DOI: 10.3901/JME.2014.15.172

可溶填充剂对孔隙自生成超硬磨料磨具 孔隙生成的影响*

吕冰海 董晨晨 邓乾发 袁巨龙 范红伟 吴 喆

(浙江工业大学超精密加工研究中心 杭州 310014)

摘要: 针对金属结合剂超硬磨料磨具结合剂密实、难修整、容易堵塞(容屑空间小)的问题,提出一种孔隙自生成超硬磨料磨具加工技术:在金属结合剂中添加“可溶”填充剂,加工过程中利用特定溶液溶解磨具表层的“可溶”填充剂,从而在磨具表层形成类似多孔金属的孔隙结构,以提供容屑空间、并增强磨具自锐性。分析了 Zn、CaO 和 SiO₂ 三种“可溶”填充剂“溶解”过程,以及填充剂对磨具整体强度的影响;制备 $\phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 青铜结合剂孔隙自生成金刚石丸片试样,进行孔隙生成观察试验以及加工试验,研究孔隙自生成磨具的自锐过程。结果表明,“可溶”填充剂 Zn 在不明显降低磨具力学特性的前提下,具有较好的孔隙生成效果,从而提高磨具自锐性、减轻磨具表面的堵塞现象和提高材料去除率。

关键词: 超硬磨料磨具; 金属结合剂; 孔隙自生成; “可溶”填充剂

中图分类号: TG156

Influence of Soluble Filler on Pores Self-generation Superabrasive Tool

LÜ Binghai DONG Chenchen DENG Qianfa YUAN Julong FAN Hongwei WU Zhe

(Ultra-precision Machining Research Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract: To overcome the great difficulties in dressing and the small space for chips, the natural problems of the traditional metal bonded superhard abrasive tool, pores selfgeneration superabrasive tool (PSSAT) is proposed. The fillers added in the metal binder of the PSSAT can be ‘dissolved’ by certain solution in the machining process, and porous structure, which is benefit to the self-sharpening and the increasing of chip space, can be generated on the tool surface layer. The dissolution of three soluble fillers Zn, CaO, SiO₂ are analyzed, and the influence of the fillers on the strength of PSSAT is also investigated. PSSAT pellets with dimension $\phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ are used in experiments to investigate the pore-generating and self-sharpening process. Results show that the filler Zn is the best one for pores self-generation without obvious decline of the tool strength. As a result, the self-sharpening of the abrasive tool and material removal rate are improved with decrease of the jam on tool surface.

Key words: superabrasive tool; metal binder; pore selfgeneration; soluble filler

0 前言

金属结合剂超硬磨料磨具具有磨粒把持力强、结合强度高、耐磨性好、形状保持性好、寿命长等特点,已经成为实现结构陶瓷、玻璃等硬脆难加工材料高效精密加工的主要工具之一。但多层金属结合剂超硬磨料磨具自身也存在一些固有的缺陷,主要表现在^[1-2]:一方面,金属结合剂超硬磨料磨具的自锐性差,磨粒出刃难,且出刃后出露度难以保持;另一方面,由于结合剂密实,砂轮表面容易堵塞(容

屑空间小),易造成材料去除效率下降,并导致工件表面烧伤等表面损伤问题,严重影响工件的加工效率与质量。为解决上述问题,加工过程中需要对金属结合剂超硬磨料磨具不断地进行修整,通过去除结合剂的方式使磨刃露出,并形成容屑空间。因此,金属结合剂超硬磨料磨具的修整技术成为影响加工精度和效率的重要因素。但由于金属结合剂密实,造成传统机械式磨具修整方法的修整效果不佳。为此,国内外学者提出了诸如在线电解修整(Electrolytic in-process dressing, ELID)^[3]、电化学在线控制修整(Electrochemical in-process controlled dressing, ECD)^[4]、接触式电火花修整(Electro-contact discharge dressing, ECDD)^[5]、气中放电辅助修整(Dry electrical discharge assisted truing, dry-ECD)^[6]、

* 国家自然科学基金(51175166)、浙江省自然科学基金重点(LZ12E05001)和浙江省科技计划(2013C31014)资助项目。20130812 收到初稿,20140519 收到修改稿

