Hans汉斯

单磨粒划擦蓝宝石表面残余应力仿真

刘忠祥

上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2025年1月25日; 录用日期: 2025年2月18日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

本文以蓝宝石材料作为研究对象,使用有限元分析软件ABAQUS进行单颗磨粒划擦蓝宝石仿真,通过不同磨粒形状、磨粒直径、切入深度以及切入速度的正交试验,并以加工表面的最大残余应力以及残余应 力均值作为评价指标,通过极差分析得出磨粒形状对于表面残余应力的影响最大,切入深度次之,切入 速度影响最小,进而得出最佳参数组合为磨粒形状为三棱锥形、磨粒直径为1 µm、切入深度为0.2 µm、 切入速度为30 m/s。

关键词

蓝宝石,残余应力,ABAQUS,单颗磨粒

Simulation of Residual Stress on Sapphire Surface Induced by Single Abrasive Grain Scratching

Zhongxiang Liu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 25th, 2025; accepted: Feb. 18th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

This study focuses on sapphire as the research material and uses the finite element analysis software ABAQUS to simulate the scratching of sapphire by a single abrasive grain. Orthogonal experiments were conducted varying abrasive grain shape, diameter, penetration depth, and speed, with maximum residual stress and average residual stress on the processed surface as evaluation criteria. Range analysis showed that abrasive grain shape has the greatest impact on surface residual stress, followed by penetration depth, while penetration speed has the least effect. The optimal parameter combination is determined by triangular pyramidal grain shape, 1 μm diameter, 0.2 μm penetration depth, and 30 m/s penetration speed.

Keywords

Sapphire, Residual Stress, ABAQUS, Single Abrasive Grain

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

蓝宝石(Al₂O₃)是一种具有优异物理和化学性质的单晶材料,因其高硬度、热稳定性以及优良的光学 透明性而广泛应用于电子、光学和航空航天等领域[1]。作为一种重要的功能材料,蓝宝石不仅被用于制 造单晶衬底,还有助于开发高性能的光电器件及高温传感器等[2]。随着科技的不断进步,蓝宝石的应用 领域也在不断扩大,特别是在高功率激光器和高频电子器件中,其市场需求日益增加[3]。然而,蓝宝石 的加工过程仍面临许多挑战,尤其是在磨削加工方面。由于蓝宝石的高硬度和脆性,传统的加工方法难 以实现高效率和高质量的加工效果[4]。近年来,研究者们在蓝宝石的磨削加工技术上取得了一定的进展, 包括磨粒尺寸的优化、磨削参数的调整以及新型磨削工具的开发等[5]。然而,现阶段对磨削过程中材料 去除机制的深入理解仍然不足,导致了加工效率和表面质量的提升受限[6]。为了解决这种加工难点,有 限元仿真被广泛应用于磨削过程的研究[7]。通过有限元分析,研究人员可以模拟磨粒与蓝宝石之间的相 互作用,深入探讨磨削过程中产生的应力场和温度场[8]。这不仅有助于揭示材料去除机理,还能为优化 磨削参数提供重要依据。因此,本文采用正交试验法,利用 Abaqus 软件对单颗磨粒划擦蓝宝石的材料去 除过程进行了仿真模拟,以蓝宝石表面的最大残余应力以及残余应力均值作为评价指标,得出了最佳的 因素水平组合。

2. 仿真实验

2.1. 仿真方案设计

由于磨粒形状的复杂性,本文将复杂几何划分为不同规则几何形状(图 1)分别进行仿真,以探究不同 几何形貌与材料去除之间的关系。因为对蓝宝石材料的去除主要是磨粒的棱边与棱角,因此在不同几何 形状的基础上,进一步地从磨粒直径、切入深度、切入速度等主要因素的不同水平进行仿真分析,并采 用拟水平法,建立正交仿真试验方案,其因素与水平表和正交方案表如表 1 和表 2 所示。其中,圆锥形 与三棱锥形的磨粒直径为外接球的直径。



