

金属薄锥壳冲击响应行为及载荷特征研究进展综述

林柯^{1,2}, 王帅^{1,2}, 屈明^{1,2}, 颜怡霞^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 邓志方^{1,2*},
张青平^{1,2}, 魏强^{1,2}, 谢珂^{1,2}, 李继承^{1,2*}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 系统总结薄锥壳冲击试验方法和数值模拟方法, 并分析其响应行为和载荷特征, 以发展基于薄锥壳塑性变形的冲击载荷等效加载技术。**方法** 全面调研国内外关于薄锥壳结构冲击响应的工作, 总结其冲击试验加载技术和数值模拟方法, 主要利用冲击块加速度变化以及载荷-位移曲线对薄锥壳力学响应及能量吸收特性进行表征, 并结合弹塑性应力波进行理论分析。**结论** 金属薄锥壳冲击试验加载方法主要有落锤冲击、化爆脉冲加载和气压推动质量块进行撞击等, 数值模拟中通常采用刚性板挤压金属壳单元的方法进行验证。除对薄锥壳轴向加载外, 还有斜向加载、引入刻槽、泡沫材料填充和复合材料夹层等试验设计。该领域研究仍处于初期发展阶段, 今后有必要结合试验测试与数值模拟分析, 全面而深入地研究薄锥壳参数变化对其冲击响应行为和载荷特征的影响规律及其物理机制。

关键词: 薄锥壳结构; 冲击响应; 冲击载荷; 轴向压溃; 能量吸收

中图分类号: TB122

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)19-0041-17

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.003

Research Advance on Impact Behavior and Load Characteristics of Metallic Thin-walled Conical Shells

LIN Ke^{1,2}, WANG Shuai^{1,2}, QU Ming^{1,2}, YAN Yixia^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}, DENG Zhifang^{1,2*},
ZHANG Qingping^{1,2}, WEI Qiang^{1,2}, XIE Ke^{1,2}, LI Jicheng^{1,2*}

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province,
Sichuan Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The work aims to systematically summarize the experimental and numerical methods for the impact of thin conical shells, analyze the corresponding response behavior and load characteristics, and develop equivalent impact loading technology based on the plastic deformation of thin conical shells. By comprehensively surveying related research on the impact response of thin conical shell structures, the impact loading techniques and numerical simulation methods were summarized in detail, and the mechanical properties and energy absorption performance of thin conical shells were primarily characterized through the acceleration history of impact object and the load-displacement curve. And theoretical analysis was also conducted based on elastoplastic stress waves. The results show that the main loading approach for metallic thin conical shell impact tests includes drop-weight impact, explosive pulse loading, and pneumatic mass block

收稿日期: 2024-08-10

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金自强项目 (YZJJZQ2023010, YZJJZQ2022008); 四川省自然科学基金杰出青年科学基金 (2023NSFSC1913); 国家自然科学基金 (12302495)

*通信作者

impact, etc. Regarding the numerical simulation method, it is usually based on the compression of the metallic shell by a rigid plate. Furthermore, in addition to the axial loading on the conical shell, there are several other experimental designs for the investigation on the impact response, e.g., oblique loading, introduction of grooves, foam material filling, and composite material interlayers, etc. On the whole, the research in this field is still in its early stages of development. In the future, it needs to investigate comprehensively and deeply the influence of shell parameter variation on its impact response and load characteristics as well as the corresponding mechanism. It is suggested to combine the experimental and numerical approaches together in related research.

KEY WORDS: conical shell; impact behavior; impact load; axial crushing; energy absorption

近年来,薄锥壳结构在工程实践中得到了广泛应用,如导弹、火箭、雷达等重大装备的壳体,其在冲击载荷下的瞬态响应问题引起了越来越多的重视,例如鱼雷入水、火箭升空和导弹着靶,其外壳结构均受到复杂的冲击载荷作用。薄锥壳结构的冲击动力学响应十分复杂,同冲击载荷类型、结构几何尺寸、材料属性、初始缺陷以及载荷作用时间等因素密切相关。

一直以来,国内外研究者针对金属薄锥壳结构在持续开展相关研究。早期,Seide^[1]研究了圆锥体在轴向压缩下的轴对称屈曲,得到一个简单的表达式,将圆锥体屈曲载荷与相同厚度圆柱体的屈曲载荷联系起来。Albrecht 等^[2]基于 Sanders 一阶线性壳理论,分析预测了截顶锥壳小端受到斜冲击时产生的弹性应变波特性。Mamalis 等^[3]通过研究截顶锥壳的准静态轴向压缩,分析了载荷-变形行为、初始峰值压力和各类坍塌模式,发现初始峰值压力随锥形结构细长比的增加而增加。El-Sobky 等^[4]研究了不同几何尺寸和端部约束下载顶圆锥受轴向冲击载荷的坍塌变形模式以及能量吸收性能,给出了锥壳实现最大能量吸收性能的最佳几何参数。Gupta 课题组^[5-6]对薄锥壳进行冲击压缩实验,得到典型变形模式、载荷-位移曲线,并进行了相应的数值模拟分析。Zhang 等^[7]在研究中对薄锥壳厚度进行设计,引入了非均匀厚度分布,改善了锥形管的防撞性能。Rahi^[8]通过对锥形壳进行落锤实验获得冲击块加速度时间历程,计算了冲击过程中质量块速度的时间历程及薄锥壳的平均崩溃载荷和吸收的能量。Yan 等^[9]在尺寸分析的基础上,提出了一个模型来预测锥形管在轴向载荷作用下的动态响应。

国内相关工作也取得了显著进展。早期,陈裕泽等^[10]利用模型实验和有限元分析研究了薄锥壳在轴向冲击载荷作用下弹性应力波的传播。孙博华^[11]从锥壳结构的 Mushtari-Donnell 型位移微分方程出发,引入位移函数将基本微分方程简化为可解偏微分方程,得到锥壳固有振动的精确解。骆东平等^[12]采用 Flugge 壳体理论和迁移矩阵法,讨论了环肋圆锥壳边界条件变化,环肋尺寸、间距和半锥角变化对其自由振动频率的影响。陈成军等^[13]分别开展了轴向冲击下单层锥壳结构与复合壳体结构瞬态响应的数值模拟与试验研究,测取了锥壳的动态应变历程。蔡成钟等^[14]研

究了截锥壳在强脉冲载荷作用下的动态响应,杨志鹏等^[15]进行了模态试验,得到了锥壳结构的动态特性。邓志方等^[16]对截锥壳跌落进行数值模拟,分析了跌落试验中参数的敏感性。张彤运等^[17]开展了锥型头航行器高速倾斜入水冲击载荷特性研究,利用数值模拟总结了锥型头航行器入水的轴向和纵向冲击载荷历程。总体来说,目前国外多数研究主要关注薄锥壳的结构吸能特性^[4,6,18-19]。

另外,在冲击载荷等效加载技术方面,通常由数值模拟分析所考核部件结构的响应特征^[20-21],再基于实际构型的响应特性,结合冲击相似理论分析等^[22-23],来设计相应模拟加载技术和开展冲击等效性分析。从公开文献来看,目前仍无针对大质量构件长时冲击的成熟加载技术和装置。分离式霍普金森压杆装置(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)、泰勒撞击、落锤试验等尽管可产生较高过载幅值($10^2 \sim 10^4$ g),但其持续时间较短($10^2 \mu\text{s} \sim 2$ ms),且试件尺寸较小(约为 100 mm),难以满足长时高过载的工程需求。张景峰等^[24]在落锤冲击作用钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)梁试验中给出了冲击作用下 RC 梁的冲击力和支反力时程曲线,其冲击持续时间限于 2 ms 内。高立龙等^[25]利用 400 kg 落锤加载装置对炸药柱进行了撞击感度试验,峰值应力也仅持续不到 2 ms。铝泡沫材料压缩尽管可产生长时载荷脉冲,但载荷曲线常产生剧烈波动^[26]。近年来,中国工程物理研究院总体工程研究所探索了基于薄锥壳结构的载荷发生器^[27],鉴于薄锥壳结构与刚性地面相互作用时容易产生锥壳塑性屈曲,利用锥壳中心的塑性屈曲变形形成缓冲载荷,施加于上方结构,且随着变形范围的不断扩大,造成载荷稳定上升,最后又随结构整体速度的降低,使得载荷逐渐下降。相关研究工作为设计平稳、长时和高过载的稳定等效加载结构奠定了一定基础。总体而言,目前针对大质量构件的长时高过载加载技术和装置仍亟需发展,其中基于薄锥壳结构的载荷发生器的相关方法和技术具有巨大潜力。

鉴于薄锥壳结构的冲击响应行为及载荷特征较为复杂,且薄锥壳在实际工程中得到广泛应用,国内外学者针对薄锥壳冲击响应行为及载荷特征开展了大量研究,薄锥壳厚度多数处于 0.5~3 mm 区间。本文基于金属薄锥壳的载荷发生器应用背景,系统介绍

金属薄锥壳冲击响应行为及载荷特征方面的研究进展, 包括试验研究、有限元模拟和理论分析等多个方面, 并结合相关研究进展, 给出未来工作的一些展望。

1 试验研究

目前对于金属薄锥壳结构的冲击响应特性研究主要基于试验手段, 测量冲击载荷作用下锥壳结构的响应以及载荷特征。以下将对相关试验研究进展进行介绍, 包括加载方法和平台、测试方法、测试参量表征和分析方法等方面。

1.1 加载方法和平台

目前针对金属薄锥壳的冲击加载方法主要有 4 类, 以下将对相关方法和平台进行介绍。

1.1.1 万能力学试验机压缩

El-Sobky 等^[4,28]在研究轴向冲击载荷下受约束截顶薄锥壳的坍塌模式中, 使用万能力学试验机对厚度为 0.5~1.1 mm 的锥壳进行轴向挤压, 速度范围在 2~5 m/s, 锥壳受挤压试验变形坍塌典型过程如图 1 所示。Prasad 等^[29]也使用万能力学试验机对金属薄锥壳进行加载, 其中控制压缩速率为 100 mm/min 和 200 mm/min, 以研究压缩速率对其坍塌模式的影响。Zhang 等^[7,30]在研究具有非均匀厚度分布薄壁锥形管的碰撞性能及吸能特性时, 通过 1 台配有计算机控制和数据采集系统的 200KN 万能力学试验机, 利用控制顶板垂直向下移动来压缩试件, 压缩速率为 1 mm/s, 试验中发现由于压缩过程中的材料硬化, 环形状变形从锥形管底部开始, 由下至上逐个形成。Mohammed 等^[31]在测试壁厚呈线性分布的截顶圆锥的准静态压缩性能时, 使用万能力学试验机以 1 mm/min 的速度压缩圆锥。



图 1 锥壳在万能力学试验机压缩下的坍塌过程^[4]

Fig.1 Collapse process of conical shell under compression of universal testing machine^[4]

1.1.2 落锤冲击

Gupta 等^[6]和 Rahi^[8]采用重力落锤装置对厚度在 0.72~1.62 mm 之间的薄锥壳进行了轴向冲击压缩实验, 重锤的质量恒定为 34.75 kg, 选择不同下落高度以获得所需的下落初始冲击速度。Yan 等^[9]在锥形管耐撞性能研究中, 采用原理相同的加载方式, 将锥形管放置在固定的底板上, 控制顶板以不同的速度垂直

