

文章编号 1004-924X(2016)02-0398-08

KDP 晶体三倍频晶面微观力学行为及加工性能

郭晓光, 刘子源*, 郑桂林, 郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116021)

摘要: 为了揭示磷酸二氢钾(KDP)晶体三倍频晶面微观弹塑性力学行为及加工性能, 开展了纳米压痕研究。建立了 KDP 晶体三倍频晶面各向异性力学模型, 基于光滑粒子流体动力学(SPH)方法对纳米压痕进行了数值仿真并完成了纳米压痕测试实验。实验结果表明: 实验与仿真计算的载荷-压入深度关系曲线的相关系数为 0.996 328, 吻合度较高, 验证了力学模型的正确性, 得出 KDP 晶体三倍频晶面的屈服强度为 240 MPa。数值仿真结果显示: 由于材料的各向异性, 工件内部应力呈不规则圆弧状分布; 载荷大小与等效应力影响深度呈近似线性递增关系; 材料表面等效塑性应变分布形状与压头投影面几何形状相类似, 存在复映效果。当载荷小于 2 mN 时, 各压头的残余应力深度差异性较小(小于 0.2 μm); 随着载荷逐渐增大, 这种差异不断扩大。得到的结果为实现 KDP 晶体三倍频晶面的高效低损伤加工提供了理论支撑。

关键词: 磷酸二氢钾晶体; 三倍频晶面; 纳米压痕; 光滑粒子流体动力学; 数值仿真

中图分类号: O733.1; O786 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0398

Micro-mechanical behavior and machining property for tripler plane of KDP crystal

GUO Xiao-guang, LIU Zi-yuan*, ZHENG Gui-lin, GUO Dong-ming

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116021, China)

* Corresponding author, E-mail: lzy5307827@126.com

Abstract: To reveal the micro elastic-plastic mechanic behavior and the machining property of tripler plane of a potassium dihydrogen phosphate (KDP) crystal, the nano-indentation process was researched. An anisotropic mechanical model for the tripler plane of KDP crystal was established. Then the nano-indentation numerical simulation based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method was performed and the nano-indentation experiments were accomplished. The results indicate that the correlation coefficient between the experimental load-indentation depth curve and the simulation one is 0.996328, showing a higher goodness of fit and verifying the correctness of the mechanical model. Moreover, the yield strength of tripler plane of the KDP crystal is 240 MPa. Because of the anisotropy property of the material, the stress inside the workpiece is irregular arc shape distribution, and the relationship between the magnitude of load and the influence depth of equivalent stress is an approximate linear increasing. The distribution shape of equivalent plastic strain on the material surface is similar

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-08-18.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 51135002); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目 (No. 51321004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. DUT15LAB03)

to the geometrical shape of the indenter projective plane, which verifies that the reflection effect exists. When the load is lower than 2 mN, the differences of the residual stress's depths among the indenters are less than 0.2 μm . As the load increases gradually, the differences are widening. The research results provide theoretical supports for machining the tripler planes of KDP crystals in high efficiency and low damage.

Key words: potassium dihydrogen phosphate (KDP) crystal; tripler plane; nano-indentation; Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH); numerical simulation

1 引言

磷酸二氢钾晶体 (Potassium Dihydrogen Phosphate, KDP) 是一种性能优异的非线性光学晶体, 广泛应用于能源、国防、航空航天、基础核物理研究等国家核心战略领域^[1-4]。特别的, KDP 晶体是我国光学领域世纪之交最宏伟工程—神光-III 惯性约束核聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 装置中不可或缺的重要光学元件^[5-7]。然而, KDP 晶体由于具有软脆、易潮解、对温度变化敏感、易开裂等特性, 已成为典型的难加工材料。KDP 晶体加工成品率低下是制约神光-III 装置输出能量水平的关键技术瓶颈之一^[8-11]。