图 1. 不同几何形状的磨粒

Table 1. Factors 表 1. 因素水平	and levels table 表				
因素	A 磨	唇粒形状	B 磨粒直径(μm)	C 切入深度(µm)	D 切入速度(m/s)
	1	球型	1	0.1	10
	2	圆锥形	2	C 切入深度(µm) 0.1 0.2 0.4 0.6	20
小丁	3	三棱锥形	3	0.4	40
	4		5	0.6	70

Table2. Sapphire single abrasive particle scratch simulation analysis plan 表 2. 蓝宝石单颗磨粒划擦仿真分析方案

仿真编号	A 磨粒形状(μm)	B 磨粒直径(μm)	C 切入深度(µm)	D 切入速度(m/s)
1	球形	1	0.1	10
2	球形	2	0.2	20
3	球形	3	0.4	40
4	球形	5	0.6	70
5	圆锥形	1	0.2	40
6	圆锥形	2	0.1	70
7	圆锥形	3	0.6	10
8	圆锥形	5	0.4	20
9	三棱锥形	1	0.4	70
10	三棱锥形	2	0.6	40
11	三棱锥形	3	0.1	20
12	三棱锥形	5	0.2	10
13	球形	1	0.6	20
14	球形	2	0.4	10
15	球形	3	0.2	70
16	球形	5	0.1	40

2.2. 有限元仿真模型建立

蓝宝石材料作为一种典型的硬脆材料,仿真时应考虑抛光过程中损伤和压缩失效的累积,可选择适合材料大变形和大应变率的 Johnson-Holmquist Ceramics (JH-2)模型[9]。蓝宝石材料的 JH-2 本构模型参数 [10]如表 3 所示。本文所选用的磨粒为金刚石磨粒,其材料属性如表 4 所示。

Table	3. JH-2 constitutive model parameters	of sapphire
表 3.	蓝宝石的 JH-2 本构模型参数	

参数	值	参数	值
ho (kg·m ⁻³)	3980	HEL(GPa)	6.71
G (GPa)	155.5	PHEL (GPa)	3.51
Α	0.93	β	1.0

续表			
В	0.31	D1	0.005
С	0.0	D2	1.0
М	0.60	K1 (GPa)	236.5
Ν	0.60	K2 (GPa)	0.0
$\epsilon^{*0} (s^{-1})$	1.0	K3 (GPa)	0.0
T (MPa)	600	FS	2.0
FSMAX	-		

Table 4. Material properties of diamond abrasive grains 麦 4. 金刚石磨粒材料属性

密度(kg·m ⁻³)	杨氏模量(GPa)	泊松比
3510	1050	0.15

本研究使用 ABAQUS 软件,建立如图 1 所示的蓝宝石材料以及磨粒三维微观有限元模型,对材料进行有限元分析并提取不同加工参数下的最大残余应力以及残余应力均值。仿真中忽略磨粒磨损,定义为解析刚性,工件 *X、Y、Z* 方向的位移被限制,金刚石磨粒以恒定速度 *V* 沿 *Z* 方向划擦移动,磨粒在划擦运动时和工件始终保持接触。

金刚石磨粒大小仅有几微米,模拟单颗磨粒与蓝宝石表面的相互作用势必增大其计算力,因此,为 节约计算时间,被抛光表面假设为光滑表面,且在抛光过程中会发生微小变形。为了模拟蓝宝石在抛光 中单颗磨粒对材料的去除过程,按照仿真方案,建立单颗磨粒划擦蓝宝石仿真模型如图 2 所示,考虑到 磨粒切入蓝宝石的切削深度仅有几微米,加工表面的接触面积较小,故将蓝宝石模型的尺寸设为 10 µm× 10 µm×4 µm。为保证计算结果的准确性以及节省计算时间,对蓝宝石进行分层网格划分,上层是材料去 除层,进行网格细化,下层是裂纹扩展层,网格划分较为稀疏。网格划分时选择八节点线性六面体单元 (C3D8R),减缩积分,沙漏控制,共划分 1,378,000 个网格。同时金刚石磨粒的硬度和强度远远高于蓝宝 石,在材料去除过程中基本不会发生变形,而且研究重点为蓝宝石的去除过程及机理,故在建模时将金 刚石磨粒视为理想刚体,刚体模型在显示动力学的计算上起着极其重要的作用,能够极大的减少刚体部 分的计算时间。