下落, 对壁厚在 0.5~2.8 mm 之间的锥形管进行轴向冲击试验, 初始冲击速度在 3.8~20.4 m/s 之间。Kathiresan^[32]在研究不同位置带有圆形切口厚度为 1 mm 的铝制薄锥壳的轴向和斜向低速冲击响应中, 设计了低速落锤冲击试验, 相应的试验装置如图 2 所示。冲击速度从 4 m/s 到 8 m/s 不等, 该装置具有已知质量的落锤, 压电折射式称重传感器和加速度计与落锤单元相连, 使重物从已知高度下落, 对锥壳进行轴向冲击, 冲击过程中采集冲击力和加速度传感器信号。

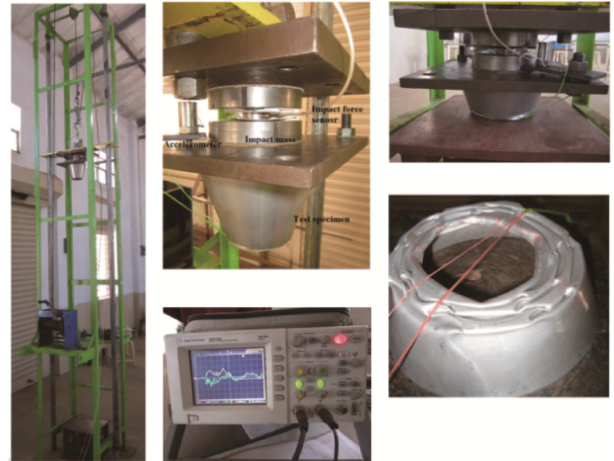


图 2 基于落锤试验装置的薄锥壳轴向冲击试验^[32]

Fig.2 Axial impact test on conical shell based on drop-weight impact test setup^[32]

1.1.3 气压推动质量块撞击

陈成军等^[13]利用内径为 25 mm 的空气炮气压加载推动弹丸, 通过调整气室中的气压来控制弹丸的自由飞行速度, 以弹丸速度 10 m/s 和 100 m/s 分别进行了冲击试验。杨喆等^[33]利用结构冲击实验平台的高压气体加载推动活塞, 活塞通过绳子与车体连接, 实现对车体的加载, 车体通过轴承在滑道上滑动。当气压降低到一定水平时, 车体与绳子发生脱钩, 车体依靠惯性继续运动, 最终可控制车体以 5~100 m/s 的速度与端部的薄壁管件发生碰撞, 实现对试件的加载, 冲击实验平台的轨道、车体及实验模型如图 3 所示。

1.1.4 化爆脉冲加载

在脉冲载荷加载技术方面, 研究人员提出了单脉冲加载^[34]、基于霍普金森压杆的双脉冲加载^[35]以及多脉冲加载^[36]等多种手段。针对金属薄锥壳结构的脉冲加载可以选择柔性导爆索 (Mild Detonating Fuses, MDF) 加载^[37], 其载荷由 MDF 阵列爆炸生成的铅微粒喷射产生, 例如黄含军^[38]利用 MDF 爆炸产生的雾状铅粒子打击锥壳表面形成冲量载荷, 实现环向分布的瞬时脉冲载荷加载; 蔡成钟等^[14]在强脉冲载荷作用下截锥壳的瞬态响应研究中, 也采用了化爆加载的方式。

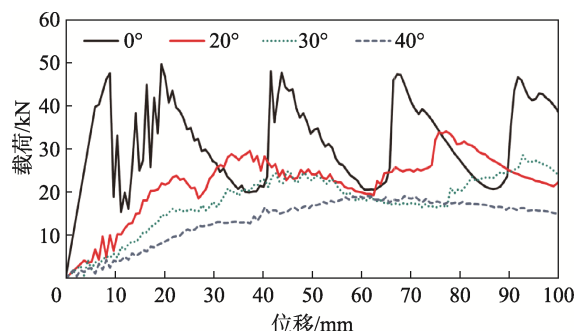
图3 基于气压推动的冲击实验平台^[33]Fig.3 Impact test platform based on air pressure propulsion^[33]

1.2 测试方法

在试验过程中的力学参量测试方面,最常用的为高速摄影 (High-speed Photography) 以及速度干涉测量法 (Velocity Interferometry) 等方式,以获取冲击瞬时速度和试件变形破坏等信息^[39],例如 Gupta 等^[6]利用相关仪器获得负载-时间历程,并使用带光电二极管的光电门装置测量初始冲击速度。

另外,常见测试方法还有通过对薄锥壳表面布置应变测点,利用应变片记录锥壳结构的时间-位移历程^[13,28,38],在锥壳沿圆周环向等距分布测点,每个测点放置2个应变片,一个测量轴向应变,另一个测量横向应变,在施加载荷瞬时记录载荷-位移曲线。部

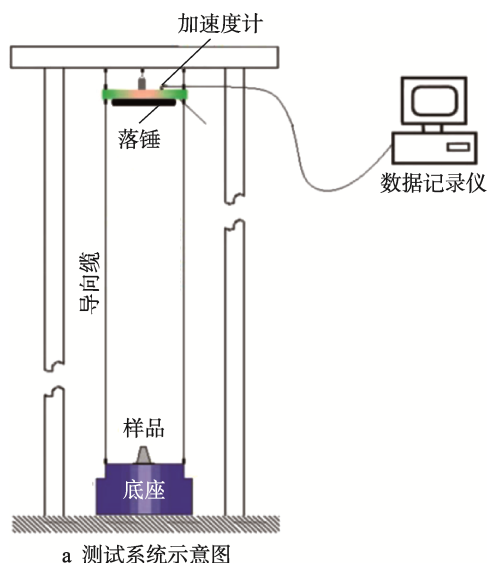
分研究者基于万能力学试验机,在加载过程中可直接得到同一应变率条件下的载荷-位移曲线^[5,7,30,40-41],典型的试验载荷-位移曲线如图4所示^[41]。

图4 基于万能力学试验机直接测量的圆锥管载荷-位移曲线^[41]Fig.4 Force-displacement curve of conical tube directly from universal testing machine^[41]

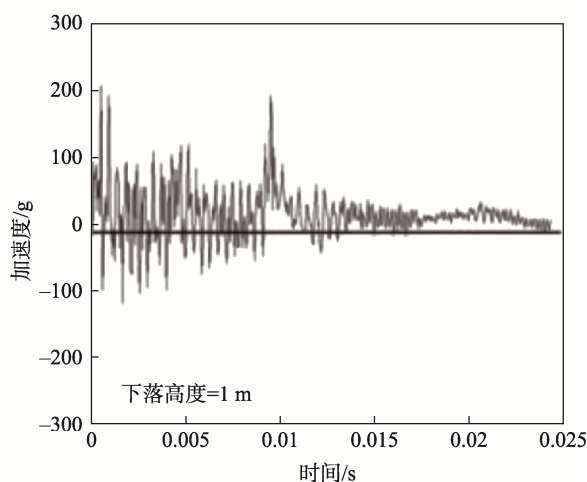
研究者^[8,32,42]也常使用加速度传感器测量冲击过程的加速度变化,一般是将加速度传感器安装在冲击质量块上,下落冲击过程的数据将传输到仪器的处理系统,从而获得加速度-时间历程,图5列出落锤冲击试验中加速度测量示意图及测量所得的典型加速度历程曲线。

1.3 力学参量表征和分析方法

分析薄锥壳在冲击载荷作用下的响应行为和载荷特征,主要是基于对相关力学参量进行表征,目前主要有载荷-位移曲线、变形坍塌模式、压溃载荷、能量吸收能力、加速度历程等几个方面,以下将进行详细介绍:



a 测试系统示意图



b 典型加速度历程曲线

图5 落锤装置加速度测试系统示意图及测量所得的典型加速度历程曲线^[8]Fig.5 Sketch of acceleration testing system in drop hammer test apparatus and typical measured acceleration history curve^[8]

1.3.1 载荷-位移曲线

Gupta 等^[5]对 2 个底部直径不同的铝制截顶圆锥进行轴向压缩试验, 其中 C6 试件底部直径为 135 mm, C18 试件底部直径为 152 mm, 其余参数一致, 测量并绘制得到了相应载荷-位移曲线, 如图 6 所示, 可看出 2 种试件载荷初始峰值明显不同, 后续变化趋势也有区别。此外, El-Sobky 等^[4]研究了各种约束条件(顶部约束、底部约束以及全约束)和不同热处理材质条件下薄锥壳的载荷变化特征, 也绘制了载荷-位移曲线, 相关研究发现, 当锥壳顶部受约束时, 载荷初始峰值载荷较高, 然后有逐渐下降的趋势, 而对于底部受约束的锥壳, 整体载荷较为平稳, 未受约束的锥壳载荷波动幅度最大; 另外, 材料经过热处理后, 相应锥壳的载荷变化更加均匀。

1.3.2 变形坍塌模式

El-Sobky 等^[4]分析了不同边界约束、不同锥角大小的截顶圆锥受轴向冲击时坍塌模式以及能量吸收特性的影响, 在冲击试验中设置了 4 种边界约束条件: 1) 顶部径向位移约束(Top); 2) 底部径向位移约束(Base); 3) 顶部和底部径向位移同时约束(Full);

4) 自由平面不约束(Free)。同时, 使用锥角分别为 30°、37°、41°、51°和 90°的圆锥在 4 种端部约束下进行冲击试验, 初始冲击速度 2~5 m/s。根据试验结果总结了 6 种坍塌模式, 如图 7 所示。总结不同约束下锥壳的坍塌模式得到, 未经热处理的无约束锥壳基本以多叶模式坍塌(图 7b); 未经热处理的顶部受约束截锥壳在锥角较小时以纯粹的多叶模式塌陷(图 7b), 锥角增大后以混合模式塌陷(图 7a), 在另一些情况下为多叶成椭圆形混合坍塌模式, 底部以纯粹的向外反转方式塌陷(图 7f)。经过热处理的顶部受约束的截锥壳表现出了蛇腹形和菱形混合坍塌模式(图 7d); 经过热处理的无约束的截锥壳全部以纯多叶模式坍塌(图 7b); 经过热处理的底部约束的锥壳均以纯多叶模式塌陷(图 7b), 顶部还向内反转(图 7e), 随着锥角的增大, 锥壳以均匀的多叶模式塌陷(图 7b); 经过热处理的全约束锥壳以纯多叶模式塌陷, 除了多叶外, 顶部还向内反转(图 7c、7d); 经过热处理的无约束锥壳首先以轴对称环坍塌随后混合多叶模式(图 7a)。类似地, Gupta 等^[6]也给出了薄锥壳在轴向冲击载荷下的上下端部坍塌模式, 并详细讨论了准静态加载和冲击加载条件下变形和破坏模式之间的差异。

