



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目：多孔柱壳在轴压载荷下的剩余承载能力规律
作者：罗俊豪，李翔宇，彭永，张克钊
收稿日期：2025-08-06
网络首发日期：2026-04-20
引用格式：罗俊豪，李翔宇，彭永，张克钊. 多孔柱壳在轴压载荷下的剩余承载能力规律[J/OL]. 国防科技大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20260417.1319.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11887/j.issn.1001-2486.25080006

多孔柱壳在轴压载荷下的剩余承载能力规律

罗俊豪¹, 李翔宇¹, 彭永¹, 张克钊^{2*}

(1. 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学试验训练基地, 陕西 西安 710010)

摘要: 为揭示多孔柱壳在轴压载荷下的剩余承载能力规律, 满足航空航天等领域的安全设计需求, 采用准静态试验、数值仿真与机器学习相结合的方法开展研究: 通过试验获得基础规律, 建立仿真基准数据; 基于验证的有限元模型, 分析三参数交互作用下的柱壳响应特性; 引入神经网络模型与沙普利可加性解释 (Shapley additive explanations, SHAP) 分析, 量化参数贡献度。结果表明: 孔半径 r 是剩余承载能力下降的主因, 随 r 增大剩余承载能力显著下降; 孔间距 d 的影响受 θ 与 r 调控, 调控作用随 r 增大更显著; 孔排布角 θ 总体与剩余承载能力正相关, 但特殊情况下会诱发剪切破坏, 导致剩余承载能力非单调性降低。SHAP 分析显示 r 、 θ 、 d 的贡献度依次递减, 三者存在显著交互作用。结论可为含孔柱壳结构的参数优化与承载性能提升提供量化参考。

关键词: 多孔柱壳; 轴压载荷; 剩余承载能力; 孔洞几何参数; SHAP 分析

中图分类号: O343.9 文献标志码: A

The law of remaining bearing capacity of cylindrical shells with cutouts under axial compression load

LUO Junhao¹, LI Xiangyu¹, PENG Yong¹, ZHANG Kefan^{2*}

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China; 2 Test Center, National University of Defense Technology, Xi'an, 710010, China)

Abstract: To investigate the laws governing the remaining bearing capacity of cylindrical shells with multiple cutouts under axial compression and meet the safety design requirements in aerospace and other fields, quasi-static tests, numerical simulations, and machine learning were combined to conduct the study. Fundamental regularities were obtained from tests to establish simulation benchmark data; based on a validated finite element model, the response characteristics of cylindrical shells under the interaction of three parameters were analyzed; a neural network model and SHAP (Shapley additive explanations) analysis were introduced to quantify the contribution of each parameter. The results show that the cutout radius r is the primary factor causing the reduction of remaining bearing capacity, and the remaining bearing capacity decreases significantly as r increases. The effect of cutout spacing d is regulated by θ and r , and this regulatory effect becomes more pronounced as r increases. The cutout arrangement angle θ is generally positively correlated with the remaining bearing capacity, but in special cases, it induces shear failure, leading to non-monotonic reduction of the remaining bearing capacity. SHAP analysis shows that the contribution degrees of r , θ , and d decrease in sequence, and there are significant interaction effects among the three parameters. The conclusion provides a quantitative reference for the parameter optimization and load-bearing performance improvement of cylindrical shells with cutouts.

Keywords: cylindrical shells with multiple cutouts; axial compression load; remaining bearing capacity; geometric parameters of cutouts; SHAP analysis

收稿日期: 2025-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12472399)

第一作者: 罗俊豪 (2001—), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, E-mail: 1411927322@qq.com

*通信作者: 张克钊 (1994—), 男, 黑龙江鹤岗人, 助理研究员, 博士, E-mail: kfzhang_v@163.com

引用格式: 罗俊豪, 李翔宇, 彭永, 等. 多孔柱壳在轴压载荷下的剩余承载能力规律[J]. 国防科技大学学报,

Citation: LUO Junhao, LI Xiangyu, PENG Yong, et al. Study on the law of remaining bearing capacity of cylindrical shells with cutouts under axial compression load[J]. Journal of National University of Defense Technology,

圆形柱壳因其轻质、高效的承载特性，广泛应用于航空航天、压力容器及海洋工程等领域，服役中常承受轴向压缩载荷。为满足管线敷设、观测等功能，结构中难免引入孔洞，此类特征会引发应力集中、改变屈曲模态，导致极限承载能力下降。在军事领域，圆柱壳是导弹弹体的常见结构，若遭破片式战斗部毁伤，弹体将产生穿孔损伤，致使壳体承载性能下降，甚至引发结构解体。随着破片战斗部向线列式演进，其产生的线性密集穿孔将引发更强的应力集中与协同效应，导致承载性能更严重的退化。因此，精准评估含孔洞柱壳的剩余承载能力、明确孔洞结构参数的影响规律，对工程结构的安全设计与武器装备性能优化具有重要理论与实践价值。

在孔洞几何参数的影响研究中，Tennyson^[1]最早通过实验发现：轴压作用下，当圆孔半径与壳体半径之比超过 5% 时，临界载荷显著下降；Starnes^[2]进一步提出孔洞几何参数 $\alpha = r/\sqrt{Rt}$ (r 为孔半径， R 为壳体半径， t 为壳体厚度) 为关键指标， α 较小时临界载荷变化平缓，超过阈值后壳体发生局部屈曲，承载性能骤降；Brush 等^[3]通过有限元分析验证了这一结论，并指出径厚比越小，结构对开孔越敏感；贾朝阳等^[4]进一步证实，薄壁圆柱壳屈曲承载能力随开孔尺寸增大近似呈指数函数关系迅速降低。Kim 等^[5]针对层合复合圆柱壳的圆形开孔，提出基于均匀化方法与 Ritz 法的简化理论，其预测的临界屈曲载荷与有限元结果差异 $\leq 8.2\%$ ，计算效率显著高于有限元法。近期，Rezaee 等^[6]针对“压缩+弯曲”组合载荷下的单孔柱壳屈曲行为开展了研究，推导了可量化开孔削弱效应的经验公式。此外，他们还对比了柱壳顶部边缘转动约束和自由转动时的壳体屈曲行为，其结果表明顶部边缘自由转动的试件出现了更显著的应力集中，同时屈曲承载力随开孔尺寸的增大呈现更明显的下降^[7]。

由于工程实践中矩形、椭圆形等非圆孔结构的广泛应用，开孔形状的影响也逐渐成为研究焦点。Toda^[8]提出相同开孔面积下，孔洞形状对临界载荷的影响不显著；Jullien 等^[9]通过开矩形孔柱壳的实验与数值模拟发现，孔洞几何参数 $\bar{r} = R\theta/(2\sqrt{Rt})$ (θ 为开孔中心角) 是影响临界载荷的关键因素。

此外，李冬等^[10]研究了矩形开孔的轴向高度、水平角度及数量对屈曲性能的影响，发现开孔临近固结边界时临界屈曲载荷提高，且多开孔相互远离时可增加临界屈曲载荷，为复杂开孔布局的工程结构提供了参考。

圆柱壳自身高径比与径厚比同样显著影响其屈曲性能。Jullien 等^[9]的研究表明，屈曲临界载

荷随高径比增大而减小，且存在渐近极限。张苗苗等^[11]针对含椭圆孔圆柱壳的研究显示，径厚比和长径比变化会显著改变屈曲失效载荷；宋波^[12]和王志高等^[13]都以含矩形大开孔的薄壁圆柱壳为研究对象，指出径厚比是影响矩形大开孔薄壁圆柱壳稳定性的关键因素。Zhao 等^[14]基于 Sander 非线性壳理论，建立了厚度、弹性模量分段变化的阶梯式圆柱壳统一理论框架。

然而，如何量化并比较各参数对结构承载性能的影响程度，是传统因素分析法所难以实现的。近期，Lin 等人^[15]以人工神经网络为模型，利用改进能量壁垒法^[16]实现对局部轴向受压圆柱壳屈曲下限设计载荷的预测，其输入包括 6 个几何参数、3 个材料参数和 1 个局部轴向受压参数。但是如何确定神经网络模型中各参数对预测结果的贡献值，是一个值得探讨的问题。为此，Lundberg 等人^[17]将博弈论中的 Shapley 值引入机器学习领域，提出沙普利可加性解释 (Shapley additive explanations, SHAP) 方法用以解决上述问题^[18-19]。

