

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2023.05.016

引文格式:

向明, 林佳伟, 冯浩, 等. 陶瓷岩板断裂数值模拟及边缘约束下最大承载力研究[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(5): 980–987.
XIANG Ming, LIN Jiawei, FENG Hao, et al. Numerical simulation of fracture and maximum bearing capacity under edge constraints for ceramic slates [J]. Journal of Ceramics, 2023, 44(5): 980–987.

陶瓷岩板断裂数值模拟及边缘约束下最大承载力研究

向明, 林佳伟, 冯浩, 廖瑞, 孙朋, 李钢

(景德镇陶瓷大学, 江西 景德镇 333403)

摘要: 为探究准确的陶瓷岩板断裂数值模拟方法, 利用三点弯曲试验获取陶瓷岩板的力学参数, 并确定了岩板平面上力学性能的各向同性特征; 对比三种有限元模拟结果确定 C3D6 单元为计算单元, 采用 6 组岩板模拟计算结果与试验数据进行对比, 其最大误差为 8.9%。验证了模型的可靠性以及力学参数的准确性。最后, 运用该模型做了边缘约束下的岩板受力分析, 得到其最大承重的变化规律, 为岩板的应用提供了分析依据。

关键词: 陶瓷岩板; 数值模拟; 三点弯曲; 有限元模型

中图分类号: TQ174.1⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2023)05-0980-08

Numerical Simulation of Fracture and Maximum Bearing Capacity under Edge Constraints for Ceramic Slates

XIANG Ming, LIN Jiawei, FENG Hao, Liao Rui, SUN Peng, LI Gang

(Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China)

Abstract: To explore accurate numerical simulation methods for fracture of ceramic slates, their mechanical parameters were obtained using three-point bending tests, thus leading to isotropic characteristics of mechanical properties on the plane. The C3D6 unit was determined to be the calculation unit after comparing the three finite element simulation results. The calculation results of six groups of ceramic slate were compared with the experimental data, with the maximum error to be 8.9%. The reliability of the model and the accuracy of the mechanical parameters are verified. Finally, the stress analysis of ceramic slate under edge constraints was performed using this model and the variation rule of their maximum bearing capacity was obtained, thus offering an analytical basis for the application of ceramic slates.

Key words: ceramic slate; numerical simulation; three-point bending; finite element model

0 引言

陶瓷岩板已经从单纯的建筑装饰材料, 拓展为家具面板甚至家电面板, 但陶瓷岩板在使用中常会出现断裂的现象。因此, 其力学性能尤其断裂力学行为备受关注。为了使陶瓷岩板的应用更加广泛, 本文聚焦获取准确的陶瓷岩板力学参数

和性能特征, 并建立合理可靠的有限元分析模型对其展开研究。

陶瓷岩板属于薄壁板件, 常用三点弯曲试验测定薄壁板件的破坏强度和断裂模数^[1]。国内不少学者通过三点弯曲试验对材料的力学性能进行了研究。王启智等^[2]利用材料力学和断裂力学原理, 得到脆性材料三点弯曲试验的最大荷载及其

收稿日期: 2023-03-25。

修订日期: 2023-08-04。

基金项目: 国家自然科学基金(51165011)。

通信联系人: 冯浩(1970-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-03-25.

Revised date: 2023-08-04.

Correspondent author: FENG Hao (1970-), Male, Ph.D., Professor.

E-mail: 595790758@qq.com

挠度和刚度的无量纲显式表达式, 验证和讨论了相应的实验荷载—挠度曲线, 理论与实验结果比较吻合。庄蔚敏等^[3]研究碳纤维复合材料在弯曲载荷作用下的失效形式与损伤过程, 以预测材料抗外力损伤性能, 指导碳纤维复合材料车身结构设计, 并通过碳纤维复合材料性能试验和三点弯曲试验, 获得材料力学性能参数。任会兰等^[4]对陶瓷材料在压缩加载下破坏过程中的声发射特性进行实验研究。在三点弯曲实验中, 采用多通道声发射系统监测了陶瓷试件的破坏过程, 定位了陶瓷试件的破坏位置; 试件断面的宏观分析表明, 陶瓷的脆性破坏机制主要是颗粒附近的微裂纹开裂。许良等^[5]对三种不同厚度的 T700 碳纤维复合材料多向层合板在两种应力比及三种应力等级下进行三点弯曲试验, 得到了复合材料多向层合板的三点弯曲疲劳寿命与材料厚度成正比关系, 与试验应力比、应力等级成反比关系。

综上所述, 三点弯曲试验是获取薄板力学参数的有效方法, 但陶瓷岩板作为一种新材料, 对其研究并不充分。为获取准确的陶瓷岩板弯曲断裂模拟参数, 选取 6 组不同尺寸的陶瓷岩板作为研究样本, 对比分析了陶瓷岩板的三点弯曲测试实验数据与仿真结果的差异。通过三点弯曲测试试验, 可从陶瓷岩板的弯曲载荷—变形曲线和应力—应变曲线数据中提取陶瓷岩板的破坏荷载 F 、破坏强度 S 以及断裂模数 R 数值; 并验证了陶瓷岩板各向同性的力学特征。利用 ABAQUS 有限元软件模拟仿真陶瓷岩板弯曲断裂变化过程, 便于试验与仿真进行对比研究。

