

Research on the Cutting Process Characteristics of Quartz Crucible Based on Pressure- Position/Velocity Feedback

Jian Jing Lianzhong Li Jiongjie Guan Chao Chen*

Zhejiang Meijing New Materials Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang, 312000, China

Abstract

Quartz crucible is a key container for drawing semiconductor single crystal silicon, with main size specifications ranging from 16 to 37 inches. After the quartz crucible is made, diamond cutting blades need to be used for end face cutting and chamfering to obtain the target height and port morphology dimensions. Due to the use of high-temperature arc method for crucible melting and forming, the accuracy of crucible contour dimensions fluctuates within $\pm 3\text{mm}$, resulting in problems such as premature edge breakage, micro cracks at the ends, rework and grinding during the cutting process, which affects product quality and production qualification rate. This article proposes a method of using cutting pressure-position and velocity feedback compensation control to address existing problems. By collecting cutting pressure in real time, denoising, and dynamically compensating for position and velocity adjustment, the method ensures the uniformity of cutting depth in the circumferential direction of the crucible, reduces the probability of premature edge breakage, and improves the quality of the crucible. Through simulation and experimental research, compared with conventional cutting and chamfering methods, the new process algorithm can effectively improve the problems of cutting edge breakage and chamfering defects, reduce the proportion of premature breakage by 10%, significantly improve the cutting yield, and reduce the rework rate.

Keywords

Quartz crucible; Cutting chamfers; Production yield rate; Pressure feedback

基于压力 - 位置 / 速度反馈的石英坩埚切割工艺特性研究

景健 李连仲 管炯杰 陈超*

浙江美晶新材料股份有限公司, 中国·浙江 绍兴 312000

摘要

石英坩埚是制造半导体单晶硅的关键容器, 尺寸规格分布在16到37英寸。目前石英坩埚制成后需要使用金刚石切割片进行端面切割和倒棱作业, 获取目标高度和规定的端口形貌尺寸。因石英坩埚熔制成型一般采用高温电弧法, 坩埚轮廓尺寸在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内波动, 导致金刚石砂轮切割设备在切割过程中存在边料提前崩断、端口微裂纹、返工修磨等问题, 影响产品质量及生产合格率。针对此问题, 提出采用切割压力-位置/速度反馈补偿控制的方法, 通过实时采集切割压力, 去噪后与理论计算压力进行反馈对比, 并通过对位置/速度的动态补偿调节, 实现坩埚圆周方向切割深度的均匀性, 减小切割过程中的压力波动, 降低边料提前崩断概率, 提高坩埚品质。通过理论分析和试验研究, 与常规切割倒角方式比, 新的工艺算法可以有效改善切割崩边问题, 切割过程中的压力波动减小30%, 提前崩断比例降低10%, 切割良率显著提升。

关键词

石英坩埚; 切割倒棱; 切割良率; 压力反馈

1 引言

石英坩埚主要用于半导体大硅片的单晶生长, 是拉制超高纯单晶硅、发展先进制程(7nm及以下)集成电路必不可少

的基础材料, 是国家战略级必备易耗品。为保障石英坩埚的产品尺寸一致性, 目前石英坩埚的生产制造技术正在朝着全自动智能化方向发展。如何加工出高尺寸一致性、低外观缺陷的石英坩埚正成为国内坩埚制造企业和研究院所的热点研究问题。

【基金项目】国家科技重大专项“超高纯天然石英砂关键技术工程化开发”(项目编号:2024ZD0605400)。

【作者简介】景健(1989—)男, 硕士, 工程师, 从事机械电子控制技术研究。

【通讯作者】陈超(1986—), 男, 博士, 副高级工程师, 从事石英、无机非金属材料研究。

石英作为玻璃材料的一种, 切割加工方式主要有金刚石砂轮切割、水射流切割和激光切割。其中水射流切割无热影响, 适合切割厚度超过100mm的石英材料, 但存在切口粗糙问题^[1]。激光切割无机械应力, 端口平整, 可切割复杂形状薄板材料, 但存在热影响区域, 且对于透明材料需要特殊波长激光, 成本高。曾凡严^[2]等研究了飞秒激光脉冲能

