

初始扭转缺陷下梯度厚度薄壁方管的变形模式与吸能性能

陈汪兵¹, 陈林^{1,2*}, 欧道刚¹

¹湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

²结构抗风与振动控制湖南省重点实验室, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

为评估梯度厚度方形金属薄壁管在制造偏差条件下的吸能性能,并探索缺陷背景下吸能性能的提升途径,本文基于LS-DYNA建立了轴向压缩有限元模型。系统研究了梯度厚度设计在准静态压缩下的变形机制,以及扭转型初始几何缺陷对吸能特性的影响规律。研究表明:相较于均匀厚度管,梯度厚度设计能有效改变屈曲演化规律,并诱导高耗能的外延变形模式;在理想构型下,梯度管的能量吸收性能显著优于均匀管,其初始峰值压溃力最高降低58.4%,压溃力效率最高提升186.6%。引入扭转型初始几何缺陷会抑制外延模式的发展并导致吸能水平普遍衰减,但梯度管在缺陷条件下仍表现出优于均匀管的吸能能力,具有良好的工程鲁棒性。

关键词

梯度厚度薄壁管, 轴向压溃, 初始几何缺陷, 外延变形模式, 能量吸收

Deformation Modes and Energy Absorption Performance of Graded Thickness Thin-Walled Square Tubes with Initial Torsional Imperfections

Wangbing Chen¹, Lin Chen^{1,2*}, Daogang Ou¹

¹School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan Provincial Key Laboratory of Structural Engineering for Wind Resistant and Vibration Control, Xiangtan Hunan

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈汪兵, 陈林, 欧道刚. 初始扭转缺陷下梯度厚度薄壁方管的变形模式与吸能性能[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 246-256. DOI: 10.12677/ms.2026.165118

Abstract

To evaluate the energy absorption performance of graded thickness square metallic thin-walled tubes under manufacturing imperfections and to explore potential approaches for enhancing their crash-worthiness in the presence of defects, a finite element model of axial compression was established using LS-DYNA. The deformation mechanisms of graded-thickness design under quasi-static compression, as well as the effects of torsional initial geometric imperfections on energy absorption characteristics, were systematically investigated. The results indicate that, compared with uniform-thickness tubes, the graded-thickness design effectively alters the buckling evolution process and promotes the formation of high energy-absorbing extensional deformation modes. Under ideal configurations, graded-thickness tubes exhibit significantly superior energy absorption performance, with the initial peak crushing force reduced by up to 58.4% and the crushing force efficiency increased by up to 186.6%. The introduction of torsional initial geometric imperfections suppresses the development of the extensional deformation mode and leads to a general degradation in energy absorption capacity. However, graded-thickness tubes still demonstrate better energy absorption capability than uniform-thickness tubes under imperfect conditions, indicating strong structural robustness in engineering applications.

Keywords

Graded Thickness Thin-Walled Tubes, Axial Crushing, Initial Geometric Imperfections, Extensional Deformation Mode, Energy Absorption

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金属薄壁管凭借质量轻、比吸能高、易加工及可更换等显著优势，在车辆吸能盒、桥梁防撞装置及各类防护结构中得到了广泛应用[1]-[3]。其核心耗能机理主要源于轴向压溃过程中局部屈曲、塑性铰形成及渐进折叠所产生的塑性功耗[4]。早期研究如 Jones 等，系统揭示了方形薄壁管典型变形模式(图 1)与平均压溃载荷的内在联系[5]。随后，为进一步提升薄壁吸能结构的效率，学者们围绕均匀厚度管开展了大量优化设计，包括截面形式优化、折纸构型、开孔诱导、泡沫填充及组合结构设计等，旨在提高其平均压溃力与能量吸收能力[6]-[9]；然而值得注意的是，薄壁管在实际制造与装配过程中不可避免地存在壁面初始挠曲、壁厚波动及装配偏差等几何缺陷，此类缺陷会显著影响压溃模式和能量吸收能力。因此，鲁棒性应作为薄壁吸能结构设计中一个不可或缺的考量维度[10] [11]。