深入研究超精密加工中的材料纳米力学行为及损伤的产生机制是实现 KDP 晶体高效低损伤加工的必要理论保障^[12]。作为获得 KDP 晶体微观力学响应特性的最主要方式, 纳米压痕测试技术得到了国内外学者的广泛关注。Fang 等^[13]通过努氏压痕测试研究了 KDP 晶体 (001) 晶面材料的各向异性行为, 得到该晶面纳米硬度变化范围为 1.3~1.9 GPa。Kucheyev 等^[14]在基于球形压头的 KDP 晶体 (100) 晶面纳米压痕实验中发现了 pop-in 现象, 并通过塑性滑移理论给出了解释。鲁春鹏等^[15]开展了 KDP 晶体各功能晶面的纳米压痕研究, 结合 MPSR 模型和应变梯度理论对压痕尺寸效应进行了深入分析, 得出 KDP 晶体纳米压痕尺寸效应是一种载荷和压痕深度的非线性比例阻尼现象。郭晓光等^[16]针对 KDP 晶体二倍频晶面纳米压痕测试卸载过程中存在的黏附效应进行了深入分析。近年来随着数值仿真手段的日渐成熟, 纳米压痕仿真应运而生。该方法为揭示材料微观力学行为提供了一种新的分析角度。对于不能通过实验获得的信息, 纳米压痕仿真手段具有更强的实用性。王洪祥等^[17]基于各

向同性假设建立了 KDP 晶体 (001) 晶面纳米压痕仿真二维有限元模型, 得到了加载及卸载过程中等效应力的变化规律。陈维锋^[18]建立了 KDP 晶体二倍频晶面的三维有限元压痕形成模型, 分析了压痕形成过程中的应力集中效应, 得出该晶面的屈服极限为 350 MPa。

为了避免有限元仿真中的网格畸变问题, 本文引进了一种无网格数值仿真方法—光滑粒子流体动力学 (Smooth Particle Hydrodynamics, SPH), 建立了 KDP 晶体三倍频晶面纳米压痕仿真模型。通过进行 SPH 仿真作业, 研究了 KDP 晶体微观弹塑性力学响应特性, 分析了材料潜在裂纹的成因及扩展趋势; 并开展了 KDP 晶体三倍频晶面的纳米压痕实验, 以验证仿真建模的正确性。

2 SPH 仿真模型的建立

2.1 SPH 方法原理

由 Lucy 等人在 20 世纪 70 年代提出的拉格朗日形式的粒子法—SPH 方法是众多无网格数值仿真方法中较早发展起来的一种^[19]。随着近年来数值仿真实论的快速发展, 该方法的应用领域由最早的三维开放空间天体物理学问题扩展至连续固体力学问题^[20]。传统有限元方法在处理局部变形量大的问题时常因网格过度畸变而导致数值计算不收敛, 甚至中断; 而 SPH 方法由于具有自适应性, 即 SPH 公式构造不受粒子分布随意性的影响, 使得其可以很好地处理此类问题^[21]。

SPH 算法将一个进化的插值方案用于近似一个给定区域内任何粒子的场变量。在粒子 i 处函数的粒子近似式可以写为:

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij}, \quad (1)$$

其中:

$$W_{ij} = W(x_i - x_j, h), \quad (2)$$

式中： ρ_j 为粒子 j 的密度 ($j=1, 2, \dots, N$)， N 为在粒子 j 支持域内的粒子总量， m_j 为粒子 j 的质量， h 为光滑长度， W 是核函数 (如图 1 所示)，它依靠辅助函数 θ 定义：

$$W(x, h) = \frac{1}{h(x)^d} \theta(x), \quad (3)$$

式中 d 是空间维数。

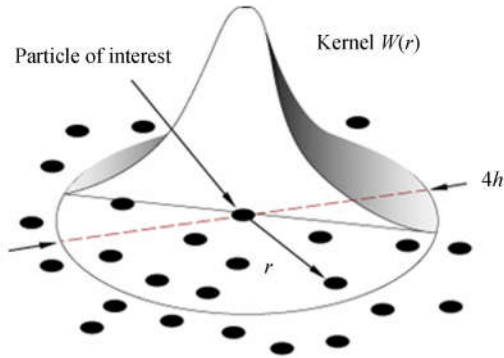


图 1 核函数

Fig. 1 Kernel function

本研究中所使用的 SPH 插值多项式 (光滑核) 为三次样条, 其表达式为:

$$\theta(m) = K \times \begin{cases} 1 - 1.5m^2 + 0.75m^3 & |m| \leq 1 \\ 0.25(2 - m^3) & 1 < |m| \leq 2, \\ 0 & |m| > 2 \end{cases} \quad (4)$$

