

高 g 值冲击下薄壁管抗冲击性能研究

李耀宙¹, 张冰冰¹, 薛仲卿¹, 范志强^{2*}

(1. 太原工业学院, 太原 030008; 2. 中北大学, 太原 030051)

摘要: **目的** 在弹箭发射与侵彻时, 弹箭系统内部测试电路元件承受高 g 值加载。为提高电路元件的存活度, 需对其进行缓冲防护。**方法** 利用气炮装置发射钢弹, 撞击底座获得高 g 值加载, 研究铝合金薄壁管的抗冲击特性, 并基于 LS-DYNA 研究薄壁管壁厚和冲击速度对高 g 值冲击过程的影响。**结果** 钢弹冲击速度增加, 底座的激励加速度幅值 (Acceleration Amplitude of Excitation, AAE) 逐渐增加, 单层管 (CirT) 和多胞管 (MT) 的缓冲效率分别达到 91.0% 和 74.7%, 数值模拟所得 AAE 和响应加速度幅值 (Acceleration Amplitude of Response, AAR) 与实验结果误差 $<5\%$, 薄壁管壁厚对激励加速度几乎无影响。**结论** 本文所得结果对轻质元件的高 g 值冲击防护有较强的指导意义。

关键词: 高 g 值加载; 薄壁管; 抗冲击; 缓冲效率

中图分类号: TB482.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)19-0058-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.004

Impact Resistance Performance of Thin-walled Tube under High g Impact

LI Yaozhou¹, ZHANG Bingbing¹, XUE Zhongqing¹, FAN Zhiqiang^{2*}

(1. Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 2. North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: During missile launch and penetration, the internal testing circuit components of the missile system are subject to high g overload. The work aims to apply buffer protection to the circuit components to improve the survival of the circuit components. The air gun device was used to launch steel bullets to impact the base under high g loading, so as to study the impact resistance characteristics of aluminum alloy thin-walled tubes. Based on LS-DYNA, the effect of thin-walled tube wall thickness and impact velocity on the high g impact was studied. As the impact velocity of the steel ball increased, the acceleration amplitude of excitation (AAE) at the base gradually increased. The buffering efficiency of single-layer tubes (CirT) and multi cell tubes (MT) reached 91.0% and 74.7%, respectively. The error between the acceleration amplitude of excitation and the acceleration amplitude of response (AAR) obtained from numerical simulation and experimental results was not more than 5%, and the wall thickness of thin-walled tubes had almost no effect on the excitation acceleration. The results obtained in this article have strong guiding significance for the high g impact protection of lightweight components.

KEY WORDS: high g loading; thin-walled tubes; impact resistance; buffer efficiency

弹体系统内部的测试电路在弹体发射或侵彻硬目标物体过程中承受着 10 000g 以上的加载作用, 其

加载时间为数百微秒, 易导致元件中线路损坏。为提高其存活度需进行防护, 其防护方式一般采用主动防

收稿日期: 2024-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (12072326); 山西省科技厅基础研究计划自由探索类青年项目 (202203021222281); 山西省高等学校科技创新项目 (2023L341); 太原工业学院引进人才科研资助项目 (2023KJ043)

*通信作者

护或被动防护^[1-2]。主动防护主要通过焊接、粘接和灌封等方式加固元件上的电路元件,然而内部加固设计受到灌封技术制约且有些光电测控设备无法进行灌封加固,加固设计还存在缓冲效率较低的问题^[3-4]。被动防护一般采用泡沫材料或泡沫材料填充管等方式,然而泡沫材料易破裂导致载荷不稳定,泡沫材料填充管很难进行多次缓冲,而薄壁管具有更好的吸能特性,因此本文采用薄壁管对元件进行高 g 值加载缓冲^[5-7]。高 g 值加载主要借助霍普金森压杆、弹体侵彻靶板和 Taylor 冲击装置 3 种方式。其中,关于霍普金森压杆加载方面,国内外许多学者利用撞击杆将高 g 值加载到入射杆端,达到 10 万 g 的加速度幅值,但霍普金森压杆尺寸限制了多胞薄壁结构的缓冲应用;借助弹体侵彻靶板和 Taylor 冲击装置都是单次加载实验,不可重复进行。鉴于以上问题,亟需对高 g 值冲击设计进行改进^[8-13]。本文以测试电路元件的高 g 值防护为背景,通过钢弹撞击底座获得高 g 值加载,底座压缩薄壁管,薄壁管有序折叠变形吸收能量,从而实现对轻质元件的防护^[14]。在抗冲击防护中,缓冲效率 η 是衡量高 g 值冲击过程的重要参数,其数学表达式为:

$$\eta = \frac{a_E - a_R}{a_E} \quad (1)$$

式中: a_E 为激励加速度, a_R 为响应加速度。

基于目前高 g 值加载的限制,本文研制出新的高 g 值加载装置,其加速度幅值 10 000 g 以上,加载时间达数百微秒,接近弹箭系统在发射或侵彻时的加速度幅值,并利用单层管和多胞管实现元件冲击防护。利用 LS-DYNA 对高 g 值冲击过程数值验证,进一步研究薄壁管壁厚和冲击速度对高 g 值冲击过程的影响,为此类测试电路元件的高过载防护提供参考。