1 陶瓷岩板三点弯曲试验

1.1 试验设备及参数计算公式

为了获取陶瓷岩板的断裂载荷模拟参数, 实验选用 WDW-10 微机控制电子万能试验机对陶瓷岩板进行三点弯曲试验。万能试验机微机系统通过控制器和调速系统控制伺服电机转动, 精密丝杆机构能够精准地控制横梁上下移动及其速度, 且横梁的加载速率为 $20 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该设备主要由压杆、试件和两个支撑杆组成, 根据国标 GB/T3810.4^[6], 陶瓷岩板三点弯曲试验的示意图如图 1 所示。

三点弯曲试验过程中陶瓷岩板的极限^[7]可被定义为破坏强度 S 或断裂模数, 其中, 破坏强度 S ^[8]计算公式为:

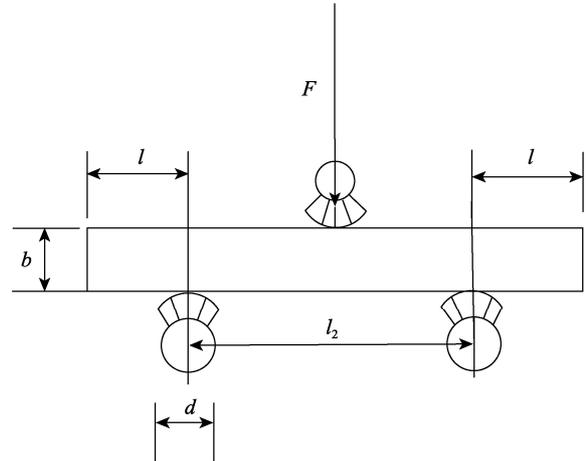


图 1 三点弯曲测试示意图

Fig. 1 Diagram of three-point bending test

$$S = \frac{Fl_2}{b} \quad (1)$$

式中: F 为载荷(N); l_2 为两根支撑棒之间的跨距(mm) (见图 1); b 为试件的宽度(mm)。断裂模数 R ^[9]计算公式为:

$$R = \frac{(3Fl_2)}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2} \quad (2)$$

式中: h 为试验后沿断裂边测得的试样断裂面的最小厚度(mm)。其中, 断裂模数的大小取决于破坏强度 S 和断裂面的最小厚度 h , 但最后只能得到近似的结果。

1.2 弯曲试验对象与试验结果

为获取陶瓷岩板的力学性能参数, 本文选取了 6 块陶瓷岩板样件, 陶瓷岩板的具体参数(长度 l 、宽度 Width、厚度 Thickness 以及有效跨距 Span) 如表 1 所示。

表 1 陶瓷岩板试件尺寸
Tab. 1 Dimensions of ceramic slates

No.	l /mm	Width/mm	Thickness/mm	Span/mm
1	300	100	6	280
2	440	100	6	420
3	300	300	6	280
4	400	300	6	380
5	500	300	6	480
6	600	300	6	580

分别对 6 组陶瓷岩板样件进行了三点弯曲试验, 在弯曲试验过程中, 中心棒以适当的速率向陶瓷岩板的表面中心部位施加压力。陶瓷岩板在外力作用下, 通过滑移所引起的塑性变形, 不能达到应力缓冲的效果, 致使陶瓷岩板发生突然性、无征兆的断裂。

以 6 号样件 (600 mm×300 mm×6 mm) 为例, 对样件断裂过程进行描述, 6 号样件的应力—应变曲线如图 2 所示, 陶瓷岩板断裂大致可分为 3 个阶段: 曲线 OA 段为陶瓷岩板裂纹的萌生, 随着载荷的增大, 裂纹开始出现并逐渐扩大; AB 段为裂纹的失稳, 当载荷继续增大, 陶瓷岩板出现小的卸载; BC 段为线性阶段, 当载荷达到 $F=622.18\text{ N}$ 时, 陶瓷岩板发生了断裂失效, 曲线点 C 为其峰值, 对应极值为 1203 MPa, 即陶瓷岩板的弯曲强度极限^[10]。根据线性阶段 BC 应力—应变曲线斜率还可求得弹性模量 $E=7336.8\text{ MPa}$ 。

为探究 6 组不同规格陶瓷岩板样本的力学性能, 本文利用 WDW-10 微机控制电子万能试验机对其开展了三点弯曲试验, 其结果汇总如下表 2 所示, 对应的陶瓷岩板荷载—位移曲线和应力—应变曲线如图 3 所示。