激光辅助修整^[7-8]等多种修整方法。其中以 ELID 技术最为典型, 应用最为成熟。但其也存在磨料无效损耗较大(ELID 磨削中氧化膜的厚度在几十微米到几百微米之间, 对于微米、亚微米级的微细磨料磨具而言, 有相当一部分磨料在还未对工件产生切削作用之前就脱离了砂轮^[9]), 以及磨削力存在波动(由于电解修整过程的非线性, 砂轮表面绝缘层的破损会造成切削力不稳定, 剪切力存在突升和突降^[10])等问题。另一方面, 为解决磨粒出刃难的问题, 也有学者将孔隙结构引入金属胚体产生了多孔金属结合剂砂轮^[11-12]。多孔金属结合剂金刚石砂轮虽然具有了类似陶瓷结合剂超硬磨料磨具易修整的特点, 但以牺牲磨具本身的耐用性为代价。

综上所述, 由于金属结合剂密实, 金属结合剂超硬磨料磨具加工存在难修整、易造成工件烧伤等问题。ELID 等技术能够很好地解决磨具的在线修整问题, 但砂轮的无效损耗等问题增加生产成本。如果从砂轮的本身着手, 来改善金属结合剂超硬磨料工具的修整修锐能力, 显然具有事半功倍的效果^[1]。

本文提出了一种孔隙自生成超硬磨料磨具(Pores selfgeneration superabrasive tool, PSSAT)加工技术: 在磨具的金属结合剂中添加可溶于特定溶剂的填充剂。加工过程中, 通过特定的加工液“溶解”磨具表层的“可溶”填充剂, 在结合剂间形成孔隙。在形成容屑空间的同时, 降低磨具对表层磨粒的把持力, 使磨损磨粒容易脱落, 并露出新的磨粒, 增强了磨具的磨削性能和自锐力。本文阐述了孔隙自生成超硬磨料磨具的基本工作原理, 研究了不同可溶填充剂的孔隙生成效果, 并通过试验分析了生成孔隙对提高磨具自锐能力和材料去除率的效果。

1 孔隙自生成磨具的基本工作原理

孔隙自生成超硬磨料磨具的修整过程如图 1 所示。随着加工的进行, 磨具表层磨粒钝化。此时, 将包含有特定溶剂的加工液注入磨具表面(图 1a)。“溶剂”与磨具表层的“可溶”填充剂发生化学反应, 使填充剂溶解, 从而在磨具表面形成孔隙(图 1b), 形成类似多孔金属结合剂的结构。这些孔隙既可作为容屑空间, 又降低了磨具表层对磨粒的把持力以及磨具表层结合剂的结构强度。由于把持力的下降, 表层磨损磨粒更易脱落(图 1c); 由于表层结构强度下降, 磨具表层的金属结合剂更容易破碎, 从而使次表层的磨粒露出(图 1d), 达到在线修锐磨具、生成容屑空间的目的。通过调整“可溶”填充剂颗粒

本身大小和数量可以控制砂轮所能形成的容屑空间及其机械特性; 通过调整“溶剂”浓度等参数可以控制“可溶”填充剂的溶解速率, 从而调控磨具的修整速度。

图 1 孔隙自生成超硬磨料磨具修整过程

2 “可溶”填充剂对磨具性能的影响

2.1 “可溶”填充剂及“溶剂”材料的选择

“可溶”填充剂是实现孔隙自生成超硬磨料磨具的技术关键, 应具备以下三个基本要求。

(1) “可溶”填充剂与金属结合剂具有较好的结合性, 从而保证磨具具有良好的整体强度。

(2) “可溶”填充剂可以溶解于含特定“溶剂”的溶液(加工液)中, 而这种该溶液对工件(钢、结构陶瓷等)及加工设备不产生化学腐蚀。

(3) “可溶”填充剂可以耐受金属结合剂磨具制作过程中的高温。

本文分析三种类型的材料作为“可溶”填充剂。

(1) 金属 Zn: 金属 Zn 与 Fe、Cu 具有良好的亲和性。将 Zn 添加到铸铁或青铜结合剂中, Zn 能和

结合剂一起对磨粒起到良好的把持作用。在加工区域注入 FeCl_3 溶液, 磨具表层暴露的 Zn 将与之反应

使 Zn 溶解于 FeCl_3 溶液中, 在磨具表面形成孔隙。

(2) 金属氧化物 CaO : 一般金属氧化物只溶解于酸性溶液中, 但酸性溶液会对加工设备造成腐蚀, 而 CaO 可以溶解于水中。将 CaO 作为填充剂添加到金属结合剂磨具中时, 加工过程暴露在表层的 CaO 可与水发生反应

