削对比实验。德国学者<sup>[9,10]</sup>用 YAG 激光器普通脉冲修锐

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<sup>[11]</sup>也用 YAG 激光器普通脉冲对树脂结合剂 SiC 砂轮作了修锐实验。西北工业大学的研究人员<sup>[12]</sup>用 YAG 激光器普通脉冲修锐树脂、青铜结合剂金刚石砂轮和树脂结合剂 CBN 砂轮,并用激光从切向对砂轮整形进行实验性研究。南京航空航天大学的研究人员<sup>[13]</sup>用 CO<sub>2</sub> 激光器普通脉冲修锐树脂金刚石砂轮片,研究了占空比、频率对修锐的影响。此外,日本 Nagaoka 大学利用倍频 Nd:YAG 激光器修锐铸铁基金刚石砂轮,其输出为 532nm 的波长,实验时用 8ns 的脉冲速率,功率密度 0.03~0.48J/mm<sup>2</sup>,砂轮转速 1.1mm/s。

由此可见,大多数学者都采用 YAG 激光器对砂轮修整,这是因为 YAG 激光器比 CO<sub>2</sub> 激光器在修整砂轮上更有优势。YAG 激光器输出波长为 1.06 $\mu$ m,恰巧是 CO<sub>2</sub> 激光器波长的十分之一。波长较短,对聚焦、光纤传输和金属表面的吸收有利,例如金属结合剂金刚石砂轮中结合剂主要成分为铜粉、镍粉和锡粉,它们在室温下对特定波长下的吸收率如表 2 示。YAG 激光器

表 2 室温下对特定波长下的吸收率

激光器波长	YAG(1.06 $\mu$ m)	CO <sub>2</sub> (10.6 $\mu$ m)
铜	0.10	0.015
镍	0.26	0.03
锡	0.19	0.34

和 CO<sub>2</sub> 激光器比较如表 3 示。激光修整砂轮为激光对砂轮表面材料烧蚀加工,高的脉冲峰值功率和吸收率有利于材料去除。YAG 激光易于光纤传输 YAG 激光器,体积相对小,价格便宜,有利于工业化推广应用。

表 3 YAG 激光器和 CO<sub>2</sub> 激光器比较

性能	YAG 激光器	CO <sub>2</sub> 激光器
连续(平均)功率	-	+
脉冲峰值功率	+	-
光束质量	+	+
波长	+	-
光纤传输	+	-
效率	-	+
体积和重量	+	-
使用寿命	-	+

脉冲激光占空比小,烧蚀时有利于散热,热影响小,能减小对烧蚀磨料损伤,获得较好的地形地貌。激光修整普通磨料砂轮能获得较理想的效果,但相比其它修整方法,没有很大的优势。若用激光修整超硬磨

料砂轮,重点解决选择性去除烧蚀机理和修整精度两大问题,完善工艺研究和产品设计则有望进入实用化。

### 2.3 声光调 Q YAG 激光烧蚀机理

声光调 Q 的基本原理:激光通过声光介质中的超声场时,产生衍射,使光束偏离谐振腔,造成谐振腔损耗增大, Q 值下降,因而激光振荡不能形成。固在光泵激励下其上能级反转粒子数将不断积累并达到饱和值。若这时突然撤掉超声场,则衍射效应即行消失,腔损耗减少, Q 值猛增,激光振荡迅即恢复,其能量以巨脉冲形式输出。峰值功率为 kW 级,脉宽为纳秒级。重复频率可达 (1~20)kHz。

湖南大学激光研究所<sup>[14]</sup>对声光调 Q YAG 激光烧蚀作用的机理进行了研究,研究表明:声光调 Q YAG 激光脉冲具有高峰值功率、小脉宽和高重复频率。每个激光脉冲烧蚀深度都在微米数量级,热影响区小,可通过多次叠加出完整的加工表面。烧蚀过程没有显著的热量积累,热影响小,易于控制烧蚀过程。在此基础上开发了三维烧蚀精度控制系统,如图 1 示。烧蚀用激光,没有明确的刀尖。很难象普通切削一样控制刀尖位置,保证加工精度。若利用闭环控制系统,控制巨脉冲的输出,高点时输出巨脉冲去除材料、低点时不发巨脉冲,由于每次去除量很小,可达到精密整形的目的。

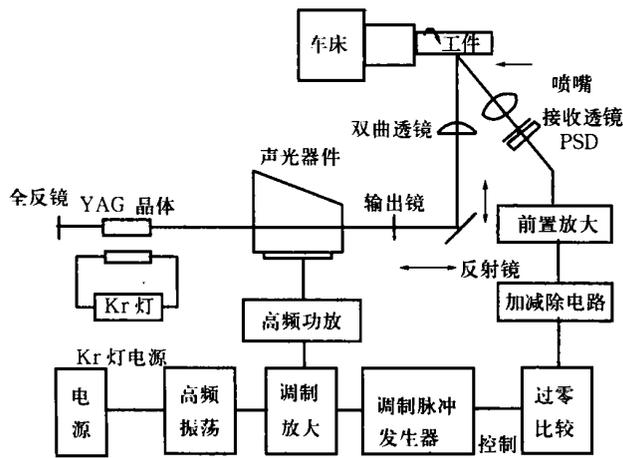


图 1 声光调 Q YAG 精密修整系统

### 2.4 声光调 Q YAG 激光修整树脂结合剂 CBN 砂轮的试验研究

试验砂轮: CBN II 型, 粒度 180 #, 浓度 100%。

树脂结合剂的主要成分是酚醛树脂, 密度为  $1.25\text{g}/\text{cm}^3$ , 约在  $236^\circ\text{C}$  开始分解,  $300^\circ\text{C}$  以上开始炭化, 没有固定的熔点, 热导率:  $0.24 \sim 0.27\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ , 线膨胀系数:  $2.5 \sim 6.0 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 。

