DOI: 10.3901/JME.2014.17.201

多孔复合结合剂立方氮化硼砂轮磨损特性*

陈珍珍 徐九华 丁文锋 马昌玉
(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 针对难加工材料高效磨削砂轮难以满足高气孔率与高强度要求问题, 基于氧化铝空心陶瓷球颗粒造孔与增强, 开发了一种新型多孔复合结合剂立方氮化硼(Cubic boron nitride, CBN)砂轮。开展了镍基高温合金磨削试验, 分别从磨削力、砂轮径向磨损量、磨损形貌过程等方面分析多孔砂轮的磨损特性, 并与白刚玉砂轮进行对比。研究表明: 多孔复合结合剂 CBN 砂轮磨削高温合金的磨削力和磨削温度均小于白刚玉砂轮; 当单位材料去除率为 $4 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时, 多孔复合结合剂 CBN 砂轮的磨削比是白刚玉砂轮的 6 倍; 多孔复合结合剂 CBN 砂轮磨削高温合金的磨损形式主要是磨粒磨耗磨损、磨粒及结合剂破碎磨损及黏附磨损, 磨损过程伴随新磨粒与气孔的出露。相比之下, 白刚玉砂轮黏附堵塞现象严重, 砂轮磨损快, 工件表面质量难以保证。

关键词: Al_2O_3 空心球; 复合结合剂; 多孔 CBN 砂轮; 磨削力; 磨损

中图分类号: TP212

Wear Behavior of Porous Composite-bonded CBN Abrasive Wheels

CHEN Zhenzhen XU Jiuhua DING Wenfeng MA Changyu

(College of Mechanical and Engineering School, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016)

Abstract: In order to meet the wheel requirement of high porosity and high strength for the high efficiency grinding process of difficult-to-cut materials, a new type of porous composite-bonded cubic boron nitride (CBN) abrasive wheel is developed based on alumina bubble particles as pore-forming agent. The grinding experiments are conducted on nickel-based alloy respectively with the developed porous CBN wheel and white corundum grinding wheel. The grinding forces, radial wear and wheel wear forms are measured and investigated. Results show that, the grinding forces and grinding temperatures of porous CBN wheel are smaller than that of white corundum grinding wheel, and the grinding ratio is about 6 times higher when the material remove rate is $4 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$. The primary wear forms of porous composite-bonded CBN wheel include abrasive abrasion wear, abrasive and bond fracture, and adhesion wear. Accompanied by the wear, new abrasives and pores are exposed. Serious wheel adhesion and loading phenomena are found during grinding with white corundum grinding wheel, and the radial wear of the corundum grinding wheel is almost 6 times that of porous one.

Key words: alumina bubbles; composite-bonded; porous cbn wheel; grinding force; wheel wear

0 前言

镍基高温合金等高强韧性难加工材料磨削过程具有砂轮易黏附堵塞、磨削力大、磨削温度高、磨削表面质量难以保证等特点, 普通磨料砂轮无法满足其加工要求^[1]。但由于磨床主轴转速、主轴刚

度等条件限制, 目前主要还是采用大气孔单晶刚玉砂轮进行缓进给磨削高温合金来实现较大的材料去除和保证加工精度。随着陶瓷立方氮化硼(cubic boron nitride, CBN)砂轮的发展, 其在难加工材料磨削领域中得到了广泛应用, 但高气孔率砂轮在重负荷作用下易崩边, 型面完整性差。而金属结合剂 CBN 砂轮虽磨粒把持力强、型面稳定性好、使用寿命长等优良性能, 但修整困难、容屑空间小、自锐性差等缺点, 从而影响磨削效率和加工质量。

针对上述两类砂轮存在的固有缺陷, 国内外学

* 国家自然科学基金(51005116, 51235004)、中央高校基本科研业务费专项资金(BCXJ10-08)和江苏省研究生培养创新工程(CX10B-090Z-05)资助项目。20130927 收到初稿, 20140513 收到修改稿

