

超声振动辅助干式钻削SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料试验研究

陈玉荣, 苏宏华, 傅玉灿, 何静远, 张 炜

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 针对 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料在干式钻削中的工具磨损快、加工效率低等问题, 提出了一种基于有序排布钎焊金刚石套料钻的超声振动辅助干式钻削加工工艺。采用不同排布参数下的钎焊金刚石套料钻对 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料进行超声振动辅助钻孔加工, 通过对加工孔径的测量, 研究钎焊金刚石套料钻磨粒排布参数对钻孔工具寿命和制孔精度的影响规律, 分析工具不同位置处磨粒的磨损特征。结果表明: 工具端面磨粒越多, 工具使用寿命越长; 工具侧边磨粒排布越长, 列数越多, 加工孔的孔径变化越小; 距离工具端面越近处的磨粒磨损越大, 主要以宏观破碎和磨耗平台为主, 而距离工具端面较远处的磨粒磨损较小。

关键词: 超声振动; 钎焊金刚石套料钻; 陶瓷基复材; 干式钻削; 磨粒磨损

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.047



陈玉荣

博士研究生, 主要从事超声振动辅助加工装备研制、硬脆材料磨削加工。

陶瓷基复合材料 (Ceramic Matrix Composites, CMC) 具有低密度、高比强度、高比模量、耐高温和抗热振等优异性能, 在航空发动机高温部件上有着广泛的应用前景^[1-2]。

陶瓷基复合材料的脆性低于陶瓷材料, 但由于其高硬度及纤维编织结构特征^[3-4], 仍然属于典型的硬脆难加工材料, 此类材料的加工由于切削力大、切削温度高, 极易导致工具快速磨损^[5-6]而失效, 是当前加工的主要难题之一。

目前, 针对陶瓷基复合材料的钻孔加工通常采用普通麻花钻、PCD 麻花钻和电镀金刚石钻头工具, 但普通麻花钻易导致复合材料中碳纤维断裂, PCD 麻花钻易使孔出口处产生崩边, 电镀金刚石钻头使用寿命短、效率低。另一方面, 该类材料的超声振动辅助加工方法研究已获得了重视。Feng 等^[7]通过对比 C/SiC 复合材料超声振动辅助钻削与传统钻削的试验, 表明了超声振动辅助加工在降低钻削力的同时还可有效抑制孔口的撕裂; Ding 等^[8]通过分析超声振动辅助加工后的 C/SiC 复合材料工件表面/亚表面损伤表明, 与

传统加工相比, 粗糙度 S_a 最大可降低 12%。Azarhoushang 等^[9]通过研究 C/C-SiC 复合材料的传统加工与超声振动辅助加工对比试验得出, 在振动方向平行于纤维方向时, 相比于传统加工, 超声振动辅助加工可使磨削力降低 20%, 表面粗糙度可降低 30%。但是, 受到加工工艺应用场合的限制, 陶瓷基复合材料在加工过程中, 存在不允许使用冷却液的工况。在采用干式切削加工工艺的条件下, 刀具磨损严重的问题更为突出, 还缺乏有效的工具和工艺措施来提高刀具寿命。有序排布钎焊金刚石工具是一种金刚石磨粒与基体间结合强度很高的工具, 其不仅能提高金刚石工具的耐磨性与使用寿命^[10-12], 还可提高工具的排屑效果, 改善工具的切削性能, 是适用于硬脆难加工材料高效加工的一种特殊工具。

本文采用超声振动辅助加工技术, 结合有序排布钎焊金刚石套料

钻,对 SiC_f/SiC 复合材料进行干式钻削的试验研究,揭示钎焊金刚石套料钻结构与超声辅助加工方法对钻削工具寿命和制孔精度的影响规律,为高质量、高效率、低成本的 CMC 材料自动化干式钻削加工提供可行的工艺方法。