目前，已有研究多以单孔结构为主，对多孔结构中孔洞间的相互作用关注不足；同时缺乏对各参数贡献度的量化评估，无法为工程设计提供明确的优化方向。针对现有研究的局限，将受线列式战斗部毁伤穿孔的导弹目标壳体简化为含线性三孔洞的圆柱壳结构，以其为研究对象，通过准静态压缩试验初步得到孔洞参数对柱壳极限承载能力的影响规律及基准数据；在此基础上以有限元数值仿真为主要手段，探究孔洞尺寸、间距、排布角度对孔间应力叠加效应与屈曲模态演化的作用机制；同时引入 SHAP 方法量化各参数对承载性能的贡献度，明确关键影响因素及其作用方向。成果可为工程结构的安全设计、性能优化及失效预警提供理论依据与量化参考。

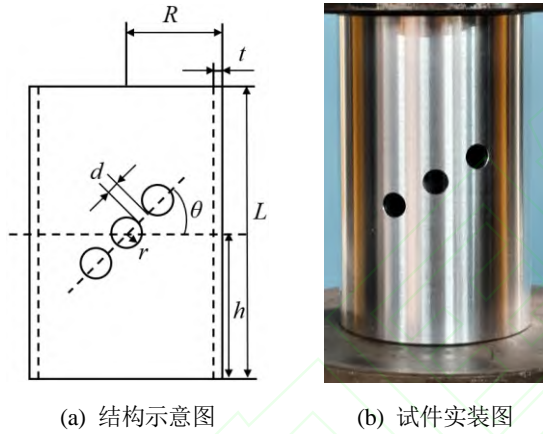
1 多孔柱壳轴压试验研究

结构中存在的孔洞等不连续特征会引发周围区域的应力集中效应，改变结构内部的应力分布模式，加速材料的屈服萌生。因此，圆孔的存在会显著影响圆柱壳屈曲临界载荷及屈曲形貌。然而单孔引发的应力集中影响范围有限，且其影响程度与孔径直接相关。当孔径较小时，结构的承载性能与屈曲特性通常无明显影响^[2]。与单孔结构相比，多孔结构不仅导致柱壳有效截面积减小，还会引发应力集中效应的叠加，进而扩大应力集中的作用范围。为探究孔间相对位置关系对上述

叠加效应的影响机制，揭示这种影响如何改变柱壳承载性能与屈曲特性，本节选取孔半径 r 、孔间距 d 和排布角度 θ 作为关键参数展开试验研究。

1.1 试件设计

准静态轴压试验基于液压伺服试验机开展，试验过程中通过力-位移控制模式，以 10 mm/min 的加载速率施加轴向载荷，实时采集力与位移数据。所用试件的结构示意图如图 1 所示，其几何参数为：壳体壁厚 $t=2$ mm，外半径 $R=25$ mm，长度 $L=80$ mm，中心孔洞的圆心位于柱壳轴向中点位置。图中 r 代表单个圆孔的半径； d 为孔间距，即沿圆柱壳外表面两孔圆心间的最短测地线距离； θ 为孔排布角度，定义为圆心连线与柱壳径向平面之间的夹角。所有孔洞尺寸一致，开孔方向均沿壳体径向。试件材料选用广泛应用于航空航天领域结构制造的 2A12 铝合金。



(a) 结构示意图 (b) 试件实装图
图 1 含孔柱壳试件

Fig.1 Cylindrical shell specimen with cutouts

柱壳极限承载能力是指结构在荷载作用下所能承受的最大荷载值，在此状态时结构已出现显著的塑性变形，但仍能保持平衡而不发生无限制的变形或倒塌。取试验中力-位移曲线所记录的最大载荷为结构极限承载能力。

为了更直观地反映孔洞存在对柱壳承载性能的影响，引入“剩余承载能力”作为归一化特征量，定义为含孔柱壳极限承载能力与相同几何尺寸无孔柱壳极限承载能力的比值，公式如下：

$$\delta_i = \frac{A_i}{A} \quad (1)$$

式中， A 为特定几何尺寸下无孔柱壳的极限承载能力， A_i 为相同几何尺寸但具有不同孔洞几何参数的柱壳极限承载能力。

为初步掌握各参数对柱壳剩余承载能力与屈

曲形貌的影响规律，并为后续数值仿真研究提供试验依据，本节分别以 r 、 d 、 θ 作为变量设计工况开展试验研究。基于 Starnes^[2] 提出的 $\alpha = r/\sqrt{Rt}$ 关键阈值范围，设计孔半径 r 取值范围为 [1 mm, 4 mm]。同时将 d 的取值范围设置为 [2 mm, 8 mm]，以便探究孔距变化对孔洞间相互作用的影响。为利于呈现更加显著的变化规律，结合预仿真研究，将对照组的 r 固定为 3 mm， d 固定为 6 mm。具体参数设置如表 1 所示。

表 1 准静态压缩试验工况设计

Tab.1 Design of quasi-static compression test conditions

编号	孔半径 r /mm	孔间距 d /mm	孔排布角 $\theta/^\circ$
1	1	6	0
2	2	6	0
3	3	6	0
4	4	6	0
5	3	2	0
6	3	4	0
7	3	8	0
8	3	6	30
9	3	6	60
10	3	6	90
11	无孔		

1.2 孔周应力分布的理论解

对于受轴向压缩的薄壁圆柱壳，孔边缘会产生显著的应力集中现象，而由此造成的应力分布变化正是决定结构屈曲与失效行为的核心因素。相较于壳体自身几何特征而言，研究对象所含孔洞尺寸较小，因此可将其简化为无限大平板上的圆孔周围应力分布问题。

对于无限大薄板中受远场均匀压应力 σ 的单个圆孔，其孔周应力的弹性解析解为：

$$\begin{cases} \sigma_\rho = \frac{1}{2}\sigma\left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right) + \frac{1}{2}\sigma\left(1 - \frac{4r^2}{\rho^2} + \frac{3r^2}{\rho^4}\right)\cos 2\beta \\ \sigma_\beta = \frac{1}{2}\sigma\left(1 + \frac{r^2}{\rho^2}\right) - \frac{1}{2}\sigma\left(1 + \frac{3r^2}{\rho^4}\right)\cos 2\beta \\ \tau_{\rho\beta} = \frac{1}{2}\sigma\left(1 + \frac{2r^2}{\rho^2} - \frac{3r^2}{\rho^4}\right)\sin 2\beta \end{cases} \quad (2)$$

其中， ρ 和 β 表示薄板上某点的极坐标，如图 2 所示。

当 $\rho=r$ 时，孔边缘上的应力分布为：

$$\begin{cases} \sigma_\rho = 0 \\ \sigma_\beta = \sigma(1 - 2\cos 2\beta) \\ \tau_{\rho\beta} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

因此应力最大值出现在垂直于应力场的孔边缘处，即当 $\beta=\pi/2$ （或 $3\pi/2$ ）时所对应的 P 点。

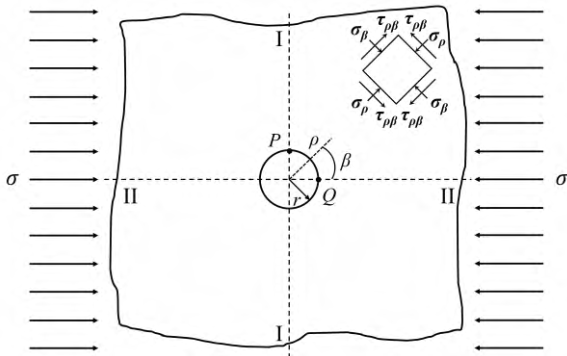


图2 压缩载荷下的单孔无限薄板

Fig.2 Infinite thin plate with a single cutout under compressive load

σ_β 在圆孔周围的分布情况如图3所示，可见其影响范围有限。由此可知，当柱壳存在多个圆孔时，若孔间距 d 小于应力集中区域的影响范围，相邻孔的应力场会发生叠加，导致孔间区域应力显著升高。显然，叠加效应的强弱与孔间相对位置关系（孔间距 d 、排布角 θ ）密切相关。