其中 K 为归一化常数, 由空间维数确定^[22]。

式(1)说明被关注的粒子 i 处的任一函数值均可以通过光滑函数对其紧支域内所有粒子相对应的函数值进行加权平均近似获得。

2.2 纳米压痕 SPH 建模

KDP 晶体纳米压痕模型由压头及工件组成, 整个 SPH 建模过程在 ABAQUS 软件中实现。仿真中用到 4 种形状的压头, 分别为: 玻氏压头、维氏压头、圆锥压头、球形压头。各压头对应的形状尺寸参数如图 2 所示。由于金刚石压头的硬度远高于 KDP 晶体, 为提高数值计算效率, 设定其为理想刚性体。

KDP 晶体 SPH 粒子工件采用矩形几何建模方式, 长宽高分别分 15、15、6 μm , 它们对应的粒子数量分别为 150 个、150 个、60 个。材料性能方面, KDP 晶体的质量密度为 2.338 g/cm^3 , 理想外形如图 3 所示。KDP 晶体晶胞参数 $a=b=0.745$

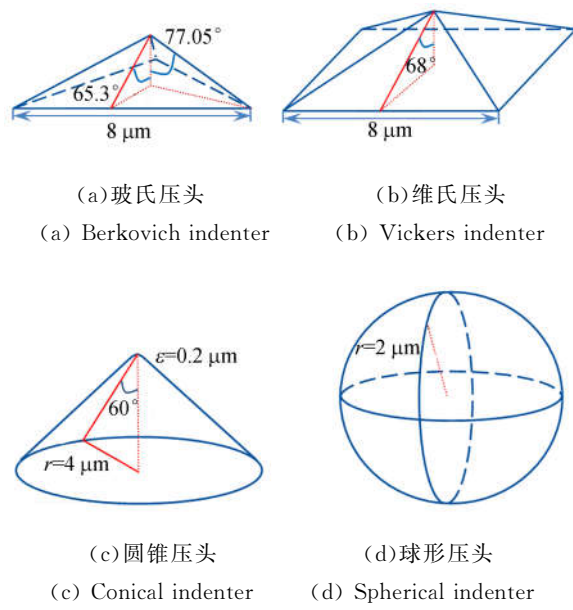


图 2 压头形状尺寸参数

Fig. 2 Shapes and dimension parameters of different indenters

3 nm, $c=0.6975$ nm, 点群结构为 $\bar{4}2m$, 可知该晶体为横观各向同性材料, 即: 在垂直于弹性对称轴的任一平面内材料是各向同性的^[23] (如图 3 所示), 其弹性本构关系如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{11} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{13} & D_{13} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ 为三维应力状态下作用于 KDP 晶体的 6 个应力分量; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ 分别为 6 个应力分量对应的应变分量; $D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{33}, D_{44}, D_{55}$ 为 KDP 晶体材料的刚度系数 (具体数值见表 1)。

表 1 KDP 晶体刚度系数^[13]

Tab. 1 Stiffness coefficients of KDP crystal

刚度系数 (D_{ij})	量值/GPa
D_{11}	71.65
D_{12}	-6.27
D_{13}	14.94
D_{33}	56.4
D_{44}	6.21
D_{55}	12.48

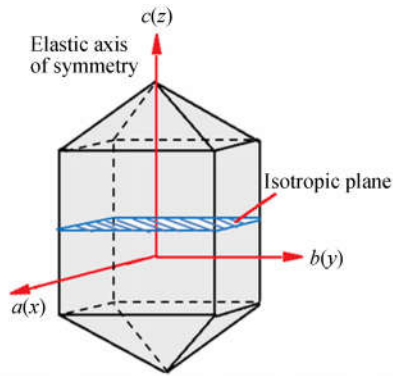


图3 KDP晶体理想外形

Fig. 3 Ideal configuration of KDP crystal

考虑到KDP晶体三倍频晶面的取向问题,在定义材料方向时需对原有三维直角坐标系进行坐标变换,即:由原先的 $oxyz$ 变换为 $ox_1y_1z_1$ (如图4所示)。