者开展了多种新技术、新方法研究,旨在改善砂轮强度与气孔率、自锐性与耐磨性。其中较为典型的是 CHATTOPADHYAY 等^[2-3]先后将活性钎焊技术应用于金属结合剂砂轮,采用活性钎料实现了 CBN 磨粒与金属基体的化学连接,提高了磨粒把持强度。TANAKA 等^[4-6]采用造孔剂制孔,开展了多孔金属结合剂砂轮研究,但这种方法所形成的气孔存在大小及形状分布不均匀等问题,从而降低了金属结合剂砂轮工作层型面的强度,且因金属结合剂较软,磨粒内陷无法正常出露,降低了砂轮锋利度。TAWAKOLI 等^[7-8]在 2000 年提出 T-Tool 概念砂轮,特殊修整后砂轮有效工作面减小 25%,使有效磨粒数发挥最大的切削功能。此后,又采用激光束在树脂或陶瓷砂轮表面烧制盲孔的方法使砂轮的有效工作面下降 20%。但此类砂轮耐磨性明显下降,在难加工材料高效深切磨削应用领域受限。日本则武 NORITAKE 公司推出的多气孔 CBN 通用砂轮“KP MEMOX”和新型多孔结构 CBN 砂轮“FP”均可大幅提高磨粒分散性防止砂轮堵塞,提高磨削锋利度,防止磨削烧伤,能保证高精度要求,同时可使用单颗粒修整器进行砂轮修整。至此,在保证砂轮强度的前提下高气孔率的重要性可见一斑。Winter(温特)、Tyrolit(泰利莱)等国际知名磨料工具制造公司推出了陶瓷颗粒增强胎体合金制作的金属结合剂超硬磨料砂轮样品,在硬质合金材料加工中显示出较佳的磨削性能。此外,圣戈班最新推出的高性能陶瓷工具磨砂轮诺顿 Hummingbird“蜂鸟”,采用圣戈班全球最新研发的创新陶瓷结合剂配方 Vitrium3,与普通结合剂相比, Vitrium3 无论在磨削效率、表面粗糙度、砂轮使用寿命和加工精度方面都具有明显的优势。由于以上所述国外砂轮的设计制造都处于高度保密状态,所以一直未见其相关的专利和文献报导。尽管如此,可以看出多孔复合结合剂砂轮已经成为多层超硬磨料砂轮的发展趋势。

目前用氧化铝空心陶瓷球作为造孔剂制作砂轮的报道很少^[9]。基于颗粒增强复合材料原理,空心陶瓷球颗粒有助于提高砂轮工作层强度,解决了多孔结构引入后砂轮工作层强度下降而导致的崩边、塌边等型面稳定性差问题,而且能够增强工作层对 CBN 磨粒的支撑能力,避免磨粒被压入工作层而无法出露,提高砂轮耐用度。课题组前期在多孔 CBN 砂轮制备研究中已取得一定的成果^[10-13]。

为进一步优化砂轮磨料层组元与结构,制备了直径 150 mm 的多孔复合结合剂 CBN 砂轮,并开展了镍基高温合金普通往复磨削试验,分别从磨削力、砂轮径向磨损量及砂轮磨损形式等方面考察多孔复

合结合剂 CBN 砂轮磨削磨损特性。同时,在同等条件下采用白刚玉砂轮进行对比,确保此类砂轮在高温合金磨削加工应用中的优势,并为研制高温合金高速高效磨削用多孔复合结合剂 CBN 砂轮提供参考。

1 试验装置与试验方法

砂轮磨削试验在 HZ-Y150 型卧轴矩台平面磨床上进行,磨床主轴转速为 3 000 r/min,使用直径 150 mm 的砂轮时最大线速度为 23.55 m/s。试验中使用新开发的多孔复合结合剂 CBN 砂轮,其基体材料为经调质处理的 45 钢,外径 138 mm,内径 32 mm,砂轮工作面宽度为 10 mm,工作层厚度为 6 mm,其砂轮工作层以 CBN 颗粒、Cu-Sn-Ti 钎料、石墨颗粒、 Al_2O_3 空心陶瓷球为原料,采用优化的组元配比和液态活化烧结工艺制造。对比用白刚玉砂轮型号为 WA46KV。切削液使用 4%水基乳化液。工件材料为沉淀强化镍基高温合金 GH4169,尺寸为 50 mm×30 mm×5 mm。试验装置示意图如图 1 所示,试验条件列于表 1。