起到溶解 CaO 的作用, 从而在磨具表面形成孔隙。但是, 由于 CaO 本身不具备黏结效果, 无法对磨粒起到把持作用, 因此会降低磨具的强度。

(3) 非金属氧化物 SiO_2 : 一般非金属氧化物可以溶于碱性溶液中, 弱碱性的溶液对设备的金属构件腐蚀较小。这里选用 SiO_2 作为可溶填充剂。暴露在磨具表层的 SiO_2 可与碱性溶液(NaOH 溶液)发生反应

从而使 SiO_2 溶解, 在磨具表面形成孔隙。但是, SiO_2 本身不具备黏结力, 加入金属结合剂后, 也会降低金属结合剂超硬磨料磨具的强度。

2.2 可溶填充剂对磨具表面孔隙生成性能的影响

采用以上三类“可溶”填充剂, 制作孔隙自生成超硬磨料磨具的丸片作为试样。试样均为 $\phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的平均粒径为 $13 \mu\text{m}$ 金刚石丸片, 青铜结合剂, 金刚石浓度 100%(金刚石质量分数约为 0.89 g/cm^3)。丸片试样分别添加 Zn 、 CaO 和 SiO_2 , 添加的填充剂与金刚石微粉的重量比约为 3:10。添加的 Zn 粉粒度为平均粒径 $13 \mu\text{m}$, CaO 粒度为平均粒径 $45 \mu\text{m}$, SiO_2 粒度为 W5(平均粒径 $5 \mu\text{m}$)。试样如图 2 所示。

图 2 孔隙自生成超硬磨料磨具丸片试样

为观测磨具表面的孔隙生成效果, 将不同的丸片放入相应的 FeCl_3 溶液、 H_2O 和 NaOH 溶液中浸泡 10 min 后取出, 分别采用扫描电镜(Scanning electric microscope, SEM)对浸泡“溶剂”前后的磨具试样表面进行了观测。同时, 观测按正常工艺加工的金刚石丸片作为对比。

(1) 正常型的金刚石丸片表面: 图 3 是按工厂

正常工艺生产的青铜结合剂金刚石丸片表面的 SEM 照片。由图可见, 丸片表面比较密实, 表面的孔隙较小, 不利于磨具表面形成充足的容屑空间和磨具的修整。

图 3 正常型金刚石丸片表面 SEM 照片

(2) 添加 Zn 的金刚石丸片表面: 试验将添加 Zn 的金刚石丸浸泡在 FeCl_3 水溶液 (质量分数 1%) 中 10 min, 观察浸泡前后的丸片表面。由图 4a 可见, 该丸片在浸泡 FeCl_3 水溶液之前, 其表面结构与正常型丸片结构基本类似, 表面也比较密实。而如图 4b 所示, 该丸片在 FeCl_3 溶液浸泡后, 可以发现结合剂上有明显的被溶解痕迹, 丸片表面产生了明显的凹坑及孔隙, 形成了类似多孔金属磨具的结构。同时, 次表层的金刚石颗粒也被暴露出来了。这主要是由于青铜结合剂中所分散的“可溶”填充剂 Zn 被 FeCl_3 溶液溶解所形成的。

(a) 浸泡前

(b) 浸泡后

图 4 浸泡前后添加 Zn 金刚石丸片的 SEM 照片

试验采用等离子体质谱仪 PerkinElmer Elan DRC-e ICP-MS，对浸泡丸片前后 FeCl_3 水溶液中的 Fe 和 Zn 质量分数进行了检测，分析结果如表 1 所列。分析结果表明，浸泡前溶液中含有大量的 Fe 和少量的 Zn，这些少量的 Zn 可能是 FeCl_3 化学药品中本身掺杂的杂质。加工后，溶液中 Fe 减少，而 Zn 质量分数大幅增加。这进一步说明了丸片中添加的 Zn 与溶液中的 FeCl_3 发生了置换反应。

表 1 加工前后加工液成分(元素)分析检测结果

样品	被检测元素/(mg/L)	
	Fe	Zn
加工前	1 580.8	9.7
加工后	1 389.5	502.4

(3) 添加 CaO 的金刚石丸片表面：同样观测 CaO 作为可溶填充剂金刚石丸片在浸泡 H_2O (常温)前后的表面结构变化。由图 5a 可见，添加 CaO 的金刚石丸片与正常型的金刚石丸片存在明显差异，其表面布满了 CaO 颗粒，其表面气孔较多。这主要是由于 CaO 本身没有黏结作用，无法与金属结合剂融成一体。如图 5b 所示，该丸片在水中浸泡后，其表面的部分 CaO 被溶解，形成一定的孔隙。这主要是由于 CaO 在水中的溶解度较低，静态浸泡 10 min 并不足以使表面的 CaO 全部溶解所造成的。