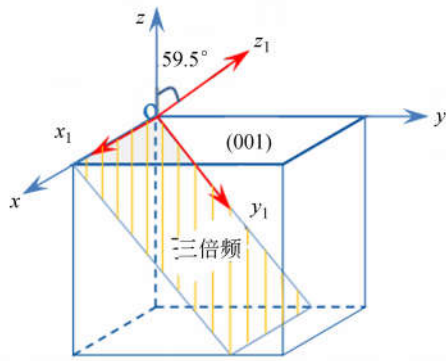


图4 坐标变换示意图

Fig. 4 Sketch of coordinate transformation

边界条件方面,压头采用匀速加载,并限制其除下压方向平移之外的所有自由度;限制KDP晶体工件底面的所有自由度,以表示工件位于刚性支撑面上。

3 三倍频晶面纳米压痕实验

采用传统切割、研磨、抛光工艺获得了表面粗糙度为 2.413 nm(RMS) 的 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的KDP晶体测试用样片。纳米压痕实验采用TI900 TriboIndenter (Hysitron Inc.)全自动纳米力学测试系统。该系统载荷调节范围为 $0\sim 12.6\text{ mN}$,载荷力分辨率为 3 nN ;位移调节范围为 $0.2\sim 6\text{ }\mu\text{m}$,位移分辨率为 $0.0004\text{ }\mu\text{m}$ 。测试

压头类型为玻氏金刚石压头,最大载荷为 $8000\text{ }\mu\text{N}$,载荷增量设置为 $100\text{ }\mu\text{N/s}$ 。为防止环境温度对测试过程的影响,整个测试过程在恒温超净间(千级洁净度)中完成。

4 结果与讨论

4.1 塑性性能拟合

由于KDP晶体三倍频晶面的塑性性能参数无法通过实验手段直接获得,本文采用力学性能类似材料的塑性参数作为初始值,并在此基础上进行不断修正,以提高仿真载荷-压入深度曲线与实验曲线的吻合度(如图5所示),最终获得较为精确的塑性性能表征参数。此外,本研究使用OriginPro 8.0对曲线吻合度进行验证性计算,发现两组数据的相关系数为 0.996328 ,吻合较好。这进一步验证了KDP晶体材料本构关系表征的正确性。

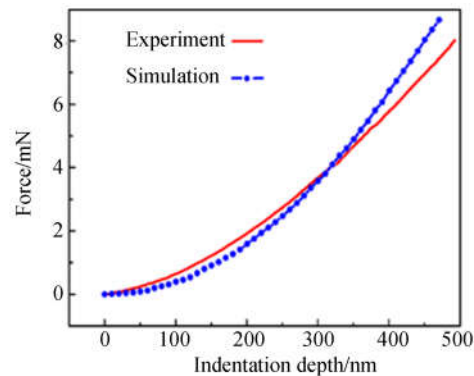


图5 载荷-压入深度曲线

Fig. 5 Load-indentation depth curves

根据KDP晶体品质、样片加工工艺流程及纳米压痕实验原理推测可知:晶体表面形貌、表面层固有缺陷及加工损伤等因素是造成实验曲线与仿真曲线存在一定偏差的主要原因。图6为经过修正的KDP晶体三倍频晶面有效应力-应变曲线。由图6可知该晶面的材料屈服强度为 240 MPa 。

4.2 应力响应行为分析

在延性域内不同大小的加载载荷作用下材料的力学响应具有相似性,同时考虑到等效应力云图的饱满程度,故选用 6 mN 最大加载载荷进行分析。图7为4种压头在 6 mN 最大加载载荷条件下对应KDP晶体工件的等效应力分布。可以

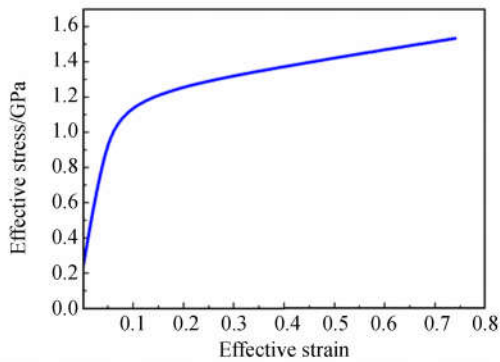


图 6 有效应力-应变曲线

Fig. 6 Effective stress-strain curve

看出 4 种压头对应的材料应力响应存在一些共性,如:压头与工件接触区域存在应力集中效应,这导致工件等效应力峰值区域均分布于靠近压头尖部的正下方,且应力由靠近压头一侧向外逐渐