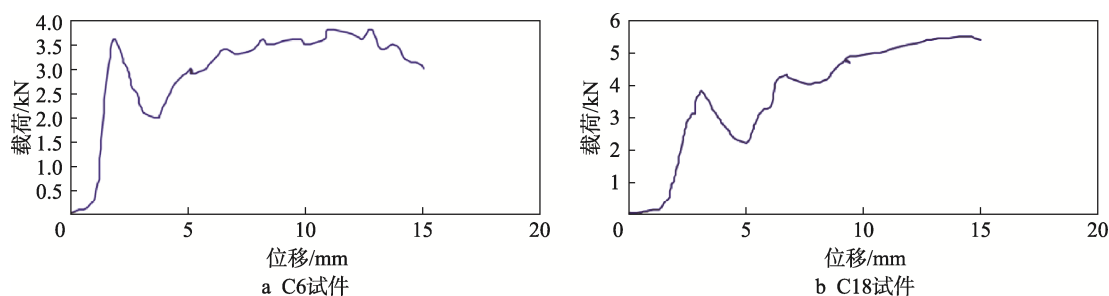


图 6 不同几何尺寸薄锥壳对应的载荷-位移曲线^[5]

Fig.6 Load-displacement curves corresponding to conical shells with different sizes^[5]

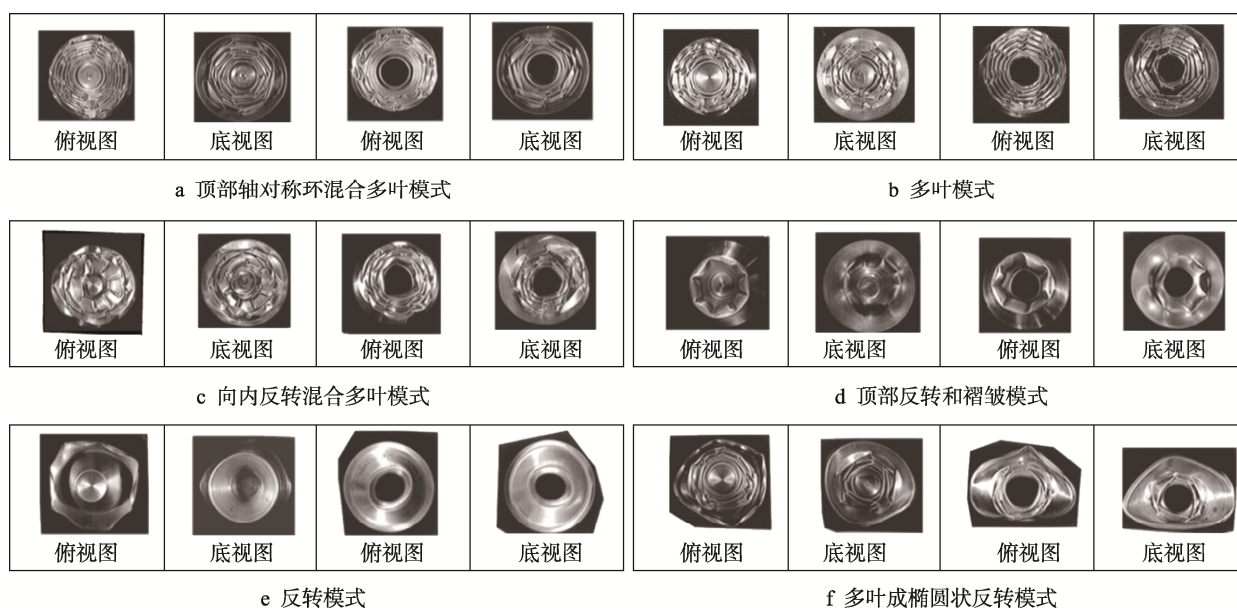


图 7 圆锥壳坍塌模式分类^[4]

Fig.7 Classification of collapse modes of conical shells^[4]

1.3.3 压溃载荷

Gupta 等^[6]的研究中同时测量得到了静动态压缩试验的载荷曲线及能量曲线,如图8所示。相关分析发现,与准静态试验值相比,冲击试验的平均坍塌载荷有所提高,冲击试验的吸能能力较准静态试验值提高了 8.93%~49.6%。此外, Gupta 等^[6]还分析了薄锥壳压溃载荷与壁厚、锥角、顶径和底径等几何参数之间的关系,并得到如下规律:1)对于厚度不变且锥角不同的试件,随着锥角 65.35° 以下平均直径/壁厚比例 D/t 的增大,平均坍塌载荷减小;2)锥角相同、厚度不同的试件其平均坍塌载荷随 D/t 比的增大而减小;3)底径相同、深度或顶径不同的试件其平均坍塌载荷随锥形外壳 D/t 比的增大而增大;4)顶径相同、深度或底径不同的试件其平均坍塌载荷随锥形外壳 D/t 比的增大而增大。

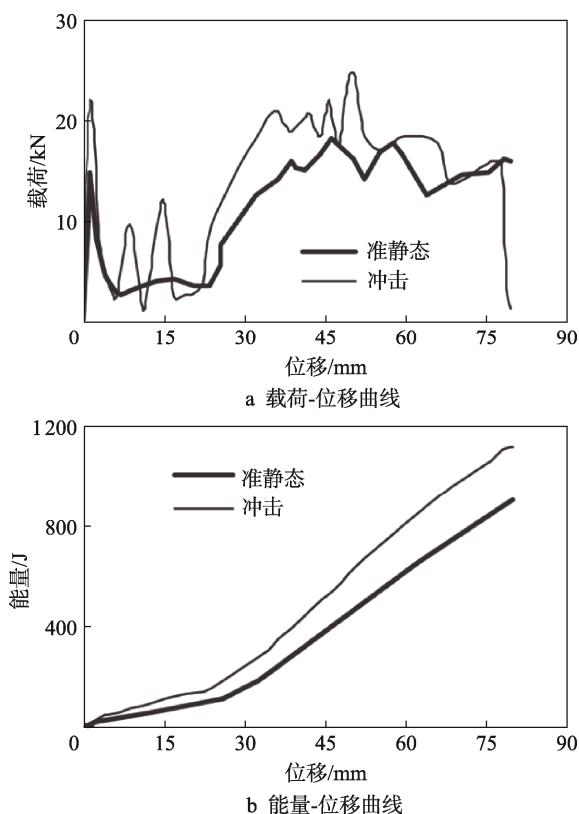


图8 锥壳在准静态和冲击压缩试验中的典型载荷-位移曲线和能量-位移曲线^[6]

Fig.8 Typical load-displacement and energy-displacement curves in quasi-static and impact compression tests of conical shell^[6]

1.3.4 能量吸收能力

El-Sobky 等^[4]通过万能力学试验机压缩试验,分析了壁厚位于 $0.5\sim 1.1\text{ mm}$ 之间的锥壳能量吸收特性的变化,绘制了圆锥能量吸收与轴向长度/壁厚比例 L/t 和锥角 α 的关系,如图9所示。其试验研究还发现,在顶部对薄锥壳进行约束比在其他位置进行约束更能提高锥壳的能量吸收能力,对两端进行约束则可

提高其整体特定能量吸收能力。此外,结果显示,经过热处理后圆锥获得最大能量吸收的最佳几何参数选择变得更加突出,但由于材料应变硬化特征的消除,锥壳整体能量吸收能力有所下降。Singace 等^[43]也进行了类似的工作,并与准静态试验结果进行了对比,结果显示,端部约束能有效增强薄锥壳能量吸收的能力,平均载荷的增加速率是锥角 α 的函数。

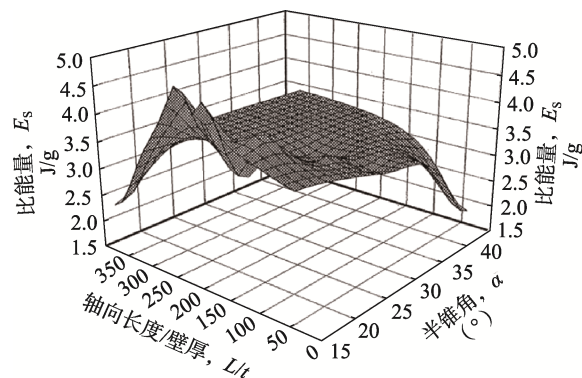


图9 无约束圆锥受轴向压缩时能量吸收能力随长度/壁厚比 L/t 和锥角 α 的变化关系^[4]

Fig.9 Specific energy absorption as a function of axial length / thickness ratio (L/t) and semi-apical angle(α) corresponding to a frusta subjected to quasi-static axial crushing load^[4]

1.3.5 加速度历程

Rahi^[8]进行了壁厚为 $1.47\sim 1.70\text{ mm}$ 的薄锥壳的落锤冲击试验,在试验中记录了冲击过程中质量块的加速度-时间历程,并通过对加速度积分得到速度历程曲线,相应的锥壳最终变形形貌和对应的速度历程曲线如图10所示。分析发现,通过加速度积分得到的速度与理论计算得到的名义速度 $\sqrt{2gh}$ 非常吻合。此外,速度变化信号具有一定的逻辑性,存在一些非常明显的相对恒定速度区间。变形样品的外部褶皱数量与速度时程曲线中的平坦区域数量之间存在紧密联系,如图10a中AL-3试件,塌陷由4个轴对称褶皱组成。从图10b该样本的速度时程曲线中,可看出3个明显的恒速区间,其中一个在信号尾端,另一个在信号起始端。这些区间内速度保持恒定意味着锥壳结构由于塑性接头的移动而无法抵御冲击质量的移动,且这种塑性连接移动导致褶皱的形成。因此,通过对试验中加速度-时间历程信号进行积分,并确定速度恒定区间的数量,可以对锥壳坍塌特征进行一定程度的评估。

Kathiresan^[32]在试验中将采集到的冲击力和加速度数据储存在数字示波器中,之后将其转换为载荷-位移关系图,从载荷-位移曲线图中可获得第一峰值载荷 (P_{fst})、最大载荷 (P_{max}) 以及平均载荷 (P_{avg}) 等参量,并利用这些参量评估锥形管的耐撞性特征,还可以根据相关公式计算得到挤压力效率 (Crush Force Efficiency, CFE)、能量吸收 (Energy Absorption, E_{abs}) 和比能量 (Specific Energy Absorption, SEA) 等参量。