根据 1~6 号样件的试验结果可知, 随着陶瓷岩板样件尺寸参数的变化, 其破坏强度 S 、断裂模数 R 、应力—应变曲线 BC 段推导的弹性模量 E 均差异不大, 1~6 号陶瓷岩板样件的破坏强度 S 均值为 1200 MPa, 断裂模数 R 均值为 49.84 MPa,

弹性模量均值为 7338 MPa。

1.3 陶瓷岩板与普通瓷砖的力学性能对比

为探究陶瓷岩板与普通瓷砖的力学性能, 本节选取了同种规格的岩板与瓷砖进行三点弯曲试验, 对比了分析两者的抗弯性能。图 4 为陶瓷岩板与普通瓷砖^[11]试验所得应力—应变曲线。

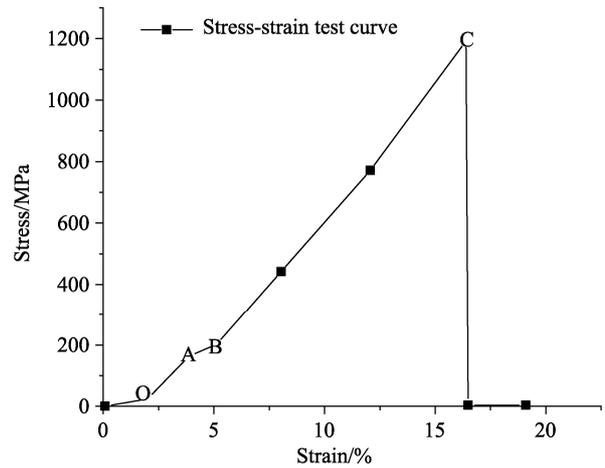


图 2 600 mm×300 mm×6 mm 陶瓷岩板的应力—应变曲线
Fig. 2 Stress strain curve of the ceramic slate (600 mm×300 mm×6 mm)

表 2 不同尺寸的陶瓷岩板试验结果汇总表
Tab. 2 Test results of the ceramic slates with different sizes

No.	Span/mm	L/mm	Width/mm	F/N	S/MPa	R/mm^2	Elastic modulus/MPa
1	280	300	100	426.26	1194	49.73	7340.60
2	420	440	100	289.68	1217	49.70	7337.00
3	280	300	300	1278.26	1193	49.71	7332.70
4	380	400	300	941.87	1193	49.71	7342.10
5	480	500	300	751.36	1202	50.09	7338.90
6	580	600	300	622.18	1203	50.12	7336.80

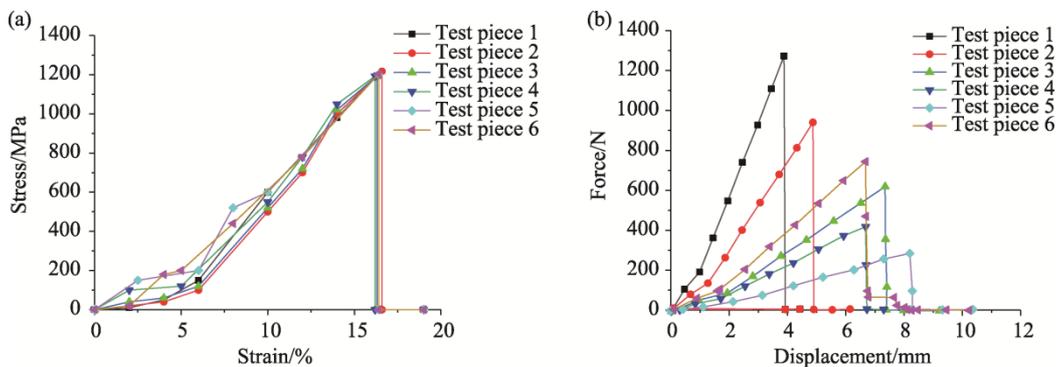


图 3 六组陶瓷岩板的试验结果曲线
Fig. 3 Load deformation test curves of five groups of ceramic slate

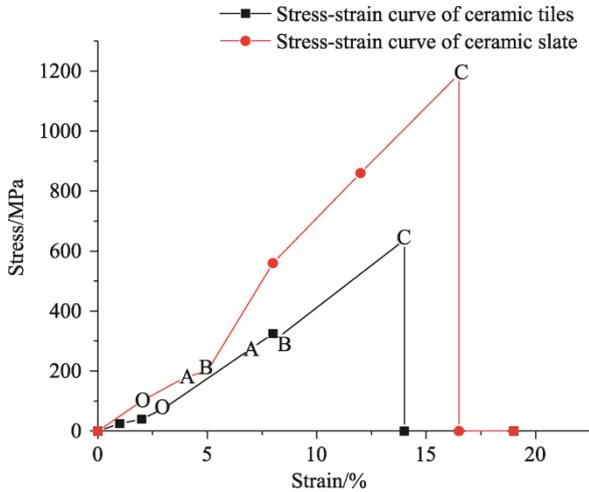


图 4 陶瓷岩板与瓷砖的应力—应变曲线

Fig. 4 Stress strain curve of the ceramic slate and ceramic tile

1.4 陶瓷岩板各向同性力学性能验证

为研究陶瓷岩板的各向同性力学性能，选取图 5 中 1 号、2 号样件和 3 号、4 号样件进行三点弯曲试验，分析其抗弯性能^[12]和陶瓷岩板的纵向力学性能。其中，纵向为陶瓷岩板成型方向(箭头方向)，四组陶瓷岩板样件尺寸为 280 mm×130 mm×6 mm，具体如图 5 所示。

