

多裂隙缺陷陶瓷轴承破坏机理研究

郭鹏翔, 谷晓娇, 朱振伟

(沈阳理工大学 机械工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 针对氮化硅陶瓷轴承的多裂隙缺陷会影响其力学性能及使用寿命的问题, 提出了一种结合离散元 (DEM) 仿真和 FISH 语言程序的方法研究轴承缺陷。首先, 采用 DEM 对轴承进行建模, 通过力学校准实验测定相关力学性能参数, 并通过试错法进行细观参数的标定, 采用 FISH 语言程序建立氮化硅陶瓷轴承简化模型, 并在模型中预制不同倾角和数量的平行裂隙缺陷; 然后, 通过模拟和数值计算, 研究了裂纹在不同倾角和数量裂隙缺陷下的演化规律, 同时结合裂纹周围的速度矢量场, 分析了裂纹扩展的复杂性。实验结果揭示了受压下多裂隙缺陷的陶瓷材料损伤破坏机制, 可为陶瓷轴承加工工艺、故障诊断、力学性能及使用寿命等研究提供理论指导。

关键词: 氮化硅陶瓷轴承; 离散元; 多裂隙缺陷; 破坏机理

中图分类号: TH17

文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.01.009

Study on the Failure Mechanism of Ceramic Bearings with Multiple Crack Defects

GUO Pengxiang, GU Xiaojiao, ZHU Zhenwei

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: To address the issue that the multi-fracture defects of silicon nitride ceramic bearings will affect their mechanical properties and service life, a method combining discrete element method (DEM) simulation and FISH language program is proposed to study bearing defects. Firstly, the bearing is modeled by DEM, and the relevant mechanical performance parameters are determined by mechanical calibration experiments. The meso-parameters are calibrated by trial and error method. The simplified model of silicon nitride ceramic bearing is established by FISH language program, and parallel crack defects with different inclination angles and numbers are prefabricated in the model. Then, through simulation and numerical calculation, the evolution law of cracks under different inclination angles and number of crack defects is studied. At the same time, combined with the velocity vector field around the crack, the complexity of crack propagation is analyzed. The experimental results reveal the damage and failure mechanism of ceramic materials with multiple cracks under compression, and provide theoretical guidance for the processing technology, fault diagnosis, mechanical properties and service life of ceramic bearings.

Key words: silicon nitride ceramic bearing; discrete element; multiple crack defects; failure mechanism

氮化硅陶瓷轴承作为高性能陶瓷轴承的代表, 具有耐腐蚀、耐高温和耐磨损等优良特性^[1],

广泛应用于高温、高速、高精度、真空、无磁性、无油润滑、强酸、强碱等苛刻工况下^[2]。但在实际工

作中,陶瓷轴承往往会受到多种因素的影响,其中之一是裂隙缺陷,裂隙的存在对陶瓷轴承的强度和耐久性可能造成负面影响。

刘彪等^[3]基于离散元法(DEM)进行了颗粒聚合体应力计算和破碎路径模拟,发现颗粒间粘结力对破碎机制有重要影响。王宇驰等^[4]采用PFC^{2D}(particle flow code in 2 dimensions)模拟不同倾角孔洞岩石,发现倾角显著影响其力学特性和破坏特征。Han等^[5]通过实验和数值模拟研究了带有单一缺陷的砂岩在轴向约束下的破裂行为,发现裂纹的动态扩展过程表现出复杂的非线性特征。孙家军等^[6]采用PFC^{2D}模拟了单裂隙缺陷复合岩的裂纹,发现围压和裂隙位置对岩石应力和裂纹扩展具有重要影响。刘树新等^[7]通过对含裂隙岩石试件进行单轴实验,发现岩石强度对试件单轴抗压强度具有重要影响。成小雨等^[8]研究了裂隙砂岩以及相似材料的破坏特性,结果表明,裂隙和尺寸等对砂岩的强度影响较大。

本文通过PFC^{2D}采用离散元法^[9-11]系统地研究多裂隙缺陷下氮化硅陶瓷轴承的破坏机理。首先通过实验获取基础数据,然后采用数值模拟方法分析不同倾角裂隙引起的陶瓷轴承力学性能变化,探讨裂隙数目增多对轴承的抗压强度、起裂应力和弹性模量的影响,揭示多裂隙缺陷下陶瓷轴承破坏的机理,为设计耐用、可靠的陶瓷轴承提供理论支持。本文技术路线如图1所示。