1 高 g 值冲击实验

高 g 值加载实验平台如图 1 所示,主要包括空气炮装置和内外套筒,空气炮内径为 50 mm,炮口端安装测速装置。内外套筒主要用于底座和元件自由滑动,内外套筒的直径和厚度分别为 $\Phi 108 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 和 $\Phi 133 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,长度分别为 365 mm 和 480 mm,

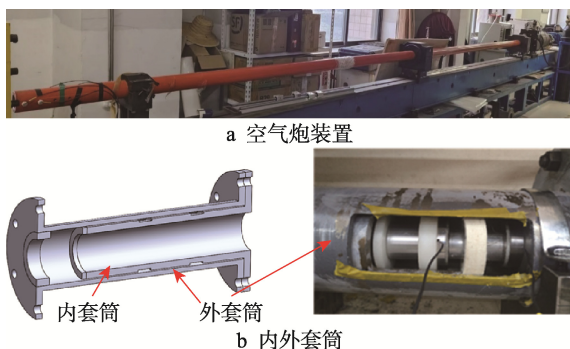


图 1 高 g 值加载实验平台

Fig.1 High g loading experimental platform

这样可以控制底座在设备中的行程,当底座碰到内套筒底部时会被阻挡,保证底座不会对薄壁管进行二次加载;内外套筒通过法兰连接,整套装置放置在工作台架上。

底座主要用于压缩薄壁管,其直径为 110 mm,厚度约为 60 mm,材料采用合金钢,总体质量约为 2.6 kg,表面套有尼龙环,保证底座能在外套筒内自由滑动。元件直径为 80 mm,厚度为 85 mm,材料采用铝合金,质量为 0.567 kg。底座和元件的中间分别安装加速度传感器,其灵敏度系数为 0.005 pc/ms^{-2} 。为保证高 g 值加载的平稳性,本文实验采用锥形整形器。为使钢弹精准地冲击底座,在冲击实验之前采用激光校准方法,对整体设备进行对中调试。本文采用单层管和多胞管进行抗冲击实验,2 种薄壁管的尺寸特征: d_0 为 40 mm, d_1 为 20 mm,长度 l 为 60 mm,两者壁厚均为 1.0 mm,材质均为铝合金,整个实验装置和薄壁管如图 2 所示。

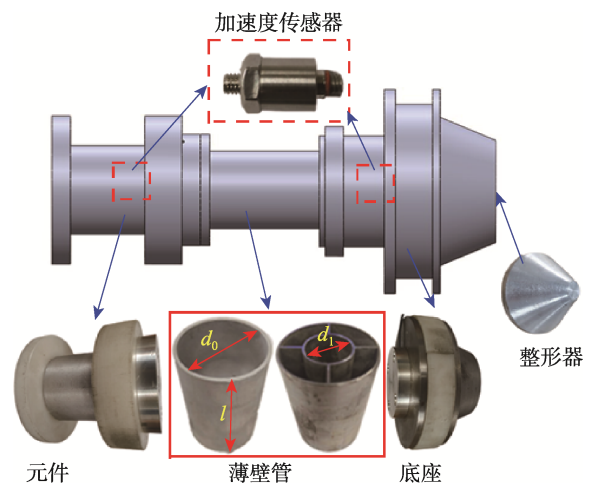


图 2 高 g 值冲击实验装置与薄壁管

Fig.2 High g impact test device and thin-walled tube

2 实验结果与分析

2.1 单层管

在高 g 值冲击时,将单层管固定在底座和元件中间,通过发射器钢弹获得初速度,钢弹撞击整形器,整形器压缩底座,使底座获得初速度;由于缓冲作用,元件加速较慢,夹在中间的单层管被压缩。通过测速仪,当钢弹冲击速度 v 为 60 m/s 时,底座获得冲击速度为 30 m/s,单层管能被压缩 3 次,前 2 次压缩量皆为 24 mm,且压缩载荷有序波动,第 3 次冲击时单层管被压实,压缩载荷急剧上升,导致元件的 AAR 增加,此时不利于元件的缓冲。当 v 为 80 m/s 时,底座获得冲击速度为 50 m/s,单层管可以经历 2 次压缩,第 1 次压缩量为 27 mm,第 2 次单层管被压实,压缩载荷快速上升,元件的 AAR 急剧增加。传感器测量的 AAE 如图 3a 和 3c 所示,在 2 种冲击速度时底座的 AAE 分别为 10 000 g 和 15 000 g ,加载脉宽约为 300 μs ;

