第47卷第6期 大连理工大学学报 Vol. 47, No. 6
2007年11月 Journal of Dalian University of Technology Nov. 2007

文章编号：1000-8608(2007)06-0823-06

青铜结合剂金刚石砂轮激光修锐试验研究

王续跃*， 汲丛平， 康仁科， 王连吉， 牛伟光

（大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘 要：用YAG脉冲激光对青铜结合剂金刚石砂轮进行修锐试验研究，为改善激光修锐效果，提出辅助交叉吹气的方法，实验研究了激光功率密度和离焦量对结合剂去除效果的影响. 对修锐后的砂轮表面形貌显微观察表明，辅助交叉吹气方法有助于磨粒的暴露，有明显的修锐效果. 同时，对修锐砂轮的磨削力测量结果表明，修锐后法向磨削力比修锐前下降10%～15%，切向下降5%～7%，比单独同轴吹气下降3%～5%，提高了砂轮的磨削性能. 该结果为金属结合剂超硬磨料砂轮的激光修锐应用提供了理论与试验依据.

关键词：激光修锐；青铜结合剂；金刚石砂轮

中图分类号：TG665 **文献标识码**：A

0 引 言

金刚石等超硬磨料砂轮的深切磨削、超高速磨削和快速点磨，不仅实现了高效率和高表面完整性加工，而且还能得到高精确度尺寸. 然而，由于超硬磨料的硬度和金属结合剂的韧性，用传统的机械修整方法，修整工具磨损快、修整时间长，很难满足修整质量和效率的要求，磨粒突出高度不够，使磨削中的磨削条件恶化、磨削力增大、磨削区温度升高、砂轮的寿命降低，导致工件表面完整性下降. 为了解决传统的砂轮修整问题，研究人员提出了改进方法，例如，GC杯型砂轮修整方法[1]、软弹性修整方法[2]、游离磨料修锐法[3,4]等，针对金属结合剂开发了电火花修整法和在线电解修整法[5,6]等. 这些方法各有优缺点，存在着修整工具损耗大、设备复杂、修整效果不理想和修整的综合成本较高等问题. 因此，需要一种效率高、消耗少、简单实用的方法来弥补这些不足. 激光修整方法作为一种非接触修整方法，无机械力作用，利用激光束在砂轮表面快速扫描，在不损伤磨料的情况下，使结合剂直接气化或者熔化后被吹除，这样可简化复杂的修锐工艺，提高生产效率.

国内外对超硬磨料砂轮的激光修锐开展了理论与试验研究，并在树脂结合剂砂轮修锐方面取得较大进展. 由于树脂结合剂的分解温度(350 ℃左右)与金刚石磨料的熔点(3 000 ℃以上)相差悬殊，可以通过控制激光参数将树脂结合剂气化去除来达到修锐目的[7]. 而金属结合剂的气化温度与金刚石磨料的破坏温度接近，结合剂的熔化排除困难，因此，激光修锐金属结合剂超硬磨料砂轮难度较大. 与树脂磨料砂轮的激光气化去除结合剂原理不同，金属结合剂金刚石砂轮的激光修整，主要在金属结合剂的熔化状态下进行修锐，对熔化状态结合剂的去除成为激光修锐金属结合剂金刚石砂轮的关键. 有报道对金属结合剂超硬磨料砂轮进行了初步研究[7,8]，由于在去除过程中排除的金属结合剂对已修锐表面存在严重的熔化重凝覆盖，金属结合剂超硬磨料砂轮的激光修锐效果不明显，国外学者采用激光辅助金刚石笔修整砂轮的方法，提高了激光辅助修锐的效果；国内学者采用激光修锐后对磨方法，去除熔化结合剂的重凝覆盖层，虽有修锐效果，但是，在应用中难以控制.

本文采用辅助交叉吹气法，改善金属结合剂超硬磨料砂轮的激光修锐工艺，同时，对青铜结合剂金刚石砂轮样件进行修锐后的磨削力在线测量，以得到稳定、明显的激光修锐效果.