量、扫描速度等参数对复杂石英部件微槽加工质量的影响。金越越^[3]等研发了一套激光旋转切割石英管设备，实现了石英管的无损伤切割。金刚石砂轮切割使用金刚石颗粒作为磨料，切割精度高，适合大尺寸加工，但锯片磨损快，边缘易产生微裂纹。吴翔^[4]研究了刀轮角度、切割压力和切割速度对玻璃裂纹及断面质量的影响，提出了“中位裂度切割法”，验证了该方法的正确性和可靠性。李海泉^[5]对玻璃切割工艺进行了研究，给出了切割压力、切割深度、切割速度等工艺参数的设置方法。周波^[6]通过对比三种刀轮切割玻璃的品质差异，提出了刀轮压力精密调整以及断痕分布进行的措施。于百灵^[4]等通过提高机构的稳定性及关键零部件的加工精度改善了不良因素对切割玻璃基板品质的影响。

因石英坩埚由透明层和非透明层组成，厚度达到 15mm 以上，难以采用激光切透，目前国内外企业以金刚石砂轮切割为主，但存在切割过程中坩埚边料提前断裂，影响端口形状尺寸的问题且石英坩埚作为薄壁圆桶结构，其切割难度远高于玻璃基板的切割难度。本文针对石英坩埚物理切割加工过程中存在的崩边问题，通过分析切割压力、进给速度、切割转速对崩边的影响，提出了基于压力反馈-位置/速度补偿的优化算法，并通过仿真计算和试验验证，证明了算法的正确性和可靠性，试验结果显示崩边率降低 10% 以上。

2 石英坩埚切割加工原理

包含有压力传感器的石英坩埚切割倒棱原理如图 1 所示。

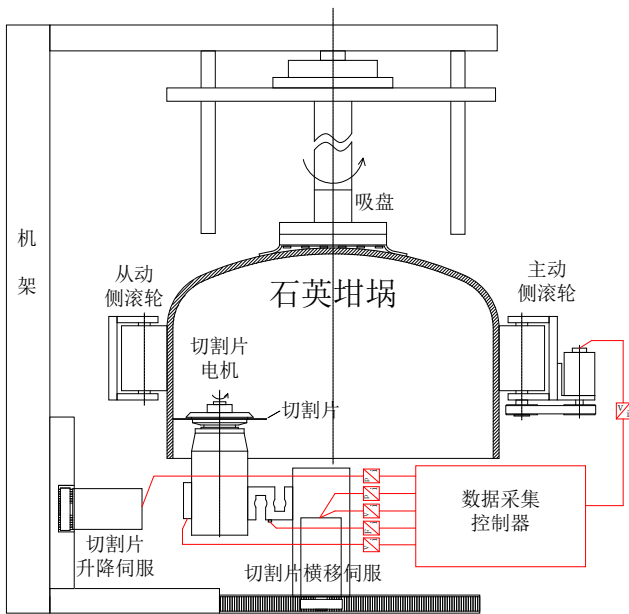


图 1 石英坩埚切割加工原理图

石英坩埚由顶部可旋转吸盘吸附，并通过 4 个侧向包胶滚轮夹持，其中相邻两组由伺服电机驱动伸缩，且其中一只滚轮通过伺服电机驱动用以控制坩埚旋转。另外两组滚轮由气缸控制伸缩，通过气缸的柔性缓冲坩埚直径方向的波

动。切割片由变频电机进行转速控制，可根据坩埚材质特性调整切割转速。切割片旋转电机通过一组压力传感器与移动底座固定在一起，当切割片接触到坩埚后，压力传感器可实时反馈水平切割压力。切割片的移动由横移和升降两组伺服电机进行独立控制，切割片升降伺服主要用于调整切割的位置，以获取目标高度；横移伺服主要用于控制切割片进给速度，以防止压力过大损坏坩埚。

3 压力闭环切割特性研究

为研究图 1 所示石英坩埚切割设备的加工特性，以直径 D 为 24 英寸，直壁厚度 T 为 12mm 的石英坩埚为对象，首先在无切割片切割压力控制条件下，分析切割片进给速度、坩埚转速、切割片转速对坩埚端口断面的影响。试验过程中，首先用吸盘吸住坩埚底部，并通过调整吸盘上下位置确定切割位置，然后用归正滚轮夹紧坩埚，并驱动主动侧滚轮，使坩埚旋转纠正。坩埚被纠正后顶部吸盘破真空脱离坩埚并重新吸取坩埚，保障吸盘回转中心与坩埚回转中心同轴。最后依次启动主动侧滚轮电机、切割片电机，使坩埚按照规定转速旋转，最后移动切割片横移伺服进行切割验证，通过切割压力曲线的变化直接反映出切割断面的断裂大小，如图 2 所示。切割完成后，重新调整切割位置，进行再次切割验证。