试验条件

1 试验平台

建立了图 1 所示的超声振动加工试验系统。该系统主要由制孔装备、自主研发超声振动加工系统和工件组成。制孔装备由库卡六轴机器人和末端执行器构成。自主研发超声振动加工系统由超声振动刀柄、超声波电源和原边供电装置组成,超声刀柄参数如表 1 所示。原边供电装置套装在末端执行器主轴前端,超声振动刀柄与主轴接口相连。超声电源为超声刀柄提供电激励,经原边供电装置传输给超声振动刀柄,采

用 Polytec 单点激光测振仪对工具端面振动频率和振幅进行测量,当电源输出功率为 40%,工具悬伸长度为 25mm 时,钎焊金刚石套料钻端面的超声振动频率为 26.6kHz,振幅 A 为 5.5 μm 。被加工工件通过螺钉固定在桁架上。

2 工具与工件试样

采用钎焊工艺制作的直径为 4.28mm 有序排布钎焊金刚石套料钻工具,如图 2 所示。工具磨料为 40/45 金刚石磨粒。金刚石磨粒排布参数有两种,分别为:排布长度 3mm、磨粒列数 8 列和排布长度 7mm、磨粒列数 13 列。试验所用的工件为 8mm 厚 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料,如图 3 所示。

3 试验方案

分别采用两种钎焊工具在相同钻削工艺参数下,对比磨粒排布长度、列数对工具寿命和孔径尺寸的影响,具体钻削工艺参数如表 2 所示。

4 测量方法

采用 DIATEST 孔径测量仪对加工后的入口/出口孔径进行测量,测量精度为 0.001mm,每个孔测量 3 次,取平均值作为试验测量结果。采用 Hirox KH-7700 三维视频显微镜对加工前后工具的端面和侧边磨粒进行观察。

试验结果与讨论

1 刀具寿命及孔径尺寸分析

图 4、5 分别为磨粒排布长度 3mm/8 列和长度 7mm/13 列两种钎焊金刚石套料钻的加工孔径尺寸与孔数的变化规律。由图 4 可知,磨粒排布长度 3mm/8 列的钎焊金刚石套料钻最多可加工 30 个孔;当工具失效时,已加工孔的入口孔径最大偏差为 0.084mm,出口孔径最大偏差为 0.098mm,平均孔径最大偏差为 0.092mm;磨粒排布长度 3mm/8 列的钎焊金刚石工具在加工过程中侧边磨粒随着加工孔数的增多而较快磨损,导致平均孔径尺寸随加工孔数的增多呈线性减小趋势;当工具端面磨粒磨损失效或者脱落时,工具不再具备钻孔切削能力,工具达到寿命极限。

由图 5 可知,磨粒排布长度 7mm/13 列的钎焊金刚石套料钻最多可加工 45 个孔;当工具失效时,已加工孔的入口孔径最大偏差为 0.041mm,出口孔径最大偏差为 0.042mm,平均孔径最大偏差为

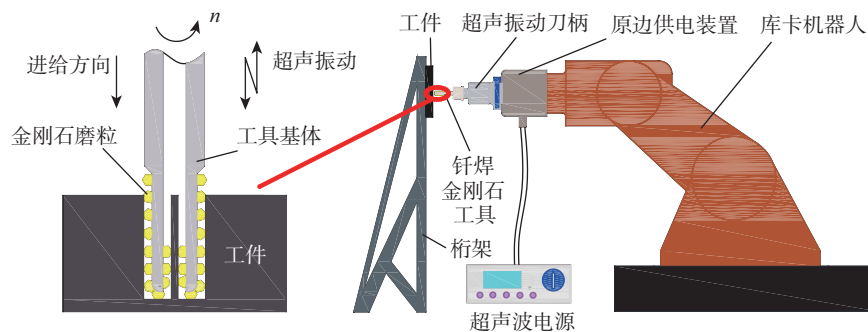


图1 超声振动加工试验系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic vibration machining system

表1 超声振动刀柄参数

Table 1 Ultrasonic vibration handle parameters

最高转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	振动频率 f/kHz	振幅 $A/\mu\text{m}$
25000	23~28	0~8.5