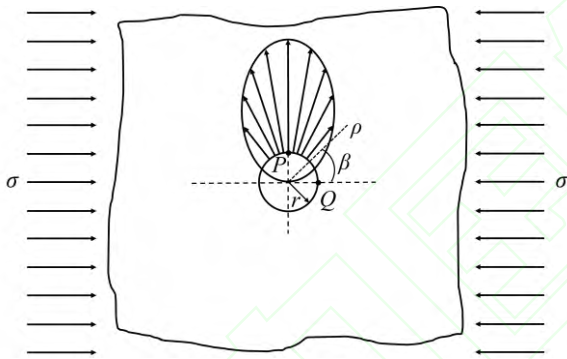


图3 孔边缘上周向应力分布

Fig.3 Circumferential stress distribution on cutout edge

1.3 试验结果-屈曲形貌

部分工况的试验后柱壳形貌如图4所示。将图4(a)与图4(b)进行对比，无孔柱壳的屈曲集中于近固支端，这是由于固支约束对壳体径向位移和转动形成完全限制，在边界附近产生显著的约束应力与较高的应力梯度，使该区域成为几何不连续与刚度变化的敏感区；同时，实际结构中存在的初始几何缺陷在边界约束作用下更易被放大，促使屈曲波在此处优先萌生与发展。而含孔柱壳因孔间应力叠加效应改变了应力分布梯度，使得屈曲起始位置转移至孔洞所在的中央截面。这一现象表明，孔洞引发的应力场重构是调控屈曲行为为空间特征的核心机制。结合应力分析可知，孔径增大与孔距减小会显著增强应力叠加效应：

当 r 增大时，单孔应力集中区域范围扩大；当 d 减小时，相邻孔的应力场重叠度提高，两者共同加剧了对屈曲形貌的影响。特别地，当孔距 d 较小时，孔间有效连接区域缩减与应力水平升高的耦合作用，会加速结构断裂失效，如图4(d)所示。

一般而言，柱壳的极限承载能力与其临界屈曲载荷一致，孔洞通过影响应力分布改变柱壳屈曲特性，进而影响其极限承载能力。但若结构的断裂发生于屈曲之前，此时材料特性成为影响结构极限承载能力的主要因素，则柱壳承载性能随孔洞参数的变化规律将发生改变。

值得注意的是，孔排布角 θ 的变化会导致结构失效形式的显著差异。如图4(c)所示， θ 为 0° 时，柱壳表现为屈曲变形；当 $\theta=30^\circ$ 时，孔间区域出现明显断裂，这是由于 θ 增大使孔间应力集中叠加场呈现倾斜分布，导致该区域材料失效形式由轴压屈服向剪切破坏转变，结构起裂点位于孔的水平端点，即图2所示点 P 。当 θ 继续增大至 60° ，柱壳不再出现裂纹，柱壳屈曲形变更加显著并由局部屈曲过渡为全局屈曲。

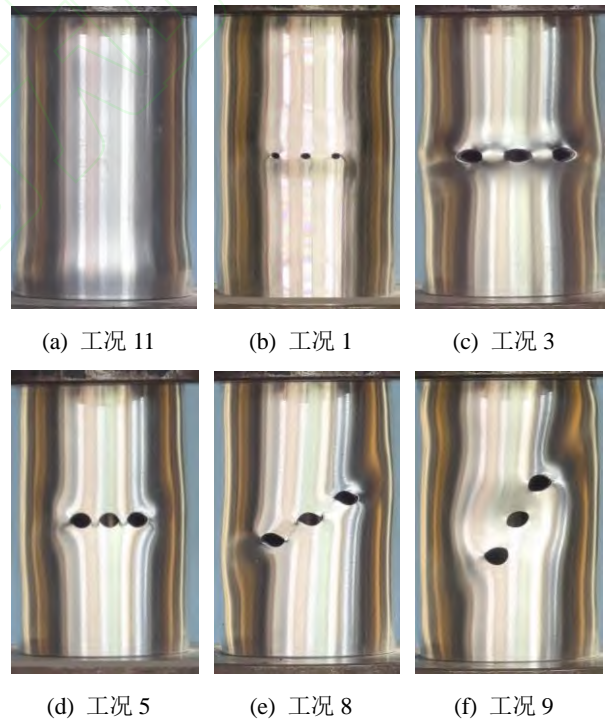


图4 试件屈曲形貌

Fig.4 Buckling morphology of specimens

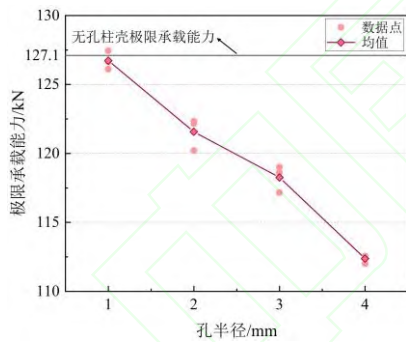
1.4 试验结果-剩余承载能力

为降低随机误差对试验结果的干扰，各工况重复试验3次，取均值作为该工况下柱壳的极限承载能力，结果如图5所示。图中水平实线代表无孔柱壳的极限承载能力，试验均值为127.1 kN。

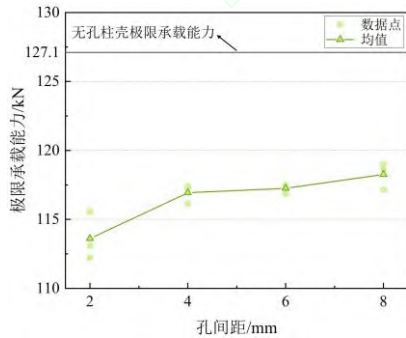
工况 1 的试验结果表明,当 $r=1\text{ mm}$ 、 $d=6\text{ mm}$ 时,小孔的存在对结构极限承载能力的影响微弱。此时因随机误差导致的结果波动甚至超过孔洞自身的影响,因而出现个别含孔柱壳极限承载能力略高于无孔柱壳的情况。

依图 5(a)与图 5(b)结果可知,孔径的增大显著降低柱壳承载性能,而孔距的增加对结构剩余承载能力的影响有限。 d 由 2 mm 增至 4 mm 时,柱壳剩余承载能力有一定的上升,后续随 d 的继续增加仅有微幅提高。该现象证明,孔距通过影响孔间应力的交互作用改变柱壳的屈曲进程,进而影响其承载性能。但单孔所能产生的应力集中效应分布范围有限,因此当孔距增大至一定程度后,各孔将趋于独立,应力的叠加效应减弱直至消失,剩余承载能力不再随孔距显著变化。

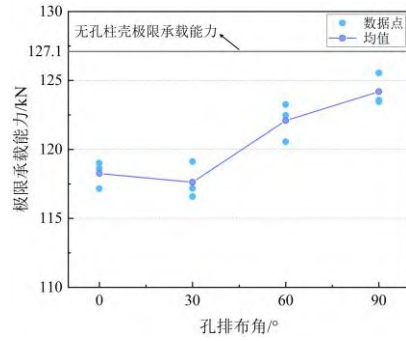
考察孔排布角 θ 对柱壳承载性能的影响,总体呈现正相关趋势,即 θ 增大有助于提升剩余承载能力,如图 5(c)所示。然而, θ 由 0° 增至 30° 时,结构承载性能略有下降,与总体趋势不符。对比图 6 所示工况 7 与 8 的试验力-位移曲线可知,当 θ 为 30° 时,柱壳在达到其临界屈曲载荷前出现断裂,导致结构承载性能降低,这与 1.3 节中屈曲形貌分析的失效形式转变规律一致。



(a) 孔半径



(b) 孔间距



(c) 孔排布角

图 5 各参数影响下的结构极限承载能力试验结果

Fig.5 Test results of structural ultimate bearing capacity under the influence of various parameters