(a) 浸泡前

(b) 浸泡后

图 5 浸泡前后添加 CaO 金刚石丸片的 SEM 照片

(4) 添加 SiO_2 的金属结合剂金刚石丸片表面：

图 6 是 SiO_2 作为可溶填充剂金刚石丸片在浸泡 NaOH 水溶液(pH 值约为 8)前后的表面 SEM 照片。由图可见，添加 SiO_2 的金刚石丸片表面比较密实，细小的 SiO_2 颗粒基本将磨具表面充满。而在 NaOH 溶液浸泡后，其表面的 SiO_2 大部分被溶解掉，并形成了新的孔隙。

(a) 浸泡前

(b) 浸泡后

图 6 浸泡前后添加 SiO_2 金刚石丸片的 SEM 照片

以上观测试验结果表明：金属结合剂金刚石磨具中添加的 Zn、 CaO 和 SiO_2 三种“可溶”填充剂均可以被相应的溶剂溶解，在磨具表面形成孔隙。其中，填充剂 Zn 形成孔隙的效果最好，而 SiO_2 次之， CaO 被溶解相对较少，形成孔隙的效果相对较差。

2.3 可溶填充剂对磨具力学性能的影响

为考察“可溶”填充剂对磨具力学性能的影响，采用剪切试验检测磨具的整体力学性能。试样剪切试验的原理如图 7 所示。试样由夹具固定，压头向下对试样进行剪切，试样沿中轴面被剪断。通过考察剪断工件所需力的大小来确定填充剂对磨具整体力学性能的影响。试验在 EHC-120 型电液伺服万能材料试验机上进行，该设备采用高精度数字伺服阀组 and 全数字闭环控制技术，载荷精密级为 0.5%，位移分辨率 1 μm 。被剪切丸片与以上观察试验所用丸片相同，每种丸片均剪切三次，取平均值。

图 8 为不同试样的剪切试验结果。由图可见，添加 Zn 的金刚石丸片与正常型的金刚石丸片相比，剪断所需的力差别不大，从 3.28 kN 下降至 3.22 kN。

图 7 磨具试样剪切试验原理图

图 8 不同试样的剪切试验结果

这是因为金属 Zn 本身具有良好的黏结性，与金刚石磨粒及青铜结合剂之间具有良好的结合力，使丸片具有较好的整体强度。而添加 CaO 和 SiO₂ 金刚石丸片剪断所需的剪切力分别为 1.26 kN 和 0.77 kN，远小于正常型金刚石丸片所需的剪切力。这主要是 CaO 和 SiO₂ 本身无黏结效果，造成了磨具试样整体强度的下降。

以上试验结果表明，填充剂 Zn 对磨具整体的力学影响性能较小，而填充剂 CaO 和 SiO₂ 会显著降低磨具的力学性能。由此可见，在目前的试验中，Zn 更适合作为孔隙自生成磨具的“可溶”填充剂。

3 加工试验

3.1 加工条件

为观测实际加工过程中孔隙自生成超硬磨料磨具表面的孔隙生成情况，采用孔隙自生成金刚石丸片对平板玻璃进行了加工试验。加工试验平台如图 9 所示。试验在精密平面抛光机上进行，系统由一个黏结金刚石丸片的磨具盘、夹持工件的转台和加工液供给装置三部分组成。加工过程中，旋转的磨具头在一定的压力作用下与旋转的工件接触，实现材料去除。溶解“可溶”填充剂的溶剂通过加工液进入加工区域。

图 9 磨具研磨加工示意图

为比较加工效果，本试验分别采用正常型金属结合剂金刚石丸片和添加 Zn 的孔隙自生成金刚石丸片进行加工试验。加工试验参数如表 2 所列。每加工 60 min，采用精密天平测量工件去除量，并采用显微镜观测磨具表面。

表 2 磨具研磨加工试验条件

项目	条件
丸片磨粒	金刚石
磨粒平均粒径/ μm	13
丸片结合剂	青铜
丸片可溶填充剂	Zn
丸片尺寸 $\left(\frac{\text{直径}}{\text{mm}} \times \frac{\text{高度}}{\text{mm}}\right)$	20×5
丸片数量	8
正常型丸片冷却液	水
添加 Zn 丸片冷却液	FeCl ₃ 水溶液(质量分数 1%)
工件	$\phi 300$ mm 平板玻璃
磨具基盘直径/mm	150
工件转速/(r/min)	60
磨具基盘/(r/min)	60
加工载荷/N	30
测试试验时间/(min/组)	60