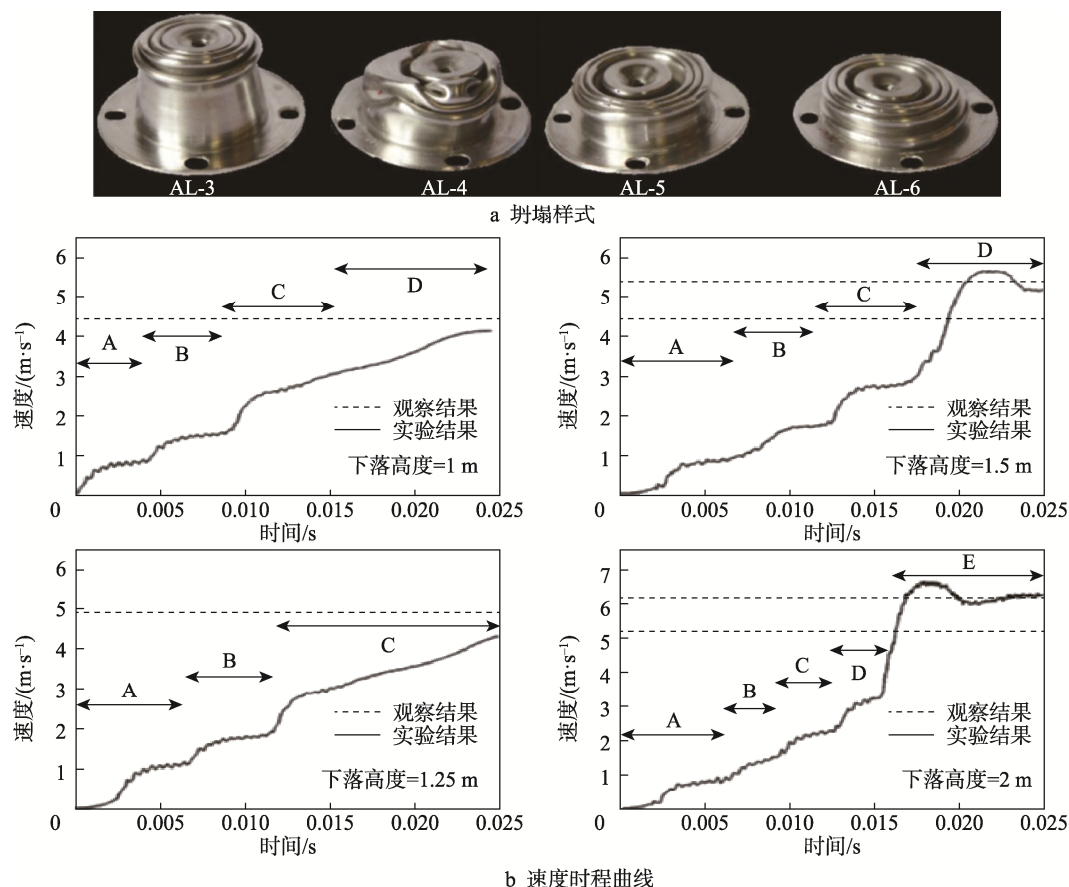


图 10 锥形管受质量块在不同高度跌落冲击后的坍塌样式及相应速度时程曲线^[8]

Fig.10 Collapse morphologies and corresponding velocity history curves of conical tube subject to impact of block dropping at different height^[8]

1.4 小结

总体来说,对于金属薄锥壳冲击响应行为及载荷特征的试验研究,研究人员通常通过改变金属薄锥壳的锥角、壁厚等几何参数对其进行轴向冲击试验,主要关注载荷-位移曲线,并通过相关曲线获取最大载荷及平均载荷等力学参量。此外,研究者还通过设定顶部或底部约束,探究端面约束条件对金属薄锥壳冲击响应的影响;还有从夹层、填充泡沫材料和开孔等结构设计的角度研究锥形管的冲击响应行为。目前大多数研究重点关注薄锥壳的变形坍塌模式及能量吸收特性,主要从能量吸收角度分析薄锥壳的冲击行为,从载荷发生器角度进行分析的研究仍较少见。

2 数值模拟研究

数值模拟,尤其是有限元模拟目前已成为冲击动力学领域的一种重要研究手段,广义上,数值模拟也可以看作一种基本实验,可获得冲击过程中详细的变形和破坏过程,还可得到内外力学参量的具体变化特征,有助于结合试验数据一起开展更深入的机理分析。研究者在针对金属薄锥壳冲击响应行为及载荷特征研究中,也开展了大量有限元模拟工作,以下将从几何建模方法、材料本构模型、力学参量表征和分析方法等方面进行介绍。

2.1 几何建模方法

几何模型借助有限元前处理软件建立,对于薄锥壳在冲击载荷作用下的响应问题,目前相关研究常使用壳单元进行建模^[5,42,44-46]。例如, Mohamed 等^[42]在建模中对锥形管采用 4 节点塑性壳单元,顶板和底板采用刚性壳单元,在试件下端约束了除围绕载荷轴旋转之外的所有自由度,刚性板和试件之间以及锥形管自身均定义接触,其中动摩擦因数和静摩擦因数均设置为 0.1,相应的有限元模型如图 11 所示。Ahmad 等^[44]在轴向冲击载荷下锥形管的动态响应模拟分析

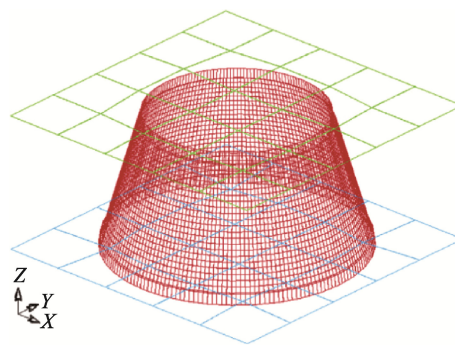


图 11 基于壳单元的锥壳压缩有限元几何模型^[42]

Fig.11 Finite element geometric model of conical shell compression test based on shell elements^[42]

中也建立了类似的几何模型,其中基于模型对称性只建立一半模型以减少计算时间。求解过程中通过对刚体施加初始速度来模拟动态加载,部件之间也定义接触,其中静、动态摩擦因数分别设为 0.2 和 0.3。

Kathiresan 等^[47]在几何建模中对底部刚性板采用 4 节点双线性四边形网格,锥形壳体的底部边缘和底部刚性板在装配时采用节点与表面接触的粗摩擦方式,以避免底部刚性板的横向移动,同时也考虑了可变形锥形壳内的自接触,较准确地模拟了铝质锥壳和玻璃纤维-环氧复合材料包覆的铝制锥壳的实际变形坍塌模式,如图 12 所示。此外,其研究中还分析了模型网格尺寸的影响,分析发现进一步减小网格尺寸将会消耗大量计算时间但不会增加模拟结果的精度^[45],如图 13 所示。

2.2 材料本构模型

在有限元模拟中,只有对几何模型再赋予材料模型才能真正体现物体的真实属性。一般来说,对于金属薄锥壳,金属材料在冲击过程中常呈现出应变率效应等。多数针对金属薄锥壳冲击响应的有限元模拟利用形式简单、计算效率高的经典弹塑性本构模型、考虑应变率效应的 Cowper-Symonds 模型等来表征相应材料的力学性能^[5,9,47-49]。部分研究者还针对锥壳的材

质设计了金属-复合材料混合^[46]、纤维金属层压材料^[45]、填充泡沫材料^[50-53]等,在有限元模拟分析中也新增了针对非金属材料的本构模型。总体来说,目前对金属薄锥壳冲击响应行为的有限元模拟中所用的材料模型,与针对相同材料的常规试验件或其他结构的本构模型及其参数基本相同,并无本质上的差异。

2.3 力学参量表征和分析方法

对于金属薄锥壳轴向冲击数值模拟分析,一般主要关注峰值载荷、平均载荷以及加速度等信息,通过积分处理,还可以获得薄锥壳速度和位移等信息,再次积分可进一步得到锥壳吸收的总能量。Gupta 等^[5]通过对载荷-变形曲线下的面积进行积分得到锥壳变形过程中吸收的能量,并利用滚动和固定塑性铰的概念,建立了预测圆锥变形机制的数学模型。Kathiresan 等^[45]在研究中加入人工应变能(The Artificial Strain Energy)和内能分析。Mirfendereski 等^[54]还在后处理中分析了加载板与顶部刚性压盘轴向压缩的界面接触力,通过接触力和变形数据,得到载荷与变形的关系图,对其积分可计算能量值。Azarakhsh 等^[55]讨论两端夹紧的空锥形管和泡沫材料填充的锥形管的轴向压缩及能量吸收时,在数值模拟工作中采用能量吸收能力、平均压缩载荷和压缩力效率等参数进行描述分析。

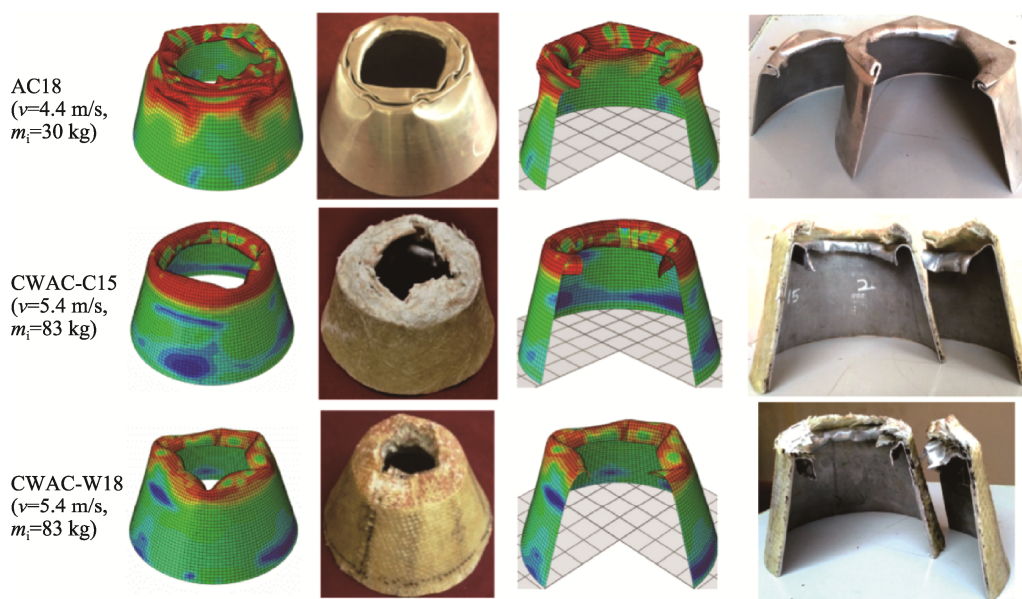


图 12 基于壳单元模型的铝质锥壳(AC)和复合材料包覆铝质锥壳(CWAC)的褶皱模式和失效模式模拟结果及其同试验结果对比^[47]

Fig.12 Simulation results for wrinkle patterns and failure modes of AC and CWAC conical shells based on shell element model and related comparison with experimental results^[47]

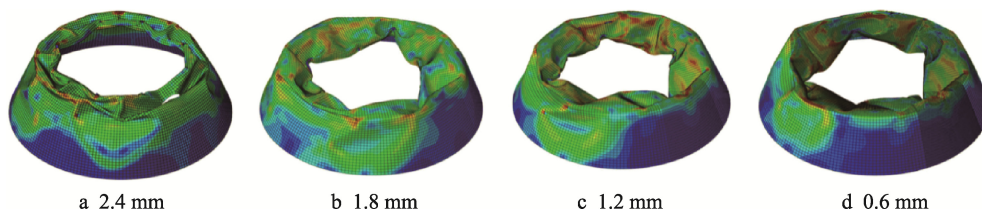


图 13 模型网格尺寸对锥壳坍塌模式影响分析^[45]

Fig.13 Effect of mesh size on collapse mode of conical shell in finite element simulations^[45]