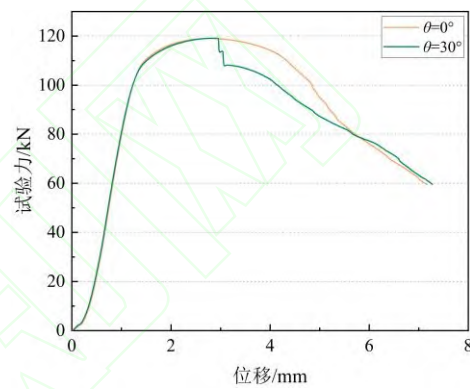


图 6 试验力-位移曲线

Fig.6 Test force-displacement curve

孔排布角 $\theta=30^\circ$ 时,相邻孔洞的应力集中区域叠加场呈现倾斜分布。这种倾斜的应力叠加模式改变了孔间区域的受力状态,使得该区域不仅承受轴向压缩应力,还额外产生显著的剪切应力。试验所用 2A12 铝合金虽具有较好的轴向抗压性能,但抗剪能力相对较弱。当 $\theta=30^\circ$ 时,孔间区域的剪切应力因倾斜应力场而显著升高,超过了材料的抗剪极限,导致材料失效形式从 $\theta=0^\circ$ 时的“轴压屈服主导的屈曲变形”转变为“剪切破坏主导的断裂”。结构在达到临界屈曲载荷前就因剪切断裂而丧失承载能力,表现为剩余承载能力的异常下降。

2 多孔柱壳轴压有限元计算分析

2.1 模型建立

为进一步探究 r 、 d 、 θ 复合影响下的柱壳承载性能变化规律,同时掌握结构内部应力分布特性,本节建立与试验试件结构相同的有限元模型(如图 7 所示),并基于 ls-dyna 开展数值仿真研究。柱壳模型采用 shell 单元,依图 8 所示为模型

添加边界条件：结构下端边缘采用全固定约束，上端节点仅允许沿单轴压缩方向运动，其余方向自由度均被限制。对壳体上边缘施加匀速向下的均匀轴向位移载荷，以保证计算过程中壳体上边缘始终保持平面状态。

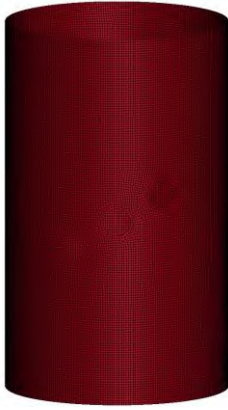


图7 有限元模型
Fig.7 Finite element model

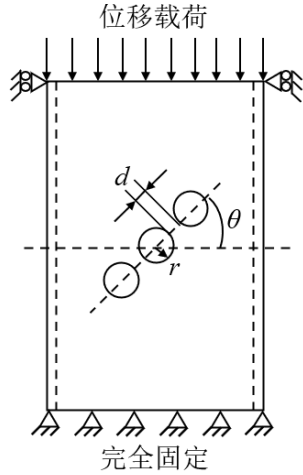


图8 边界条件示意图
Fig.8 Schematic diagram of boundary conditions

2.2 网格收敛性

在结构准静态压缩的数值仿真研究中，需重点考察结构的屈曲形貌及应力分布特征，而孔洞引发的应力集中效应对此类现象具有显著影响。为确保有限元模型能够准确复现结构的形变与应力分布特征，为后续对比分析提供可靠基础，需要首先开展网格收敛性验证。

基于图9所示的网格收敛性分析结果，当网格尺寸从2 mm逐步细化至0.5 mm时，柱壳极限承载能力的数值仿真结果呈现明显收敛趋势，但其计算时长随网格细化呈非线性激增。进一步对比可知，相较于0.5 mm网格，采用0.25 mm的更精细网格时，极限承载能力的计算结果未发生变化，但计算时间陡增至前者的4倍；而与0.75 mm网格相比，0.5 mm网格的计算结果稳定性更优，且计算时长处于可接受范围。综合权衡计算精度、计算效率及几何离散适应性，0.5 mm网格在三者间达到最优平衡，据此开展多孔柱壳轴压有限元计算分析。为避免0.5 mm的全局网格在模拟 $r=1$ mm孔洞时可能带来的精度不足，对该尺寸工况引入了孔周局部网格加密，以评估其必要性。对比研究发现：局部加密会对孔洞周边的应力数值产生影响，但对应力分布的整体模式与结构的极限承载能力均影响甚微。鉴于此，为平衡计算精度与效率，最终采用的策略是：主体模

型仍采用0.5 mm网格，仅对 $r=1$ mm这一特定工况进行局部加密。

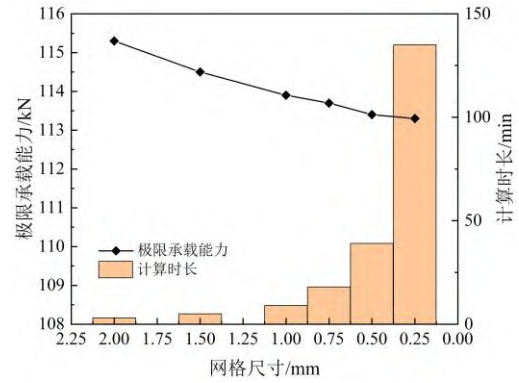


图9 网格尺寸对极限承载能力及计算时间的影响
Fig.9 Influence of mesh size on ultimate bearing capacity and calculation time

2.3 有效性验证

对比试验与仿真获得的结构极限承载能力，结果如图10所示。可见，试验值与仿真结果的离散点分布趋势基本吻合，无系统性偏差，呈现出较为一致的变化规律，表明仿真模型能够较准确地反映柱壳在轴压作用下承载性能变化特征。

两者之间的差异主要来源于材料本构简化以及模型理想化。数值仿真采用本构模型对结构材料进行描述，将不可避免的存在理论与实际的误差；此外，仿真模型未考虑试件加工过程中不可避免的微小初始几何缺陷，而此类缺陷会轻微降低结构屈曲临界载荷，进一步扩大仿真计算误差。

进一步计算两者相对差值：

$$\Delta_{RD} = \frac{F_{Si} - F_{Ti}}{F_{Ti}} \quad (4)$$

其中， F_{Si} 为仿真结果， F_{Ti} 为试验结果， i 为工况编号。计算结果如图11所示，所有工况的相对差值均控制在 $\pm 5\%$ 以内，其中多数工况的差值集中在 $\pm 3\%$ 范围内，处于可接受区间，因此仍可验证数值模型在极限承载能力预测方面的精度。

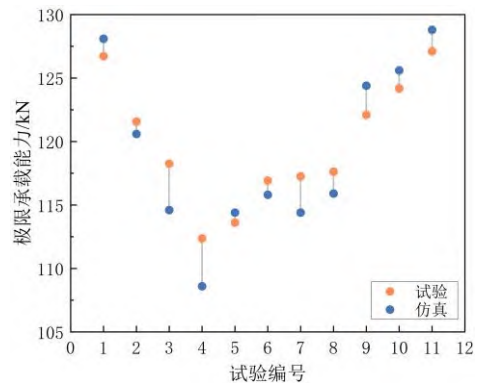


图10 试验与仿真结果对比

Fig.10 Comparison between test and simulation results

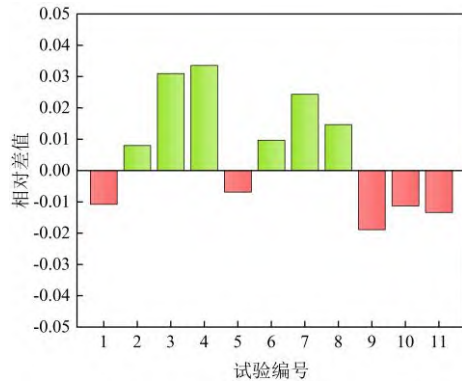


图 11 试验与仿真相对差值

Fig.11 Relative difference between test and simulation

结构屈曲形貌的吻合性是验证模型有效性的另一关键指标,图 12 展示了典型工况下试验与仿真的柱壳形貌对比。例如,工况 11(无孔柱壳)的试验与仿真结果均呈现出近固支端的整体屈曲特征,屈曲波数与变形幅度基本一致;工况 3 中,两者均在中央截面孔洞区域出现明显的局部屈曲,且屈曲凹陷的位置与范围相互匹配;工况 8 和工况 9 的对比则表明,仿真模型能够复现试验中孔间区域的剪切破坏和全局屈曲形态,并还原裂纹产生的位置与扩展趋势。

综上,无论是极限承载能力的数值精度,还是屈曲形貌与破坏模式的一致性,数值仿真结果均与试验数据保持良好吻合,充分验证了所建立有限元模型的有效性,为后续参数影响分析奠定了可靠基础。