降低。该应力集中带为径向裂纹及中位裂纹的成核区域,当该区域材料所承受的载荷超过其断裂韧性时,便会产生裂纹。由于 KDP 晶体三倍频晶面具有各向异性的力学性质,使得 4 种情况对应的等效应力均呈现出规则圆弧状分布,且随着载荷的不断增大,工件材料的应力分布有向斜下方延伸的趋势。该现象是 KDP 晶体三倍频晶面机械加工中亚表面斜向裂纹产生的主要原因之一。在加工中随着磨粒对材料表面挤压程度的增大,表面层的微裂纹及缺陷便会沿着应力延伸方向扩展,最终形成斜向裂纹。此外,4 种压头对应的工件的应力响应也表现出一定的差异,如:球形压头的应力峰值分布区域的范围远大其他 3 种情况;这是由于在相同的压入载荷条件下,球形压头与工件材料接触部分的曲率半径较大,对材料的推挤作用强于其他 3 种压头。

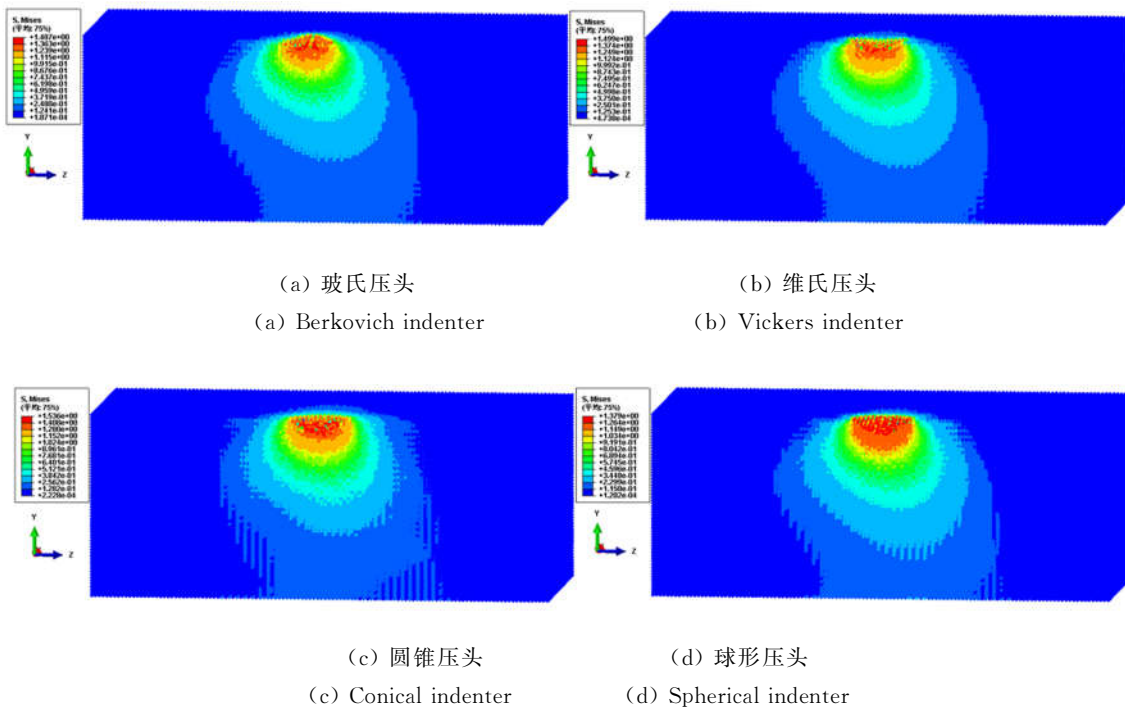
(a) 玻氏压头
(a) Berkovich indenter(b) 维氏压头
(b) Vickers indenter(c) 圆锥压头
(c) Conical indenter(d) 球形压头
(d) Spherical indenter