图 1 磨削试验装置示意图

表 1 试验条件

项目	条件
机床	HZ-Y150 型卧轴矩台平面磨床
砂轮	多孔复合结合剂 CBN 平面砂轮 白刚玉砂轮 W46KV
工件材料	GH4169
冷却液	4%水基乳化液
砂轮线速度 v_s /(m/s)	23.55
工件进给速度 v_w /(m/min)	4, 8, 12
切深 a_p /μm	10~30
每行程磨削长度 l /mm	50

对多孔复合结合剂 CBN 砂轮采用金刚石笔整形和切入式磨削 GC 砂轮修锐配合使用的修整方法,对白刚玉砂轮采用金刚石笔修整。分别采用修整后的多孔 CBN 砂轮和白刚玉砂轮进行高温合金 GH4169 磨削对比试验,通过比较两种砂轮的磨削力、砂轮磨损量及磨削比,来考察该多孔 CBN 砂轮在高温合金磨削应用中的优势。

磨损试验条件为 $v_s=23.55$ m/s, $v_w=12$ m/min, $a_p=20$ μm 。每磨削 50 个行程(累计切削深度 1 mm, 其中单行程磨削长度为 50 mm, 工件宽度为 5 mm, 即累计材料去除体积为 250 mm^3)后, 测量一次砂轮径向磨损量 Δr , 并用三维视频显微镜对砂轮工作面上局部区域的形貌尤其是磨粒微观磨损形貌、结合剂和磨粒黏附情况进行跟踪观测分析, 用扫描电镜对砂轮典型磨损形式进行观察分析。

2 多孔复合结合剂 CBN 砂轮制备

高温合金磨削时主要存在砂轮易黏附堵塞、磨损严重等问题, 导致砂轮在使用过程中需频繁修整, 极大地缩短砂轮寿命。为改善高温合金的磨削性能、提高砂轮寿命, 新开发的多孔复合结合剂 CBN 砂轮需满足大气孔、高强度、强耐磨性等要求。

多孔 CBN 砂轮工作层以 CBN 颗粒、Cu-Sn-Ti 钎料、石墨颗粒、 Al_2O_3 空心陶瓷球为原料。其中, 作为胎体合金的 Cu-Sn-Ti 钎料中含 Ti 量为 10%; 为满足砂轮大气孔的要求, 作为造孔剂的 Al_2O_3 空心陶瓷球外径选用 500~600 μm , 壁厚约为 30 μm ; CBN 磨粒为普通单晶型, 型号为 CBN230, 粒度为 150~180 μm , 砂轮浓度 100%; 石墨粒度为 50 μm , 占胎体合金的 8%, 因其高熔点而在工作层节块的烧结过程中作为骨架象存在, 且因其片层状结构而在磨削过程中起到润滑作用。

将钎料、磨粒、石墨、空心陶瓷球按一定比例称重, 加入成型剂充分混合后倒入专用模具, 并在粉末压片机上经 18 MPa 的压力冷压成型节块毛坯, 然后采用优化后的烧结工艺(最高温度 880 $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间 30 min)在真空炉中活化烧结后随炉冷却。将烧结成型后的工作层节块及砂轮基体表面经过喷砂、清洗, 并采用高强度环氧树脂胶黏剂黏接制成多孔复合结合剂 CBN 砂轮, 如图 2 所示。

图2 多孔复合结合剂 CBN 砂轮

经修整后的砂轮表面形貌如图 3 所示。从图中可以看出, 通过切入式磨削 GC 砂轮修锐后, 多孔复合结合剂 CBN 砂轮表面磨粒周围的结合剂被去

除, CBN 磨粒和空心球均基本出露, 气孔部分形成, 为高温合金磨削时提供充足的容屑空间, 同时有效地将切削液带入磨削弧区。

图3 修整后多孔 CBN 砂轮表面形貌

由于试验所选用的空心陶瓷球孔径已知, 在工作层中所造孔为闭孔, 通过理论计算可得添加空心陶瓷球质量分数 15% 所对应的体分比为 30%。此外, 采用真空烧结后结合剂胎体内部形成一定的孔隙结构, 故砂轮的气孔率在 35%~40% 之间。采用三点抗弯强度测定仪所测的工作层强度约为 68 MPa, 满足砂轮强度要求。