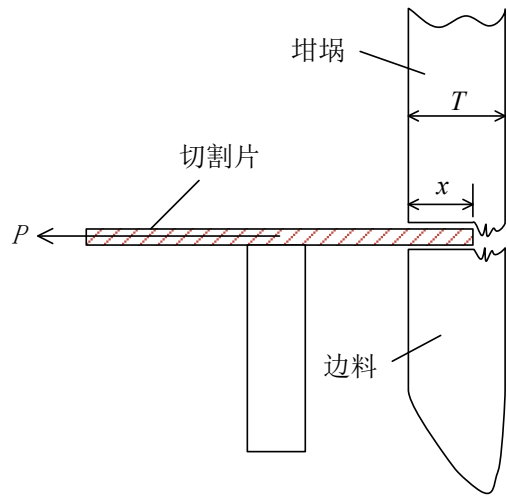


图 2 切割压力分析示意图

3.1 切割片进给速度对端口断面影响

在给定切割片和坩埚旋转速度分别为 2800r/min、25r/min 条件下，测试横移伺服不同移动速度下的切割压力曲线，结果如图 3 中曲线所示。从图 3 中试验曲线可以看出，当切割横移速度增大到 0.09mm/s 时，边料在 8.2mm 处发生断裂，进一步增大速度，断裂位置基本不变；当切割横移速度减小到 0.04mm/s 时，边料在 10.5mm 位置处发生断裂，进一步减小横移速度，断裂位置基本不变。因此，为保障加工效率，应该将切割横移速度控制在 0.04mm/s 附近，此时可以获取较好的切割断面，断裂部分可通过倒角消除。

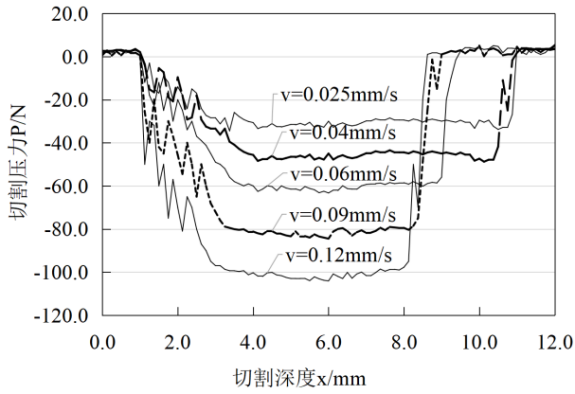


图3 不同横移速度下位移-压力曲线

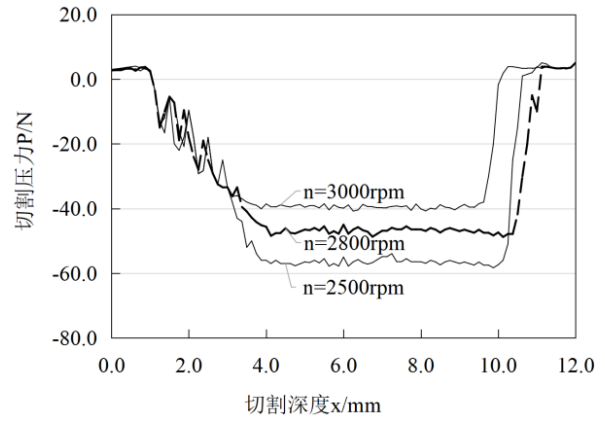


图5 不同切割片转速下位移-压力曲线

3.2 坩埚旋转速度对坩埚端口断面影响

图4是在切割进给速度0.04mm/s,切割片旋转速度2800r/min状态下,不同坩埚转速下的切割压力曲线。从图4曲线可看出,坩埚转速减小到20r/min时,切割压力最大,但坩埚边料在切割深度10mm左右断裂;当坩埚转速增大到35r/min时,切割压力最小,但坩埚边料在9mm左右发生断裂,根据实际分析,坩埚快速旋转条件下,边料提前断裂的原因主要在于坩埚旋转与机台发生共振,导致边料在切入过程中震动提前断裂。因此,根据试验结果,最优坩埚转速需要控制在20-25r/min,加工不同尺寸规格坩埚时均需在此范围内。