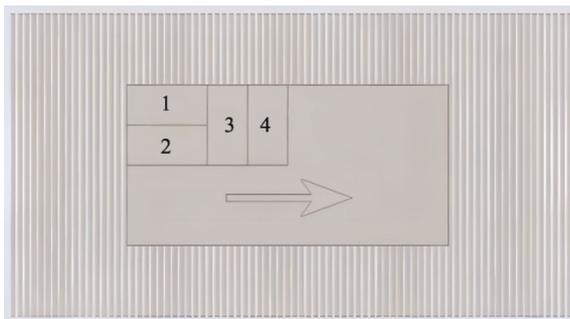


图 5 陶瓷岩板成型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of ceramic slate forming

图 6 为 1~4 号样件试验所得的应力—应变曲线，对应的陶瓷岩板力学参数如表 3 所示。根据表 3 中的结果分析可知，1 号、2 号样件和 3 号、4 号样件的

破坏载荷 F 、破坏强度 S 以及断裂模数 R 基本相同，说明陶瓷岩板的物理性质不会因方向的不同而有所变化，即各向同性。根据图 6 的应力—应变曲线可知，四条曲线变化趋势基本吻合，进一步说明陶瓷岩板各向同性的特征。

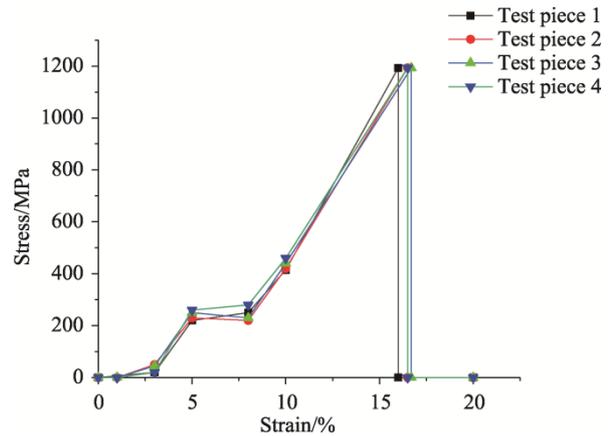


图 6 四组同尺寸陶瓷岩板应力—应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of four groups of ceramic slate with the same size

2 陶瓷岩板弯曲过程数值模拟

2.1 有限元建模

根据实际情况，陶瓷岩板样件几何模型采用 SolidWorks 建模，其中，陶瓷岩板样件 6 的模型尺寸为 600 mm×300 mm×6 mm，上方的压杆和下方两根支撑杆为 1200 mm，宽为 40 mm，与试件接触的部位为 20 mm 半径圆。

陶瓷岩板材料属于脆性材料，对材料参数设置时需采用 Abaqus 脆性材料破坏准则(Brittle cracking)来定义；Brittle failure 里设置当单元中的应变达到 1E-5 时，此时有限元计算中的部分单元失效，也就是有限元分析定义陶瓷岩板断裂的过程。其中，压杆和支撑杆材料为 structural steel 模型，陶瓷岩板三点弯曲模拟具体参数如表 4 所示。

表 3 同尺寸的陶瓷岩板试验结果汇总表

Tab. 3 Summary of test results of ceramic slate with the same size

No.	Span/mm	l/mm	Width/mm	F/N	S/MPa	R/mm ²	Elastic modulus/MPa
1	260	280	130	596.50	1193	49.71	7339.30
2	260	280	130	598.00	1196	49.83	7340.90
3	260	280	130	597.00	1194	49.71	7340.20
4	260	280	130	600.00	1200	50.00	7342.10

2.2 单元类型的选择及网格划分层数

采用 ABAQUS 有限元中显示动力学模块进行仿真分析,如图 7 所示,压杆和支撑杆刚体部分采用自动网格划分,网格类型为六面体单元。为了探究单元类型对陶瓷岩板三点弯曲试验过程模拟的影响,本文选取网格类型为 C3D6 (楔形单元)、C3D4 (四面体单元)和 C3D8R (六面体单元)进行比较分析。其中,图 7(a)为楔形单元划分,图 7(b)为四面体单元划分,图 7(c)为六面体单元划分。

一般来说,单位网络划分越细、尺寸越小说明模拟的结果就越接近实验,精度也就越高。然而,计算精度不会随着尺寸的减小而直线上升,到达一定的精度趋于平缓,精度提升得并不明显。为了探究网格划分层数对仿真结果的影响,本文开展了陶瓷岩板厚度方向均布多组网格单元层数的研究,且满足薄板厚度的方向至少有 2 层单元要求。