1 基本原理

激光对青铜结合剂金刚石砂轮的修锐作用与一般激光加工原理相同：被照射材料吸收激光光能，转变为热能使材料温度升高，导致被照射区域的熔化或气化. 激光修锐砂轮时，光学系统把激

收稿日期：2006-05-20； 修回日期：2007-10-15.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(重大项目52090101)；国家"863"计划资助项目(2002AA421230).
作者简介：王续跃*(1960-)，男，博士，副教授.
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

光束聚焦成较小的光斑作用于砂轮表面，在较短的时间内使砂轮局部表面的材料熔化或气化. 由于金刚石磨料和青铜结合剂材料的物理性能差异(见表1)，金刚石的热导率和热扩散率高于结合剂材料，在相同的激光作用时间内，金刚石达到熔点所需的激光功率密度比青铜结合剂材料高，且金刚石磨料透光波段为 0.225 ～ 100 μm，对于波长为 1.06 μm 的 YAG 激光器来说，激光照射在金刚石磨料表面时，除少量激光能量反射外，大部分能量将透过金刚石磨料作用在结合剂上. 因此，利用脉冲激光进行超硬磨料砂轮修锐时，通过控制激光修锐参数，可以选择性地去除结合剂材料，在不损伤超硬磨粒的前提下，使磨粒暴露出来，在砂轮表面形成一定的容屑空间，提高磨料的磨削性能，实现金属结合剂超硬磨料砂轮的激光修锐[9～12].

表1 金刚石与青铜材料的物理性能[1]

Tab. 1 Physical properties of diamond and bronze bond[1]

材料	ρ/(g·cm^{-3})	c/(J·kg^{-1}·C^{-1})	λ/(W·m^{-1}·C^{-1})	α/(mm^2·s^{-1})	t_m/C	$A_{1.06\ \mu m}$
金刚石	3.48 ～ 3.56	502	146	82	3 700 ～ 4 000	0.1
青铜	8.76	342	25	8.34	831	0.3

2 辅助交叉吹气方法

通常情况下，脉冲激光修锐砂轮时，光束以一定的重叠率和扫描速度对砂轮表面进行快速扫描(图1). 当脉冲激光束照射砂轮表面时，金属结合剂被熔化，利用激光头内辅助同轴气体，吹除熔化与气化的多种混合物. 同轴气体吹除熔化物时，金属会向四周喷溅，前一次扫描露出的磨料，会被后一次扫描时产生的熔化金属覆盖(图2(a))，结果只有砂轮表面边缘有磨粒暴露出来(图2(b)). 这种条件下修锐的砂轮，表面存在二次熔化金属覆盖，修锐效果差；用修锐后砂轮进行磨削加工时，熔化金属容易转移到工件表面，影响被磨削工件的表面质量.

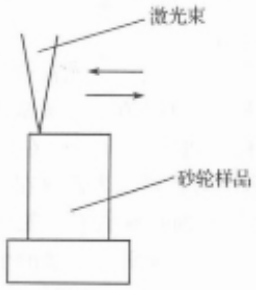
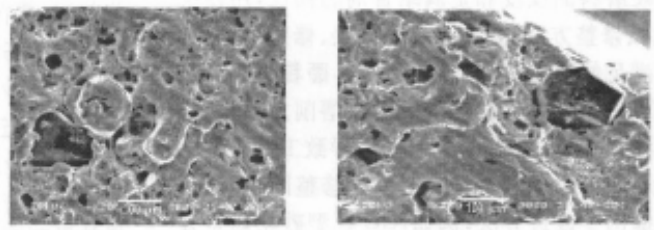


图1 激光修锐示意图

Fig. 1 Sketch illustration of laser dressing



(P_m = 20 W, z = +4.5 mm, 200×)