图 7 不同压头等效应力分布

Fig. 7 Distributions of equivalent stress for different indenters

图 8 为 KDP 晶体三倍频晶面纳米压痕载荷大小与工件等效应力影响深度的关系曲线。由图 8 可以发现各压头对应曲线之间存在一定的差异。球形压头由于具有较大的接触曲率半径,因此对工件材料的推挤作用较强,在相同载荷条件下应力影响深度要大于其他 3 种压头。圆锥压头

与工件的接触面积在 4 种压头中最小,故其应力影响深度最小。由于玻氏压头和维氏压头均为棱锥形结构,它们的几何形状特征相似,因此在相同载荷条件下二者的应力影响深度比较接近,曲线的相似度较高。此外,随着载荷的增大,各压头应力影响深度均呈现近似线性递增关系。由该曲线

关系可以推测:在 KDP 晶体三倍频晶面的超精密加工中,磨粒的压入深度远小于其所产生的应力对材料的影响深度。应力影响区域的材料本身不可避免的存在一定量固有缺陷及损伤,在应力的不断扰动下,这些缺陷及损伤很可能发生扩展,造成晶体加工质量的降低,进而影响其后续的使用性能。所以在加工 KDP 晶体时一般采用较小

的法向载荷,以尽可能地减少材料自身固有缺陷的加重及扩展。

4.3 塑性行为分析

考虑到材料的塑性行为发生于屈服之后,当载荷较小时,塑性应变仅分布在很小的范围内,不利于分析,故本部分以 8 mN 最大加载载荷为例,分析 KDP 晶体三倍频晶面不同形状压头的等效塑性应变分布情况(如图 9 所示彩图见期刊电子版)。由俯视图可以发现:不同压头对应的材料表层塑性应变分布区域的形状与各压头的投影面形状类似,存在一定的复映效果。此外,各压头对应的等效应变分布深度也存在一些差别,具体体现为:球形压头>玻氏压头≈维氏压头>圆锥压头。不同种类压头的投影面积不同所造成的对材料的推挤程度的差异是产生该结果的主要原因。当晶体所承受的推挤压力高于材料自身的屈服极限时,晶体内部就会产生位错、相变等不可恢复的晶格缺陷,最终造成晶体在宏观尺度上产生材料性质的改变。这也是 KDP 晶体机械加工中变质层的形成机理之一。