3 试验结果及其分析

3.1 磨削力与磨削温度

图 4a 和 4b 分别为采用多孔复合结合剂 CBN 砂轮和白刚玉砂轮 WA64KV 磨削 GH4169 时切深 a_p 和工件进给速度 v_w 对单位切向力 F_t' 的影响。由图 4 可见, 两个砂轮都呈现出这一特点: 切深增大, 磨削力增大; 工件进给速度增大, 磨削力也随之增大, 但增大幅度较小。这主要是因为 a_p 和 v_w 增大, 单颗磨粒的未变形切屑厚度增大, 所以磨削力随之增大。同时, 从图 4 可以明显地看出, 多孔复合结合剂 CBN 砂轮要比白刚玉砂轮的磨削力小, 降幅约为 30%, 因此更适于磨削高温合金。

由于采用的砂轮线速度较低, 单颗磨粒切削厚度大, 再加上 GH4169 高温合金的磨削性能差, 因而多孔 CBN 砂轮和白刚玉砂轮的磨削力比 F_n/F_t 都较大, 为 2.6~3.2, F_n 为单位法向力。

图 5 为采用多孔 CBN 砂轮和白刚玉砂轮磨削 GH4169 时切深 a_p 对测得的磨削温度 T 的影响。磨削温度 T 是指工件表面磨削弧区的平均最高温度, 采用半人工热电偶来测量。由图 5 可以看出, 随着切深的增大, 磨削温度升高, 且多孔复合结合剂 CBN 砂轮比白刚玉砂轮的磨削温度小, 当切深为 0.03 mm 时, 降幅约为 30 %。

(a) 切深对单位磨削力 ($v_s=23.55$ m/s, $v_w=4$ m/min) (b) 工件进给速度对单位磨削力 ($v_s=23.55$ m/s, $a_p=0.02$ mm)

图4 磨削参数对磨削力的影响

图5 切深 a_p 对磨削温度 T 的影响

3.2 砂轮磨削比

图6是磨削高温合金时砂轮径向磨损量 Δr 随工件累计去除体积 $\Sigma \Delta V_w$ 的变化曲线,图6为用多孔CBN砂轮和白刚玉砂轮磨削GH4169高温合金的磨削比 G (磨削比 G 为砂轮磨损体积 $\Sigma \Delta V_s$ 与工件累计去除体积 $\Sigma \Delta V_w$ 之比)。由图6可见,采用白刚玉砂轮磨削时,砂轮磨损非常严重。当工件累计材料去除体积达 $3\,500\text{ mm}^3$ 时,砂轮径向磨损量达 $450\text{ }\mu\text{m}$,而多孔复合结合剂CBN砂轮的径向磨损量仅为 $80\text{ }\mu\text{m}$,且磨损较稳定。

图6 砂轮径向磨损量

从图7可以看出,当单位材料去除率为 $4\text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时,采用白刚玉砂轮磨削GH4169高温合金的磨削比 G 很低, $G=2.0\sim 3.3$,而在相同的磨削用量条件下,多孔CBN砂轮的磨削比 G 要高得多, $G=15.0\sim 21.2$ 。随着砂轮磨削过程进行,工件磨削表面粗糙度呈逐渐减小的趋势,当砂轮径向磨损量为 $450\text{ }\mu\text{m}$ 时白刚玉砂轮加工的工件表面粗糙度 R_a 约为 $0.42\text{ }\mu\text{m}$,而多孔CBN砂轮去除工件 $5\,250\text{ mm}^3$ 后的工件表面粗糙度约为 $R_a0.39\text{ }\mu\text{m}$ 。经三维视频显微镜观察,多孔CBN砂轮磨削的工件表面质量较好,切削纹理清晰,而白刚玉砂轮磨削的工件表面有沟槽翻边、隆起、磨屑黏附等缺陷。

图7 砂轮磨削比

3.3 CBN砂轮磨损特征

采用白刚玉砂轮平面磨削GH4169高温合金,当材料去除率达 $4\text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时,磨粒切削长度大,再加上白刚玉砂轮孔隙的不规则及孔隙连通性,磨屑极易堵塞砂轮容屑空间,从图8所示的当累积材料去除体积为 $1\,500\text{ mm}^3$ (300行程) 时白刚玉砂轮表面局部形貌可以看出,砂轮磨损形式以砂轮堵塞黏附为主。此外,从图6砂轮磨损量结果可知,砂轮磨损严重,对砂轮表面磨粒状态观察比较困难。因此,本文主要对制备的新型多孔复合结合剂CBN砂轮表面磨损形貌进行微观分析。