图2 熔化重凝覆盖的激光修锐表面形貌

Fig. 2 Resolidification surface topography after laser dressing

激光修锐时，青铜结合剂有以下几种状态：气化排除、熔化喷溅、颗粒飞溅，以及熔化结合剂重凝于砂轮表面. 当激光束照射到砂轮表面时，砂轮表面温度开始上升，当升到青铜结合剂的熔点时，结合剂开始熔化，且随着热量的积累有少量结合剂气化离开砂轮表面. 与此同时，等温面将以一定的速度向材料内部传播. 同轴气体将给熔化金属一个向下的压力，在熔池中形成一个凹坑，同时熔池中的熔化金属被反射出凹坑. 当沿凹坑侧壁反射气体的压力大于凹坑侧面熔化金属表面张力时，将有一部分熔化金属以较高的速度向四周飞溅而出，飞离砂轮表面，这一部分熔化的结合剂不会对砂轮的已修锐表面产生影响. 随凹坑体积增大，一部分熔化物附着在凹坑壁上，这些结合剂处于激光照射的能量密度的边缘，附着在未熔化固体上，表面张力较大，同轴气体不能排净所有熔化产物，熔化结合剂的流动重凝覆盖相邻已修锐的砂轮表面. 即熔化物的流动，靠近凹坑内侧的熔化金属在反射气体的吹动下，沿着凹槽侧壁向外流动，附着在所形成的凹坑边缘的四周，覆盖已加工表面和未加工表面. 由于重叠扫描，在凹坑与凹坑之间产生缺口，这样熔化结合剂倾向于向已加工表面流动覆盖已加工的凹坑(见图3).

在同轴吹气基础上，采用辅助侧向吹气方法，改变熔化结合剂的流动和飞溅的方向，使其不影

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

响已修整表面，与同轴气体共同作用，加大气流对熔化结合剂的排除作用，使反射气体的压力大于熔化结合剂的表面张力，使砂轮表面的熔化物被更有效地排除(见图 4).

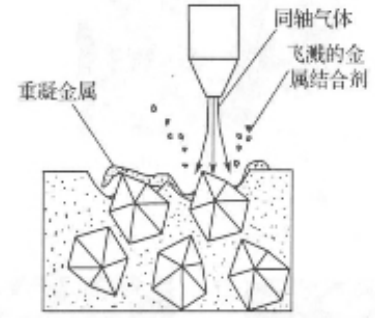


图 3　熔化重凝覆盖原理图

Fig. 3　Sketch illustration of resolidification

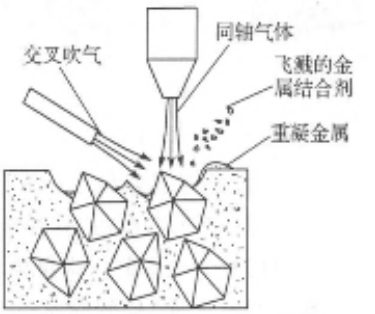


图 4　辅助交叉吹气激光修锐原理图

Fig. 4　Sketch illustration of laser dressing with side blowing

3　试验条件

采用 JK701 型脉冲 Nd：YAG 数控激光加工机. 激光器输出脉冲宽度为 0.3 ～ 2.0 ms、重复频率范围为 20 ～ 40 Hz、输出功率为 0 ～ 150 W 连续可调. 同轴喷嘴为与激光器切割镜头配套的直径为 1 mm 的圆口喷嘴，辅助气体压强 0.5 MPa，由 0.6 MPa 空气压缩机提供，并带有同压交叉辅助喷嘴. 试验材料为粒度 120#、质量分数 100% 的青铜结合剂金刚石砂轮样品，砂轮样品结构如图 5 所示. 试验设计采用正交试验法进行修锐参数组合，优化修锐效果. 利用光学显微镜和扫描电镜观察修锐前后砂轮表面的微观形貌；通过磨削力试验，验证修锐试验研究结果，图 6 为磨削力的测量装置图.

4　试验与结果分析

4.1　激光修锐参数的选择

砂轮表面的大面积修锐由单脉冲形成的有一定重叠度的凹坑群组成. 因此，单脉冲试验是进行大面积修锐的基础. 为确定单个凹坑的直径和深度，本文建立单脉冲修锐参数与修锐尺寸的对应关系，为大面积修锐提供基础数据.