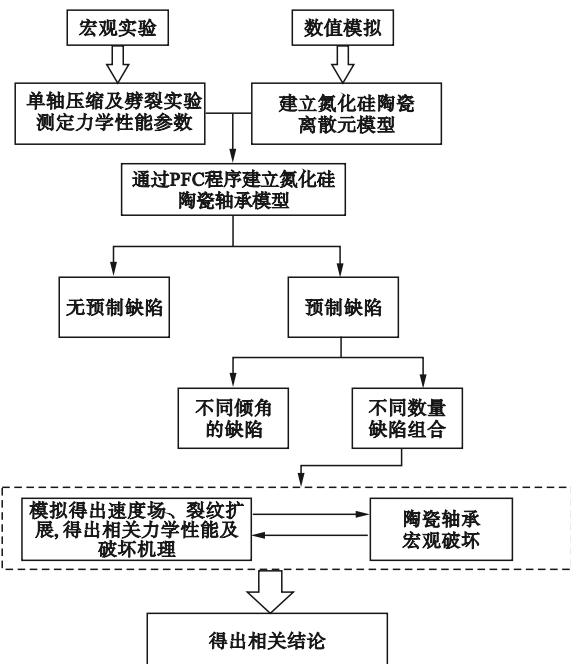


图1 技术路线

Fig.1 Technical route

1 离散元建模与参数确定

1.1 PFC^{2D}建模

本文选用氮化硅陶瓷材料进行单轴压缩实验和巴西劈裂实验,测得氮化硅陶瓷材料的性能参数如表1所示。圆柱形陶瓷模型尺寸为 $\phi 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,陶瓷球半径为10 mm,离散元陶瓷模型如图2所示。

表1 氮化硅陶瓷材料性能参数

Table 1 Performance parameters of silicon nitride ceramic materials

性能参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3 250
杨氏模量/MPa	310
抗压强度/MPa	>3 500
泊松比	0.26
失效模式	剥落
使用上限温度/ $^{\circ}\text{C}$	1 050
抗热冲击	高

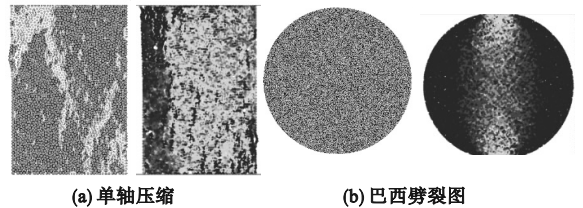


图2 离散元陶瓷模型

Fig.2 Discrete element ceramic model

为减小建模难度,采用AUTOCAD生成文件,将其导入PFC中,生成随机分布的颗粒,用以构建氮化硅陶瓷轴承的简化模型,离散元模型如图3所示。轴承外径26 mm、内径10 mm、宽度8 mm、内圈肩部直径14.8 mm、外肩部直径22.6 mm、颗粒的最小半径0.02 mm。

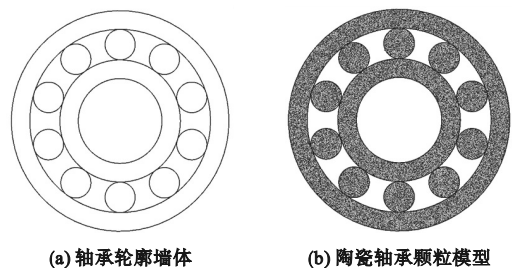


图3 陶瓷轴承离散元模型

Fig.3 Ceramic bearing discrete element mode

1.2 氮化硅陶瓷轴承性能参数的确定

实验设备为万能电子实验机(5982/8872/CMT4104/RGM-6300,美国 INSTRON 公司),加载速度为 0.5 mm/min,加载过程中材料发生断裂随机崩碎,整个破坏过程非常迅速。

采用 PFC^{2D} 建模方法,结合压缩实验测定氮化硅陶瓷的力学参数,并通过试错法使仿真的力学参数尽可能接近宏观实验力学性能参数,氮化硅主要力学性能指标如表 2 所示。