图 8 白刚玉砂轮磨损形貌(300 行程后)

图 9a、9b 所示分别为累计磨削去除材料体积 $1\ 750\ \text{mm}^3$ (350 行程) 和 $5\ 250\ \text{mm}^3$ (1 050 行程) 时新型多孔复合结合剂 CBN 砂轮表面局部磨损形貌。对比图 3、图 9a、9b 可以看出, 在图 3 中所观察到的砂轮修整后表面有效磨粒在磨削 1 050 个行程后基本断裂, 如图 9b 所示, 但新磨粒已基本出露。砂轮磨损稳定, 砂轮磨损形式以磨粒破碎磨损为主, 伴随结合剂破碎及黏附。此外, 图 3 中观察到的砂轮表面气孔随着砂轮不断磨损其出露截面越来越大, 同时, 下层的空心球也在磨削 350 个行程后出露出来形成新气孔, 如图 9a 所示, 并在磨削 5 250 个行程后逐渐扩大容屑空间, 如图 9b 所示。

(a) 350 行程后

(b) 1 050 行程后

图 9 多孔 CBN 砂轮磨损形貌局部跟踪

为更好地表征砂轮磨损特征, 采用扫描电镜对砂轮磨损形貌进行观察。图 10 显示了典型的砂轮磨损形貌, 主要有磨粒微破碎、磨粒黏附、磨粒断裂、结合剂滑擦及黏附等。从图 10a、10b 可以清楚地观察到磨粒微破碎, 这种微破碎效果有利于更好地发挥磨粒的切削作用。图 10c 所示为重负荷作用下磨粒断裂, 清晰可见磨粒断裂处的单晶解离面, 这类磨粒可在修整去除周边结合剂后重新出露参与磨削, 这也是多层砂轮的优势之一。

砂轮黏附主要表现为磨粒表面黏附和结合剂黏附, 分别如图 10b、10d 所示, 可以清楚地看到结合剂滑擦的痕迹及黏附的锯齿形切屑。从图 10b 中可以看到, 磨粒表面包裹结合剂更易使磨屑黏附在磨粒顶端, 但这类磨屑可在后续磨削过程中扩大至脱落, 致使磨粒顶端或结合剂发生破碎。但毫无疑问, 磨屑黏附使磨削过程中的磨削力增大和磨削温度升高, 影响工件表面质量, 加剧砂轮磨损。此外, 由图 10e 的砂轮磨损局部表面气孔的形貌可见, 气孔孔型完整性好, 气孔内部无磨屑堵塞, 这主要是由于规则孔型的盲孔使切削液能更好地进入气孔清除磨屑, 减少气孔堵塞。

根据以上试验及微观分析, 对砂轮磨损与自锐过程及原因进行归纳如下。

(1) 砂轮黏附主要表现为磨粒顶端黏附小块切屑、切屑去除使磨粒微破碎、磨粒顶端包裹大面积工件材料、切屑大面积去除导致磨粒破碎、结合剂表面黏附等。

(2) 在磨削过程中, CBN 磨粒对被磨工件具有切削作用, 而磨屑对砂轮磨粒和结合剂也有冲击和滑擦作用, 这会加速砂轮的磨损。如图 9d 所示结合剂表面的滑擦痕迹。

(3) 当表层磨粒失效、结合剂大面积黏附脱落后多伴随新磨粒和气孔出露, 如图 8b 所示的新磨粒与气孔在磨削 1 050 个行程后出露。

综上所述, 制备的新型多孔复合结合剂 CBN 砂轮具有一定的耐磨性和自锐性, 磨粒主要经历磨耗-黏附-微破碎-断裂失效这几个过程, 黏附和微破碎之间不断循环, 且磨粒失效后周边有新磨粒出刃, 达到自出刃的效果; 而白刚玉砂轮表面黏附严重造成大面积剥落, 导致砂轮磨损快, 且磨削时磨屑极易堵塞砂轮, 不利于散热, 加工表面质量难以保证。