图 12 试验与仿真的柱壳形貌对比

Fig.12 Comparison of cylindrical shell morphology between test and simulation

2.4 参数影响

准静态轴压试验结果仅能表示单一参数改变时,柱壳承载性能的相应变化,其展现的规律有限。为了掌握各孔洞几何参数复合影响下的结构剩余承载能力变化规律,将 r 、 d 、 θ 同时作为变

量进行析因设计,因子水平分别为 5、5、4,如表 2 所示。柱壳其他几何参数与试验保持一致并固定不变,因而工况总数为 $5 \times 5 \times 4 = 100$ 。为便于区分,规定工况编号规则为: $r-d-\theta$,例如工况 1-2-0 表示孔半径 $r=1$ mm,孔间距 $d=2$ mm,孔排布角 $\theta=0^\circ$ 的柱壳结构。

表 2 数值仿真参数设置

Tab.2 Parameter settings for numerical simulation

变量	变量取值范围
r/mm	1、2、3、4、5
d/mm	2、4、6、8、10
$\theta/^\circ$	0、30、60、90

已有研究表明,当单孔柱壳结构的孔径较小时,孔洞存在几乎不影响柱壳极限承载能力^[2-3],这一结论在多孔柱壳结构同样有所体现。如图 13 为部分工况下的柱壳剩余承载能力变化情况,当 $r=1$ mm、 $d=2$ mm 时,即使各孔引起的应力集中效应出现了图 14 所示的叠加现象,结构内部应力分布仍较为均匀,因此柱壳极限承载能力几乎未有变化,其剩余承载能力约等于 1。考虑到实际应用场景下的孔洞数量有限,且必定存在一定的孔洞间距,可将 Starnes^[2]等人的结论延伸至多孔柱壳结构,即增加小尺寸孔洞的数量无法对结构承载性能产生明显影响。

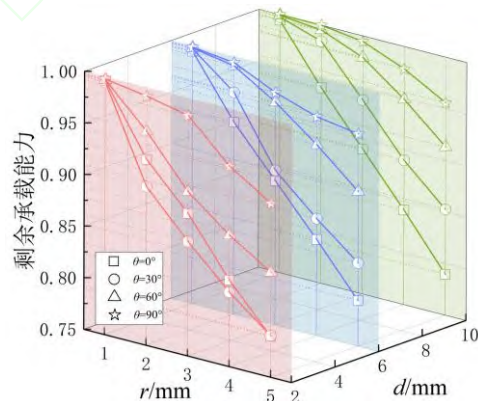


图 13 部分工况的数值仿真结果

Fig.13 Numerical simulation results of partial cases

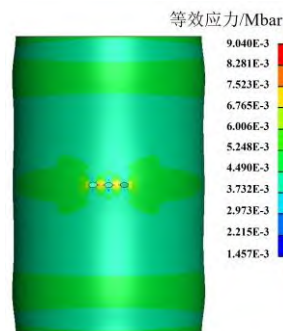
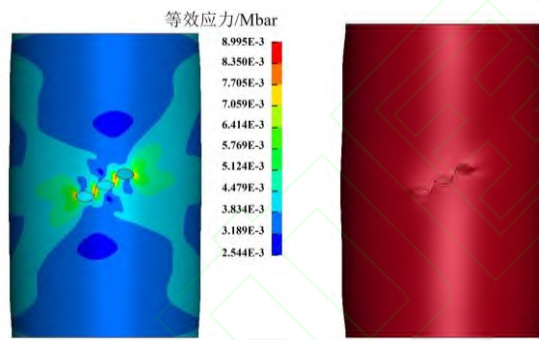


图 14 工况 1-2-0 应力分布云图

Fig.14 Stress distribution nephogram of case 1-2-0

李冬^[10]在考察开孔数量对柱壳极限承载能力的影响时,仅聚焦于孔洞沿壳体中央水平面排布的单一情形,因此研究结论的适用范围存在一定局限性。鉴于此,在其基础上,通过引入孔洞排布角 θ 这一参数,进一步拓展了对不同孔洞空间分布模式下柱壳承载性能变化规律的探究。研究表明,随着孔径的增大,排布角 θ 对柱壳承载性能的影响逐渐展露,总体表现为:结构剩余承载能力随排布角的增大而增大。正如 1.4 节所述, θ 由 0° 增至 30° 时,结构剩余承载能力因材料剪切破坏而出现反常的下降,图 15 的仿真应力云图证实了这一结论。孔间应力集中带的倾斜分布将逐渐增强孔间区域材料所受剪切力,导致抗剪能力相对较弱的 2A12 铝合金材料更易失效从而引起结构破坏,进而削弱结构承载性能。特别地,当孔距较小时,应力叠加效应强,且孔间连接区域小,材料破坏进程加速,导致 $\theta=30^\circ$ 时的结构剩余承载能力较 0° 更低。随着孔间距 d 的增大,孔间相互影响减弱的同时连接部分拓宽,孔间区域的剪切破坏推后甚至消失,结构剩余承载能力随 θ 的增大呈正相关变化。



(a) 应力分布 (b) 孔间裂纹

图 15 工况 2-2-30 仿真结果

Fig.15 Simulation results of case 2-2-30

当孔距增大,应力叠加效应减弱,柱壳首先达到其临界载荷,其后才可能出现材料失效。此时结构承载性能不再受材料失效的影响,转而受制于壳体内部的应力分布特性。如图 16 所示为孔洞 $r=3\text{ mm}$ 、 $d=6\text{ mm}$ 时,柱壳达到其极限承载能力时的应力分布云图。从图 16(a)至图 16(d), θ 的改变直接对孔间应力叠加产生干预,孔周围的高应力区域形态与范围均有所不同,体现出应力叠加效应被重塑;与此同时,结构整体的应力分布出现显著差异,随着 θ 的增大,高应力区域扩展趋势趋于平缓,这说明 θ 的增大可对应力增长速率起到延缓作用,同时弱化局部应力集中程度。

应力分布的均匀化削弱了孔洞存在对柱壳承载性能的影响,提高了其剩余承载能力。

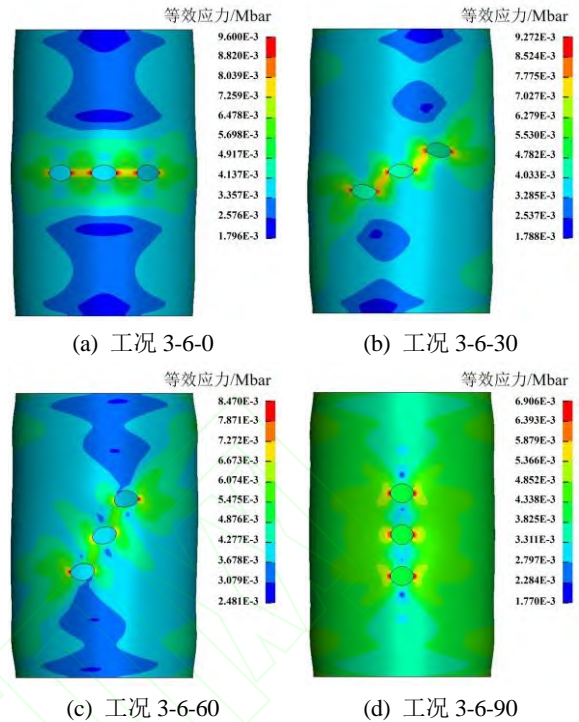
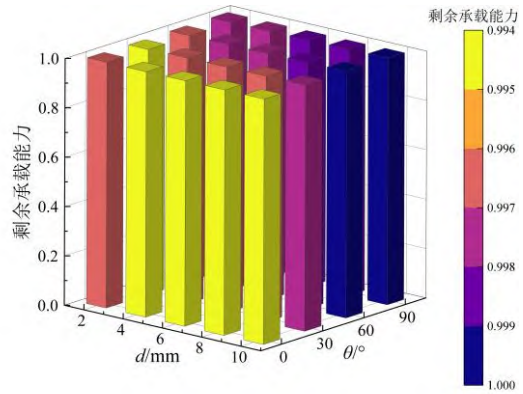