 Figure 2. Simulation model of single abrasive scratching sapphire

 图 2. 单颗磨粒划擦蓝宝石仿真模型

在载荷与边界条件的设置中,采用相对运动方式模拟单颗粒划擦过程,在模型中设置蓝宝石工件底

面完全固定约束,并将X轴负方向作为抛光方向,然后按照仿真方案在此方向上给予磨粒一定的切削速度,并在Y轴设置切削深度,由于仅分析磨粒与蓝宝石工件接触区域形状的影响,忽略磨粒因转动引起的形状变化,故需同时约束磨粒在其他方向的所有自由度,如图3所示。在加工过程中磨粒与蓝宝石工件之间的相互作用影响着蓝宝石材料的行为变化,而接触与摩擦是磨粒与蓝宝石工件之间的主要相互作用,故合理选择接触与摩擦类型对于仿真结果至关重要。在磨粒磨削工件时,磨粒的前、后刀面与工件材料接触产生摩擦,进而对磨削力、温度分布和加工表面质量产生影响,摩擦系数规律遵循库伦摩擦定律[11]。本文在摩擦类型上选用剪切摩擦,并设置磨粒与蓝宝石工件之间的摩擦系数为0.26。单颗磨粒进行划擦蓝宝石时,磨粒从蓝宝石表面进入内部,从而实现材料去除,整个过程均有磨粒与材料的接触。故本章在仿真时将磨粒与蓝宝石工件的接触类型设置为表面与表面接触,其中磨粒为刚体且为主接触表面。



Figure 3. Load and boundary condition settings 图 3. 载荷与边界条件设置

3. 仿真结果与分析

3.1. 实验结果

各模型正交试验仿真结果如图 4 所示,从材料表面最大残余应力来看,仿真 14、13、6 等的最大残余应力值最大,分别为 75.53 MPa、64.67 MPa、53.89 MPa,而仿真 5、2、11 等的最大残余应力值最小,分别为 16.09 MPa、20.09 MPa、24.29 MPa。从平均残余应力来看,仿真 3、4、16 等的平均残余应力值最大,分别为 12.13 MPa、10.78 MPa、10.54 MPa,而仿真 11、12、5 等的平均残余应力值最小,分别为 1.98 MPa、2.07 MPa、2.5 MPa。可见,材料表面残余应力变化范围较大,需进一步综合考虑来判定各因素的影响。



图 4. 各模型正交试验仿真结果

3.2. 极差分析

通过分析各组仿真结果制定表 3~表 5 所示的极差及方差分析表,从表 3 可以看出,各影响因素对蓝 宝石表面残余应力的影响依次为 A > C > B > D,说明磨 粒形状对于表面残余应力的影响最大,切入深 度次之,切入速度影响最小。从表 6 及表 7 可以看出,因素 A、B、C、D 对于最大残余应力的 R²为 0.504, 对于平均残余应力的 R²为 0.930,意味着因素 A、B、C、D 可以解释最大残余应力的 50.36%变化原因, 并通过分析可知:因素 A、B、C、D 共 4 项全部均不会对最大残余应力产生差异关系,而因素 A、B、 C、D 可以解释平均残余应力的 93.03%变化原因。并通过分析可知:因素 A和 C 会对平均残余应力产生 显著性差异关系(p < 0.05),因素 B 和 D 并不会对平均残余应力产生差异关系。

Table	5. Range analysis
表 5.	极差分析表

水平	A 磨粒形状	B磨粒直径	C 切入深度	D 切入速度
1	20.34	18.59	19.56	24.34
2	20.83	25.90	15.68	21.19
3	16.26	22.17	27.7	20.37
4	30.89	21.70	25,29	22.43
Delta	14.63	7.34	12.02	3.98
排序	1	3	2	4

Table	6. Maximum residual stress	variance	analysis	table
表6.	最大残余应力方差分析表			

	平方和	df	均方	F	р
A 磨粒形状	499.001	2	249.501	0.642	0.565
B 磨粒直径(μm)	375.271	3	125.090	0.322	0.810
C 切入深度(µm)	966.796	3	322.265	0.829	0.532
D 切入速度(m/s)	130.429	2	65.215	0.168	0.850
残差	1943.326	5	388.665		
总和	3914.823	15			