4 结论

(1) 制备的新型多孔复合结合剂 CBN 砂轮磨削高温合金时的磨削力和磨削温度均小于白刚玉砂

(a) 磨粒微破碎

(b) 磨粒黏附

(c) 磨粒断裂

(d) 结合剂滑擦与磨屑黏附

(e) 气孔无堵塞

图10 砂轮典型磨损形貌

轮,且加工工件表面质量更好,因此更适于磨削高温合金。

(2) 当材料去除率为 $4 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ 时,采用白刚玉砂轮磨削 GH4169 高温合金的磨削比很低,砂轮磨损严重;而同等条件下,多孔 CBN 砂轮的磨削比约为白刚玉砂轮的 6 倍。

(3) 多孔 CBN 砂轮耐磨性好,其磨损形式主要表现为磨粒与结合剂破碎磨损及砂轮黏附,基本无屑堵塞气孔现象。

(4) 多孔 CBN 砂轮在磨损过程中,随着表层磨粒失效、结合剂大面积黏附脱落,新磨粒切削刃和气孔外露,周而复始,这是砂轮自锐性的体现。

参 考 文 献

- [1] 任敬心, 康仁科, 史兴宽. 难加工材料的磨削[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
REN Jingxin, KANG Renke, SHI Xingkuan. Grinding of difficult-to-cut materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [2] CHATTOPADHYAY A K, HINTERMANN H E. On performance of brazed single-layer CBN wheel[J]. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 313-317.
- [3] DING Wenfeng, XU Jiuhua, SHEN Min, et al. Development and performance of monolayer brazed CBN grinding tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(6): 491-495.
- [4] TANAKA T. New development of metal bonded diamond wheel with pore by the growth of bonding bridge[J]. Japan Society for Precision Engineering, 1992, 26(1): 27-32.
- [5] 苏宏华, 徐鸿钧, 傅玉灿. 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. 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.
- [6] TIMOTHY D, SHELDON D, ERKEY C. Highly porous vitrified bonded abrasives by the selective extraction of butyl carbonate from green grinding wheels with supercritical CO_2 [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2005, 88(7): 1729-1733.
- [7] TAWAKOLI T. Innovative werkzeugsysteme zum schleifen, abrichten und fraesen (T-tool profile, und T-tool)[C/CD]//III Seminar Moderne Schleiftechnologie,

- Furtwangen, Germany, 2000.
- TAWAKOLI T. Innovative tool system for grinding, dressing and milling (T-tool profile, and T-Tool) [C/CD]/III Seminar Modern Grinding Technology, Furtwangen, Germany, 2000.
- [8] TAWAKOLI T, RABIEY M. An innovative concept and its effects on wheel surface topography in dry grinding by resin and vitrified bond CBN wheel[J]. *Machining Science and Technology*, 2008, 12(4): 514-528.
- [9] 熊华军, 刘明耀, 夏举学. 空心球造孔制备的多空金属结合剂金刚石砂轮的磨削性能研究[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2011, 31(2): 44-49.
- XIONG Huajun, LIU Mingyao, XIA Juxue. Study on grinding performance of porous metal bond diamond wheel manufactured with hollow sphere pore-forming agent[J]. *Diamond & Abrasive Engineering*, 2011, 31(2): 44-49.
- [10] CHEN Zhenzhen, DING Wenfeng, XU Jiuhua, et al. Porous composite-bonded CBN grinding wheel with alumina bubbles[J]. *Advanced Material Research*, 2012, 565: 46-51.
- [11] DING Wenfeng, XU Jiuhua, CHEN Zhenzhen, et al. Fabrication and performance of porous metal-bonded CBN grinding wheels using alumina bubble particles as pore-forming agents[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67: 1309-1315.
- [12] SONG Chengjie, DING Wenfeng, XU Jiuhua, et al. Grinding performance of metal-bonded CBN wheels with regular pores[J]. *Applied Mechanics and Material*, 2012, 217-219: 1857-1862.
- [13] PAN Qing, DING Wenfeng, XU Jiuhua, et al. Fabrication of composite blocks containing alumina bubble particles for porous CBN abrasive wheels[J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 499: 229-234.
-
- 作者简介: 陈珍珍, 女, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为超硬材料工具技术与难加工材料高效磨削加工。
- E-mail: czzjudy@nuaa.edu.cn
- 徐九华 (通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为难加工材料高性能切削/磨削技术、超硬磨料工具技术、抗疲劳制造技术、超精密加工技术。发表学术论文 200 余篇。
- E-mail: jh xu@nuaa.edu.cn