砂轮中的填料为铜粉, 铜的导热系数:  $4.01\text{K}/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$  (温度  $273\text{K}$ ),

比热:  $0.38\text{C}/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$  (温度  $273\text{K}$ ), 热扩散:  $1.19\alpha(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$  (温度  $273\text{K}$ )。

CBN 的熔点:  $3500\text{K}$  ( $10.5\text{MPa}$ )。在  $1573\text{K}$  时会氧化。

图 2 中(a)为整形过的 CBN 砂轮照片, 从图中可看出 CBN 磨粒未凸出。经过连续激光修整后, 由于热积累的作用, CBN 磨粒表面出现变质层(如图 2 中(b)示)。

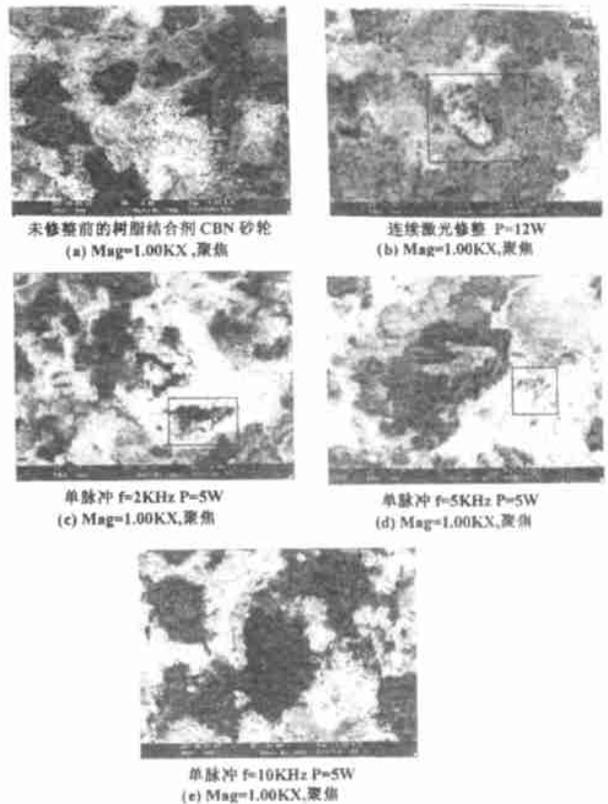
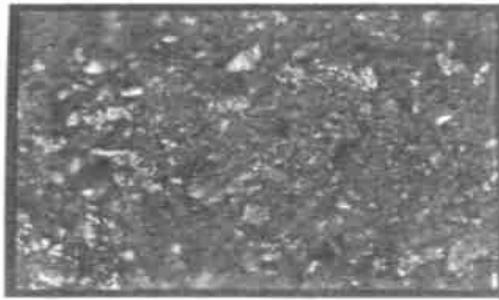


图 2 树脂结合剂 CBN 砂轮的 SEM 照片

声光调 Q 激光  $1 \sim 10\text{kHz}$  单脉冲试验, 当平均输出功率  $P=5\text{W}$ , 重复频率  $f=2\text{kHz}$ , 高的脉冲峰值作用下形成凹坑(见图 2 中(c)方框中), 凹坑较深。频率增加到  $f=5\text{kHz}$  时, 其它参数不变, 凹坑变浅, 磨粒凸出合适, 能获得较好的地形地貌(图 2 中(d))。频率增加到  $f=10\text{kHz}$  时, 其它参数不变, 凹坑继续变浅, 磨粒凸出不够(图 2 中(e)示)。由此可见在  $f=5\text{kHz}$  时, 有可能达到理想的修整效果。为此, 在  $f=5\text{kHz}$ ,  $P=5\text{W}$ , 砂轮转速  $n=85\text{r}/\text{min}$ , 进给量  $a_f=0.08\text{mm}/\text{r}$  条件下对砂轮进行修整, 经过两个工作行程, 在光学显微镜下观测到良好的地形地貌, 如图 3 示。

超硬磨料与结合剂材料的物理、光学性能相差较



$f=5\text{KHz}$   $P=5\text{W}$   $n=85\text{r/min}$   
 $a_p=0.08\text{mm/r}$   $\text{Mag}=1\text{KX}$ , 聚焦

图3 光学显微镜下的照片( $\times 100$ )