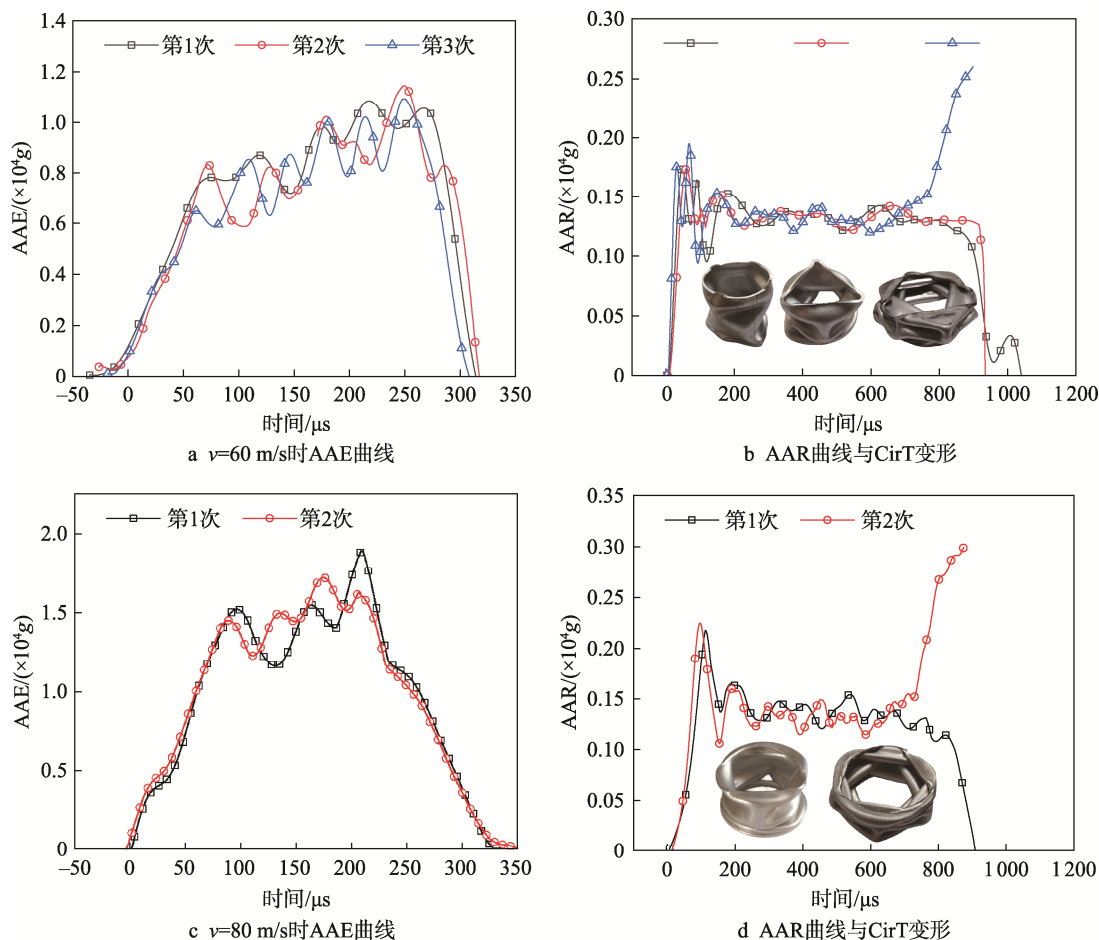


图3 2种速度冲击时 AAE、AAR 和 CirT 变形

Fig.3 AAE, AAR and deformation under two kinds of velocity

且在同一速度时,底座的 AAE 基本一致,也表明高 g 值实验装置的可靠性。

在不同冲击速度时实验测得元件平台段的 AAR 分别为 1 278g 和 1 343g,如图 3b 和 3d 所示。由式 (1) 得到装置的缓冲效率分别为 87%和 91%,该装置通过单层管的折叠变形进行能量吸收,对底座上万 g 的加速度进行缓冲;较高的缓冲效率能保护元件的电路器件不被破坏,提高元件的存活度。单层管动态压缩载荷为 7.21~7.69 kN,根据 $a=F/m$ 得元件的 AAR 为 1 272.6 g~1 356.0g,与实验结果相比,误差<0.99%,表明本实验装置测量 AAR 的准确性^[4]。

表 1 2种速度冲击时 CirT 结果
Tab.1 Results of CirT under two kinds of velocity

冲击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	缓冲次序	压缩量/mm	AAE/ $\times 10^4\text{g}$	AAR/ $\times 10^4\text{g}$
60	第 1 次	24	1.0	0.127 8
	第 2 次	24		
	第 3 次	压实		
80	第 1 次	27	1.5	0.134 3
	第 2 次	压实		

2.2 多胞管

在单层管的冲击实验中,当钢弹冲击速度达到

80 m/s 时,单层管历经 2 次冲击就被压实,在第 2 次冲击时单层管被压实,压缩载荷上升,导致元件的 AAR 也快速增加,这样不利于对电路元件进行冲击防护,为此本节采用多胞管进行冲击防护。通过动态冲击实验,本节得到底座 3 次冲击的 AAE-时间曲线,如图 4a 所示,AAE 约为 15 000g,加载时间为 300 μs ,并且 3 次 AAE 幅值和加载时间基本一致。图 4b 为 MT 的 AAR 曲线,平台段加速度约为 3 851g,3 次冲击的 AAR 幅值基本一致,表明高 g 值冲击多胞管过程的可靠性,缓冲效率为 74.7%。针对 MT 的动态冲击载荷分析,理论加速度为 3 793g,与本次高 g 实验的 AAR 基本一致。将每次冲击过程的 MT 变形量记录下来,如表 2 所示,MT 3 次的变形量几乎相等,且经过 3 次压缩结构未被压实。MT 变形如图 4b 所示,表明每次缓冲过程 MT 吸收能量大小基本相等,变形模式均为金刚石折叠模式。