表 2 氮化硅主要力学性能指标

Table 2 The mechanical properties of silicon nitride

力学性能	实验结果	仿真结果
抗压强度/MPa	3 510	3 400
断裂韧性/(MPa·m ^{-1/2})	5.5	5.3
抗拉强度/MPa	1 620	1 600
泊松比	0.26	0.26

1.3 平行裂隙的预制

在陶瓷轴承加工过程中,缺陷通常随机分布,其中平行裂隙关系相对简单,故本文以平行裂隙作为研究对象,采用以下方法进行平行裂隙预制。

1) 首先确定位置参数。以第一条建立的裂隙为基准,建立第二条裂隙,确定裂隙中心位置、长度 L 以及两裂隙中心距 a ,通过 a 确定下一裂隙中心位置。

2) 确定 a 与裂隙之间的夹角 α 。初始裂隙倾角已知为 θ ,通过初始裂隙中心坐标可求出第二条裂隙中心位置坐标。

3) 通过以上三个参数(θ 、 a 、 α)可生成任意位置的平行裂隙,具体计算式为

$$x_2 = a \times \cos(\theta + \alpha) - x_1 \quad (1)$$

$$y_2 = a \times \sin(\theta + \alpha) - y_1 \quad (2)$$

式中: x_1 、 y_1 分别为裂隙 1 中心的横、纵坐标; x_2 、 y_2 分别为裂隙 2 中心的横、纵坐标。

采用 DEM 模拟陶瓷轴承的两条裂隙缺陷。用 PFC 程序建立裂隙模型进行平行裂隙的预制,如图 4 所示,图中裂隙长度 L 为 0.6 mm,裂隙宽度为 0.09 mm。

2 陶瓷轴承多裂隙缺陷分析

2.1 不同倾角的裂隙缺陷分析

通过改变 θ 以及 α 可获得不同组合方式的平行裂隙。在研究不同倾角对于氮化硅陶瓷轴承力

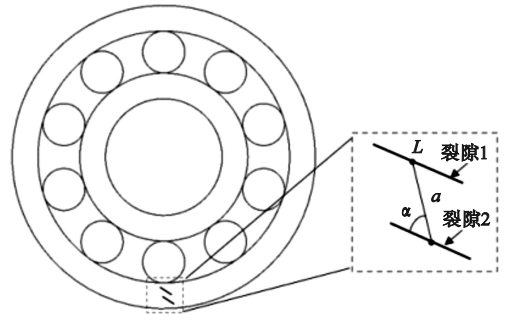


图 4 平行裂隙预制示意图

Fig. 4 Parallel fracture prefabrication schematic diagram

学性能影响时, θ 分别取为 0° 、 30° 、 60° , α 分别取为 15° 、 30° 、 45° 、 60° ,固定 $a = L$ 。建立 12 组不同组合方式的平行裂隙,如表 3 所示。

表 3 平行裂隙倾角及夹角

Table 3 Parallel fracture dip angle and intersection angle

组合方式	$\theta/(^\circ)$	$\alpha/(^\circ)$
a ₁	0	15
a ₂	0	30
a ₃	0	45
a ₄	0	60
b ₁	30	15
b ₂	30	30
b ₃	30	45
b ₄	30	60
c ₁	60	15
c ₂	60	30
c ₃	60	45
c ₄	60	60

不同倾角的裂隙缺陷会导致材料内部的应力分布发生变化,如拉伸、剪切或压缩等,对材料的强度和韧性产生影响,可能会导致不同的断裂形式,基于不同倾角的裂隙缺陷分析,可以预测裂纹扩展的趋势和速度,有助于提前识别材料的损伤和破坏,从而采取相应的措施加以防范。

根据裂纹受力方式的不同,裂纹汇合可分为拉伸裂纹汇合、剪切裂纹汇合以及拉剪混合裂纹汇合^[12]。为了简便,以下用 S-汇合表示拉伸裂纹汇合,T-汇合表示剪切裂纹汇合,ST-汇合表示拉剪混合裂纹汇合。