大,理论计算表明,超硬磨料达到熔点和气化点所需的激光功率密度比结合剂材料高1~3个数量级。合理选择激光的参数(峰值功率、脉冲重复频率、脉宽、离焦量)和机床的运动参数(转速、进给量)就可以选择性地去除结合剂材料,而凸出CBN磨粒,达到修锐的目的。以一定的激光参数、工艺参数修整砂轮表面,发现低脉冲重复频率时的烧蚀凹坑比高频时要深,这是因为频率低时的脉宽窄,峰值功率高。树脂结合剂没有固定的熔点,约为 $200\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ ,在高的脉冲峰值功率激光辐照下,树脂以气化形式分解,金属(主要是铜粉填料)熔化,瞬间形成凹坑,高的气化压力使得金属熔融物部分溅射,并阻止熔融物向凹坑填充,部分金属熔融物在凹坑周围熔凝。

### 3 结论

目前超硬磨料砂轮修整大部分为修磨法和电加工法,各有其特点,但均存在一定的局限性。激光修整作为一种非接触修整技术,避开力的作用,基于热的作用以熔化、气化形式去除材料,是一新的修整方法。在比较国内外研究得基础上,采取新的试验方法,得出以下结论:

(1)采用声光调Q YAG激光径向照射树脂结合剂CBN砂轮进行修锐,能选择性去除树脂结合剂,得到良好的地形地貌,CBN磨粒未出现明显的变质层;

(2)已建立一套闭环控制系统,控制声光调Q巨脉冲的输出,拟用作精密整形。

激光修整作为一种新的修整方法,有待更深入地研究,在以下方面可作进一步深入研究:(1)建立材料热去除模型和气体动力学模型,完善激光修整机理的研究;(2)实现激光整形和修锐过程同时进行;(3)深入研究激光精密修整技术;(4)开发激光成形砂轮修整技术;(5)开发自适应控制修整系统,实现激光在线修整;(6)提高修整效率。以使该项技术成为实用的,能够解决超硬磨料砂轮修整的行之有效的行有效的手段。

### 参 考 文 献

- 1 崔仲鸣,严文浩,马琳.磨削中砂轮修整技术的新发展.湖南大学学报,Vol. 26, No. 2(增刊),1999, p57~61.
- 2 Hitoshi Ohmori. Electrolytic In-process Dressing(ELID)Grinding Technique for Ultra-precision Mirror Surface Machining. Int. Journal of JSPE, 1992, Vol. 26, No. 4.
- 3 李力钧编著.现代激光加工及其装备.北京理工大学出版社,1993:3-38.
- 4 N. Ramesh Babu, V. Radhakrishnan, Y. V. G. S. Murti. Investigation on Laser Dressing of Grinding Wheels-Part I; Preliminary Study. Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, August, 1989, P244~252
- 5 N. Ramesh Babu, V. Radhakrishnan. Investigation on Laser Dressing of Grinding Wheels-Part II; Grinding Performance of a Laser Dressed Aluminum Oxide Wheel. Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, August, 1989 p253~261.
- 6 N. Ramesh Babu, V. Radhakrishnan. Influence of Dressing Feed on the Performance of Laser Dressed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Wheel in Wet Grinding. International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 35, No. 5, 1995, p661~671.
- 7 Toshikatsu Nakajima, Kazuhito, Ohashi, LiXi Sun and Kenrou Jitsumori, Dressing of resinoid Bond Wheel with Moving Heat Source(1st Report)-Transaction of Wheel Source with a Single Pulse Irradiation of YAG Laser. 精密工学会志, Vol. 59, No 12, 1993 p1967~1972.
- 8 Toshikatsu Nakajima, Kazuhito Ohashi and Daisuke Yagi, Dressing of resinoid Bond Wheel with Moving Heat Source (3st Report)-Improvement of Dressing Effect with Q-switched YAG Laser. 精密工学会志, Vol. 63 No.8, 1997, p1153~1157.
- 9 E. Westkämper, J. Freytag, U. Harbs. Dressing of Resin-Bonded CBN Grinding Wheels by Means of a Pulsed Nd: YAG Solid-State Laser. Proceedings of the LANE' 94, Vol. I, 1994, p491-500.
- 10 E. Westkämper. Grinding Assisted by Nd: YAG Lasers. Annals of the CIRP, vol. 44, No. 1, 1995, p317-320.
- 11 陈明等.激光技术在砂轮修锐中的应用.制造技术与机床,2000(9), p23~25.
- 12 康仁科等.超硬磨料砂轮的激光修锐技术研究.中国机械工程, Vol. 11, No 5 2000, p493~496.
- 13 左敦稳等.金刚石砂轮的 $\text{CO}_2$ 脉冲激光修锐实验.机械工程学报, Vol. 35 No.2, 1999 p42~45.
- 14 陈根余,李力钧,刘劲松.超硬磨料砂轮激光修整实验系统的研究.机械设计与制造工程, Vol. 29, No. 3, 1999, p49~59.

第一作者简介:陈根余,男,湖南长沙,湖南大学激光研究所,副教授,主要研究方向为激光和高效磨削;

第二作者简介:谢小柱,男,湖南长沙,湖南大学激光研究所,硕士研究生

(收稿日期:2002-02-11)

(编辑:张慧)