3 高 g 值冲击响应数值分析

3.1 数值验证

针对高 g 冲击实验过程进行数值验证,采用 Solid Works 软件建立模型,并利用 HYPERMESH 功

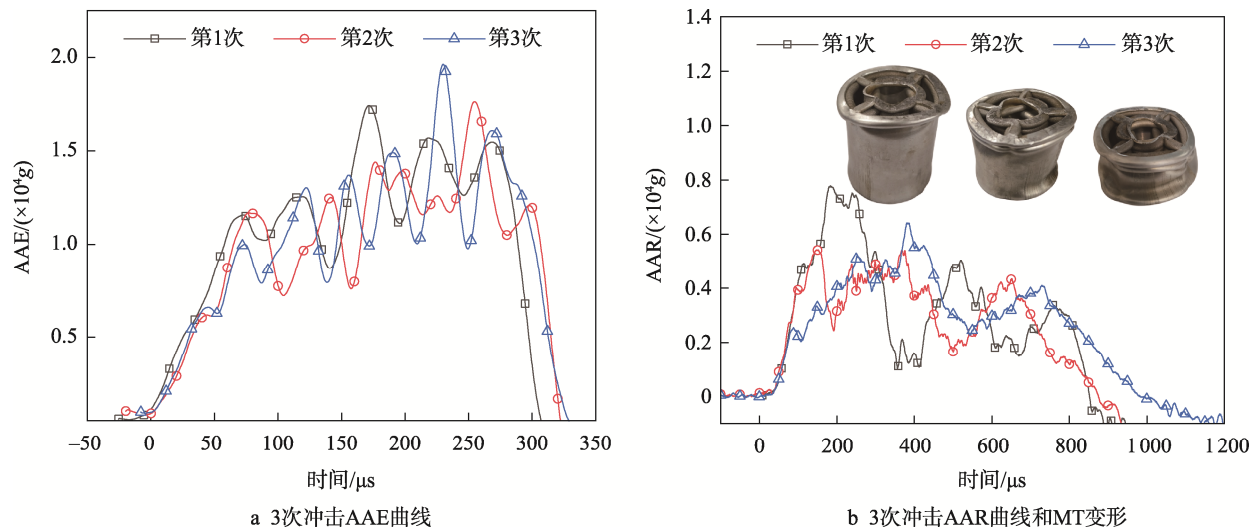


图 4 多胞管高 g 值冲击曲线和变形
Fig.4 Curve and deformation of multi-cell tube under high g impact

表 2 多胞管高 g 值冲击结果
Tab.2 Results of multi-cell tube under high g impact

冲击速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	缓冲次序	压缩量/mm	AAE/ $\times 10^4 g$	AAR/ $\times 10^4 g$
80	第 1 次	10.84		
	第 2 次	11.07	1.500 0	0.385 1
	第 3 次	11.47		

能进行网格划分,数值模型如图 5a 所示。该数值模型包括钢弹、整形器、底座、薄壁管和元件,其中钢弹、底座和元件采用 001-ELASTIC 模型,整形器和薄壁管采用

123-MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 模型,材料参数如表 3 所示^[7, 15]。为保证计算的准确性,需进行网格无关性验证,如图 5b 所示,考虑到计算时间和计算精度,本文选择薄壁管网格为 $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 进行计算,其余部分采用 $1.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ 的网格尺寸进行计算。

为了准确地模拟薄壁管的大变形,薄壁采用 Beltschko-Tsay 四边形壳单元,单元厚度方向采用五点积分。关于模型接触算法,钢弹与整形器、底座与整形器、底座与薄壁管和元件与薄壁管之间采用 NODES_TO_SURFACE 算法,薄壁管采用 AUTOMATIC SINGLE SURFACE 算法,静态摩擦系数和动态摩擦系数分别为 0.3 和 0.2^[16-18]。