2.3 加载条件及约束边界

陶瓷岩板三点弯曲试验采用位移加载的方式,为了使模拟具有真实性,该模拟在压杆、陶瓷岩板以及支撑杆设置了参考点(其中,RP-up 为载荷施加的参考点),如图 8 所示。为了防止陶瓷

岩板的滑移,支撑杆和陶瓷岩板之间设置耦合约束,约束方法为有限滑移,接触摩擦系数为 0.1。

陶瓷岩板三点弯曲试验时所受的幅值是随时间变化而变化的,采用 ABAQUS 有限元软件进行显示动力学分析时,需对增幅进行自定义,并通过时间对应幅值和时间间隔来控制加载速率。具体加载信息如表 5 所示。

2.4 有限元模拟结果

根据表 6 可知,当陶瓷岩板采用不同单元类型划分时,四面体单元(C3D4)类型仿真精度最高,但其计算时间过长;楔形单元类型和六面体单元类型两者仿真数值偏差较小,但六面体单元计算时间较长,所以,陶瓷岩板模型应选择 C3D6(楔形单元),其计算精度介于四面体和六面体之间,这样既保证运算的精度,又节省了运算时间。图 9 为不同划分层数的 C3D6 陶瓷岩板单元类型仿真结果与试验数据的误差曲线图,虽然随着厚度方向网格层数的加密仿真精度逐渐提高,但随着网格划分尺寸到达一定时,其计算精度趋于一定,中部应力的误差基本也在 8%左右,满足工程计算精度需求。

表 4 陶瓷岩板三点弯曲的材料参数

Tab. 4 Material parameters of three-point bending of ceramic slates

Material type	Elastic modulus/MPa	Poisson ratio	Density/(kg·m ⁻³)	Compressive strength/MPa
Structural steel	200000	0.30	7850	500
Ceramic slate	7338	0.22	2600	1200

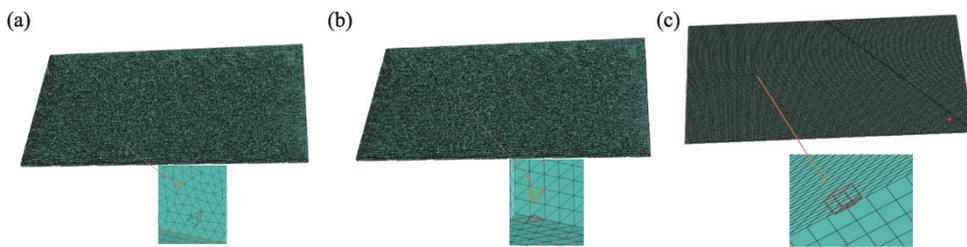


图 7 三种不同单元网格划分
Fig. 7 Three cell grids

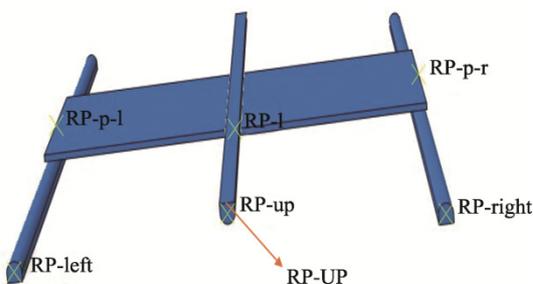


图 8 陶瓷岩板三点弯曲有限元模型
Fig. 8 Three point bending finite element model

表 5 载荷幅值和时间间隔

Tab. 5 Load amplitude and time interval

Time/s	Amplitude/mm
0	0
0.00016000	0.136612
0.00020800	0.150000
0.00080000	1.000000
0.00080001	0
0.00100000	0

表 6 不同单元模型仿真三点弯曲破坏载荷
Tab. 6 Three-point bending failure load simulated by using different element models

Grid cell type	Total number of cell grids	Simulation time/s	Simulated failure load/N	Deviation from test/%
C3D4	1064791	4159	668.138	7.4
C3D6	1030176	679	670.707	7.8
C3D8R	1035000	825	671.159	7.9

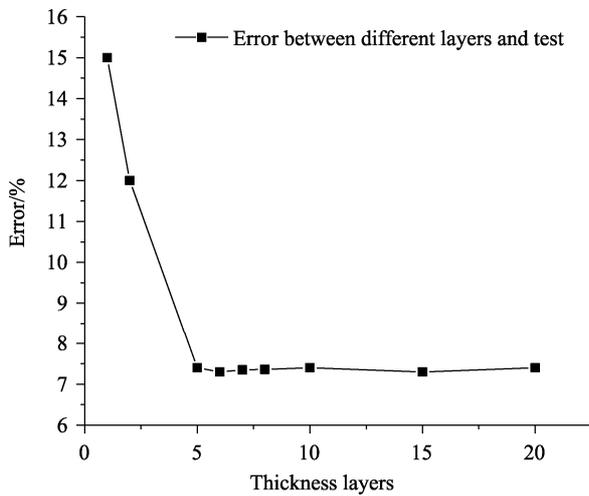


图 9 不同网格层数模拟结果与试验数据误差曲线
Fig. 9 Error curves of simulation results and test data for different grid layers