一般情况下，磨粒裸露在外边的部分以磨粒尺寸的 1/3 为宜. 金刚石磨料的尺寸在0.106 ～ 0.125 mm，因此应该掌握激光参数使修锐的深度在0.03 ～ 0.05 mm 比较合适.

输出功率和离焦量对激光修锐的效果起着决定性的作用. 图 7 为激光功率对形成的凹坑直径和深度的影响. 图 8 为离焦量对凹坑的修锐量的影响，如图在输出功率不变的情况下，随着离焦量的增加，凹坑深度变小，凹坑直径有一个从小变大再变小的趋势.

在选择激光加工参数时应该在保证一定单脉冲深度的前提下，尽量选择大的离焦量，这样的选择与凹坑的熔池形状有关. 当离焦量很小时，能量集中在很小的光斑范围内，此种条件下会得到一个深径比很大的熔池. 在这样的参数下进行大面积修锐将导致大量的熔化结合剂在高压气体吹动下流向已加工表面，由于孔洞深而孔径小，熔化结合剂将很难沿孔壁爬升，飞溅出凹坑，即使在辅助侧吹气体的条件下，结合剂也很难去除. 而当保证一定深度的情况下，选择大的离焦量，将降低凹坑的深径比，在重叠度一定的情况下，一方面由于熔池的面积扩大使得流向已加工表面并凝着在已加工表面的熔化结合剂相对减少，另一方面使得熔化结合剂更容易沿着坑壁爬

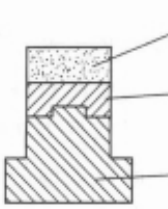
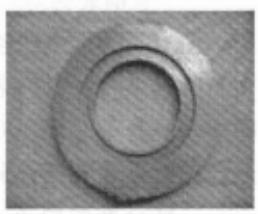
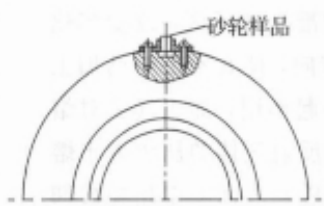


图 5　砂轮样品示意图

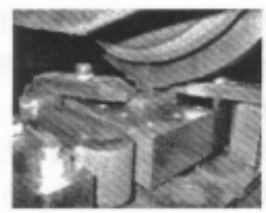
Fig. 5　Sketch of grinding wheels sample



(a) 砂轮测力装置



(b) 砂轮测力装置装配示意图



(c) 磨削平台

图 6　磨削力的测量装置

Fig. 6　The device of measuring grinding force

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

升飞溅离开，而且提高了加工效率，降低了加工成本. 因此在选择加工参数时应该尽量选择一定输出功率下的使得去除面积最大的离焦量作为试验参数.



(a) $P_m = 15$ W(100 ×)　　(b) $P_m = 25$ W(100 ×)

图 7　输出功率对单脉冲烧蚀凹坑尺寸的影响($z = +3$ mm)

Fig. 7　The dimension of cater single pulse ablated influenced by output power ($z = +3$ mm)

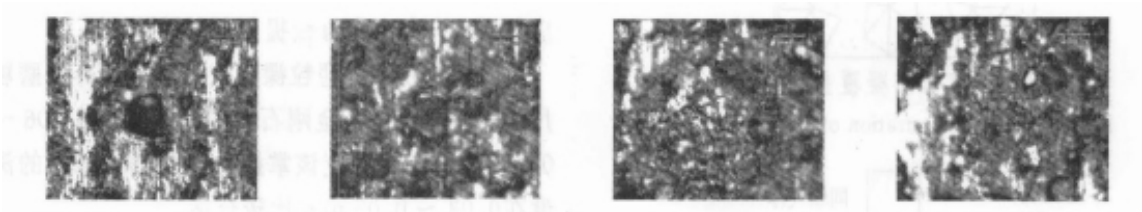


图 8　离焦量对单脉冲烧蚀凹坑尺寸的影响($P_m = 15$ W)

Fig. 8　The dimension of cater single pulse ablated influenced by defocus distance ($P_m = 15$ W)

4.2　辅助交叉吹气试验

金属结合剂金刚石砂轮激光修锐前表面形貌如图 9 所示. 磨粒之间被大量结合剂填充，没有足够的磨粒微刃露出，没有足够的容屑空间，所以这种微观状态的砂轮磨削性能很差.