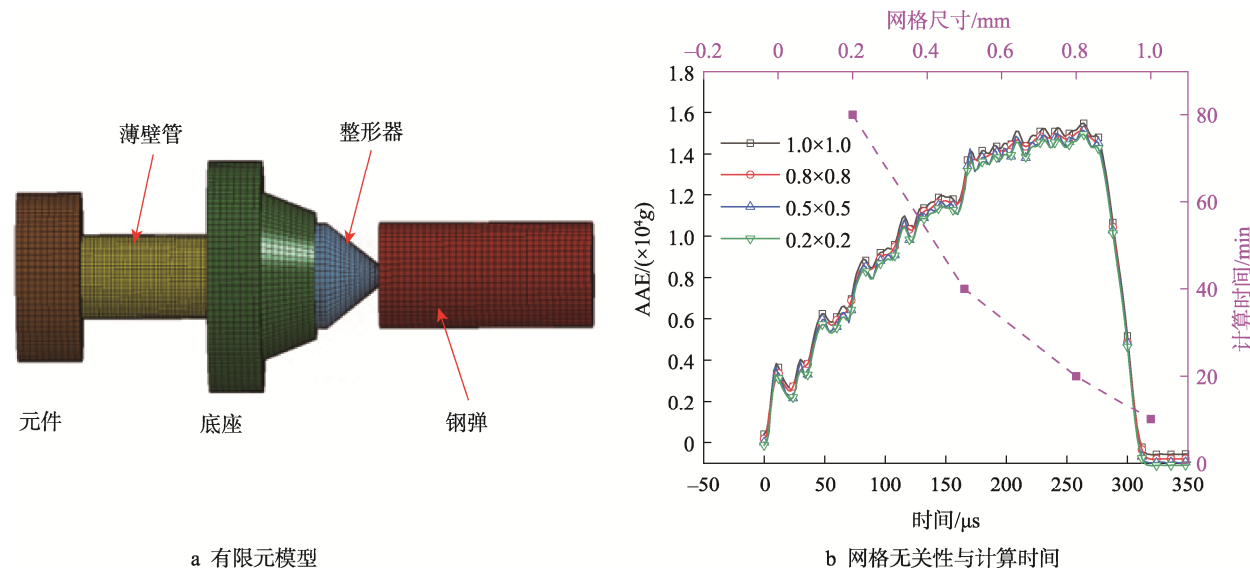


图 5 高 g 冲击数值模型
Fig.5 High g impact numerical model

表3 各材料模型部件和数据参数

Tab.3 Material model and data parameters of each part

部件	E/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	σ_y/MPa	ν
钢弹	210	7 850	—	0.30
整形器	70	2 700	200	0.33
底座	210	7 850	—	0.30
薄壁管	68	2 700	76.9	0.30
元件	68	2 700	—	0.30

各部分的速度变化如图 6a 所示, 钢弹在冲击过程中逐渐减速, 底座逐渐加速; 由于缓冲作用, 元件随后加速, 且加速比较缓慢, 最后 3 者达到匀速运动状态。整形器塑性变形和多胞管变形如图 6b 和 6c 所示, 实验结果和数值结果变形基本一致。3 次冲击实验的 AAE 和 AAR 的加速度幅值、加载时间和数值模拟结果基本一致, 如图 6d 和 6e 所示, 因此该数值算法能够准确模拟高 g 值动态冲击过程。