2.5 C3D6 模型有限元模拟结果

陶瓷岩板三点弯曲有限元模型通过 ABAQUS 显示动力学中求解器 Job 模块提交计算，可以得到 6 号样件 (600 mm×300 mm×6 mm) 的应力—应变曲线及载荷—位移曲线，以及陶瓷岩板最大应变为 0.16，极限抗弯应力为 1190 MPa，破坏载荷为 670.98 N，如图 10 所示。

为研究陶瓷岩板三点弯曲试验模拟数值，分别对 1~6 号陶瓷岩板样件开展了三点弯曲仿真研究，以参考点 RP-up 上的反作用力作为陶瓷岩板三点弯曲仿真破坏载荷，其对应的仿真结果如下表 7 所示。

2.6 试验与仿真对比分析

通过有限元软件对陶瓷岩板三点弯曲试验过程进行数值模拟，得到 6 组陶瓷岩板的破坏载荷 F ，模拟结果与试验数据对比如下表 8 所示。

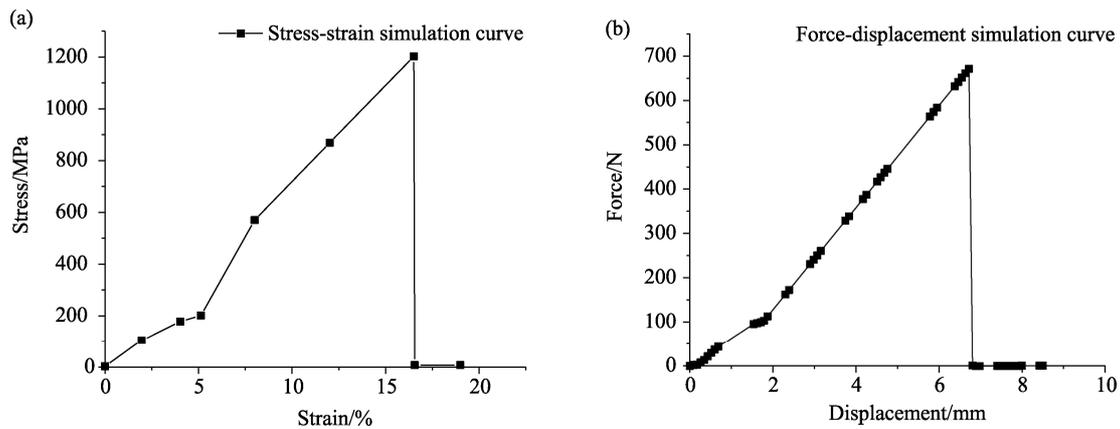


图 10 600 mm×300 mm×6 mm 陶瓷岩板分析结果曲线
Fig. 10 Analysis result curve of the ceramic slate (600 mm×300 mm×6 mm)

表 7 不同长宽比例的陶瓷岩板三点弯曲破坏载荷
Tab. 7 Three point bending failure strength of the ceramic slates with different length width ratios

No.	Length/mm	Width/mm	F/N
1	300	100	444.377
2	440	100	301.216
3	300	300	1342.170
4	400	300	1025.530
5	500	300	785.159
6	600	300	670.984

表 8 陶瓷岩板破坏载荷模拟计算和试验测试值
Tab. 8 Failure load simulation calculation and test value of the ceramic slates

No.	Simulated failure load/N	Test failure load/N	Deviation from test/%
1	444.377	426.26	4.3%
2	301.216	289.68	4.0%
3	1342.217	1278.26	5.0%
4	1025.530	941.87	8.9%
5	785.159	751.36	4.5%
6	670.984	622.18	7.8%

从表 8 可以得出仿真和试验的破坏载荷 F 误差范围在 4.3% ~ 8.9% 之间, 满足工程应用允许最大误差, 三点弯曲试验验证了陶瓷岩板有限元建模方法的准确性。基于 ABAQUS 有限元模拟计算数值比三点弯曲试验结果偏大。这是因为现实陶瓷岩板内部存在微裂纹以及小气孔, 而数值计算模型只考虑了撑杆与陶瓷岩板的摩擦; 说明了模拟计算与试验的可行性。

3 陶瓷岩板断裂数值模拟应用算例

陶瓷岩板作为面板材料, 其在使用过程中常会出现断裂的现象。为了使陶瓷岩板的应用更加广泛, 本文建立合理可靠的有限元分析模型对简支边缘约束和悬臂边缘约束两种约束条件的陶瓷岩板面板的最大承载力展开了研究, 具体模拟分析如下:

算例 1: 陶瓷岩板简支边缘约束时中心最大承载力分析。

本文对不同厚度的岩板桌面最大承载力进行了仿真分析, 具体如表 9 所示, 其对应厚度—承重曲线如图 12 所示。从三点弯曲试验可知陶瓷岩板的最大破坏强度 S 为 1200 MPa, 图 11 为 1 号样件(1 m×1 m×6 mm)在承重为 250.6 kg 时, 陶瓷岩板所受最大应力云图, 说明陶瓷岩板 250.6 kg 是试样 1 的极限载重。

从图 12 可知, 厚度为 6 mm 的岩板在 1.0 m×1.0 m 和 1.5 m×1.5 m 边缘约束条件下最大承载力分别为 250.6 kg 和 191.3 kg, 其承载力变化如表 9 所示。该次模拟结果可作为不同规格的陶瓷岩板面板的最大承载力的判断依据。

算例 2: 陶瓷岩板悬臂边缘约束最大承载力分析。

表 9 陶瓷岩板桌面最大承载力模拟

Tab. 9 Simulation of maximum bearing capacity of the ceramic slate desktop

No.	Desktop size/m	Thickness/mm	Max capacity/kg
1	1.0×1.0	6	250.6
2	1.0×1.0	8	389.7
3	1.0×1.0	9	463.8
4	1.0×1.0	10	538.7
5	1.0×1.0	12	608.3
6	1.5×1.5	6	191.3
7	1.5×1.5	8	330.7
8	1.5×1.5	9	400.5
9	1.5×1.5	10	479.4
10	1.5×1.5	12	547.1

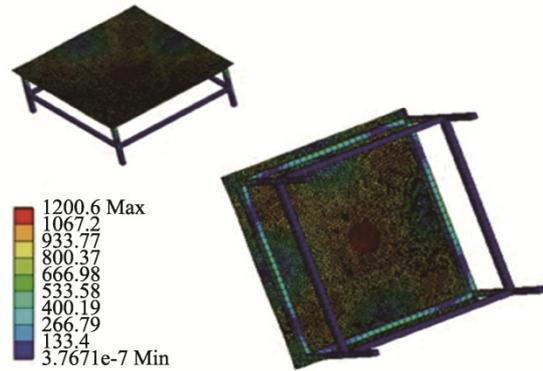


图 11 陶瓷岩板桌面最大应力云图

Fig. 11 Cloud chart of maximum stress on ceramic slate desktop

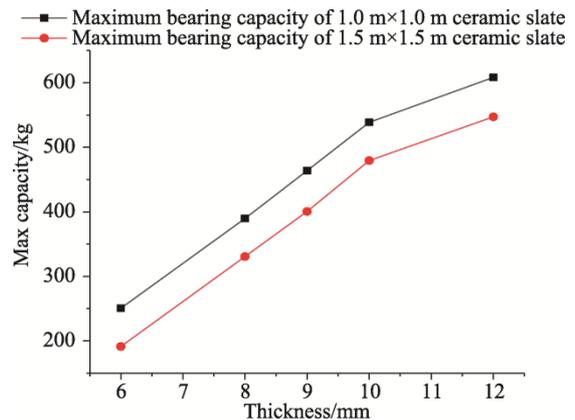


图 12 不同厚度陶瓷岩板的最大承载力曲线图

Fig. 12 Maximum load bearing curve of the ceramic slate with different thicknesses

陶瓷岩板在实际应用时, 陶瓷岩板边缘伸出长度 l 容易破损, 如图 13 所示。为探究陶瓷岩板伸出长度 l 与最大承载力的关系, 本文对五组不同大小 l 的最大承载力进行数值模拟, 具体如表 10 所示, 对应曲线如图 14 所示。

根据图 14 可知, 陶瓷岩板的伸出长度 l 为 0.2 m 时, 其最大承载力为 118 kg, 其承载能力变化如表 10 所示。该次模拟结果能较好预测陶瓷岩板悬臂边缘约束时的最大承载力。