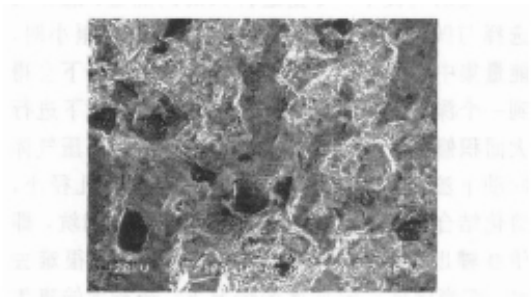


图 9　青铜结合剂金刚石砂轮激光修锐前表面形貌

Fig. 9　Surface topography of metal bond diamond grinding wheel before laser dressing

辅助交叉吹气是在同轴吹气基础上，辅助侧向吹气，气流吹动方向对准未加工区，改变熔化结合剂的流动和飞溅的方向，使其不影响已加工表面，并且与同轴气体一起作用，加大气流对熔化结合剂的排除作用，使反射气体的压力大于熔化结合剂的表面张力，使砂轮表面的熔化物被彻底地排除.

辅助交叉吹气的压力为 0.6 MPa，辅助吹气喷嘴保持与水平成 20°. 图 10 为重叠率 0.5 时，辅助交叉吹气条件下，激光修锐后砂轮的表面形貌. 可见在加入辅助交叉吹气后，修锐效果较好，避免熔化金属对已修锐表面的二次覆盖，并且在颗粒之间有较大容屑空间，达到修锐目的.

4.3　磨削试验

激光修锐优化参数：激光输出功率 $P_m = 20$ W，离焦量 $z = +4.5$ mm，脉宽 $t_0 = 0.5$ ms，频率 $f = 35$ Hz，重叠系数为 0.5，有同轴气体和辅助交叉气体联合作用.

磨削参数：试验砂轮测力装置的外径为 250 mm，青铜结合剂金刚石砂轮粒度 120#，质量分数 100%. 砂轮经过圆弧整形、修锐后，镶嵌在砂轮测力装置上，表面圆弧与砂轮测力装置圆盘同心. 砂轮装置线速度 $v_s = 19$ m/s，仅进行砂轮径向进给，每次进给量 $a_p = 0.02$ mm. 磨削试件为 45 mm × 25 mm × 7 mm 硬质合金块，固定于测力平台上.

(1) 磨削表面对比

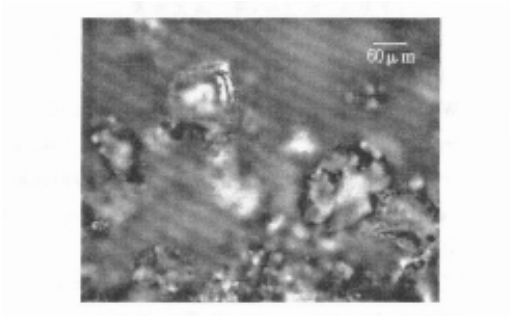
图 11(a)、(b) 分别为未使用交叉吹气和使用交叉吹气条件下，修锐的青铜结合剂金刚石砂轮磨削硬质合金表面. 可见未使用交叉吹气方法激光修锐的砂轮在磨削过程中，由于砂轮表面的二次覆盖结合剂的脱落，结合剂转移至硬质合金表面，污染了工件表面. 而使用交叉侧吹方法进行激光修锐的砂轮，避免了结合剂对修锐表面的二次覆盖，在磨削过程中完全是金刚石磨粒对工件

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表面的磨削，不存在结合剂脱落对工件表面的污染.