裂纹扩展类型繁多,模拟得到不同倾角平行裂隙裂纹扩展如图 5 所示。

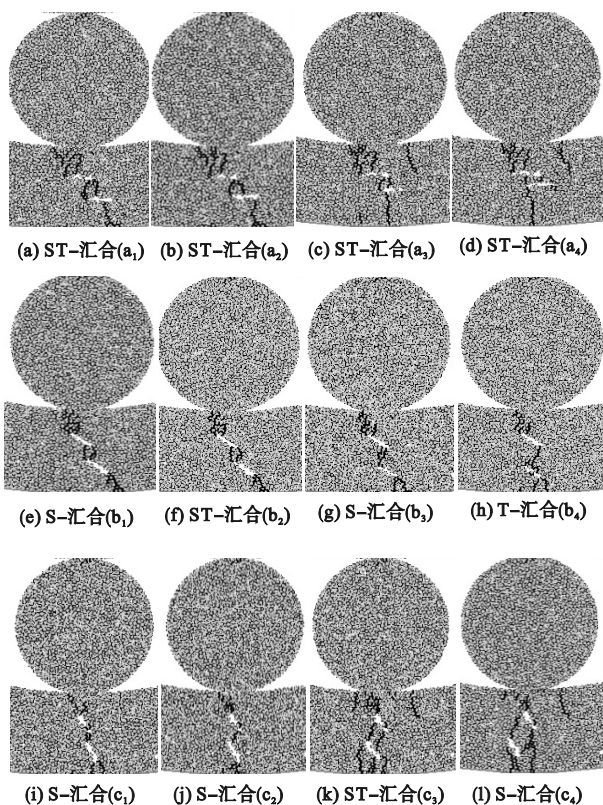


图5 不同倾角平行裂隙裂纹扩展图

Fig. 5 Crack propagation diagram of parallel cracks with different dip angles

图5(a)~5(d)均为ST-汇合,裂纹扩展过程受到拉应力和剪切应力共同影响,裂纹扩展形式基本一致。图5(e)和图5(g)裂纹扩展形式不同,分别为直接汇合和间接汇合,但两者汇合模式相同,均为S-汇合,主要受拉伸应力影响。图5(f)和图5(h)分别为ST-汇合和T-汇合,裂纹扩展过程中初始裂纹与次生裂纹汇合。图5(i)、图5(j)、图5(l)为S-汇合模式,裂纹萌生较为迅速,且裂纹较为单一,图5(k)呈现ST-汇合模式,裂纹扩展过程中次生裂纹的形成并未开始于预制裂隙,而是在初始裂纹扩展一定程度后产生。这些模式展示了不同 θ 和 α 情况下裂纹扩展的复杂性,表明裂纹汇合在氮化硅陶瓷轴承中的重要性。

施加压缩载荷时,应力会在裂缝周围产生集中,从而引发裂纹扩展。 θ 会影响应力集中的位置和程度,进而影响裂纹扩展的路径和速率。 α 越大,裂纹的扩展速度可能会增加,因为裂纹在这种情况下需要克服更大的应力集中效应。在此基础上, θ 取为 0° 、 30° 、 60° ,进行三组离散元数值模拟实验,研究 θ 与抗压强度及 α 的关系,结果如图6所示。

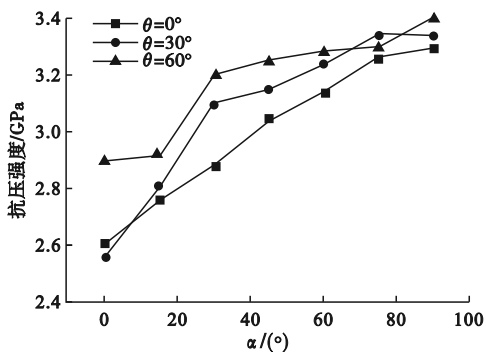


图6 不同 θ 下夹角 α 与陶瓷轴承抗压强度关系

Fig. 6 The relationship between angle α and compressive strength of ceramic bearing under different crack dip angles