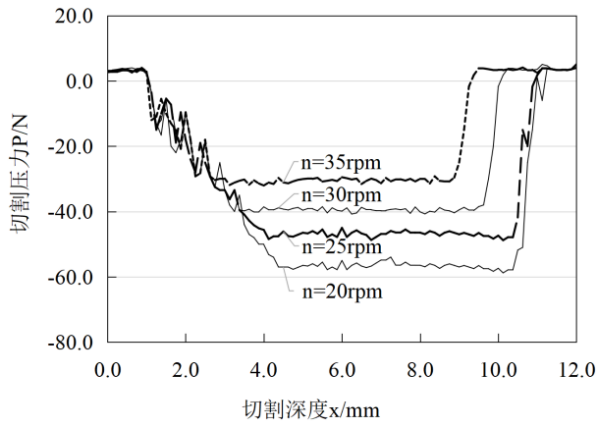


图4 不同坩埚转速下位移-压力曲线

3.3 切刀转速对崩边影响

图5是切割进给速度0.04mm/s,坩埚旋转速度25r/min状态下,不同切割片旋转速度下的对应切割压力曲线。从曲线中可以看出,当切割片转速为2800r/min时,坩埚边料在10mm左右位置发生断裂,当切割片转速高于或低于该值时,均会发生提前断裂,尤其是转速过高时,断裂位置会进一步提前。这是因为切割片转速低,磨粒切削刃不够锋利,导致切割片表面容易形成积屑瘤,从而引起提前断裂;速度过高,且砂轮表面磨粒的切削刃过于粗大,导致切割时容易产生较大的切削力和振动,从而造成提前断裂。

4 压力闭环切割特性研究

在开环试验基础上,基本获得了最优的加工参数范围,如表1所示。但在下表基础上,因还涉及不同规格坩埚,不同壁厚尺寸,导致无法用一个参数适配不同类型的坩埚切割以达到1.5mm崩断宽度,因此提出采用压力反馈的方式进行改善。通过接入压力传感器信号进行反馈调节,实现断裂面的宽度控制。

表1 参数范围表

参数名称	横移速度	坩埚转速	切割片转速
单位	mm/s	r/min	r/min
范围	0.025-0.04	20-25	2600-2800

4.1 压力反馈-速度调节数学模型

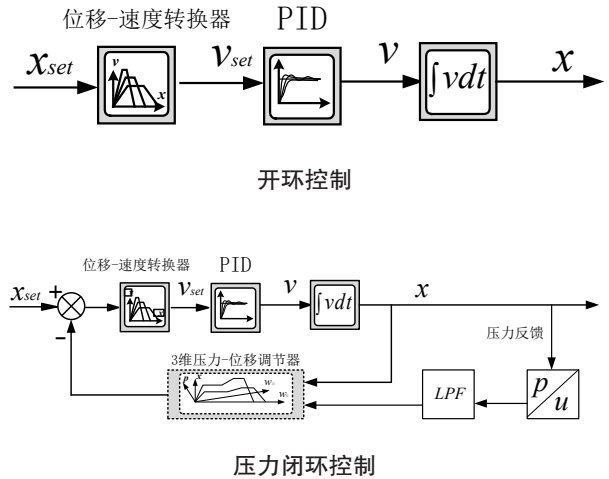


图6 控制函数

压力反馈开环和闭环控制函数如图6所示,但因切割压力与切割片转速、坩埚旋转速度及切割片横移速度呈现非线性耦合关系,无法直接采用公式表达,为实操可行,采用简化分离参数拟合方法进行函数逆向求解。令

$$p = f(x) \cdot f(v) \quad \text{式 1}$$

其中 $f(x)$ 是切割压力与切割片横移位移的函数，根据实际测量结果分析，其曲线可以通过 3 段曲线表达，具体如式 2 所示； $f(v)$ 是切割压力与切割片横移速度的函数，其曲线近似于一次函数，具体如公式 3 所示。

$$f(x) = \begin{cases} a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1 & (0 \leq x < 2) \\ b_2x^2 + c_2x + d_2 & \dots\dots(2 \leq x < 6) \\ d_3 & (x \geq 6) \end{cases} \quad \text{式 2}$$

$$f(v) = mv + n \dots\dots(0.02 \leq v \leq 0.12) \quad \text{式 3}$$

通过数据拟合计算，得到各项系数如下，

表 2 参数项表格

参数项	参数值
a_1	-25.89
b_1	117.84
c_1	-163.28
d_1	73.42
b_2	-1.62
c_2	-1.45
d_2	-11.27
d_3	-59.31
m	-748
n	-15