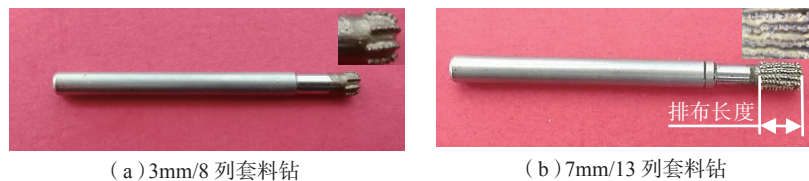


图2 有序排布钎焊金刚石套料钻

Fig.2 Brazed casing drill of defined grain distribution

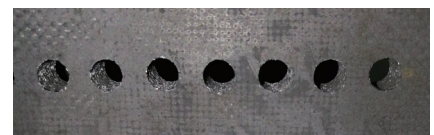


图3 SiC_f/SiC陶瓷基复合材料

Fig.3 SiC_f/SiC ceramic matrix composites

表2 加工参数

Table 2 Processing parameter

转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $v_w/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	振动频率 f/kHz	振幅 $A/\mu\text{m}$
8000	15	26.6	5.5

0.039mm; 相比图4中长度3mm/8列套料钻加工的平均孔径变化趋势, 图5中长度7mm/13列套料钻加工的平均孔径存在一个稳定的孔径变化区, 如图6所示; 当加工孔数 $N < 7$ 时, 由于工具侧边的部分磨粒出露高度较大, 导致初始加工的平均孔径大, 但随着出露高的磨粒快速磨损, 孔径尺寸进入稳定变化区; 当加工孔数 $7 \leq N \leq 41$ 时, 侧边磨粒出露高度相对一致, 磨粒进入稳定磨损阶段, 加工后的平均孔径尺寸趋于稳定, 该区域内的孔径尺寸偏差小于 $11 \mu\text{m}$; 当加工孔数 $N > 41$ 时, 侧边磨粒磨损逐渐增大, 孔径尺寸减小, 此时的端面磨粒已完全磨损, 工具失效。磨粒排布长度和列数的增加减小了单颗磨粒磨削孔壁时的材料去除体积, 减小了侧边磨粒的磨损量, 从而减小了孔径尺寸偏差; 在加工参数相同的条件下, 工具端面磨粒的增加, 降低了端面单颗磨粒的切削力, 减缓了端面磨粒的磨损速度, 增加了制孔数量, 提高了钎焊金刚石工具的使用寿命。

综上所述, 磨粒排布长度和排布列数是影响孔加工尺寸精度及刀具使用寿命的重要因素, 磨粒排布长度越长, 列数越多, 则加工孔的孔径变化越小; 工具端面磨粒越多, 工具加工寿命越长; 相比于长度3mm/8列套料钻, 长度7mm/13列套料钻加工寿命可提高50%。

2 磨粒磨损分析

图7、8分别为7mm/13列的钎焊金刚石套料钻在超声振动辅助干式钻削前后端面磨粒和侧边磨粒的磨损形貌特征。图7(a)为工具端面磨粒的原始形貌, 图7(b)为加工45个孔后的端面磨粒形貌。由图7(b)可知, 失效后的端面磨粒磨损特征以磨耗平台和宏观破碎为主。

图8中(a)、(b)、(c)分别为加工45个孔后距工具端面0.5mm、3mm、6.5mm处的侧边磨粒的磨

损形貌。由图8可知, 距离端面为0.5mm处的侧边磨粒磨损特征以宏观破碎为主, 伴随着磨粒脱落; 距离为3mm处的侧边磨粒磨损特征以磨耗平台为主, 同时伴有微破碎; 距离为6.5mm处的侧边磨粒几乎无磨损。综上可知, 超声振动辅助加工过程中, 越接近工具端面主磨削区的磨

粒磨损越严重, 因此, 磨粒排布长度越短的工具, 其加工的孔径尺寸下降越快; 当工具侧边磨粒排布较长时, 由于距工具端面较远的磨粒磨损较小, 通过越程加工后的孔径尺寸变化较小, 可有效保证孔的尺寸精度。