(2) 磨削力对比

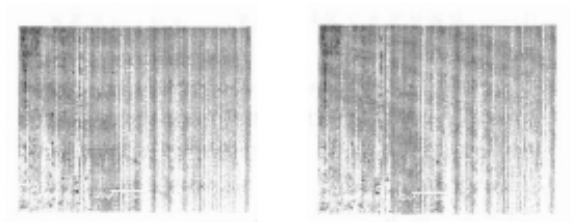
测力试验采用大连理工大学传感测控研究所研制的优化结构整体式压电磨削测力平台，测力系统由测力平台、电荷放大器、稳压电源、配有数据采集板的微机和专用软件组成. 测力系统能够把力信号转化成能够显示的波形信号和存储的数据格式，图 12 为磨削力测量结果.



(P_m = 20 W，z = + 4.5 mm，200 ×)

图 10　辅助交叉吹气条件下激光修锐青铜结合剂砂轮表面形貌

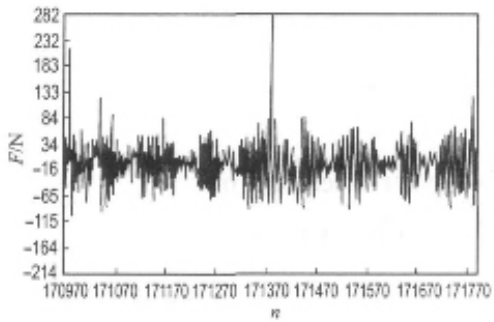
Fig. 10　The surface topography of metal bond grinding wheel after laser dressing with side blowing



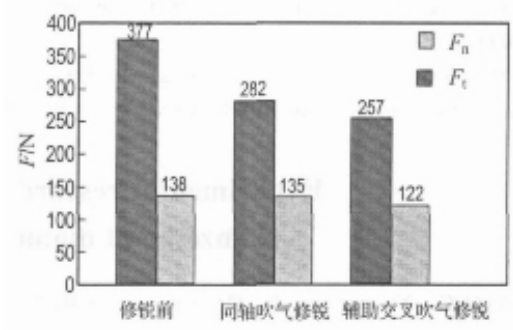
(a) 熔化结合剂转移至试件表面　　(b) 金刚石磨粒作用表面

图 11　不同修锐方法磨削表面对比(磨削硬质合金试件)

Fig. 11　Comparison of grinding surface with different dressing method (grinding hard alloy)



(a) 测量的力信号



(b) 砂轮修锐前后磨削力对比

图 12　测量的力信号及砂轮修锐前后磨削力对比

Fig. 12　The signal of grinding force and the comparison of grinding force

磨削力的测量：首先测量修锐前砂轮的磨削力，径向进给 3 次，测量 3 次磨削力，然后对砂轮进行激光修锐，再径向进给 3 次，测量 3 次修锐后砂轮的磨削力，比较砂轮修锐前后的平均磨削力.

图 12(a) 为磨削力测力信号输出，由于在砂轮装置的圆周上只镶嵌了一个圆弧样件，在砂轮装置圆盘旋转时，只有当砂轮与工件接触时才有磨削力信号，其余的信号为噪音信号. 磨削力信号在图中呈周期性，砂轮转速为1 440 r/min，磨削力检测信号频率为 24 Hz，完全相符. 测量结果如图 12(b) 所示，激光修锐后的砂轮的最大磨削力较未进行激光修锐砂轮的最大磨削力明显降低. 且对只有同轴吹气和辅助交叉吹气的激光修锐两种方法对比可见，后者的法向力 F_n 比修锐前平均降低 10% ～ 15%，切向力 F_t 降低 5% ～ 7%. 说明辅助交叉侧吹激光修锐进一步降低了砂轮的磨削力，提高了砂轮的磨削性能.

5　结　论

(1) 在辅助交叉吹气试验条件下，可以使熔化的青铜结合剂有效排除，避免了修锐过程中熔化结合剂对修锐表面的覆盖，解决了常见的金属结合剂砂轮的熔化重凝问题.