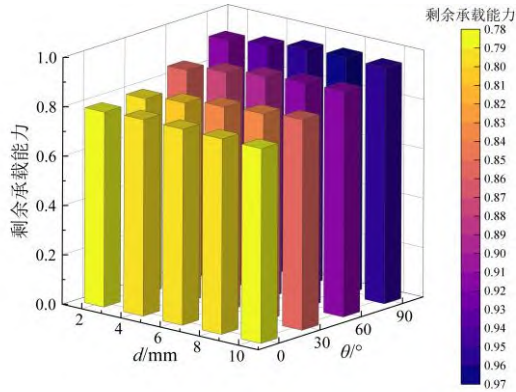
图 16 排布角 θ 对应力分布的影响

Fig.16 Influence of arrangement angle θ on stress distribution

以孔距 d 与孔排布角 θ 之间的复合影响作为主要研究对象,部分柱壳剩余承载能力变化规律如图 17 所示。显然, $\theta=0^\circ$ 时的柱壳对孔距变化不敏感,孔半径 r 由 1 mm 增至 5 mm 过程中,柱壳剩余承载能力随 d 变化所产生的浮动均可忽略不计。而随着 θ 逐渐增大,剩余承载能力开始随 d 的增加而缓慢增大,增幅与 θ 呈正相关关系,这一现象随 r 的增大而愈发显著。可见,孔径的增大不仅会直接降低柱壳剩余承载能力,还将扩大 d 和 θ 的影响,三者之间存在明显的交互作用。



(a) $r=1\text{ mm}$



(b) $r=5\text{ mm}$

图 17 d 与 θ 共同影响下的结构剩余承载能力变化规律
Fig.17 Variation law of structural remaining bearing capacity under the combined influence of d and θ

为进一步探究大间距下应力叠加效应与结构承载性能的演化规律,在上述 100 组工况基础上,增补表 3 所示的拓展工况,拓展工况保持 r 、 θ 取值与原有工况基本一致,以便于更全面的进行结果对比。但鉴于 $r=1\text{ mm}$ 时柱壳剩余承载能力变化幅度极小,拓展工况中不再对其进行研究。表中 $d=\text{max}$ 代表各孔洞均匀分布于柱壳中央水平面,孔圆心夹角均为 120° ,此时各孔间距达到极值,其结构示意图如图 18 所示。

表 3 d 的拓展取值

Tab.3 Extended values of cutout spacing d

参数	$r=2\text{ mm}$	$r=3\text{ mm}$	$r=4\text{ mm}$	$r=5\text{ mm}$
$\theta=0^\circ$	$d=\text{max}$	$d=\text{max}$	$d=\text{max}$	$d=\text{max}$
$\theta=30^\circ$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$
$\theta=60^\circ$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$
$\theta=90^\circ$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$	$d=20\text{ mm}$

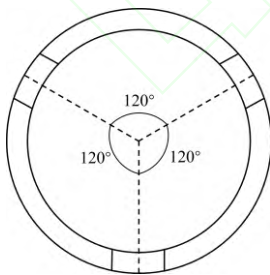


图 18 $d=\text{max}$ 工况的柱壳中央剖面图

Fig.18 Cross-section of the cylindrical shell center for the $d=\text{max}$ case

对比 d 为 10 mm 与 20 mm 时的柱壳剩余承载能力,如图 19 所示。可见: $\theta < 30^\circ$ 时,柱壳剩余承载能力随 d 增大有不同程度提升;而当 θ 增至 60° 后, d 的增大反而导致了剩余承载能力

的降低,且降幅随 r 与 θ 增大呈上升趋势。由图 20 可知, d 的增大改变了应力分布形式,使之更加契合结构的形变规律,从而降低了剩余承载能力。

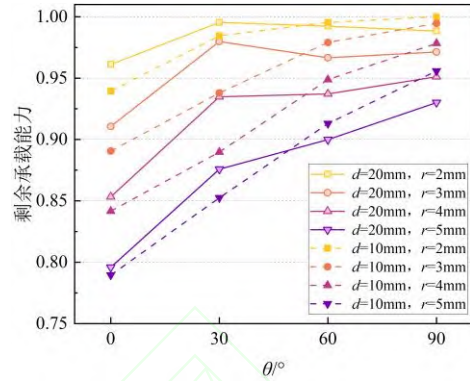
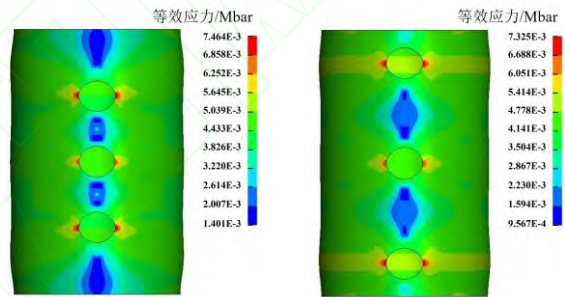


图 19 d 为 10 mm 与 20 mm 的剩余承载能力对比
Fig.19 Comparison of remaining bearing capacity when d is 10 mm and 20 mm



(a) 工况 5-10-90

(b) 工况 5-20-90

图 20 d 为 10 mm 与 20 mm 的应力分布对比

Fig.20 Comparison of stress distribution when d is 10 mm and 20 mm

此外,上述结果显示 $d=20\text{ mm}$ 、 $r=2\text{ mm}/3\text{ mm}$ 时,因孔距较大,孔间应力叠加效应减弱, θ 作用从优化局部应力转为影响整体刚度。此时,角度 θ 的作用机制在优化局部应力分布的同时,会影响结构的整体刚度。 θ 增大会削弱壳体的环向连续性,从而降低其整体抗屈曲能力。因此,结构的剩余承载能力随 θ 增大而略有下降。

针对工程中应用更为广泛的 $\theta=0^\circ$ 情况,将 d 增至极值,得到结构剩余承载能力变化如图 21 所示。 d 由 10 mm 增至 20 mm 后,相同间距增量下,小孔洞间应力叠加效应的减弱更为显著,剩余承载能力增幅更大;当 d 继续增至极值,孔间相互作用均降至最低,对大孔洞间应力叠加效应的影响跨度最大,对应剩余承载能力变化也最大。图 22 展示了孔距 d 由 20 mm 增至极限值过程中,不同时刻的应力分布对比。可见,结构受载瞬间,两工况下的应力叠加效应已基本消失,但随着壳

体变形的持续发展，孔洞间的相互影响仍会逐渐显现，其影响程度随孔距增大而有所减弱。该现象提示，应存在一个“临界孔距阈值”，一旦孔距超过该值，孔间应力叠加对结构极限承载能力的影响将不再显著，但该阈值的具体取值很可能与孔洞尺寸及材料的本构特性密切相关。

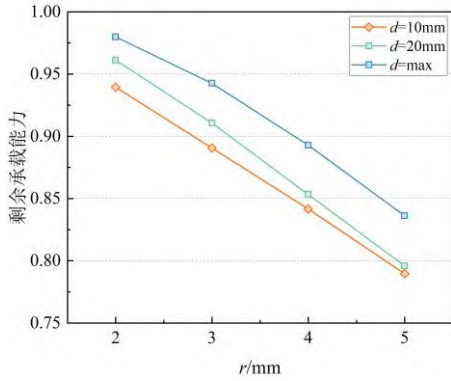


图 21 $\theta=0^\circ$ 时 d 取极值对剩余承载能力的影响

Fig.21 Influence of extreme values of d on remaining bearing capacity when $\theta=0^\circ$

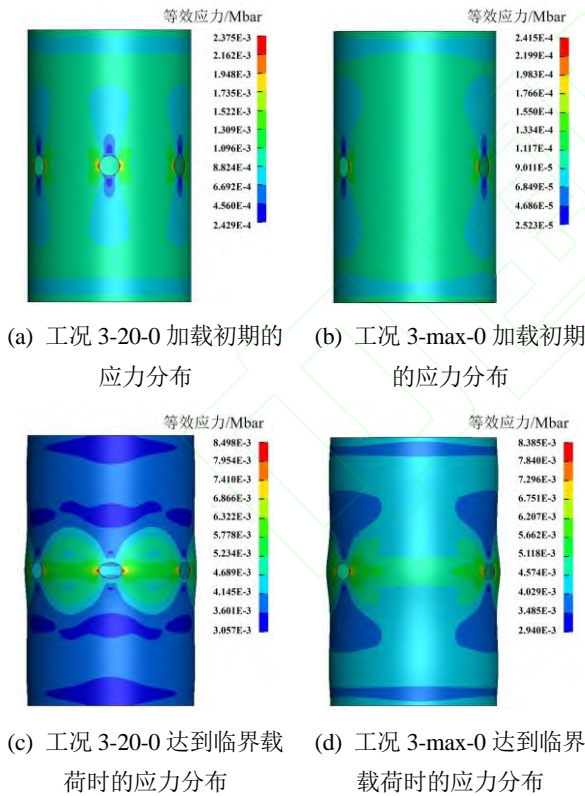


图 22 工况 3-20-0 与 3-max-0 的应力分布云图

Fig. 22. Stress distribution contours for Case 3-20-0 and Case 3-max-0

3 参数贡献度分析

经有限元计算分析可知，孔洞参数 r 、 d 、 θ 复合影响下，任一参数的变化都可能导致柱壳剩

余承载能力的改变。然而，各参数对结构承载性能的影响贡献度尚未可知，无法为工程结构优化时的参数优先级选择提供依据。为此，本节将基于深度学习神经网络进行开展参数贡献度分析。