由图8可知, 靠近工具前端主切削区的磨粒, 由于磨粒所承受的磨削

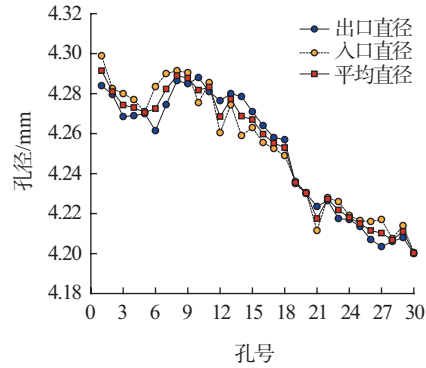


图4 长度3mm/8列有序排布钎焊金刚石套料钻孔径尺寸与孔数的变化关系
Fig.4 Relationship between hole size and the number of holes in brazed casing drill of defined grain distribution with length 3mm/8 column

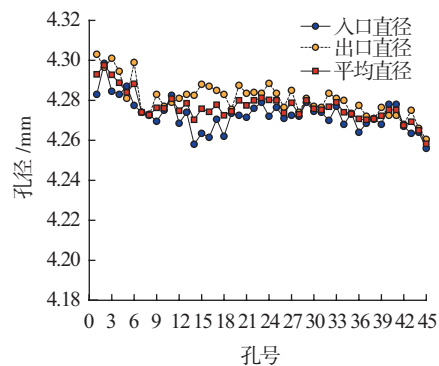


图5 长度7mm/13列有序排布钎焊金刚石套料钻孔径尺寸与孔数的变化关系
Fig.5 Relationship between hole size and the number of holes in brazed casing drill of defined grain distribution with length 7mm/13 column

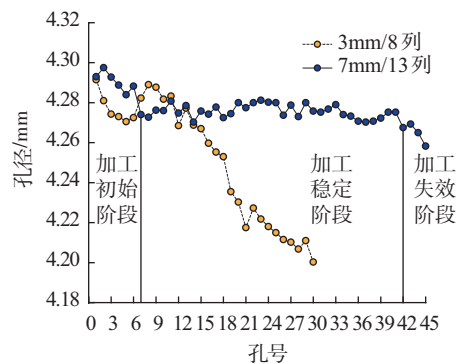


图6 两种不同工具的平均孔径尺寸与孔数的变化关系
Fig.6 Relationship between the average hole size and the number of holes in two different tools

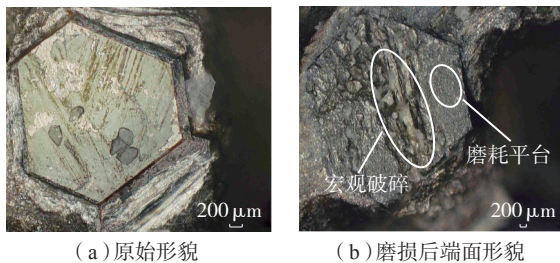


图7 端面磨粒磨损形貌
Fig.7 Wear surface morphology of the end grains

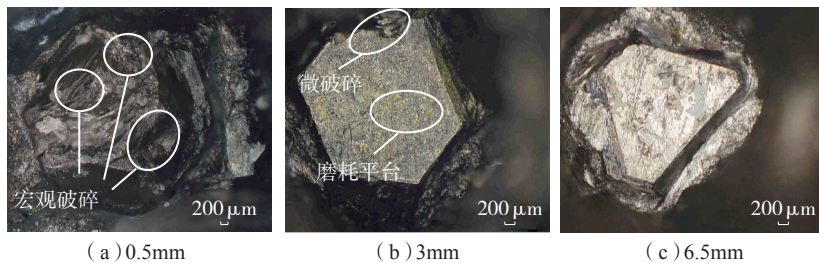


图8 侧边磨粒磨损形貌
Fig.8 Wear surface morphology of the side grains

力大,因而极易产生磨损,且磨损形式主要以宏观破碎为主。工具侧边中部磨粒的主要作用是磨削加工孔壁,保证孔径尺寸精度,由于所受的磨削力较小,因此这些磨粒的磨损相比于工具端面的磨粒磨损小,主要磨损形式是磨耗平台,伴随着微破碎。距离工具端面较远处的磨粒,由于工具的前端磨粒已将孔径加工至所需尺寸,导致其与孔壁间只有少量划擦作用,因此并未产生较大的磨损。由此可知,工具磨粒排布存在一个最优长度值,即在工具失效时,工具侧边的磨粒应全部参与孔壁的磨削加工。