(2) 选择激光修锐参数功率 20 W，离焦量 4.5 mm，脉宽 0.5 ms，重叠率 0.5，磨削力测量结果表明，法向磨削力比修锐前降低了 10% ～ 15%，比同轴吹气降低了 2% ～ 3%，切向磨削力比修锐前降低了 5% ～ 7%，比同轴吹气降低了

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2%～3%，取得了稳定、明显的修锐效果.

参考文献：

[1] 王德泉. 砂轮特性与磨削[M]. 北京：中国标准出版社，2001

[2] 王先逵，应宝阁. 金刚石微粉砂轮软弹性修整研究(I)—— 软弹性修整及其机理[J]. 金刚石与磨具磨料工程，1996(6)：9-11

[3] LI Xiao-ping. A free-abrasive machining approach to dressing of resin-bonded CBN grinding wheels [J]. **J Mater Proces Technol**, 1995, **48**(1-4): 223-230

[4] 冯宝富，蔡光起. CBN 砂轮的修整方法及其应用[J]. 工具技术，2001，**35**(12)：8-11

[5] WANG Xian-kui, YING Bao-ge, LIU Wei-gang. EDM dressing of fine grain super abrasive grinding wheel [J]. **J Mater Proces Technol**, 1996, **62**(4): 299-302

[6] LIM H S, FATHIMA K. A fundamental study on the mechanism of electrolytic in-process dressing (ELID) grinding [J]. **Int J of Machine Tools and Manuf**, 2002, **42**(8): 935-943

[7] ZHANG C, SHIN Y C. A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels [J]. **Int J of Machine Tools and Manuf**, 2002, **42**: 825-835

[8] KANG Ren-ke, YUAN Jing-ting, ZHANG Yun-peng. Truing of diamond wheels [J]. **Key Eng Mater**, 2001, **202-203**: 263-268.

[9] 康仁科，原京庭，任敬心，等. 激光修整金刚石砂轮的实验研究[J]. 西北工业大学学报，1999，**17**(4)：624-628

[10] WANG Xu-yue, WANG Jun. An experimental study of laser 3D machining with variable processing parameters [C] // **2nd International Conference on LEM21**. Niikata: Japan Society of Mechanical Engineeing Press, 2003

[11] 王续跃，吴勇波，王 军，等. 激光入射角对修整圆柱形砂轮的影响[J]. 大连理工大学学报，2005，**45**(5)：672-675
(WANG Xu-yue, WU Yong-bo, WANG Jun, *et al*. Effect of incident angle on laser processing of a small vitrified CBN grinding wheel [J]. **J Dalian Univ Technol**, 2005, **45**(5): 672-675)

[12] 王续跃，吴勇波，徐文骥，等. 激光修整圆柱形砂轮中离焦量对能量分布的影响[J]. 中国机械工程，2006，**17**(7)：702-705

Experimental research on laser dressing of bronze bond diamond grinding wheel

WANG Xu-yue*, JI Cong-ping, KANG Ren-ke, WANG Lian-ji, NIU Wei-guang

(Key Lab. for Precis. and Non-tradit. Mach. Technol. of Minist. of Edu., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract: A new method to true diamond grinding wheel using Nd: YAG laser was presented, which used assistant side blowing to improve the laser dressing effects. Both modeling and experiment were conducted to investigate the effect of laser power density and focal offset on bond removal. The comparison between the surface topography on bronze bond diamond grinding wheel before and after laser dressing shows that using assistant side blowing can make the abrasives exposure more enough, and thus laser dressing can get effective dressing results. Meanwhile, the grinding force measurements were performed, and the results show that the grinding force decreases to 10%-15% in normal direction, 5%-7% in tangent direction, and the grinding force also decreases 3%-5% compared with the original method of inside blowing. And its grinding capability was improved effectively. The experimental research has provided an in-depth understanding of the relation between laser truing parameter and grinding quality, formed the laser dressing basis both in theory and experiment.

Key words: laser dressing; bronze bond; diamond grinding wheel

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net