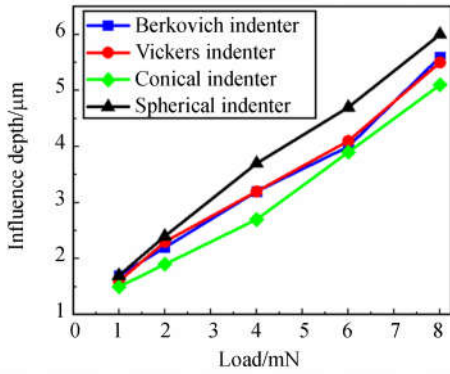


图 8 载荷-等效应力影响深度关系

Fig. 8 Relationship between load and influence depth of equivalent stress

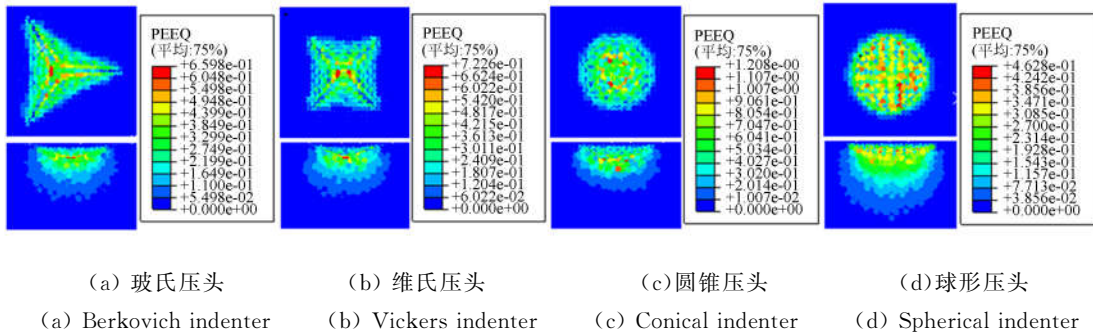


图 9 等效塑性应变分布

Fig. 9 Distribution of equivalent plastic strain

在纳米压痕的卸载阶段,深层材料所累积的变形量通过弹性回复作用向材料表面释放,在该过程中不可避免会受到已发生塑性变形材料的阻碍作用,使得弹性形变无法复原,进而以残余应力的形式留在了工件材料中。图 10 为 KDP 晶体三倍频晶面纳米压痕各压头对应的载荷大小与工件残余应力层深度关系曲线。可以发现在载荷小于 2 mN 时各压头的残余应力深度相差不大(极差<0.2 μm),然而随着加载载荷继续增大,各压头对应的残余应力层深度之间的差异逐渐扩大。这是由于在载荷较小时,压头压入深度较浅,能够

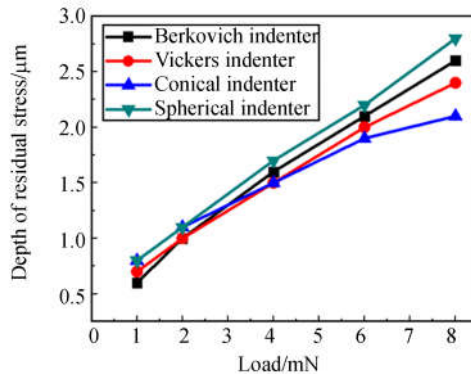


图 10 载荷-残余应力深度关系曲线

Fig. 10 Relationship between load and depth of residual stress

反映各压头间区别的塑性变形量较少,导致残余应力深度相差不大;随着载荷增大,塑性变形程度加深,各压头几何形状特征的复映效应逐渐增强,最终表现为残余应力分布深度差异性的扩大。

5 结 论

为根除有限元方法在大形变问题分析中易发生网格畸变的弊端,本文引入了光滑粒子流体动力学(SPH)数值仿真方法;实现了 KDP 晶体三倍频晶面各向异性材料本构关系的表征;建立了纳米压痕 SPH 仿真模型;开展了纳米压痕测试实

验;通过相关系数分析验证了实验与仿真所对应的载荷-压入深度曲线具有良好的吻合度,这也证实了材料建模的正确性,并得出该晶面材料的屈服极限为 240 MPa。研究发现三倍频晶面力学性质的各向异性是造成表层材料等效应力不规则圆弧形分布的主要原因。另外,还发现压头形状对 KDP 晶体材料表面塑性应变分布具有复映效应。此外,本文还分析了各压头在不同载荷条件下残余应力分布深度差异程度的变化规律。本文的研究为全面揭示 KDP 晶体微观弹塑性变形机理,实现 KDP 晶体高效低损伤加工提供了必要的理论支撑。

参考文献:

- [1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG L. *Advanced Optical Manufacture Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] PENG J, ZHANG L C, LU X CH. Elastic-plastic deformation of KDP crystals under nanoindentation [J]. *Materials Science Forum*, 2014, 773-774: 706-711.
- [3] 郭俊杰, 邱丽蓉, 王允, 等. 用于惯性约束聚变靶丸测量的激光差动共焦传感器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 644-650.
GUO J J, QIU L R, WANG Y, *et al.*. Laser differential confocal sensor for ICF capsule measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 644-650. (in Chinese)
- [4] CHEN W Q, LIANG Y CH, LUO X CH, *et al.*. Multi-scale surface simulation of the KDP crystal fly cutting machining [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(1-4): 289-297.
- [5] DENG X W, ZHU Q H, ZHENG W G, *et al.*. Research and construction progress of SG-III laser facility [C]. *Conference on High-power Lasers and Applications VIII, Beijing*, 2014.
- [6] XU D P, ZHANG R, TIAN X C, *et al.*. Progress on the suppression of FM-to-AM modulations in SG-III laser facility [C]. *Proc. of SPIE*, 2014, 9255: 1-6.
- [7] TIAN Y, HAN W, CAO H B, *et al.*. Characteristics of laser-induced surface damage on large-aperture KDP crystals at 351nm [J]. *CHIN. PHYS. LETT.*, 2015, 32(2): 027801-1-027801-3.
- [8] 吴东江, 曹先锁, 王强国, 等. KDP 晶体加工表面的亚表面损伤检测与分析[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1721-1725.
WU D J, CAO X S, WANG Q G, *et al.*. Damage detection and analysis of machined KDP crystal sub-surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1721-1725. (in Chinese)
- [9] XIAO Y, CHEN M J, YANG Y T, *et al.*. Research on the critical condition of brittle-ductile transition about micro-milling of KDP crystal and experimental verification [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(2): 351-358.
- [10] 白林山, 熊伟, 储向峰, 等. SiO₂/CeO₂ 复合磨粒的制备及在蓝宝石晶片抛光中的应用[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1289-1293.
BAI L SH, XIONG W, CHU X F, *et al.*. Preparation of nano SiO₂/CeO₂ composite and their applications to CMP on sapphire substrates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1289-1293. (in Chinese)
- [11] 郭兵, 赵清亮, 陈冰, 等. 光学玻璃的激光微结构砂轮精密磨削[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2659-2665.
GUO B, ZHAO Q L, CHEN B, *et al.*. Precision grinding of optical glasses by laser micro-structured grinding wheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2659-2665. (in Chinese)
- [12] ZHAO H W, ZHANG P, LIU H D. Influences of residual stress induced by cutting on subsequent scratch using smooth particle hydrodynamic (SPH) [J]. *Materials Transactions*, 2014, 55