近期 Yan 等^[9]提出了一个模型来预测锥形管在轴向载荷作用下的动态响应, 包括变形位移、能量吸收、比能量吸收和平均压溃力等, 通过数值模拟发现该模型的预测结果与数值分析结果吻合度很好。此外, 针对数值模拟结果中薄锥壳的 3 种基本坍塌模式(渐进屈曲模式(Progressive Buckling Mode, PBM)、过渡模式(Transition Mode, TM)和反转模式(Inversion Mode, IM)), 统计了锥形管在不同锥角大小下的总能量吸收、压溃力效率和能量吸收效果系数的分布特征, 进而可为锥壳锥角大小的设计提供参考。其中, 吸收总能量(Energy Absorption, EA)、比能量吸收(Specific Energy Absorption, SEA)、平均压溃力(Mean Crushing Force, MCF)、压溃力效率(Crushing Force Efficiency, CFE)、能量吸收效果系数(Energy-Absorbing Effectiveness Factor, EAEF)的定义分别如下:

$$SEA = \frac{EA}{m} = \frac{\int_0^s F(s)ds}{m} \quad (1)$$

$$MCF = \frac{EA}{s} = \frac{\int_0^s F(s)ds}{s} \quad (2)$$

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \quad (3)$$

$$EAEF = \frac{3GV_0^2}{8\sigma_0 A \delta_f \varepsilon_r} \quad (4)$$

式中: G 为撞击板质量, V_0 为初始撞击速度, σ_0 为准静态流动应力, A 为锥型管横截面积, δ_f 为最终轴向位移, ε_r 为断裂应变。

2.4 小结

对金属薄锥壳冲击行为开展有限元模拟分析, 可得到其在不同加载条件下的冲击响应及载荷特征, 对载荷-位移图进行积分处理, 可以得到能量吸收值, 有助于加深对薄锥壳冲击响应特性的机理认识。目前相关有限元模拟分析的几何模型建模主要基于壳单元模型, 所用的材料本构模型与其余常规模拟的本构模型基本相同, 无本质差异。

3 理论分析及设计方法

3.1 理论方法和模型

Fulton^[56]早期在弹性支撑浅球壳轴对称动态屈曲的基础上研究了受脉冲载荷浅锥壳的轴对称动态屈曲。分析中假定脉冲载荷在壳体上均匀分布, 向结构传递了均匀的初速度, 并把壳体视作单自由度系统, 在某个时刻壳体上所有点的位移达到最大值, 且此时速度为零, 根据能量守恒定律, 壳体内布应变能等于初始输入动能。通过分析应变能时间历程, 可以确定导致壳体运动出现跳跃所需的初始动能, 并定义最大位移处的应变能达到最大值为屈曲点。分析中引

入了锥壳参数 λ :

$$\lambda^2 = \frac{H}{t} [48(1-\nu^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: H 为壳体高度, t 为壳体壁厚, ν 为泊松比。在 λ 值相对较大的情况下, 简单支撑横向约束壳体的强度大于类似的固定壳体; 当 λ 值较小时, 则会呈现出相反的效果。因此可得出结论, 对于高度较大的锥壳, 支撑越灵活, 壳体抵抗动态效应的能力就越强; 而对于锥形壳体近似于板的小高度锥壳, 其主要强度来自支撑结构。

Albrecht 等^[57]基于 Sanders 一阶线性壳理论分析了截顶锥壳小端受到斜冲击时产生的弹性应变波特性。由于在分析中需包含弯曲和剪切的影响, 因变量以及方程的数量很大, 系统的特征方程变得难以处理, 其通过将所有相关变量在圆周方向上展开成傅里叶级数, 得到各个傅里叶级数形式的解耦常微分方程组, 从而便于进行计算。后期在研究弹塑性波传播问题时, 同时发展了包括变形方程及其特征线积分解在内的波的传播理论^[57], 无论是在弹性范围内还是在非弹性范围内, 理论推断与实验结果都有很好的一致性。相关实验结果显示, 结构中存在弹性纵波和弹性弯曲波的传播, 其传播速度互不相同, 进而使锥壳面承受不同的应力状态; 此外由于边界的影响, 即使纵波的反射也会产生新的反射弯曲波并沿锥面传播。

陈裕泽等^[10]分析了轴向冲击载荷作用下锥壳结构中的弹性纵波和弹性弯曲波。2 种弹性波分别以不同的速度沿锥面传播, 弹性纵波使锥壳承受压缩或拉伸应力状态, 弯曲波使锥壳承受复杂应力状态。分析中以结点速度为场参量, 用分片多项式速度函数逼近真解, 沿径向和轴向定义锥壳各节点的速度, 可通过轴对称有限元分析方法得到速度函数、应变率、应力率。

茹重庆等^[58]利用能量原理研究了轴向冲击载荷下小锥角圆锥壳的轴对称塑性屈曲问题。能量原理的基本思想是, 对冲击载荷下的塑性结构, 若任何导致屈曲的相对于基本运动的偏离都必将违背能量关系, 则该结构在此冲击载荷下不可能屈曲, 据此可计算临界冲击速度和屈曲模态。相关分析中假设基本运动(未发生屈曲)控制着屈曲运动, 考虑未发生卸载的情况, 忽略沿轴向惯性和切向屈曲位移分量, 主要考虑法向屈曲挠度。利用 Levy-Mises 关系, 可得到屈曲引起的应力增量, 再积分得到内力的表达式, 分别代入法向平衡方程和矩平衡式, 可以求得屈曲挠度。

3.2 设计准则

实验设计可以发挥最佳的杠杆作用, 通过加快设计过程、减少后期工程设计变更、降低产品材料和劳动力复杂性来降低设计成本^[59]。设计过程中, 研究者常根据具体情况提出相应的设计准则。对于薄锥壳等

结构,其在轴向冲击作用下常发生屈曲变形,结构的动力屈曲准则大致分为 2 种:一种是建立受扰动的结构系统的运动方程,在求解过程中,若外载荷(或冲击速度)的微小增量可导致结构系统响应的巨大变化,则与此对应的载荷(冲击速度)即为临界载荷(冲击速度);另一种是从能量角度出发,对结构系统进行动力分析,从而求出屈曲载荷和相应的屈曲模态^[60]。目前相关研究中常用的屈曲准则主要有以下几类。

3.2.1 B-R 准则

该准则最早由 Budiansky 和 Roth 于 1962 年针对球壳跳跃屈曲问题提出,可大致概括为若微小的增量能够使受冲击的结构引起强烈的响应,则认为该结构屈曲。Ball 等^[61]在对任意加载的旋转壳体进行几何非线性准静态和动态分析中,研究了夹紧浅球形壳体在轴对称和近似轴对称阶跃压力载荷作用下的动态行为,提出了近似轴对称载荷下的动态屈曲准则(Budiansky-Roth 准则,简称 B-R 准则),并确定了大范围壳体尺寸的临界动压力。Humphreys 等^[62]在大型激波管上对浅球壳进行了一系列冲击屈曲实验。相关分析显示,B-R 准则基本上能够反映结构的冲击屈曲现象。总体来说,B-R 准则是基于载荷响应曲线的运动屈曲准则,适用于长时加载和有静力后屈曲不稳定结构,不适用于缓慢变化的过程。

3.2.2 加载分离准则

刘赛等^[63]在轴向冲击作用下杆的弹塑性动态屈曲研究中,提出了一种较 B-R 准则更为简便的动态屈曲准则——加载分离准则,重物对杆的轴向加载过程中,杆的加载端与重物发生明显的分离。基于载荷-响应曲线的 B-R 准则可表述为,杆在轴向加载过程中轴向力突然下降,结合扁长杆的动态响应,可判断在此冲击速度下扁长杆发生了弹性动态屈曲。

3.2.3 规定变形准则

结构产生极值型屈曲时,并非所有荷载响应曲线上都有屈曲的特征点。即使是具有特征点的球壳盖跳跃型(Snap-Through)屈曲,在较小冲击荷载下,球壳盖顶部只有一小区域产生内凹变形,荷载增大则变形区域增大,当荷载达到某临界值壳体才发生跳跃翻转。对于这类情况,研究者采用规定变形准则,缘于工程上对结构变形限制的考虑,称为规定变形准则^[64]。Song 等^[65]在研究有几何缺陷的完整弹性规定球壳在均匀的外部阶跃静水压力作用下的动态屈曲行为过程中,规定在初始振动的 20 周时间以内,球壳径向平均位移或极点处的径向位移若随时间单调增大,则认为结构屈曲。Telalov 等^[66]分析认为,当冲击荷载下结构位移与静力后屈曲下临界荷载引起的位移相等时,结构发生冲击屈曲。

3.2.4 能量准则

茹重庆等^[58]基于能量原理提出了屈曲能量准则,认为若系统由于扰动面吸收或消耗的能量总大于外力在扰动上所作的功,则该主运动是稳定的。该准则认为结构的扰动运动稳定与否取决于有限时间内基本运动的信息,在分析非保守系统动力屈曲问题时,使用该准则比较方便且物理意义明确。

3.3 设计手段和思路

对于薄锥壳冲击试验,一般可通过量纲分析等方法,设计等效缩比试验,确定不同设计变量(锥壳材料性能、材料组合、锥角、厚度、高度、跌落高度、撞击倾角等)的样本空间,基于多目标协同优化策略,通过等效试验、代理模型建模、目标逼近优化等方法开展研究。Mohamed 等^[42]在针对薄锥壳受冲击试验优化设计中采用实验设计(Design Of Experiments, DOE)进行数值分析和试验。DOE 是一种用于选择数量有限的设计点,从而利用响应面方法(Response Surface Methodology, RSM)建立数学模型的统计技术,使用 DOE 可以减少所需的实验次数。

在薄锥壳轴向冲击试验中,多数研究者通过改变锥角、壁厚和冲击速度等变量研究锥壳的动态响应^[4-5,9],通常选择常见的塑性材料铝材以及脆性材料低碳钢进行对比试验来获得不同的响应数据。也有研究者对锥壳添加泡沫填充材料进行冲击试验,以获得不同的冲击响应特性^[51]。

特别地,除针对常规薄锥壳构型的轴向冲击试验外,研究人员还设计了新的加载方法和新型锥壳结构等。典型的有斜冲击试验^[49,51,55]、在锥壳设计中引入刻槽或图案^[19,67]、非均匀厚度分布设计^[7]等。此外,现阶段也有不少研究者致力于改变薄锥壳材料以及夹层材料、设计复合材料锥壳等方面的研究^[68-71]。以下将对其中几种典型的设计思路和方法进行介绍。

3.3.1 斜向加载

由于撞击过程中结构很少承受纯轴向或纯弯曲载荷,而是在轴向和非轴向或斜向(离轴)载荷的共同作用下产生复杂变形和破坏,因此研究者对锥壳进行了斜冲击试验研究。Karbhari 等^[72]研究了锥形管负载角在 $5^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 范围内承受轴向和离轴负载时的响应特性和能量吸收特性。Ahmad 等^[51]也开展了相关斜冲击试验研究,相应试验装置和装配情况如图 14a 所示,试验过程中加载方法是降低十字头,使试件的自由端挤压到试验机的承载面上,试件也可以在承载面上自由滑动。Azarakhsh 等^[55]则采用上下两端夹紧装置开展锥壳斜冲击试验,试件夹在两端,载荷通过顶部刚体移动来施加, α 表示加载角度,如图 14b 所示。