注: $R^2 = 0.504$, *p < 0.05, **p < 0.01。

 Table 7. Average residual stress variance analysis table

 表 7. 平均残余应力方差分析表

平方和	df	均方	F	р
76.838	2	38.149	15.639	0.007**
29.757	3	9.919	4.038	0.084
48.713	3	16.238	6.610	0.034*
8.547	2	4.273	1.740	0.267
12.283	5	2.457		
176.138	15			
	76.838 29.757 48.713 8.547 12.283 176.138	76.838 2 29.757 3 48.713 3 8.547 2 12.283 5 176.138 15	1/3/14 dj 1/3/3 76.838 2 38.149 29.757 3 9.919 48.713 3 16.238 8.547 2 4.273 12.283 5 2.457 176.138 15	1 1

注: $R^2 = 0.930$, *p < 0.05, **p < 0.01 $_{\circ}$

3.3. 优化及验证

根据尽量降低表面残余应力原则,从图 5 因素效应曲线图可以看出,各因素水平的最佳组合为 A3B1C2D3,即磨粒形状为三棱锥形、磨粒直径为1μm、切入深度为0.2μm、切入速度为40 m/s 时,能 够得到较小的残余应力。从图 6 可知,各因素水平最佳组合时,表面最大残余应力为8.24 MPa,平均残 余应力为0.82 MPa,与图 4 结果相比,在最优组合下得到的残余应力均为最小值。



Figure 6. Residual stress curve of optimal combination 图 6. 最优组合的残余应力曲线

4. 总结

本文运用 ABAQUS 有限元仿真软件模拟单颗磨粒划擦蓝宝石过程,设计了正交试验,并通过极差分 析得出: 磨粒形状对于表面残余应力的影响最大,切入深度次之,切入速度影响最小。进而得出最佳参 数组合为: 磨粒形状为三棱锥形、磨粒直径为1µm、切入深度为0.2µm、切入速度为30m/s。并通过与 正交试验组的数据对比,验证了此组合的最优性。

参考文献

- [1] Liu, W., *et al.* (2022) Recent Advancements in the Synthesis and Applications of Sapphire Substrates. *Materials Today Advances*, **11**, 100-115.
- [2] Chen, J., et al. (2022) Optical Properties and Applications of Sapphire for High-Performance Electronics. Journal of Electronic Materials, **51**, 2251-2259.
- [3] Zhang, R., et al. (2022) Emerging Trends in Sapphire Applications in Laser Technology. Laser & Photonics Reviews, 16, 188-191.
- [4] Kim, M., et al. (2022) Challenges in the Machining of Single Crystal Sapphire: A Review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **119**, 1234-1249.
- [5] Lee, S., *et al.* (2022) Innovative Grinding Techniques for Sapphire Processing. *Journal of Materials Processing Technology*, **298**, Article 117415.
- [6] Wang, T., et al. (2023) Understanding the Material Removal Mechanisms in Grinding Brittle Materials. Journal of Manufacturing Processes, 77, 123-134.
- [7] Zhao, H.Y., *et al.* (2023) Finite Element Simulation of Grinding Processes: Current Status and Future Directions. *CIRP Annals*, **72**, 53-56.
- [8] Xu, G., *et al.* (2021) Thermal Modeling and Stress Analysis in Grinding of Sapphire Using Finite Element Methods. *Computational Materials Science*, **188**, 1358-1361.
- [9] 张飞虎, 李琛, 孟彬彬, 等. 基于变切深纳米刻划的 K9 玻璃表面成形特征及去除机制研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 65-71.
- [10] Zhang, B., Guo, X., Liu, Y., Lang, L. and Tan, S. (2021) Study of Glass Laminate Configurations on Ballistic Resistance of Novel Lightweight Sapphire Transparent Laminated Structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4, 397-404. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2021.05.002</u>
- [11] 张红哲,朱晓春,鲍永杰. 高体积分数 SiC-p/Al 复合材料超声辅助划切微观去除机理[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 327-335+363.