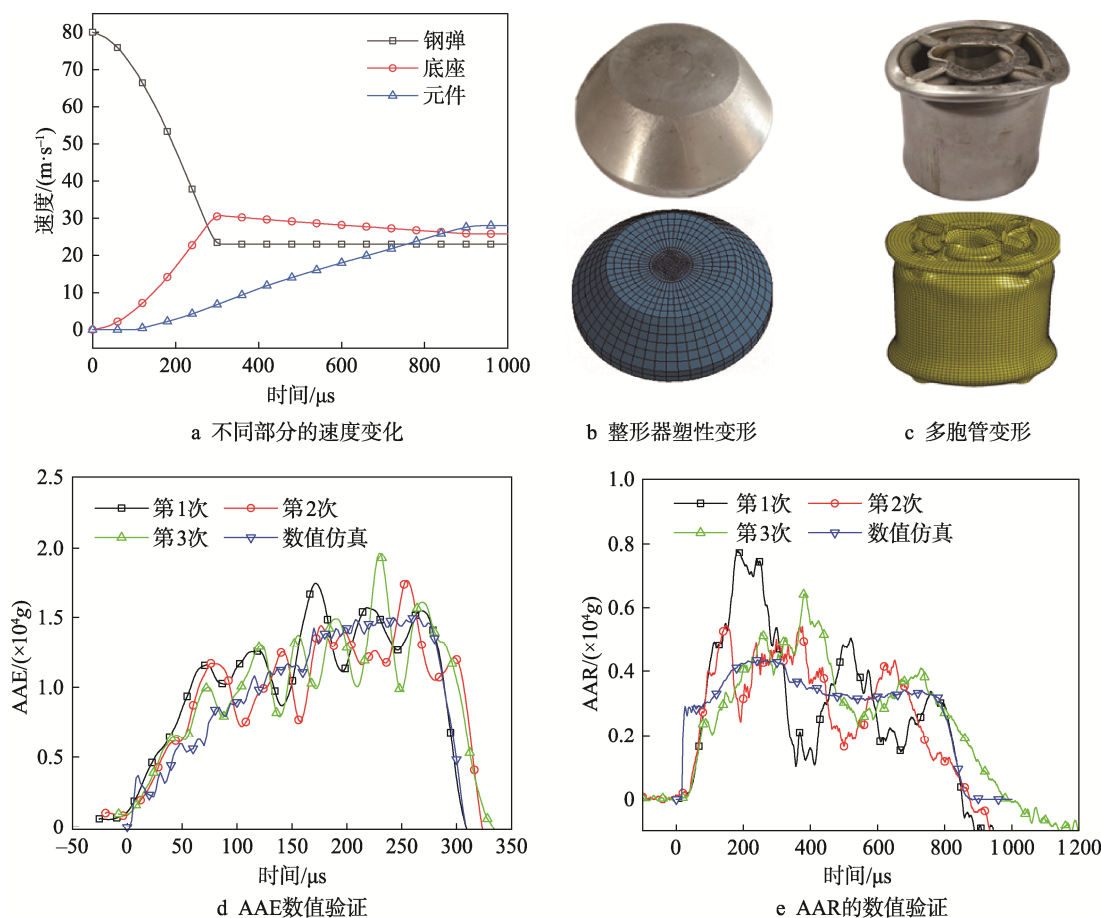
3.2 数值分析

3.2.1 薄壁管壁厚

针对 CirT 和 MT 进行抗冲击研究, 薄壁管厚度

分别为 1.0 mm 和 1.5 mm, 钢弹冲击速度分别为 60、80、100 和 120 m/s, 底座 AAE 曲线如图 7a 所示。AAE 随着冲击速度的增加而增加, 这是因为冲击速度增加, 钢弹对整形器的压缩会更强, 导致底座受到的载荷也会增大, 其 AAE 就会增加。在相同冲击速度下, 薄壁管的结构和尺寸对 AAE 几乎没有影响, 通过对比整形器和底座之间的压缩载荷和薄壁管与底座之间的载荷, 前者达到数百千牛, 后者仅仅数十千牛, 两者相差 1 个数量级。如图 7b 所示, 底座两侧相当于被载荷不同的弹簧作用, 并且 2 个弹簧载荷相差 10 倍以上, 因此底座的载荷主要取决于载荷较大的弹簧作用。底座在受到整形器和薄壁管的载荷作用时, 以前者施加的载荷为主, 则在改变不同结构对元件的缓冲时, 结构不会对底座的 AAE 产生影响。

由图 7c 可知, 在相同冲击速度下, 厚度分别为 1.0 mm 和 1.5 mm 2 种结构的压缩载荷分别为 7.6、14.1、23.5 和 43.1 kN, 压缩载荷会影响元件的 AAR, 载荷越高, AAR 越大。结果表明: 压缩载荷越低的结构, 在同一冲击速度模式下, 薄壁管折叠变形的压缩量越大, 会出现 1 次冲击结构被压实情况, 载荷急剧上升, 导致元件的加速度急剧增加; 压缩载荷越高的结构, 薄壁管折叠变形的压缩量越小, 可以进行多次缓冲。

图6 高 g 值冲击数值验证Fig.6 Numerical verification under high g impact

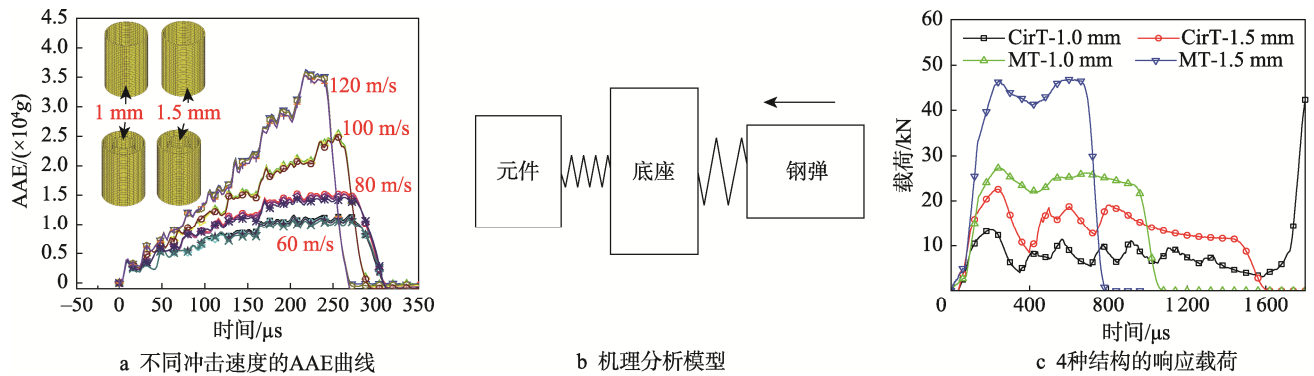


图 7 不同结构的 AAE、分析模型和压缩载荷

Fig.7 AAE, analytical models, and compressive loads for different structures

3.2.2 冲击速度

针对 CirT 和 MT 进行高 g 值加载, 壁厚分别为 1.0 mm 和 1.5 mm 的响应载荷如图 8 所示, 随着冲击速度增加, 每种结构的压缩载荷几乎没有差别, 表明薄壁管的压缩载荷主要和自身结构有关。载荷曲线呈波动形态, 这是由薄壁管在被压缩过程中形成的折叠所致, CirT 的折叠变形主要为手风琴模式, 而实验中的折叠模式主要为金刚石模式, 这是由于在数值模拟中, 结构加载处于理想状态, 结构端面平整, 而实验中的结构的端面会有误差。MT 的折叠方式主要为金刚