通过反向演算，拟合曲线与实测点的标准差在 50 以下，符合 3 维度压力 - 位移调节器控制要求。

4.2 试验验证

试验设备如如 7 所示。



图 7 试验机台切割坩埚图片

在试验过程中，首先将切割片移动速度和位移反馈至调节器，根据调节器内的模型函数，计算出理论压力值，然后将理论计算压力值与实际测量压力值做反馈比较，计算补偿控制切割片电机的横移速度，从而实现切割压力的精确控制。试验结果如图 8 所示。

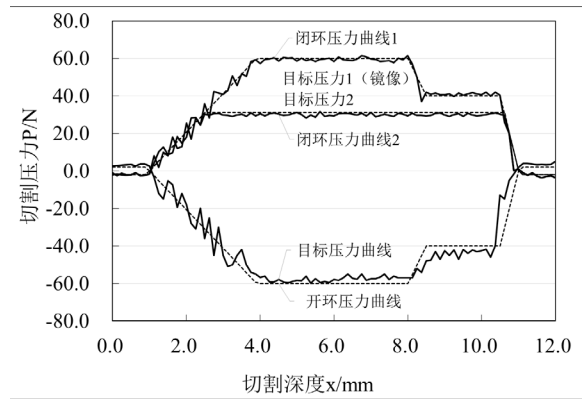


图 8 闭环压力 - 位移曲线

根据试验结果可以看出，开环控制条件下，切割压力波动大，边料存在提前断裂风险；闭环控制条件下，压力波动小，断裂基本在 10.5mm 位置处。且通过闭环曲线 1 和 2 对比，能够看出，在边料断裂前变化切割速度，精确控制切割压力，不会导致提前断裂，因此可以在切割过程中变化切割进给速度，以提高加工效率。

5 结语

(1) 坩埚切割过程中，切割片转速、坩埚转速及切割进给速度对坩埚端口断面有影响，其中切割片转速在 2800r/min，坩埚转速在 25r/min 时切割效果较好；而随着切割进给速度的不断加快，断裂会提前，影响端口形貌。

(2) 通过与开环控制坩埚切割过程对比，闭环控制能够有效改善切割压力波动，压力波动幅度减小 30% 以上，有效降低了坩埚提前断裂风险，对比开环控制，断裂比例减少 10% 以上，显著提高了坩埚加工品质。

参考文献

[1] 王军,景延延,杜鑫豪,等.磨料水射流加工技术研究现状及展望[J].机械工程学报,2025,61(09):46-77.
Wang Jun, Jing Yanyan, Duxinhao. Abrasive Waterjet Machining — State of the Art and Future Perspectives[J]. Journal of Mechanical Engineering,2025,61(09):46-77.

[2] 曾凡严,周广福,王攸,等.飞秒激光切割复杂形状石英器件的试验研究[J].激光与光电子学进展, 2023, 60(07): 183-187.
Zeng Fanyan, Zhou Guangfu, Wang You. Experimental Study on Femtosecond Laser Cutting Quartz Devices with Complex Shapes[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2023, 60(07): 183-187.

[3] 金越越,梁进智,罗光华,等.激光旋转切割石英管设备研制及其工艺研究[J].激光与红外,2022,52(04):503-507.
Jin yueyue, Liang jinzhi, Luo Guanghua. Development and process research of laser rotary cutting quartz tube equipment[J]. Laser&Infrared. 2022, 52(04): 503-507.

[4] 吴翔,雷春江等.影响玻璃切割断面质量的因素及表征性能[J].玻璃,2022,49(05):1-10+19.