- (9): 1440-1444.
- [13] FANG T, LAMBROPOULOS J C. Microhardness and indentation fracture of potassium dihydrogen phosphate (KDP) [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2002, 85(1): 174-178.
- [14] KUCHEYEV S O, SIEKHAUS W J, LAND T A., et al.. Mechanical response of $KD_2xH_2(1-x)PO_4$ crystals during nanoindentation [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(13): 2274-2276.
- [15] LU CH P, GAO H, WANG J H, et al.. Mechanical properties of potassium dihydrogen phosphate single crystal by the nanoindentation technique [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, 25(8): 740-748.
- [16] GUO X G, ZHANG X J, TANG X ZH, et al.. Nanoindentation on the doubler plane of KDP single crystal [J]. *Journal of Semiconductors*, 2013, 34(3): 034001-1-034001-4.
- [17] 王洪祥, 马恩财, 高石, 等. 磷酸二氢钾(KDP)晶体纳米压痕过程的有限元分析[J]. *材料科学与工艺*, 2009, 17(1): 40-46.
WANG H X, MA E C, GAO SH, et al.. Finite element analysis on nanoindentation process of KDP crystal [J]. *Materials Science and Technology*, 2009, 17(1): 40-46. (in Chinese)
- [18] 陈维锋. KDP晶体压痕实验及有限元仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
CHEN W F. *Indentation experiment and finite element simulation research on KDP crystal* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [19] LUCY L B. A numerical approach to the testing of fusion process [J]. *Astronomy Journal*, 1977, 88: 1013-1024.
- [20] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1977, 181: 375-389.
- [21] SU C, ZHANG Y, HUO J M. Numerical simulation and analysis for metal cutting processes based on FEM and SPH [C]. *Proceedings of the seventh International Conference on System Simulation and Scientific Computing, Chengdu, P. R. China*, 2008: 1325-1328.
- [22] GUO X G, WEI Y J, JIN Z J, et al.. A numerical model for optical glass cutting based on SPH method [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5-8): 1277-1283.
- [23] 孙云. KDP晶体力学性能与开裂现象研究[D]. 山东: 山东大学, 2012.
SUN Y. *Study on the mechanical properties and cracking phenomenon of KDP crystal* [D]. Shandong: Shandong University, 2012. (in Chinese)

作者简介:



刘子源(1989—),男,辽宁辽阳人,硕士研究生,2012年于华中农业大学获得学士学位,主要从事各向异性软脆功能晶体精密超精密加工技术的研究及损伤机理分析。E-mail: lzy5307827@126.com

导师简介:



郭晓光(1976—),女,内蒙古乌兰浩特人,博士,副教授,1998年于北方交通大学获得学士学位,2002年、2008年于大连理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事精密超精密加工理论与技术、分子动力学方面的研究。E-mail: guoxg@dlut.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)