3.2 试验结果与分析

3.2.1 丸片表面的变化过程

图 10 所示为试验过程中，正常型金属结合剂金刚石丸片表面在加工过程中的变化。由图可见，加工 2 h 后，丸片表面的大部分气孔即被堵塞。这表明正常型的金属结合剂金刚石磨具在加工脆性材料时，其表面很容易被加工过程中产生的粉末状切屑所堵塞，从而导致其加工效率下降以及工件表面质量恶化。下文对材料去除率的分析也说明了这一点。

图 11 所示为添加 Zn 的孔隙自生成金刚石丸片表面在加工过程中的变化。由图可见，在整个加工过程中，丸片表面始终有较多的气孔存在，丸片表面并未发生严重的堵塞情况。其主要原因就是丸片表层的“可溶”填充剂-Zn 被溶解而形成新的孔隙。同时，随着填充剂的溶解，原本附着在丸片表面的

粉末状切屑也容易掉落, 从而进一步减轻了堵塞现象。由此表明孔隙自生成超硬磨料磨具能够通过较简便的方法实现在线修整, 其表面生成的孔隙提供了足够的容屑空间, 避免/减轻磨具表面的堵塞。

图 10 正常型金属结合剂金刚石丸片表面在加工过程中的变化

图 11 孔隙自生成金刚石丸片(添加 Zn)表面在加工过程中的变化

图 12 给出了工件初始表面粗糙度和两种丸片加工 6 h 后的工件表面粗糙度 (Mahr S2 粗糙度仪测量)。由于在加工后期, 正常型的丸片表面被堵塞, 对工件材料的去除作用下降, 工件表面粗糙度不能被有效降低。而孔隙自生成丸片由于有较好的自锐性, 因此获得了表面粗糙度相对较低的表面。

图 12 工件加工 6 h 前后的表面粗糙度轮廓

3.2.2 工件材料去除速率的变化

图 13 给出了两种不同的丸片在加工过程中材料去除率的变化情况。由图 13 可见, 两种丸片在加工初期的材料去除率基本相同(加工第 1 h 期间), 这主要是由于丸片在加工初期, 表面未经修整, 露出表面的金刚石颗粒比较多, 因而可以获得较高的材料去除率。正常型丸片加工 2 h 后, 丸片表面突出的金刚石颗粒磨损, 丸片表面发生堵塞, 从而导致了材料去除率从 7.8 g/h 下降至 5.1 g/h 左右, 并最终逐渐稳定在 4.4 g/h 左右。而孔隙自生成金刚石丸片加工初始阶段的材料去除率与正常型相近, 为 7.6 g/h, 在 2 h 后稍有下降, 加工过程中保持在 7.3~7.4 g/h。这主要是由于丸片表面始终未发生较严重的堵塞。同时, Zn 的溶解降低了丸片表层结合剂的结构强度, 使黏结桥更易断裂。SEM 观测也验证了这一点(图 14)。

以上试验结果表明, 由于孔隙自生成超硬磨料磨具在结合剂中添加了可溶性填充剂, 在加工过程中被相应的溶剂(冷却液)溶解, 能够在磨具表面不断生成孔隙, 减少磨具表面的堵塞, 并使磨粒更容易露出, 有利于保持加工过程中的材料去除率并降低工件表面粗糙度。但是, 孔隙自生成超硬磨料磨具是一种新的磨具技术, 尚有诸多方面有待分析、探讨与完善, 如“可溶”填充剂材料的进一步优化选择; 填充剂的颗粒本身的大小、形状、一致性及其在结合剂中的分布均匀性对磨具的结构特性、加工性能和磨损性能的影响; 孔隙自生成磨具的制作

技术等都需要进一步研究。

图 13 两种金刚石丸片加工的材料去除率对比

图 14 加工 6 h 后孔隙自生成丸片表面黏结桥的裂纹

4 结论

针对传统金属结合剂超硬磨料磨具较难修整的问题,本文提出了一种孔隙自生成超硬磨料磨具,从磨具本身的结构着手,在金属结合剂中添加“可溶”填充剂,在加工过程中,利用特定的溶剂将“可溶”填充剂溶解,在磨具表层生成孔隙,从而在提供容屑空间的同时,起到磨具自锐的效果。