- Wu Xiang,Lei Chunjiang,edc. Scoring Angle, Pressure, Speed Effect of Glass Median Crack and Breakout Quality and Improved Scoring Method Based on Median Crack Analysis[J].Glass, 2022,49(05):1-10+19.
- [5] 李海泉,王涛等. TFT-LCD玻璃的对刀切割工艺及关键技术[J]. 电子工艺技术, 2021, 42(06): 357-359+365.
- Li Haiquan,Wang Tao,edc. Key Technology of Aligning Cutting Process for TFT-LCD Glass[J]. Electronics Process Technology, 2021,42(06):357-359+365.
- [6] 周波.液晶基板玻璃切割工艺分析及优化措施[J].价值工程, 2015, 34(18): 91-92.
- Zhou Bo. Analysis and Optimization Measures of LCD Substrate Glass Cutting Process[J]. Value Engineering, 2015, 34(18): 91-92.
- [7] 于百灵,段跃伟等. 液晶玻璃基板智能切割生产线的切割工艺研究[J].机械管理开发, 2024, 39(06): 16-18+21.
- Yu Bailing,Duan Yuewei,edc.Research on Cutting Process of Intelligent Cutting Production Line for Liquid Crystal Glass Substrate[J]. Mechanical Management and Development, 2024,39(06):16-18+21.
- [8] 张文武. 基于遗传算法优化的数控切割机伺服系统控制研究[J].机床与液压, 2012, 44(11): 26-29.
- Zhang Wenwu. Research on the Servo System Control of CNC Cutting Machine Based on Genetic Algorithm. Machine Tool & Hydraulics. 2012,44(11):26-29.
- [9] 穆星宇. GQ-60型石英坩埚切边倒棱机结构设计[J].辽宁工业大学学报(自然科学版), 2016, 36(02): 131-133.
- Mu Xingyu. Design and Application Of GQ-60 Type Silica Crucible Trimming and Chamfering Machine[J]. Journal of Liaoning University of Technology(Natural Science Edition), 2016,36(02):131-133.
- [10] 何魁魁,戴玉堂,严超凡.超声气体射流辅助飞秒激光刻蚀石英微槽工艺研究[J].光子学报,2022,51(11):150-160.
- HE Kuikui, DAI Yutang, YAN Chaofan. Ultrasonic Gas Jet Assisted Femtosecond Laser Etching of Quartz Microgrooves [J] . Acta Photonica Sinica, 2022, 51 (11) : 150-160.
- [11] Xiong L ,An Y ,Zhang L , et al. Highly Efficient Cutting of Quartz Glass with Low Roughness and Minor Chipping Using Bessel Laser Beams[J]. Photonics, 2025, 12(2): 162-162.
- [12] Non-destructive integration of spark-discharge produced gold nanoparticles onto laser-scribed graphene electrodes for advanced electrochemical sensing applications.
- [13] 李倩靓,刘鸣,刘可欣,等.基于狭缝整形的高重频皮秒激光玻璃斜角切割[J].应用激光, 2024, 44(09): 75-86.
- Li Qianliang, Liu Ming, Liu Kexin. Silt Beam Shapingfor Glass Bevel Cutting with A High-Frequency Picosecond Laser[J]. Applied Laser, 2024, 44(09): 75-86.
- [14] 王红星,马若飞等. 石英坩埚打磨用金刚石端面铣轮的加工性能研究[J].超硬材料工程, 2014, 26(06): 27-31.
- Wang Hongxing, Ma ruofei, et al. Study of the Processing Performance of Diamond End Milling Wheel Used for Quartz Crucible Grinding[J]. Superhard Material engineering. 2014,26(06):27-31.
- [15] 周岩,刘晓胜,杨乐民. 熔融石英激光切割表面形貌的研究[J]. 激光杂志,2003,24(3):70-72.
- Zhou Yan,Liu xiaosheng,Yang Lemin. Study on the surface appearance of laser beam cutting fused quartz crystals[J]. Laser Journal, 2003,24(3):70-72.
- [16] 郎小虎,张玮琪,孙彬,等.砂轮划片机在砷化镓材料切割中的应用研究[J].电子工业专用设备,2014, 43(04): 12-14+53.
- Lang Xiaohu, Zhang weiqi,Sun bin,etal. Dicing Saw Machine in the Application of the GaAsMaterial Cutting[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing. 2014, 43(04): 12-14+53.
- [17] 戴向国,傅水根,王先逵,等.金刚石砂轮切割工程陶瓷时工艺参数对砂轮寿命的影响[J].工具技术,2000,(09):6-7.
- Dai xiangguo, Fu shuiyin,Wang xiankui, et al. Influences of Process Parameters on Grinding Wheel Lifespan during Cutting-off Engineering Ceramics by Diamond Grinding Wheel[J].Tool Engineering, 2000,(09):6-7.