石折叠模式变形, 与实验结果一致。

对于 1.0 mm 厚的 CirT, 随着冲击速度增加, 其压缩量也逐渐增加, 当冲击速度为 100 m/s 时, CirT 被压实, 压缩载荷会急剧增加, 如图 8a 所示。对于 1.5 mm 厚的 CirT, 当冲击速度达到 130 m/s 时, 结构才能被压实, 如图 8b 所示。MT 的折叠变形以金刚石模式呈现, 且同等厚度 MT 的载荷要高于 CirT 的, 对于 1.0 mm 和 1.5 mm 厚的 MT, 当冲击速度分别达到 150 m/s 和 220 m/s, 结构才能被压实, 如图 8c 和 8d 所示。结果表明: CirT 和 MT 单次冲击被压实所需要的冲击速度随着壁厚增加而增加。

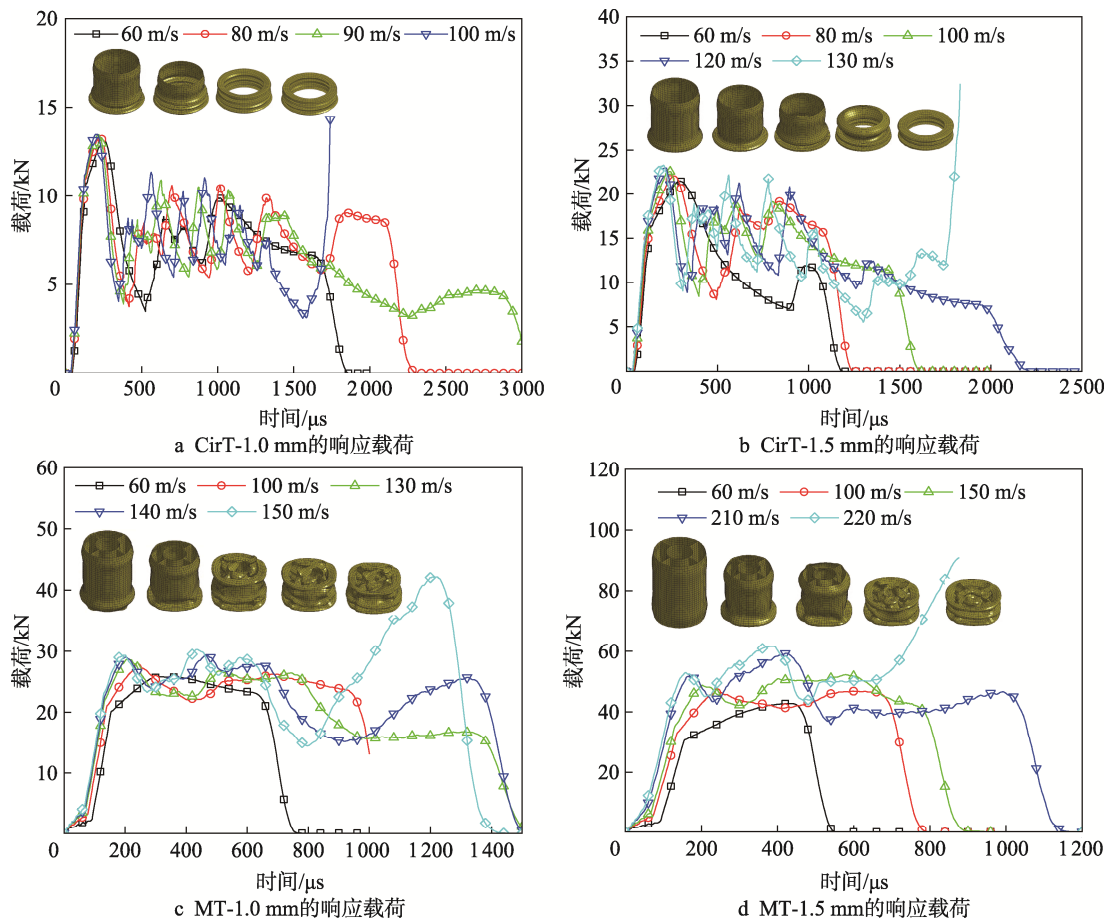


图 8 不同冲击速度时薄壁管压缩载荷和变形

Fig.8 Compression load and thin-walled tube deformation at different impact velocities

4 结语

本文基于空气炮装置构建新的高 g 值加载实验平台,通过实验得到的激励加速度和加载时间,接近弹箭系统发射或侵彻时的加速度幅值和脉宽。针对单层管和多胞管进行高 g 值冲击实验研究,利用数值方法对冲击过程中的激励加速度和响应加速度进行验证,针对薄壁管壁厚和冲击速度对高 g 值冲击影响进行研究,揭示薄壁管抗冲击性能机理,主要结论如下:

1) 本文研制出的薄壁管高 g 值冲击实验装置能重复使用,当冲击速度分别为 60 m/s 和 80 m/s 时,得到 AAE 分别为 10 000g 和 15 000g,加载时间为 300 μ s。当冲击速度为 80 m/s 时,单层管和多胞管的缓冲效率分别为 91.0% 和 74.7%,显著降低了元件的加速度幅值,提升了其抗冲击性能。