3 讨论

超声振动辅助钻削加工过程中,有序排布钎焊金刚石套料钻的端面磨粒在超声刀柄作用下产生轴向振动,由于振动平均速度 $v_v=4Af$, 为 585.2mm/s, 远大于进给速度 v_w (0.25mm/s), 因此,工具端面磨粒与工件孔底间保持规律性的“接触-分离”作用,如图 9 所示。当磨粒与工件接触时,振动的磨粒对孔底表面产生高频的锤击作用,使 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料产生微裂纹,更易于磨粒对材料去除;当磨粒与工件分离

时,切削过程中的轴向力减小,切屑从有序排布磨粒的缝隙中排出内孔,避免因切屑堵塞工具端面磨粒间隙造成的磨粒切削能力下降和过高的切削温度,从而减小端面磨粒的磨损,提高了工具的使用寿命,增加制孔数量。

有序排布钎焊金刚石套料钻侧

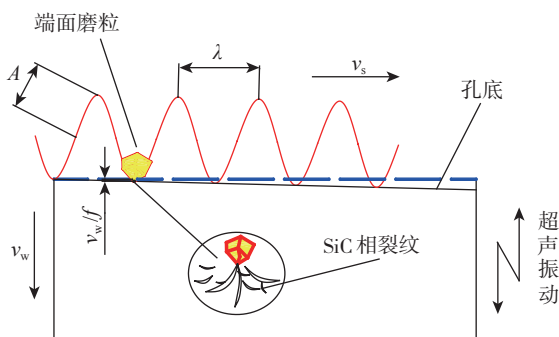


图9 端面磨粒运动轨迹
Fig.9 Trajectory of the end grain

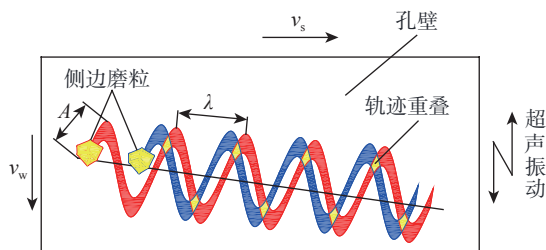


图10 侧边磨粒运动轨迹
Fig.10 Trajectory of the side grain

边的磨粒在振动条件下与工件内孔壁处于连续磨削状态,如图 10 所示。磨粒的振动虽然增大了其磨削长度,但相邻磨粒运动轨迹的交错重叠使切屑被截短,降低了磨粒的切厚,在一定程度上减小了磨粒与工件孔壁间的摩擦,减小加工过程中的扭矩与侧边磨粒的磨损,提高了孔的表面质量与尺寸精度 λ 。

结论

(1) 采用有序排布钎焊金刚石套料钻的超声振动辅助钻削方法可有效减小金刚石工具在干式钻削加工过程中的刀具磨损,刀具的有效累计钻削长度可达 360mm。

(2) 有序磨粒排布参数是影响孔加工尺寸精度及刀具使用寿命的重要因素,工具侧边磨粒排布越长,列数越多,加工孔的孔径变化越小;工具端面磨粒越多,工具使用寿命越长。相比于长度 3mm/8 列套料钻,长度 7mm/13 列套料钻加工寿命可提高 50%,在加工稳定区,平均孔径偏差小于 11 μm 。

(3) 加工工具失效后,有序排布

钎焊金刚石套料钻端面磨粒的磨损特征以宏观破损和脱落为主;侧边磨粒的磨损特征与磨粒和套料钻端面的距离有关。当距离为 0.5mm 时,磨粒磨损特征以宏观破碎为主;当距离为 3mm 时,磨粒磨损特征以磨耗平台为主,同时伴有微破碎;当距离为 6.5mm 时,磨粒几乎无磨损。