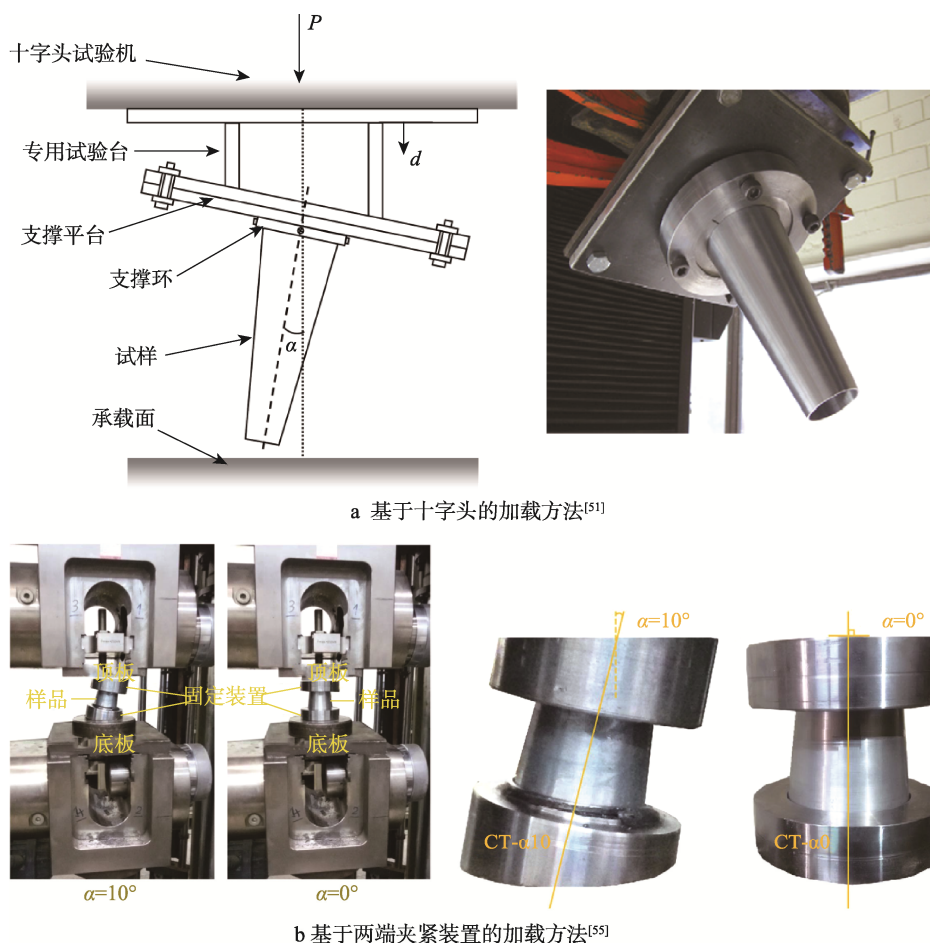


图 14 薄锥壳斜冲击加载试验装置

Fig.14 Test setup for oblique impact loading on conical shell

同时,研究者也开展了薄锥壳斜冲击的有限元模拟研究,典型的有限元模型如图 15 所示。计算求解过程中,运动质量块按实际倾斜角度放置,沿锥壳轴线方向垂直平移,而固定底板则完全约束并支撑锥壳。针对薄锥壳在不同角度斜向压缩条件下的渐进变形模式模拟结果示例如图 16 所示,可看出,模拟结果较好地体现了斜冲击对锥壳响应行为的影响。

3.3.2 引入刻槽或图案

Salehghaffari 等^[73-74]在研究薄壁圆柱形钢管轴向压缩下的能量吸收特性过程中,提出了一种全新的设计理念,通过在钢管外表面特定间隔加工圆周沟槽,可有效地促进蛇腹形褶皱形成,提高钢管挤压稳定性,降低部件对加载参数的敏感性,同时提高其能量吸收能力。Rezvani 等^[19]为保证薄锥壳在冲击过程中发生轴对称压溃变形,在薄锥壳内外表面不同位置设计了圆周凹槽,如图 17 所示,相关试验结果显示,在薄锥壳表面引入凹槽设计可以减小最大压溃载荷和变形不均匀性,还可以促进结构渐进屈曲变形。

Zhang 等^[67]在薄壁方管表面引入金字塔形图案设计,以提高其在轴向压缩作用下的能量吸收能力,所引入的金字塔形图案如图 18 所示。相关模拟结果

显示,引入金字塔形图案之后的方管相较于传统方管在变形过程出现非对称的延展坍塌模式,可以通过引入不同尺寸不同形状图案以达到控制引导薄壁管的变形行为。此外,随着薄壁管表面引入图案数量增加,其载荷-位移曲线的均匀性得到改善,能量吸收能力得到增强。

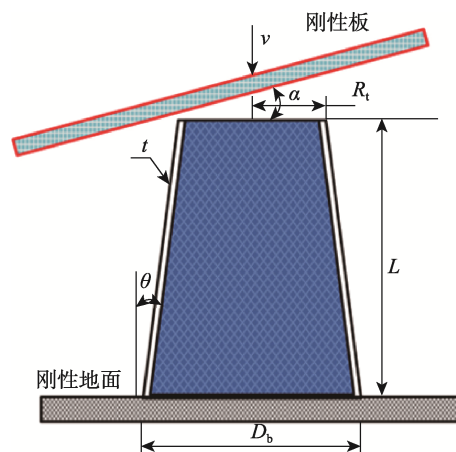


图 15 有限元模型中锥壳倾斜加载示意图^[49]
Fig.15 Sketch of oblique loading on conical shell in finite element simulation^[49]

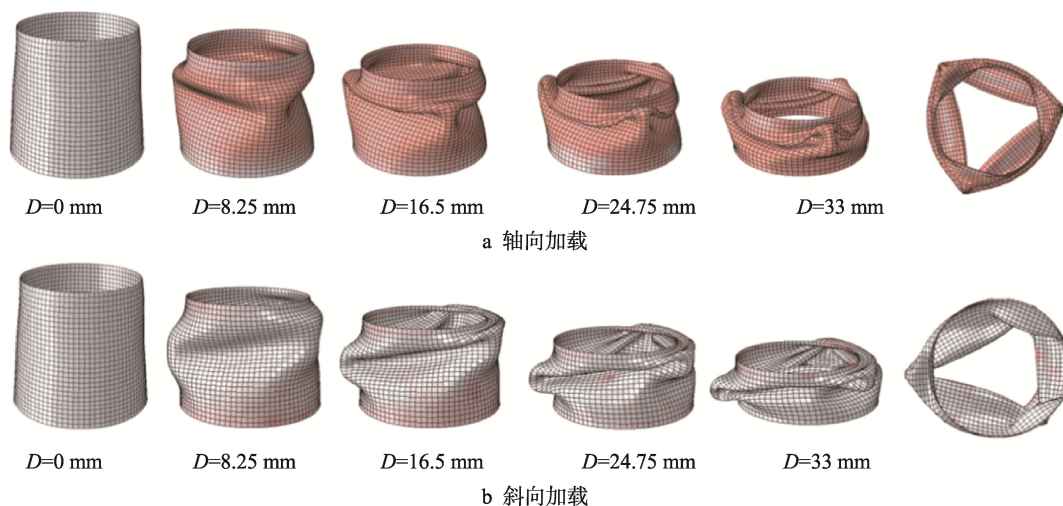


图 16 薄锥壳在轴向和斜向压缩过程中渐进屈曲过程的有限元模拟结果^[55]
Fig.16 Finite element simulation results for progressive buckling of conical shell during axial and oblique compressive loading^[55]

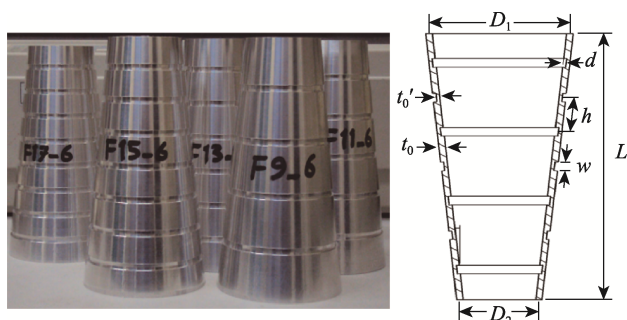


图 17 薄锥壳凹槽设计^[19]
Fig.17 Groove design in conical shells^[19]

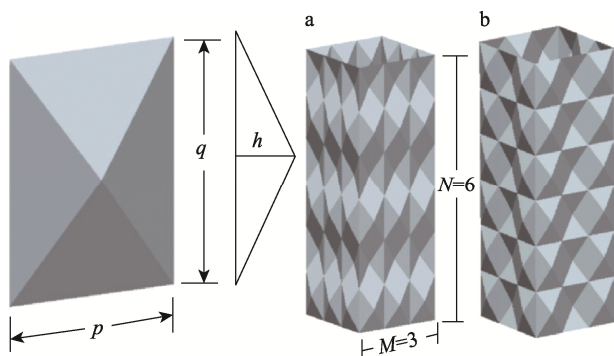


图 18 薄壁方管表面金字塔形图案示意图^[67]
Fig.18 Sketch of basic pyramid element on surface of thin-walled square tube^[67]

3.3.3 多层复合设计

陈成军等^[13]设计了一种复合锥壳，将 2 层金属薄锥壳用硅胶粘接在一起，复合锥壳结构示意图如图 19 所示，并对其进行了轴向冲击试验与数值仿真分析，结果显示复合锥壳虽然结构尺寸和材料与单层锥壳一致，但瞬态响应相差较大，复合锥壳内外

表面的应变存在很大差别，主要是由外层壳体承受载荷，内层壳体响应较小，而单层锥壳在轴向冲击下内外表面的响应差别很小。Kathiresan 等^[47]也设计了一种环氧树脂包覆铝制锥壳的复合锥壳，相关冲击试验显示，该结构相较于铝制锥壳表现出更好的抗变形能力。

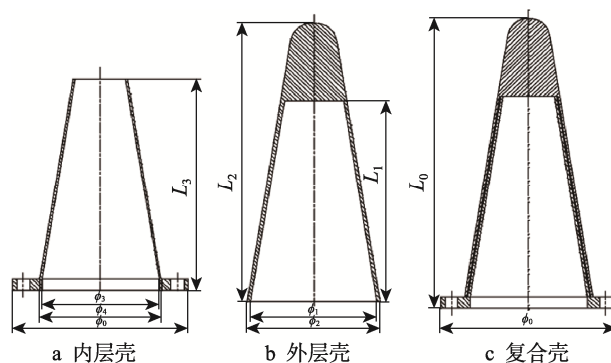


图 19 复合锥壳试件结构示意图^[13]
Fig.19 Structure diagram of two-layer conical shell bonding specimen^[13]

3.3.4 非均匀厚度分布

Zhang 等^[7]提出了一种对锥壳进行非均匀厚度分布的设计思路，相关设计示意图及实际试验件如图 20 所示。针对 6 种不同厚度分布的锥形管，进行轴向载荷作用下的相关试验研究发现，具有非均匀厚度分布的锥形管能量吸收效率最高。因此可知，薄锥壳的非均匀厚度设计具有较好的应用前景，在将来研究中，还可以对薄锥壳进行分级厚度设计，在不同的层级设置不同厚度甚至不同材质，如图 21 所示，有望使得薄锥壳在冲击过程中产生所期望的各种形式载荷曲线。