由图6可知,当 θ 为 0° 时,裂隙沿轴承的纵向延伸,意味着裂纹的扩展路径与应力方向几乎一致。在这种情况下,无论 α 如何变化,裂纹都会相对容易地沿着裂隙方向扩展,导致轴承的强度降低。随着 α 增大,抗压强度逐渐增大,且 α 大于 80° 时, L 过大,裂隙靠近滚道边缘,陶瓷轴承抗压强度处于极值。当 θ 为 60° 、 α 大于 80° 时,两条裂隙位置接近一条直线,造成贯通现象,轴承抗压强度增大。但不论 θ 及 α 如何变化,轴承最大抗压强度均不超过3.4 GPa。此外,不同 θ 的裂缝之间可能存在相互作用,例如裂缝的交汇或相互干扰,使得裂纹扩展路径相对复杂,造成合并或相互阻碍扩展,这种相互作用会影响裂纹的扩展速率和路径,从而影响陶瓷轴承的强度。

2.2 不同数量裂隙缺陷分析

不同数量的裂隙缺陷会影响轴承的强度、刚度和韧性等力学性能,会导致材料内部损伤的形成和演化,通过分析不同数量裂隙的影响,可以研究材料的损伤演化规律,了解轴承的力学性能。

设定 a 为0.6 mm,裂隙中心位于同一水平线上, θ 为 45° ,选取四种不同数量裂隙(裂隙1、裂隙2、裂隙3、裂隙4,数字代表裂隙数量)为研究对象,通过压缩实验对不同裂隙数量的陶瓷轴承进行离散元数值模拟,结果如图7所示。

图7中每个裂隙左侧为裂纹萌生初始阶段,随着压力增大,轴承形变量增加,材料内部的应力分布发生变化。更多的裂隙导致应力集中现象更加明显,导致右上滚珠断裂。形变进一步增大时,裂隙处裂纹扩展直至贯通,期间产生的次生裂纹与初始裂纹相互交汇贯通。随着裂隙数量增多,陶瓷轴承破坏模式由断裂变成破碎,裂纹衍生数目增多。

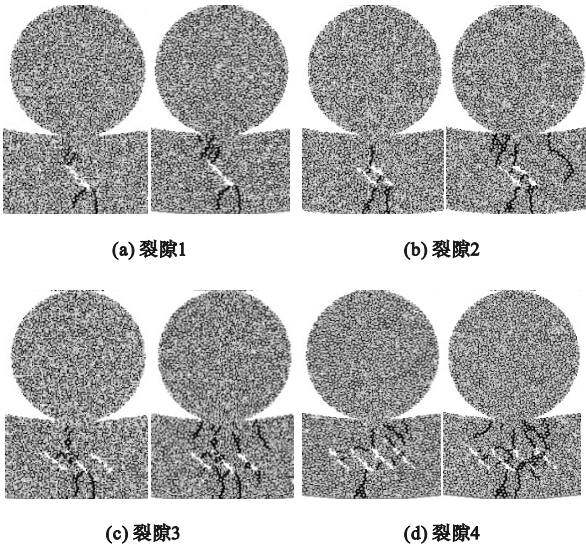


图 7 四组不同预制裂隙数目氮化硅陶瓷轴承部分模型
Fig. 7 Four groups of silicon nitride ceramic bearing models with different number of prefabricated cracks

通过 DEM 数值模拟可以得出四种不同裂隙数量氮化硅陶瓷轴承的峰值应力、裂纹起裂应力和弹性模量^[12]。为减小误差,进行了三次数值模拟,并选取平均值作为研究数据,数值模拟结果如表 4 所示。

表 4 数值模拟结果

Table 4 Numerical simulation results GPa

裂隙数量	峰值应力 均值	起裂应力 均值	弹性模量 均值
1	3.2	2.2	2.95
2	3.1	2.0	2.82
3	2.4	1.96	2.74
4	2.2	1.4	2.68

通过表 4 数据建立应力 - 裂隙数目曲线,如图 8、图 9 所示。陶瓷轴承的峰值应力、起裂应力均随裂隙数量的增加而下降。

裂隙数目的增加会使轴承的裂纹密度增加,导致轴承脆性增加,裂纹更容易形成和扩展,使得起裂应力降低。当裂隙数量增多时,应力在裂隙尖端和周围区域的集中效应增强,使这些区域容易受到破坏,造成轴承不完整,轴承剩余部分在承受同样载荷时的应力增大,导致轴承在较低应力时就被破坏,峰值应力降低。