3.1 神经网络模型

本节构建了一种增强型剩余承载能力预测神经网络。该模型综合运用数据增强、自适应优化策略及泛化能力提升方法，提高其预测精度。研究数据源自 2.4 节所述的全部有限元仿真工况，其中孔半径 r 的取值范围为 1~5 mm，孔间距 d 的取值范围为 2~20 mm，排布角 θ 的取值范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。将 r 、 d 、 θ 作为输入特征，柱壳极限承载能力 A 设定为目标变量。然而，仅有的百余组样本量相对较小，存在过拟合风险。

为应对该问题，采用高斯噪声注入法对数据集进行扩展。具体而言，通过 `augment_data` 函数添加均值为 0、标准差为 0.03 的高斯噪声，并设定增强因子，从而对数据集进行扩充。由于各参数的量纲存在差异，使用 `StandardScaler` 对输入特征与目标变量进行标准化处理，标准化公式如下：

$$x_{\text{scaled}} = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (5)$$

$$y_{\text{scaled}} = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \quad (6)$$

式中， x 为输入特征 (r 、 d 、 θ)， y 为目标变量 (A)， μ 为均值， σ 为标准差。数据预处理完成后，按照 85:15 比例将数据分为训练集和测试集，并设定随机种子为 42，以确保结果的可复现性。

在此基础上，构建 5 层全连接神经网络模型。输入层接收标准化处理的 r 、 d 、 θ 参数，四个隐藏层分别采用修正线性单元 (rectified linear unit, ReLU) 激活函数等不同技术实现特征映射、降维及抑制过拟合等功能，输出层用线性激活函数输出预测值。

基于 PyTorch 框架开展模型训练，采用“自适应优化+学习率调度+早停机制”的组合策略，核心参数如表 4 所示。训练过程优先利用计算统一设备体系结构 (compute unified device architecture, CUDA) 进行加速，损失函数选取均方误差损失，优化器采用带有权重衰减的自适应矩估计 (adaptive moment estimation with weight decay, AdamW)。在组合策略的具体实施中，通过 `ReduceLROnPlateau` 调度器实现学习率的动态调整，同时引入早停机制以抑制模型过拟合。此

外，为有效避免梯度爆炸问题，进一步采用梯度裁剪策略。基于相同验证损失阈值下的训练轮次对比，该策略相较于未采用梯度裁剪的训练方案，可使模型收敛速度提升约 20%。

表 4 神经网络训练参数

具体参数	取值/策略
权重初始化	Kaiming 正态分布
正则化方法	Dropout + BatchNorm1d
优化器权重衰减	10^{-5}
优化器初始学习率	0.001
批次大小	64
早停机制	200 轮验证损失未降则终止
梯度裁剪范数上限	1.0

模型评估采用决定系数 R 作为主要评估指标，其计算公式为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

其中 y_i 为真实值， \hat{y}_i 为预测值， \bar{y} 为均值。 R 越接近 1，表明模型解释能力越强。若初始 R 低于 0.95，通过额外 300 轮微调进一步优化模型。如图 23 所示为训练过程中的动态监控图，两条曲线趋同且稳定，代表训练集与验证集的同步优化过程。图中曲线趋势说明，训练次数达到约 100 次后，预测值与真实值的误差基本达到最低，后续的微幅度波动表明模型未过拟合，泛化能力较好。图 24 进行了神经网络预测值与数值仿真结果的对比，模型决定系数 R^2 大于 0.95，两者具有较好的一致性，可以认为预测较为成功。

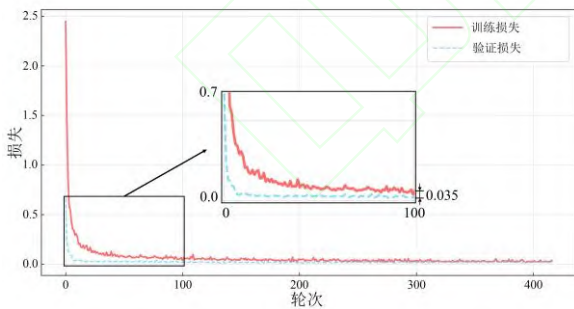


图 23 训练-验证损失曲线图

Fig.23 Training-validation loss curve

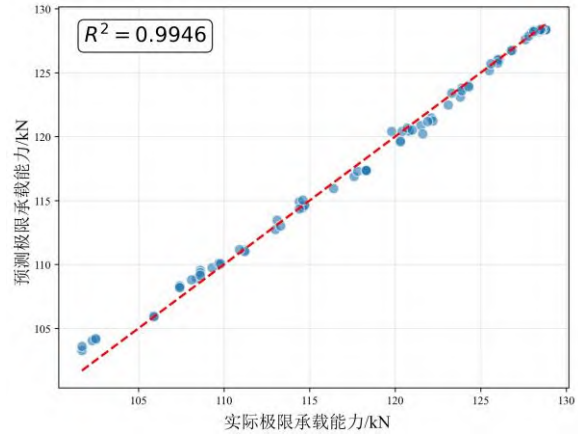


图 24 预测值与仿真值对比

Fig.24 Comparison between predicted and simulated values

3.2 SHAP 分析

借助上述神经网络模型，本节采用 SHAP 方法，评估孔半径 r 、孔间距 d 和孔排布角 θ 对柱壳承载性能的影响。SHAP 的核心思想源自合作博弈论中的 Shapley 值，原用于公平分配多个参与者在合作中所带来的收益，将这一概念引入到机器学习模型解释中，用于计算每个特征对模型预测结果的贡献。

3.2.1 全局解释

通过图 25 所示的 SHAP 汇总图，可观察各因素对柱壳极限承载能力的影响分布程度及相应趋势。图中横轴 SHAP 值作为核心量化指标，反映特征贡献的强度与方向：SHAP 值为正，意味着对应特征取值会提高预测结果（即利于柱壳剩余承载能力提升）；值为负，则表明该特征取值将降低预测结果。同时，SHAP 值的绝对值范围，直观呈现参数重要性排序逻辑——绝对值越大，参数对承载性能的调控作用越显著。

摘要图右侧颜色映射为参数取值的可视化表达：蓝色至绿色渐变，对应参数取值由低至高过渡。由此可明确：孔半径 r 减小、孔间距 d 与排布角 θ 增大时，柱壳剩余承载能力呈提升趋势。

进一步从参数影响层级看，孔半径 r 对柱壳承载性能的影响度占据主导地位，是调控剩余承载能力的最关键因素；孔排布角 θ 的影响力处于次一级水平；相较而言，孔间距 d 对剩余承载能力的影响程度相对更小。这种参数影响规律的明晰，为后续定向优化含孔柱壳结构承载性能、精准控制几何参数提供了量化依据与理论支撑。