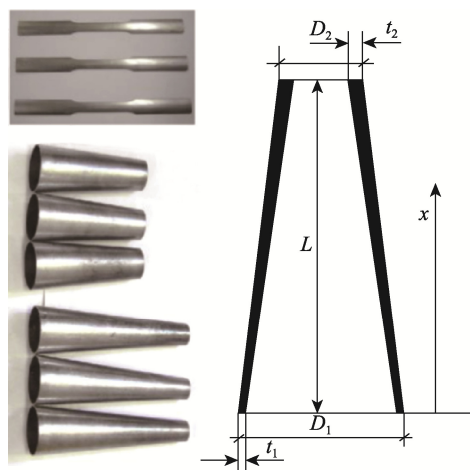


图 20 非均匀厚度分布的锥形管试件^[7]
Fig.20 Conical shell with non-uniform thickness distribution^[7]

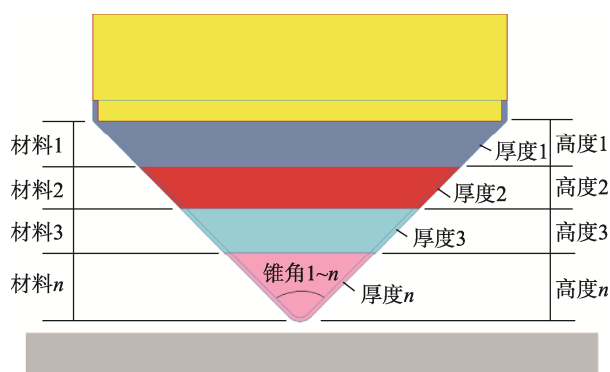


图 21 薄锥壳分级厚度设计示意图
Fig.21 Sketch of graded thickness design in thin-walled conical shell

3.4 小结

试验设计主要包括加载方式和薄锥壳结构设计 2 方面。在加载方式方面, 目前大多数工作主要开展轴向加载的相关研究, 将来有必要开展更多的斜向加载研究; 在锥壳结构设计方面, 目前已开展了引入凹槽、表面图案、多层材料复合、非均匀厚度分布等有益探索, 今后可在添加环肋条、十字肋条以及曲线凹槽设计和分级厚度设计等方面开展更系统和深入的研究, 这将有助于获得所期望的各种形式载荷曲线。

4 结语

薄锥壳在实际工程中得到广泛应用, 其冲击响应行为及载荷特征较为复杂, 国内外学者针对薄锥壳冲击响应行为及载荷特征开展了大量研究。本文系统综述了相关方面的研究进展, 重点关注试验研究、有限元模拟分析、理论分析及设计方法等方面。结合相关调研分析, 得到如下认识并给出未来工作的一些展望。

1) 金属薄锥壳理论研究可以从弹塑性波传播方面进行分析, 结合锥壳运动方程以及变形协调条件进行推导, 从而得出准确解。也可通过能量原理进行分析, 从最小势能原理或最小余能原理推导, 结合边界条件, 得到锥壳真实的位移场或应力场。

2) 金属薄锥壳冲击试验加载方法包括落锤冲击、化爆脉冲加载和气压推动质量块进行撞击等, 通过载荷-位移曲线、加速度历程和变形模式来表征锥壳冲击响应及载荷特征, 进行积分处理获得锥壳吸收总能量, 并以此评估锥壳的能量吸收能力。

3) 有限元模拟分析目前多采用壳单元对薄锥壳进行几何建模, 所用的材料本构模型与其余常规模拟情形基本相同。通过设置顶部刚性板的轴向运动速度和水平角度, 可模拟锥壳在不同速度、不同斜向角度的条件下的冲击响应特性。

4) 冲击试验设计可以从薄锥壳的几何参数以及材料参数入手, 改变锥壳的锥角、壁厚、底部/顶部直径等进行试验, 也可从加载方式进行设计, 进行不同角度的斜向冲击加载。当锥壳厚度增加时, 锥壳抗变形能力提高, 弯曲变形减弱; 当锥角增大时, 冲击试验中最大峰值压力减小, 承载能力减弱。结合综合优化设计, 有望获得所期望的冲击响应模式及载荷特征。

5) 将来对于金属薄锥壳冲击响应行为及载荷特征的研究, 有必要同时从理论分析、试验研究和数值模拟 3 方面综合分析, 进而可更全面地总结相关规律, 更深入地认识相关物理机制。

参考文献:

- [1] SEIDE P. Axisymmetrical Buckling of Circular Cones under Axial Compression[J]. Journal of Applied Mechanics, 1956, 23(4): 625-628.
- [2] ALBRECHT B, BAKER W E, VALATHUR M. Elastic Response of a Thin Conical Shell to an Oblique Impact[J]. Journal of Applied Mechanics, 1973, 40(4): 1017-1022.
- [3] MAMALIS A G, JOHNSON W. The Quasi-Static Crumpling of Thin-Walled Circular Cylinders and Frusta Under Axial Compression[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1983, 25(9/10): 713-732.
- [4] EL-SOBKY H, SINGACE A A, PETSIOS M. Mode of Collapse and Energy Absorption Characteristics of Constrained Frusta Under Axial Impact Loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(3): 743-757.
- [5] GUPTA N K, SHERIFF N M, VELMURUGAN R. A Study on Buckling of Thin Conical Frusta Under Axial Loads[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(9): 986-996.

- [6] GUPTA N K, VENKATESH. Experimental and Numerical Studies of Impact Axial Compression of Thin-Walled Conical Shells[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(4): 708-720.
- [7] ZHANG H, ZHANG X. Crashworthiness Performance of Conical Tubes with Nonlinear Thickness Distribution[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 99: 35-44.
- [8] RAHI A. Experimental and Crash-Worthiness Optimization of End-Capped Conical Tubes Under Quasi-Static and Dynamic Loading[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2019, 26(17): 1437-1446.
- [9] YAN K B, LU S S, WANG P, et al. Crashworthiness Investigation of Conical Tubes Using Dimensional Analysis Method[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2023, 28(6): 732-749.
- [10] 陈裕泽, 乐国培, 经二力, 等. 轴向冲击载荷作用下锥壳中弹性应力波传播的计算和实验研究[J]. *力学学报*, 1987, 19(2): 146-155.
CHEN Y Z, LE G P, JING E L, et al. The Numerical and Experimental Researches on Propagation of Elastic Stress Waves in a Conical Shell Under the Axial Impulsive Loading[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1987, 19(2): 146-155.
- [11] 孙博华. 锥壳固有振动的精确解[J]. *力学学报*, 1987, 19(2): 136-145.
SUN B H. Exact Solution of Eigenfrequencies of Conical Shells[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1987, 19(2): 136-145.
- [12] 骆东平, 赵玉喜. 环肋圆锥壳自由振动特性分析[J]. *振动与冲击*, 1990, 9(4): 64-69.
LUO D P, ZHAO Y X. Analysis of Free Vibration Characteristics of Ring-Ribbed Conical Shell[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1990, 9(4): 64-69.
- [13] 陈成军, 李思忠, 张方举. 轴向冲击下锥壳瞬态响应数值模拟与试验技术研究[R]. 中国国防科学技术报告, GF-A-0059856G, 2003.
CHEN C J, LI S Z, ZHANG F J. Numerical and Experimental Researches on Transient Response of Conical Shell Under Axial Impulsive Loading[R]. *China Defense Science and Technology Report*, GF-A-0059856G, 2003.
- [14] 蔡成钟, 陈浩. 截锥壳在强脉冲载荷作用下的动响应分析[J]. *导弹与航天运载技术*, 2007(4): 52-53.
CAI C Z, CHEN H. Dynamic Response Analysis of Conical Shell Under High Impulse Load[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2007(4): 52-53.
- [15] 杨志鹏, 祝济之, 杨飞虎, 等. 锥壳结构动态特性试验分析[J]. *强度与环境*, 2010, 37(3): 34-40.
YANG Z P, ZHU J Z, YANG F H, et al. Dynamic Analysis of Conical Shell Structure Based on Experimental Modal Analysis[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2010, 37(3): 34-40.
- [16] 邓志方, 颜怡霞, 陈刚, 等. 截锥壳跌落的数值模拟及参数敏感性分析[C]. 第十届全国冲击动力学学术会议, 2011.
DENG Z F, YAN Y X, CHEN G, et al. Numerical Simulation and Parameter Sensitivity Analysis of Truncated Conical Shell Drop[C]. *The International Symposium on Shock & Dynamics*, 2011.
- [17] 张彤运, 王聪, 许海雨, 等. 大尺度跨介质航行器高速倾斜入水冲击载荷特性研究[J]. *水下无人系统学报*, 2024, 32(3): 426-433.
ZHANG T Y, WANG C, XU H Y, et al. Impact Load Characteristics of Large-Scale Trans-Medium Vehicles During High-Speed Oblique Water Entry[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2024, 32(3): 426-433.
- [18] GHAMARIAN A, ZAREI H. Crashworthiness Investigation of Conical and Cylindrical End-Capped Tubes Under Quasi-Static Crash Loading[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2012, 17(1): 19-28.
- [19] REZVANI M J, NOURI M D. Axial Crumpling of Aluminum Frusta Tubes with Induced Axisymmetric Folding Patterns[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2014, 39(3): 2179-2190.
- [20] 常新哲, 徐绯, 杨磊峰, 等. 薄壁方管轴向压溃的相似性研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(11): 284-294.
CHANG X Z, XU F, YANG L F, et al. Study on the Similarity of Axial Crushing of Thin-Walled Square Tubes[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(11): 284-294.
- [21] 李广嘉, 周涛, 曹玉武, 等. 带舱大型战斗部跌落响应数值分析[J]. *高压物理学报*, 2018, 32(4): 153-157.
LI G J, ZHOU T, CAO Y W, et al. Numerical Analysis of Falling Response of Large Warhead in Cabin[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(4): 153-157.
- [22] JONES N. 结构冲击[M]. 2 版, 北京: 国防工业出版社, 2018.
JONES N. *Structural Impact*[M]. 2nd ed, Beijing: National Defense Industry Press, 2018.
- [23] 卢国兴, 余同希. 材料与结构的能量吸收[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
LU G X, YU T X. *Energy Absorption of Materials and Structures*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [24] 张景峰, 李晨涛, 李铮, 等. 多次冲击下 RC 梁损伤特征及剩余承载性能研究[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(5): 201-210.
ZHANG J F, LI C T, LI Z, et al. Damage Characteristics and Residual Load-Bearing Performances of RC Beams