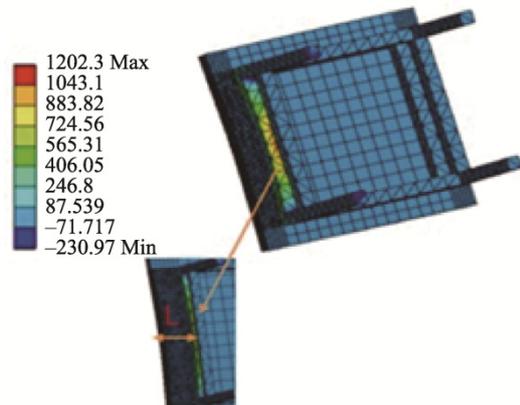


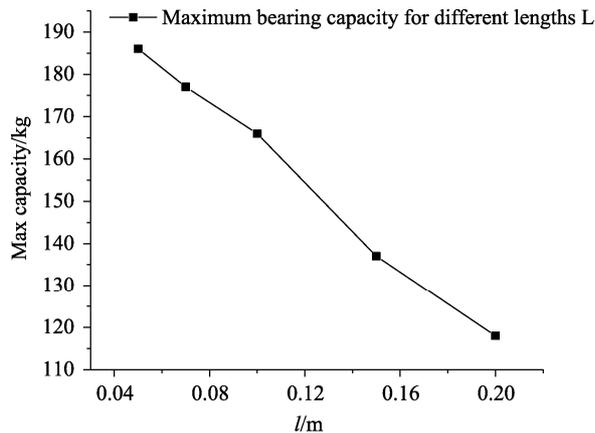
图 13 陶瓷岩板边缘最大应力云图

Fig. 13 Cloud chart of maximum stress at edge of the ceramic slate

表 10 陶瓷岩板边沿最大承载力分析

Tab. 10 Maximum load analysis of the ceramic slate edge

No.	Desktop size/m	l/m	Max capacity/kg
1	1.5×1.5	0.20	118
2	1.5×1.5	0.15	137
3	1.0×1.0	0.10	166
4	1.0×1.0	0.07	177
5	1.0×1.0	0.05	186

图 14 边沿长度 l 与陶瓷岩板最大承载力的关系曲线图Fig. 14 Curve chart of the relationship between l and the maximum bearing capacity of the ceramic slate

4 结 论

本文开展了陶瓷岩板抗弯曲性能试验及有限元分析计算研究,通过对 1~6 号陶瓷岩板样件的试验及仿真结果进行分析,结论如下:

(1) 通过对比陶瓷岩板样件的三点弯曲试验曲线与模拟曲线,确定了陶瓷岩板的破坏强度 S 为 1200 MPa、断裂模数 R 为 49.84 MPa、弹性模量 E 为 7338 MPa。对比 4 组岩板应力—应变曲线,其结果证明岩板具有各向同性力学性能。

(2) 对比三种有限元单元模拟结果确定 C3D6 单元为计算单元。采用 C3D6 单元且厚度方向均有 5 层的仿真模型进行计算,对比陶瓷岩板三点弯曲试验数据及有限元分析模拟结果,其最大误差为 8.9%。该对比试验验证了基于脆性材料破坏准则的陶瓷岩板三点弯曲瞬态动力学建模方法的可靠性以及力学参数的准确性。

(3) 在陶瓷岩板应用受力分析算例中,模拟计算了陶瓷岩板在边缘支承情况下,岩板厚度与其中心最大承载力的变化趋势曲线以及陶瓷岩板边

缘伸出长度 l 与最大承载力的变化趋势曲线,较好地预测了在边缘约束下的最大承载能力,为岩板的应用提供了分析依据。

参考文献:

- [1] SHAH S P. Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete [J]. Materials and Structures, 1990, 23(6): 461–465.
- [2] 王启智, 汪坤. 脆性材料三点弯曲试样的最大荷载及其挠度和刚度[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(6): 4–8. WANG Q Z, WANG K. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2005, 37(6): 4–8.
- [3] 庄蔚敏, 王楠, 吴迪, 等. 碳纤维复合材料层合板三点弯曲损伤仿真研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 109–114. ZHUANG W M, WANG N, WU D, et al. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 109–114.
- [4] 任会兰, 方敏杰, 贺建华. 压缩载荷下陶瓷材料声发射特性的实验研究[J]. 材料工程, 2012(2): 30–34, 54. REN H L, FANG M J, HE J H. Journal of Materials Engineering, 2012(2): 30–34, 54.
- [5] 许良, 肖景厚, 宋万万, 等. 碳纤维复合材料层合板三点弯曲疲劳性能[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-10[2023-08-02]. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20220337.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 3810.4—2016, 陶瓷砖试验方法—第 4 部分: 断裂模数和破坏强度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [7] 许金泉. 材料强度学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2009.
- [8] 杜付成, 潘利敏, 李惠文, 等. 全抛釉瓷质仿古砖断裂模数影响因素的研究[J]. 佛山陶瓷, 2013, 23(5): 28–30. DU F C, PAN L M, LI H W, et al. Foshan Ceramics, 2013, 23(5): 28–30.
- [9] 朱文斌. 陶瓷砖断裂模数测量结果的不确定度评定[J]. 陶瓷, 2010(9): 52–54. ZHU W B. Ceramics, 2010(9): 52–54.
- [10] 高秀敏, 聂光临, 包亦望. 拟涂层法评价薄陶瓷基片的弯曲强度及弹性模量[J]. 陶瓷学报, 2018, 39(4): 463–467. GAO X M, NIE G L, BAO Y W. Journal of Ceramics, 2018, 39(4): 463–467.
- [11] 谢悦增, 饶德林, 林克辉, 等. 瓷砖的残余应力与表征研究进展[J]. 陶瓷学报, 2022, 43(6): 987–993. XIE Y Z, RAO D L, LIN K H, et al. Journal of Ceramics, 2022, 43(6): 987–993.
- [12] 李文虎. Al₂O₃/TiAl 复合材料的制备与性能研究[J]. 陶瓷学报, 2009, 30(1): 40–43. LI W H. Journal of Ceramics, 2009, 30(1): 40–43.