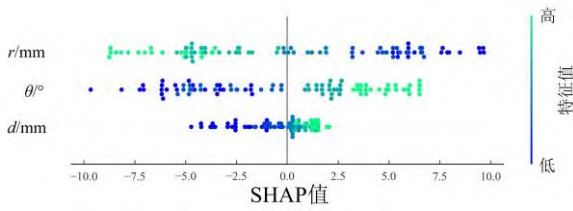


图 25 SHAP 汇总图
Fig.25 SHAP summary plot

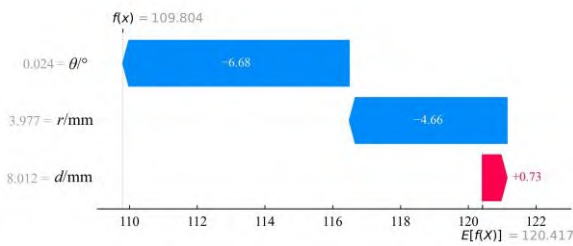
3.2.2 局部解释

图 26 的 SHAP 瀑布图直观揭示了不同孔洞参数组合下各变量对柱壳极限承载能力的动态贡献机制。图中 $E[f(x)]$ 为神经网络训练过程中所产生的基准值，图左侧表示本次预测所对应的各参数取值， $f(x)$ 即为本次预测所得的结构极限承载能力，各参数对应的瀑布阶梯代表了其特征贡献度。值得注意的是，图中瀑布阶梯中所带有的数字并非因参数变化所引起的结果真实变化值，仅用于比较特征贡献方向及贡献度。

在预测结果 1 中，所有参数均呈现正贡献，这与前文结论相同： r 的减小与 θ 的增大有利于提高结构剩余承载能力，且在 θ 值较大时， d 的增加也能产生一定的正向作用。而预测结果 2 则呈现差异化影响，显然较大的 r 值与较小的 θ 不利于维持结构承载性能。这种贡献特性的转换表明：不同的参数组合下，各因素对结果的影响将呈现动态变化。



(a) 预测结果 1
(a) Prediction result 1



(b) 预测结果 2
(b) Prediction result 2

图 26 预测结果中的参数贡献度

Fig.26 Parameter contribution in prediction results

4 总结与展望

通过准静态轴压试验、数值仿真与机器学习方法，系统探究了多孔柱壳在轴压载荷下的剩余承载能力规律，明确了孔半径 r 、孔间距 d 、排布角 θ 的影响机制及贡献度，主要结论如下：

(1) 孔半径 r 是影响柱壳剩余承载能力的关键因素。试验与仿真结果均表明，随着孔径增大，柱壳剩余承载能力显著下降。这源于孔径增大会加剧应力集中效应，且扩大孔间应力叠加的影响，加速结构屈曲或断裂进程。

(2) 孔间距 d 对结构承载性能的影响受孔排布角 θ 与孔径 r 的调控。当 $\theta=0^\circ$ 时，孔距变化对剩余承载能力影响较小；但 θ 不为 0° 时，孔距增大使孔洞靠近柱壳边界，可提升剩余承载能力，且该效应随 r 增大更显著。当孔距较小时（如 $d=2\text{ mm}$ ），应力叠加效应强，易引发材料破坏，导致承载性能异常下降。

(3) 孔排布角 θ 总体与剩余承载能力呈正相关，但其影响存在特殊情况。 θ 增大可通过改变应力分布形式，延缓应力增长速率并弱化局部集中，从而提升剩余承载能力；但当 $\theta=30^\circ$ 且孔距较小时，材料失效形式可能由轴压屈服转为剪切破坏，导致剩余承载能力短暂下降。此外，在大孔距下，孔洞的影响范围由局部扩展至全局，致使 θ 的主导机制发生转变，因此壳体承载性能的变化规律也可能相应改变。

(4) SHAP 分析量化了参数贡献度：孔半径 r 的影响最大，孔排布角 θ 次之，孔间距 d 最小；且 r 减小、 d 与 θ 增大均有利于提升柱壳剩余承载能力。三者存在显著交互作用，孔径增大会放大 d 与 θ 对承载性能的影响。

上述结论揭示了多孔柱壳轴压承载性能的调控机制，明确了关键参数的优化方向，为含孔柱壳结构的安全设计、性能优化及失效预警提供了理论依据与量化参考。然而，以上所得参数贡献度排序等量化结论，均建立在 2A12 铝合金材料和圆形孔洞结构的基础上，其适用范围存在一定局限。因此，提升神经网络模型对于不同材料类型与非圆孔结构的泛化能力，是增强其工程实用性所亟待解决的关键问题。此外，研究结果表明，应存在一个“临界孔距阈值”，超过该值后孔间距的继续增大将不再显著影响结构承载性能；同时，当孔间距 d 与排布角 θ 同时落入对应特定区间时，

结构易发生剪切主导的失效。如何建立一套高效评估方法,针对不同材料与结构,提供相应的参数设计指导,亦是未来具有重要价值的研究方向。

参考文献 (References)

- [1] TENNYSON R C. The effects of unreinforced circular cutouts on the buckling of circular cylindrical shells under axial compression[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1968, 90(4): 541-546.
- [2] STARNES J H, Jr. Effect of a circular hole on the buckling of cylindrical shells loaded by axial compression[J]. *AIAA Journal*, 1972, 10(11): 1466-1472.
- [3] BRUSH D O, ALMROTH B O. Buckling of bars, plates, and shells[M]. New York: McGraw-Hill: 1975.
- [4] 贾朝阳, 王亭亭, 龙连春. 开孔参数对轴压圆柱壳屈曲承载力影响分析[C]//北京力学学会第二十三届学术年会会议论文集. 2017: 570-571.
- JIA C Y, WANG T T, LONG L C. Analysis on the influence of opening parameters on the buckling capacity of cylindrical shells under axial compression[C]//Proceedings of the 23rd Academic Annual Meeting of Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics. Beijing, 2017: 570-571. (in Chinese)
- [5] KIM Y, PARK J. A theoretical model for the buckling characteristics of a laminated composite cylindrical shell with circular cutouts[J]. *Advanced Composite Materials*, 2022, 31(5): 515-537.
- [6] REZAEI K, MEHRETEHRAN A M. Vertically oriented thin-walled cylindrical shells with cutouts under combined compression and bending loads[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 217: 113891.
- [7] REZAEI K, MEHRETEHRAN A M. Effects of cutouts on the axial buckling strength of steel thin-walled cylindrical shells[J]. *Engineering Structures*, 2025, 333: 120149.
- [8] TODA S. Buckling of cylinders with cutouts under axial compression[J]. *Experimental Mechanics*, 1983, 23(4): 414-417.
- [9] JULLIEN J F, LIMAM A. Effects of openings of the buckling of cylindrical shells subjected to axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 1998, 31(1/2/3): 187-202.
- [10] 李冬. 轴压荷载下矩形开孔圆柱壳屈曲性能及补强措施研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- LI D. Buckling behavior and reinforcement measures of rectangular cylindrical shells with rectangular cutout under axial loading[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 张苗苗, 王丹, 张卫红. 带孔圆柱壳轴压屈曲与孔形优化设计[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(9): 1935-1938, 1943.
- ZHANG M M, WANG D, ZHANG W H. Buckling analysis and shape optimization of cylinder shells with holes under axial compression[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(9): 1935-1938, 1943. (in Chinese)
- [12] 宋波, 吴琳, 孙北东. 矩形大开孔圆柱壳轴压作用下的屈曲性能[J]. *北京科技大学学报*, 2009, 31(2): 149-155.
- SONG B, WU L, SUN B D. Buckling behavior of thin-walled cylindrical shells with large rectangular opening[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(2): 149-155. (in Chinese)
- [13] 王志高. 高空试验舱及矩形大开孔薄壁圆柱壳结构外压下的屈曲行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- WANG Z G. Research on buckling behavior of the high-altitude test chamber and thin-walled cylindrical shells with large rectangular openings under external pressure[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023. (in Chinese)
- [14] ZHAO Y, VAZ M A, YUAN L, et al. Axisymmetric buckling of stepped cylindrical shells under axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 217: 113836.
- [15] LIN X Y, JIAO P, XU H Y, et al. A machine learning-driven prediction of lower-bound buckling design load for cylindrical shells under localized axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 209: 112960.
- [16] 焦鹏. 局部轴压下薄壁圆柱壳结构的屈曲行为及设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- JIAO P. Research on the buckling behaviors and design method of thin-walled cylindrical shell structures under localized axial compression loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [17] LUNDBERG S M, LEE S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information

Processing Systems, 2017: 4768-4777.

- [18] LU D X, TRAN T S, SALEH M, et al. Potential cracking resistance indices for the SCB test utilising 100 mm diameter samples: Experimental investigation and machine learning analysis XGBoost-SHAP[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 317: 110916.
- [19] WANG X Y, LI T, WANG Y L, et al. Postblast damage assessment of concrete-filled double-skin tube columns by intelligence-based techniques[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 215: 108486.