- Under Multiple Impacts[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(5): 201-210.
- [25] 高立龙, 牛余雷, 王浩, 等. 典型炸药柱的 400kg 落锤撞击感度特性分析[J]. *含能材料*, 2011, 19(4): 428-431.
- GAO L L, NIU Y L, WANG H, et al. Analysis of Impact Sensitivity Characteristics for Typical Explosive Cylinder[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011, 19(4): 428-431.
- [26] 吕振华, 孙靖譔. 轴向变密度铝泡沫件的动态和静态压缩实验与有限元模拟分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(7): 753-762.
- LYUZ H, SUN J X. Dynamic and Static Compression Tests and FEA Analyses of Aluminum Foam Specimen with Variable Density in the Loading Direction[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2017, 57(7): 753-762.
- [27] 屈明. 基于塑性变形的载荷发生器的理论设计和数值模拟[R]. 中国国防科学技术报告, GF-A0183782G, 2014.
- QU M. The Theoretical Design and Validation by Numerical Simulations of Loading Generator[R]. *China Defense Science and Technology Report*, GF-A0183782G, 2014.
- [28] EL-SOBKY H, SINGACE A A. An Experiment on Elastically Compressed Frusta[J]. *Thin-Walled Structures*, 1999, 33(4): 231-244.
- [29] EASWARA PRASAD G L, GUPTA N K. An Experimental Study of Deformation Modes of Domes and Large-Angled Frusta at Different Rates of Compression[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1/2/3/4): 400-415.
- [30] ZHANG X, ZHANG H, WEN Z Z. Axial Crushing of Tapered Circular Tubes with Graded Thickness[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 92: 12-23.
- [31] MOHAMMED A K, ALAM M N, ANSARI R. Quasi-Static Study of Thin Aluminium Frusta with Linearly Varying Wall-Thickness[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2020, 25(5): 473-484.
- [32] KATHIRESAN M. Effects of Cutout and Impact Loading Condition on Crashworthiness Characteristics of Conical Frusta[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2022, 27(4): 1046-1066.
- [33] 杨喆, 魏延鹏, 邹金龙, 等. 薄壁圆筒冲击屈曲吸能行为的实验与数值模拟研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(S2): 244-250.
- YANG Z, WEI Y P, ZOU J L, et al. Experimental and Numerical Research on the Energy Absorption Behavior of Thin-Walled Tube Under Impact Load[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(S2): 244-250.
- [34] 张军, 汪洋. 单脉冲加载技术及其在钛合金拉伸行为研究中的应用[J]. *中国测试*, 2016, 42(10): 123-127.
- ZHANG J, WANG Y. A Single Pulse Loading Method of Split-Hopkinson Tension Bar and Its Application in the Tension Behavior of Titanium Alloy[J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(10): 123-127.
- [35] 李亮亮, 屈可朋, 沈飞, 等. 基于霍普金森压杆的 RDX 基含铝炸药装药双脉冲加载实验[J]. *火炸药学报*, 2018, 41(1): 52-56.
- LI L L, QU K P, SHEN F, et al. Double-Pulse Loading Experiment of RDX Based Aluminized Explosive Charge Based on Hopkinson Pressure Bar[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2018, 41(1): 52-56.
- [36] 何杨, 胡秋实, 仲苏洋, 等. 多脉冲加载下 PBX 装药的应力放大效应[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(6): 28-40.
- HE Y, HU Q S, ZHONG S Y, et al. Stress Amplification Effect of PBX Charge Under Multi-Pulse Loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(6): 28-40.
- [37] KIRKPATRICK S W, HOLMES B S. Structural Response of Thin Cylindrical Shells Subjected to Impulsive External Loads[J]. *AIAA Journal*, 1988, 26(1): 96-103.
- [38] 黄含军. 壳体在侧向脉冲载荷作用下的瞬态响应[D]. 北京: 中国工程物理研究院北京研究生部, 2003.
- HUANG H J. The Transient Response of Shells Under Lateral Impulsive Loading[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2003.
- [39] 杜亮亮, 钱伟新, 刘寿先, 等. 冲击波与爆轰实验瞬态光电测试技术研究进展[J]. *兵工学报*, 2023, 44(12): 3622-3640.
- DU L L, QIAN W X, LIU S X, et al. Research Progress of Transient Photoelectric Measurement Technology for Shock Wave and Detonation Physics Experiments[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3622-3640.
- [40] ZHANG X, ZHANG H. Axial Crushing of Circular Multi-Cell Columns[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 110-125.
- [41] ALKHATIB S E, TARLOCHAN F, HASHEM A, et al. Collapse Behavior of Thin-Walled Corrugated Tapered Tubes Under Oblique Impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 122: 510-528.
- [42] MOHAMEDSHERIFF N, GUPTA N K, VELMURUGAN R, et al. Optimization of Thin Conical Frusta for Impact Energy Absorption[J]. *Thin-Walled Structures*, 2008, 46(6): 653-666.
- [43] SINGACE A A, EL-SOBKY H, PETSIOS M. Influence of End Constraints on the Collapse of Axially Impacted

- Frusta[J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39(5): 415-428.
- [44] AHMAD Z, THAMBIRATNAM D P. Dynamic Computer Simulation and Energy Absorption of Foam-Filled Conical Tubes Under Axial Impact Loading[J]. Computers & Structures, 2009, 87(3/4): 186-197.
- [45] KATHIRESAN M, MANISEKAR K, MANIKANDAN V. Performance Analysis of Fibre Metal Laminated Thin Conical Frusta Under Axial Compression[J]. Composite Structures, 2012, 94(12): 3510-3519.
- [46] SHIRAVAND A, ASGARI M. Hybrid Metal-Composite Conical Tubes for Energy Absorption; Theoretical Development and Numerical Simulation[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 145: 106442.
- [47] KATHIRESAN M, MANISEKAR K. Axial Crush Behaviours and Energy Absorption Characteristics of Aluminium and E-Glass/Epoxy Over-Wrapped Aluminium Conical Frusta Under Low Velocity Impact Loading[J]. Composite Structures, 2016, 136: 86-100.
- [48] KARAGIOZOVA D, ALVES M, JONES N. Inertia Effects in Axisymmetrically Deformed Cylindrical Shells Under Axial Impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(10): 1083-1115.
- [49] ZHANG Y, SUN G Y, XU X P, et al. Multiobjective Crashworthiness Optimization of Hollow and Conical Tubes for Multiple Load Cases[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 82: 331-342.
- [50] AKTAY L, TOKSOY A K, GÜDEN M. Quasi-Static Axial Crushing of Extruded Polystyrene Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tubes: Experimental and Numerical Analysis[J]. Materials & Design, 2006, 27(7): 556-565.
- [51] AHMAD Z, THAMBIRATNAM D P, TAN A C C. Dynamic Energy Absorption Characteristics of Foam-Filled Conical Tubes Under Oblique Impact Loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5): 475-488.
- [52] GHAMARIAN A, ZAREI H R, ABADI M T. Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled End-Capped Conical Tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(10): 1312-1319.
- [53] GHAMARIAN A, ZAREI H R, FARSI M A, et al. Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of the Empty and Foam-Filled Conical Tube with Shallow Spherical Caps[J]. Strain, 2013, 49(3): 199-211.
- [54] MIRFENDERESKI L, SALIMI M, ZIAEI-RAD S. Parametric Study and Numerical Analysis of Empty and Foam-Filled Thin-Walled Tubes Under Static and Dynamic Loadings[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008, 50(6): 1042-1057.
- [55] AZARAKHSH S, GHAMARIAN A. Collapse Behavior of Thin-Walled Conical Tube Clamped at both Ends Subjected to Axial and Oblique Loads[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 112: 1-11.
- [56] FULTON R E. Dynamic Axisymmetric Buckling of Shallow Conical Shells Subjected to Impulsive Loads[J]. Journal of Applied Mechanics, 1965, 32(1): 129.
- [57] ALBRECHT B, BAKER W E, VALATHUR M. Elastic-plastic Response of a Thin Conical Shell to an Axial Impact[J]. Journal of Detection and Control, 1987; 4: 30-37.
- [58] 茹重庆, 王仁. 轴向冲击载荷下圆锥壳的塑性屈曲[J]. 工程力学, 1988, 5(2): 1-9.
- RU C Q, WANG R. Plastic Buckling of a Slender Circular Conical Shell Under Axial Impulsive Loading[J]. Engineering Mechanics, 1988, 5(2): 1-9.
- [59] YAMAZAKI K, HAN J. Maximization of the Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells[J]. Advances in Engineering Software, 2000, 31(6): 425-434.
- [60] 张超. 铜合金圆柱壳在轴向冲击载荷作用下塑性动力屈曲的实验研究及数值仿真[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- ZHANG C. Experimental Study and Numerical Simulation of Plastic Dynamic Buckling of Copper Alloy Cylindrical Shell Under Axial Impact load[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [61] BALL R E, BURT J A. Dynamic Buckling of Shallow Spherical Shells[J]. Journal of Applied Mechanics, 1973, 40(2): 411-416.
- [62] HUMPHREYS J S, ROTH R S, ZATLERS J. Experiments on Dynamic Buckling of Shallow Spherical Shells Under Shock Loading[J]. AIAA Journal, 1965, 3(1): 33-39.
- [63] 刘赛, 张伟贵, 肖凯, 等. 轴向冲击作用下杆的弹塑性动态屈曲准则[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 144-148.
- LIU S, ZHANG W G, XIAO K, et al. Elastic-Plastic Dynamic Buckling Criterion of Rods Under Axial Impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19): 144-148.
- [64] 严东晋, 宋启根. 结构冲击屈曲准则讨论[J]. 工程力学, 1997, 14(4): 18-27.
- YAN D J, SONG Q G. Discussion on Structural Impact Buckling Criterion[J]. Engineering Mechanics, 1997, 14(4): 18-27.
- [65] SONG B Q, JONES N. Dynamic Elastic Buckling of Complete Spherical Shells with Initial Imperfections[J].

- Journal of Structural Mechanics, 1983, 11(3): 327-350.
- [66] TELALOV A I, AGULOV V I. Experimental Study of the Dynamic Stability of Spherical Shells with Axial Reinforcement when Subjected to an External Pressure Pulse[J]. International Applied Mechanics, 1993, 29(1): 42-47.
- [67] ZHANG X, CHENG G D, YOU Z, et al. Energy Absorption of Axially Compressed Thin-Walled Square Tubes with Patterns[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(9): 737-746.
- [68] MAMALIS A G, MANOLAKOS D E, DEMOSTHENOUS G A, et al. The Static and Dynamic Axial Crumbling of Thin-Walled Fibreglass Composite Square Tubes[J]. Composites Part B: Engineering, 1997, 28(4): 439-451.
- [69] HUANG J C, WANG X W. Numerical and Experimental Investigations on the Axial Crushing Response of Composite Tubes[J]. Composite Structures, 2009, 91(2): 222-228.
- [70] MCGREGOR C, VAZIRI R, XIAO X R. Finite Element Modelling of the Progressive Crushing of Braided Composite Tubes Under Axial Impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(6): 662-672.
- [71] KATHIRESAN M, MANISEKAR K, MANIKANDAN V. Crashworthiness Analysis of Glass Fibre/Epoxy Laminated Thin Walled Composite Conical Frusta Under Axial Compression[J]. Composite Structures, 2014, 108: 584-599.
- [72] KARBHARI V M, CHAOLING X. Energy Absorbing Characteristics of Circular Frusta[J]. International Journal of Crashworthiness, 2003, 8(5): 471-479.
- [73] SALEHGHAFARI S, TAJDARI M, MOKHTARNEZHAD F. The Collapse of Thick-Walled Metal Tubes with Wide External Grooves as Controllable Energy-Dissipating Devices[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(11): 2465-2480.
- [74] SALEHGHAFARI S, TAJDARI M, PANAHI M, et al. Attempts to Improve Energy Absorption Characteristics of Circular Metal Tubes Subjected to Axial Loading[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(6): 379-390.