(1) “可溶”填充剂是实现孔隙自生成超硬磨料磨具的技术关键。化学反应分析表明, Zn、CaO 和 SiO₂ 三种材料可以作为“可溶”填充剂添加到金属结合剂中。加工过程中,可分别采用 FeCl₃ 溶液、水和 NaOH 溶液进行溶解。

(2) 通过孔隙生成的观测试验发现,添加 Zn 的孔隙自生成磨具表面,“可溶”填充剂可较充分的被相应的溶剂溶解,生成较多的孔隙; SiO₂ 形成孔隙的效果次之;而由于 CaO 在水中的溶解度较小,添加 CaO 的磨具表面其孔隙生成速度较慢。

(3) 通过磨具试样的剪切试验表明,由于金属 Zn 本身具有良好的黏结性,添加 Zn 的孔隙自生成磨具具有较好的机械强度,沿中轴面剪断 $\phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的磨具试样需要 3.22 kN,仅略低于正常型磨具所需的 3.28 kN。由于 CaO 和 SiO₂ 本身无黏结效

果,这两种填充剂的添加均造成了磨具整体强度下降。因此,在目前研究中,Zn 更适合作为孔隙自生成磨具的“可溶”填充剂。

(4) 玻璃的加工试验表明,正常型的金属结合剂超硬磨料磨具在加工脆性材料(玻璃)时,非常容易被粉末状的切屑堵塞。在本文的试验条件下,材料去除率从初始的 7.8 g/h 下降至 4.4 g/h。而孔隙自生成超硬磨料磨具加工时,其表面的“可溶”填充剂不断被溶解,形成的孔隙,可以提供较多的容屑空间,并使磨具具有良好的自锐性,能够保持较高的材料去除率,加工过程中稳定在 7.3~7.4 g/h。

参 考 文 献

- [1] 苏宏华,徐鸿钧,傅玉灿,等. 多层烧结超硬磨料工具现状综述与未来发展构想[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 12-17.
SU Honghua, XU Hongjun, FU Yucan, et al. Review the current questions and strategies about multilayer sintering superabrasive tools and conceive the development of future tools[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 12-17.
- [2] 袁巨龙,张飞虎,戴一凡,等. 超精密加工领域科学技术发展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
YUAN Julong, ZHANG Feihu, DAI Yifan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [3] OHMORI H, NAKAGAWA T. Mirror surface grinding of silicon wafers with electrolytic in-process dressing[J]. Ann. CIRP, 1990, 39(1): 329-332.
- [4] KRAMER D, REHSTEINE F, SCHUMACHER B. ECD (electrochemical in-process controlled dressing), a new method for grinding of modern high-performance cutting materials to highest quality[J]. Ann. CIRP, 1999, 48(1): 265-268.
- [5] SUZUKI K, ASANO S, UEMATSU T, et al. Development of a simplified electrochemical dressing method with twin electrodes[J]. Ann. CIRP, 1991, 40(1): 363-366.
- [6] WAN Daping, WANG Yan, HU Dejin. In situ turning/dressing of diamond wheel for precision grinding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(3): 46-51.
- [7] ZHANG C, SHIN Y C. A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,

- 2002, 42(7): 825-835.
- [8] 陈根余, 李力钧, 马宏路, 等. 声光调 Q YAG 脉冲激光修锐和整形青铜金刚石砂轮[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 174-179.
- CHEN Genyu, LI Lijun, MA Honglu, et al. Laser turning and dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels by a Q-switched YAG pulse laser[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 174-179.
- [9] 王平, 张飞虎, 袁哲俊, 等. 铸铁砂轮电解氧化膜在 ELID 镜面磨削中的作用机理研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 1996(6): 25-28.
- WANG Ping, ZHANG Feihu, YUAN Zhejun, et al. Study on mechanism of electrolytic oxide film of cast iron grinding wheel in ELID grinding[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 1996(6): 25-28.
- [10] LIM H S, FATHIMA K, KUMAR A, et al. A fundamental study on the mechanism of electrolytic in-process dressing (ELID) grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(8): 935-943.
- [11] TANNAKA T. New development of metal bonded diamond wheel with pore by the growth of bonding bridge[J]. JSPE, 1992, 26(1): 27-32.
- [12] CHEN Zhenzhen, XU Jiuhua, DING Wenfeng. Grinding characteristics of porous composite-bonded CBN Wheels[J]. Advanced Material Research, 2013, 797: 516-521.

作者简介: 吕冰海(通信作者), 男, 1978 年出生, 研究员。主要研究方向为磨粒加工技术及装备。

E-mail: icewater7812@126.com