2.3 速度矢量场分析

在 DEM 中,可以通过颗粒之间相互作用以及各种运动状态模拟轴承的变形和破坏行为。速度矢量场反映了颗粒在运动过程中的速度变化情

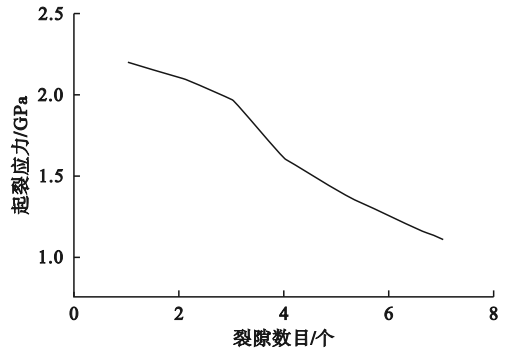


图 8 裂纹起裂应力与裂隙数目关系

Fig. 8 The relationship between crack initiation stress and crack number

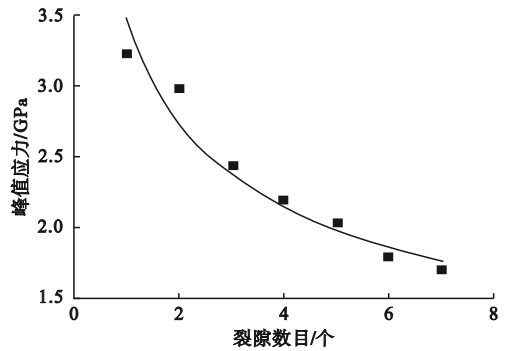


图 9 裂纹峰值应力与裂隙数目关系曲线

Fig. 9 The curve of the relationship between crack peak stress and crack number

况,通过对速度场进行分析来深入了解颗粒的运动特性,借此推断出氮化硅陶瓷轴承裂纹扩展模式、裂纹萌生位置以及应力种类。

选取四组不同倾角的滚珠预制裂隙,研究其速度矢量分布情况,结果如图 10 所示。图中颜色深浅代表速度大小,箭头表示颗粒速度方向。

由图 10 可见,裂隙周围颗粒运动速度变化明显,随着裂纹扩展,新的裂纹萌生处颗粒速度较大,而已经扩展裂纹速度逐渐降为 0。这是由于初始裂纹萌生于缺陷位置,此时初始裂纹两侧颗粒运动速度方向相反,产生的拉应力导致颗粒朝所受应力方向运动,速度逐渐降为 0。 θ 的变化会导致应力传输路径发生改变,对速度方向产生一定影响。

图 11 为滚道裂纹萌生时刻速度矢量场。滚道裂纹萌生时刻速度矢量场情况比滚珠预制裂隙速度矢量场要复杂,主要原因是滚道受到力的类型更多,包括拉伸应力、剪切应力以及拉 - 剪混合应力。颗粒受到挤压,速度方向发生偏转,造成应力的各向异性,颗粒之间连接键被撕裂,裂纹急速扩展。