2) 底座在受到整形器和薄壁管的载荷作用时,以前者施加的载荷为主,则在改变不同结构对元件缓冲时,结构不会对底座的 AAE 产生影响。

3) 底座的 AAE 随着冲击速度的增加而增加,元件的抗冲击载荷取决于薄壁管的压缩载荷。

参考文献:

- [1] 李永伟,郭晋秦,乔俊福,等.高 g 值压阻式加速度计设计与仿真[J].半导体光电,2023,44(5):690-693.
LI Y W, GUO J Q, QIAO J F, et al. Design and Simulation of High g Piezoresistive Accelerometers[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(5): 690-693.
- [2] 胡志栋,张新驰,周祥宇.高 g 值可见光导引头缓冲系统仿真设计及验证[J].兵器装备工程学报,2023,44(10):25-30.
HU Z D, ZHANG X C, ZHOU X Y. Simulation Design and Verification of High g Value Visible Light Seeker Buffer System[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(10): 25-30.
- [3] 张冰冰.漂珠聚氨酯复合泡沫制备及其高 g 值安全防护动力响应研究[D].太原:中北大学,2019.
ZHANG B B. Preparation of Cenospheres Polyurethane Syntactic Foams and the Mechanical Response in Safety Protection Subjected to High- g Shock[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [4] LI Y Z, FAN Z Q, HU S Q, et al. Dynamic Enhancement Mechanism of Energy Absorption of Multi-Cell Thin-Walled Tube[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 178: 109449.
- [5] 张冰冰,李耀宙,李华波,等.复合泡沫填充管的高 g 值冲击防护特性[J].包装工程,2023,44(21):54-61.
ZHANG B B, LI Y Z, LI H B, et al. Protection Performance of Syntactic Foam Filled Tubes to High g Shock[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(21): 54-61.
- [6] 徐鹏,高猛.高 g 值冲击下泡沫铝填充壳结构抗冲击性能多目标优化[J].应用力学学报,2016,33(5):845-851.
XU P, GAO M. Multiobjective Crashworthiness Optimization for Foam-Filled Thin-Walled Structures Subjected to High g Value Impact[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(5): 845-851.
- [7] FAN Z Q, TAN X L, HU J K, et al. A Comparative Study on Dynamic Compression Response of Multi-Cell Thin-Walled Structures with Filling Foams and Connecting Ribs[J]. International Journal of Crashworthiness, 2024, 29(2): 210-223.
- [8] 刘波.冲击加速度传感器在冲击载荷下的失效分析[D].绵阳:中国工程物理研究院,2017.
LIU B. Failure Analysis of Impact Acceleration Sensors Under Impact Loads[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2017.
- [9] 周广宇,胡时胜.高 g 值加速度发生器中的波形整形技术[J].爆炸与冲击,2013,33(5):479-486.
ZHOU G Y, HU S S. Pulse-Shaping Techniques of High- g -Value Acceleration Generators[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(5): 479-486.
- [10] TOGAMI T C, BROWN F A, FORRESTAL M J, et al. Performance Evaluation of Accelerometers to 200,000 G[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65(1): 266-268.
- [11] 文丰,石云波,周振,等.基于 MEMS 的高 g 值加速度计及在炮弹侵彻双层钢靶试验中的应用[J].振动与冲击,2013,32(19):165-169.
WEN F, SHI Y B, ZHOU Z, et al. High- g Accelerometer Based on MEMS and Its Application in a Projectile Penetrating Double-Layer Steel Target Test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(19): 165-169.
- [12] YUAN K B, GUO W G, SU Y, et al. Study on Several Key Problems in Shock Calibration of High- g Accelerometers Using Hopkinson Bar[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 258: 1-13.
- [13] LI J C, CHEN G, LU Y G, et al. Investigation on the Application of Taylor Impact Test to High- g Loading[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 717122.
- [14] XIE S C, ZHENG S W, ZHANG J, et al. The Design of Circular Tubes with Stepped Varying Thicknesses and Their Synergistic Multi-Tube Combination[J]. Structures, 2023, 57: 105125.
- [15] LI Y Z, FAN Z Q, HU S Q, et al. Mechanical Performance of Multi-Cell Thin-Walled Tubes under Static and Dynamic Axial Loading[J]. International Journal of Crashworthiness, 2024, 29(1): 46-56.
- [16] ZHANG Y, LI K Y, HUANG W Z, et al. Crushing Performance Evaluation of Gradient Sierpinski Triangular Fractal Column[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 199: 111784.
- [17] XIE S C, HE G D, ZHANG J, et al. Crashworthiness Study of Multi-Tube Assemblies of Corrugated Spacer Tubes Based on the Height Difference Staggered Compensation Method[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 199: 111783.
- [18] ZHANG J, XIE S C, ZHOU H, et al. Study and Optimization of Energy Absorption Characteristics of a New Concave Polygon Tube[J]. Structures, 2023, 53: 1030-1045.