参考文献

- [1] MADAR R. Materials science: silicon carbide in contention[J]. Nature, 2004, 430(7003): 974-975.
- [2] NASLAIN R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(2): 155-170.
- [3] KRENKEL W. Handbook of ceramic composites[M]. New York: Springer-verlag, 2005.
- [4] FUJIHARAK, OHSHIBAK, KOMATSU T, et al. Precision surface grinding characteristics of ceramic matrix composites and structural ceramics with electrolytic in-process dressing[J]. Machining Science and Technology, 1997, 1(1): 81-94.
- [5] 丁凯,傅玉灿,苏宏华,等. C/SiC 复合材料组织对磨削力与加工表面质量的影响[J]. 中国机械工程, 2013, 24(14): 1886-1890.
- DING Kai, FU Yucan, SU Honghua, et al. Effect of C/SiC composites material structure on grinding forces and machined surface quality[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(14): 1886-1890.
- [6] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Experimental studies on drilling tool load and machining quality of C/SiC composites in rotary ultrasonic machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 2900-2907.
- [7] FENG P F, WANG J J, ZHANG J F, et al. Drilling induced tearing defects in rotary ultrasonic machining of C/SiC composites[J]. Ceramics International, 2017, 43(1): 791-799.
- [8] DING K, FU Y C, SU H H, et al. Study on surface/subsurface breakage in ultrasonic assisted grinding of C/SiC composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9): 1-11.
- [9] AZARHOUSHANG B, TAWAKOLI T. Development of a novel ultrasonic unit for grinding of ceramic matrix composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9): 945-955.
- [10] 黄辉,张国青,徐西鹏. 钎焊金刚石磨粒磨损性能研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 313-317.
- HUANG Hui, ZHANG Guoqing, XU Xipeng. Study on the wear of brazed diamond grits[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2005, 33(3): 313-317.
- [11] 徐九华,牟娟,陈燕,等. 钎焊金刚石套料钻 CFRP 制孔研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(5): 747-753.
- XU Jiuhua, MU Juan, CHEN Yan, et al. Analysis on CFRP hole making with brazed diamond core drill[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(5): 747-753.
- [12] 贺虎,苏宏华,陈燕,等. 钎焊金刚石套料钻钻削 CFRP 的孔质量研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(2): 13-16.
- HE Hu, SU Honghua, CHEN Yan, et al. Researches of hole quality during drilling of CFRP with brazed diamond core drill[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(2): 13-16.

通讯作者: 苏宏华, 博士、教授、博导, 主要研究方向为切/磨削工具技术、难加工材料高效切/磨削工艺技术, E-mail: shh@nuaa.edu.cn。

Experimental Study on Ultrasonic Vibration Assisted Dry Drilling for SiC_f/SiC Ceramic Matrix Composites

CHEN Yurong, SU Honghua, FU Yucan, HE Jingyuan, ZHANG Wei

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

[ABSTRACT] For the problem of the fast tool wear and low processing efficiency for SiC_f/SiC ceramic matrix composites with dry drilling, an ultrasonic vibration assisted dry drilling processing method with the brazed drill of defined grain distribution is proposed. The brazed diamond drill with different defined grain distribution parameters is used to drill the SiC_f/SiC ceramic matrix composite with the ultrasonic vibration. By the measurement of the machining holes, the influence law of the defined grain distribution parameters on the tool life and the size of the hole accuracy are studied, and the abrasive wear characteristics at different positions of the tool are analyzed. The results show that the longer service life with the more grins in the tool end surface. The longer and the more number of columns abrasive grain layout of the tool side, the smaller changes for the pore size of the holes. The nearer the abrasive distance to the end of the tool, the more serious the abrasive wear is, and the main wear is the wear platform and the macro breakage. The farther the abrasive distance to the end of the tool, the less wear of the abrasive is.

Keywords: Ultrasonic vibration; Brazed diamond casing drill; Ceramic matrix composites; Dry drilling; Abrasive wear

(责编 大漠)