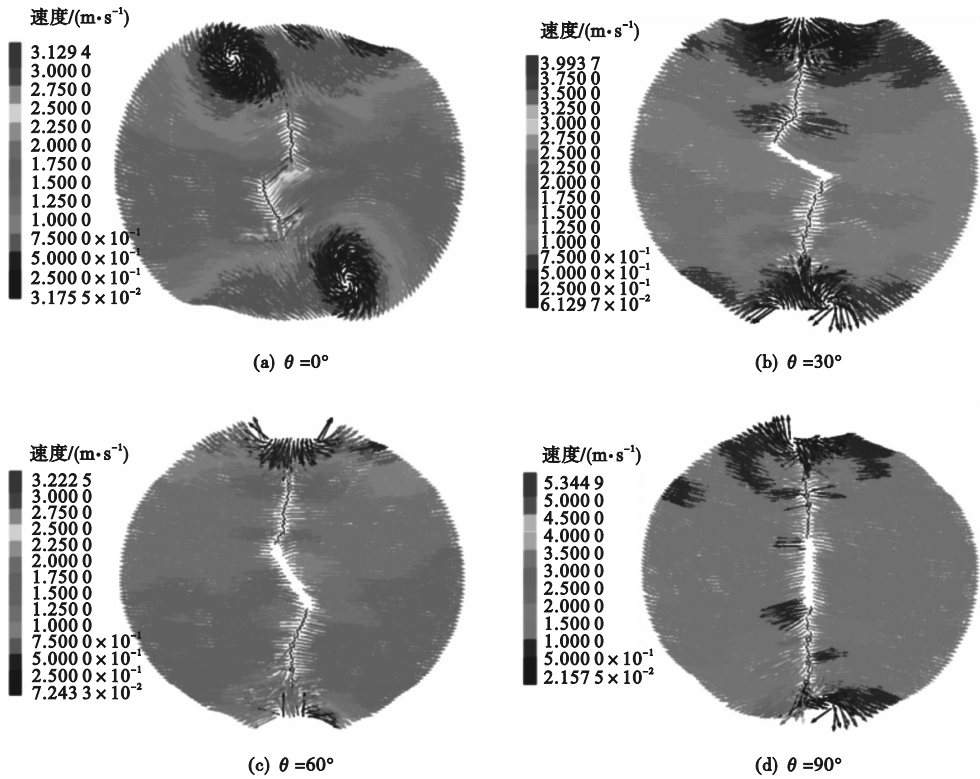


图10 滚珠预制裂隙速度矢量场

Fig. 10 Velocity vector field of ball prefabricated crack

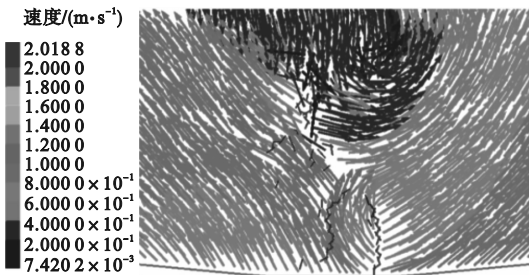


图11 滚道预制裂隙速度矢量场

Fig. 11 Raceway prefabricated crack velocity vector field

3 结论

本文提出了基于 DEM 的氮化硅陶瓷多裂隙缺陷研究方法,通过模拟陶瓷轴承裂隙演化过程,分析和预测了裂隙的演变规律,得到如下结论。

1) 改变预制裂隙倾角会使裂纹扩展路径和速率发生变化,较大倾角的裂缝会导致更大的应力集中,降低轴承的抗压强度。

2) 随着裂隙数目增多,抗压强度开始均大幅度下降,并逐渐趋近于 0。弹性模量随着裂隙数目增多也逐渐降低,且下降幅度越来越大。

本文研究结果可为设计耐用、可靠的陶瓷轴承提供理论支持。

参考文献 (References):

- [1] 吴玉厚,陈文征,孙健,等. 氮化硅陶瓷轴承套圈沟道超精加工工艺参数优化研究[J]. 现代制造工程, 2020(10): 78-82.
WU Y H, CHEN W Z, SUN J, et al. Study on the optimization of the technological parameters of the groove superfinishing of silicon nitride ceramic bearing rings[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(10): 78-82. (in Chinese)
- [2] 饶水林. 航空发动机用氮化硅陶瓷轴承技术研究现状[J]. 中国陶瓷工业, 2020, 27(3): 35-38.
RAO S L. Research status of silicon nitride ceramic bearing technology for aeroengine[J]. China Ceramic Industry, 2020, 27(3): 35-38. (in Chinese)
- [3] 刘彪,王桥,张宗亮,等. 基于 B-DEM 的颗粒聚合体应力计算和破碎路径模拟[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3493-3502.
LIU B, WANG Q, ZHANG Z L, et al. Calculation of stress field and particle breakage paths for granular system based on the combined boundary-discrete element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3493-3502. (in Chinese)
- [4] 王宇驰,杨勇,张忠政,等. 基于 PFC^{2D} 的不同倾角组合孔洞岩石力学特性及破坏特征[J]. 矿业, 2022, 31(3): 132-139.
WANG Y C, YANG Y, ZHANG Z Z, et al. Mechanical properties and failure characteristics of combined hole rocks with different dip angles based on PFC^{2D} [J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(3): 132-139. (in Chinese)

(下转第 71 页)