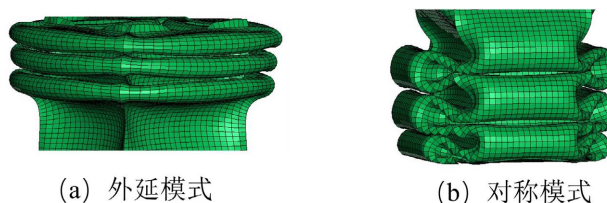


Figure 1. Classical deformation modes of thin-walled tubes
图 1. 薄壁管经典变形模式

近年来, 梯度厚度薄壁方管作为一种优化设计思路备受关注。Sun 等证明了连续轴向梯度设计能在不增加薄壁管额外质量的情况下实现比吸能的提升与峰值力的降低[12]; Zhang 等则从横向梯度角度揭示了壁厚重分配对屈曲触发、折叠传播及吸能效率的改善作用[13]。然而, 现有的梯度厚度薄壁管的研究多基于几何完美模型展开, 关于此类结构在初始几何缺陷作用下是否仍具备良好的鲁棒性, 目前相关研究仍较为匮乏; 基于上述考虑, 本文以梯度厚度方形金属薄壁管为研究对象, 通过数值模拟重点探讨以下两方面内容: 梯度厚度设计在准静态轴压下表现出更优耐撞性能的内在机理; 扭转型初始几何缺陷对其压溃模式演化与能量吸收稳定性的影响规律。

2. 梯度厚度薄壁管有限元模型及验证

2.1. 几何特征与参数定义

梯度厚度薄壁管的几何特征如图 2 所示。其中, c 为方形截面边长, L 为总初始长度, t_{ave} 为梯度厚度管的平均厚度。管壁厚度沿轴向由顶端(薄壁端) t_{min} 向底端(厚壁端) t_{max} 线性增加。当上下端厚度相等(即 $t_{max} = t_{min} = t_{ave}$)时, 金属管即为均匀厚度管。因此, 所有设计方案均保持总质量一致, 从而确保后续两者性能对比的公平性。本文引入无量纲梯度系数 G 以量化壁厚沿轴向的变化程度, 其定义见式(1)。

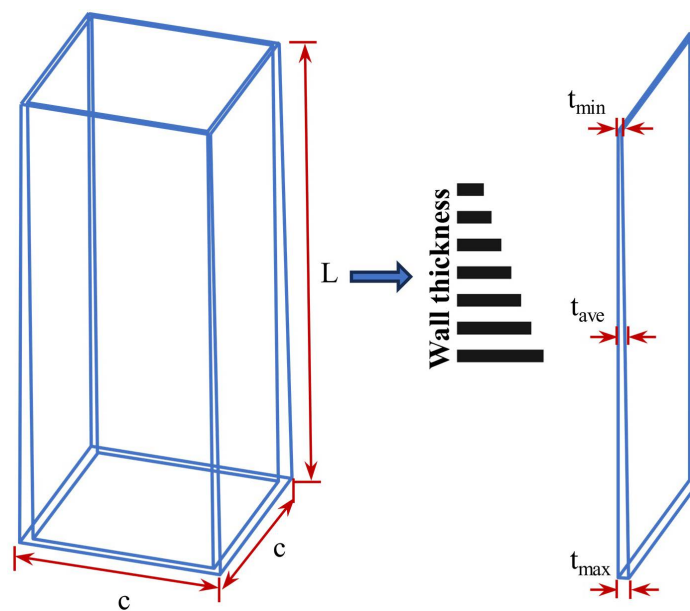


Figure 2. 3D schematics of graded thickness thin-walled tubes

图 2. 梯度厚度薄壁管的 3D 示意图

$$G = \frac{(t_{max} - t_{min})}{L} \quad (1)$$

2.2. 有限元建模及验证

本研究采用 Hypermesh 进行前处理建模, 并利用 LS-DYNA 进行数值计算。轴向压缩过程的数值模拟示意图如图 3 所示。薄壁管采用 Belytschko-Tsay 壳单元建模, 沿厚度方向设置 5 个积分点, 网格尺寸统一为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 。上下刚性板采用实体单元建模, 并定义为 *MAT_RIGID 材料模型。薄壁管材料选用 Al6063-T5 铝合金, 采用 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模型表征, 其主要物理参

数如下：密度 $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，弹性模量 $E = 68.2 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ ，屈服应力 $\sigma_0 = 180 \text{ MPa}$ [8]。鉴于该铝合金对应变率效应不敏感，模拟中忽略应变率影响[5]。为在兼顾计算效率的同时满足准静态加载条件，加载速率设定为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，并通过能量曲线(图 4)验证总动能与内能相比始终低于 5%，从而满足准静态模拟要求[14]。接触定义方面，薄壁管与刚性板之间采用自动面 - 面接触，薄壁管自接触采用自动单面接触，静、动摩擦系数均取 0.3。

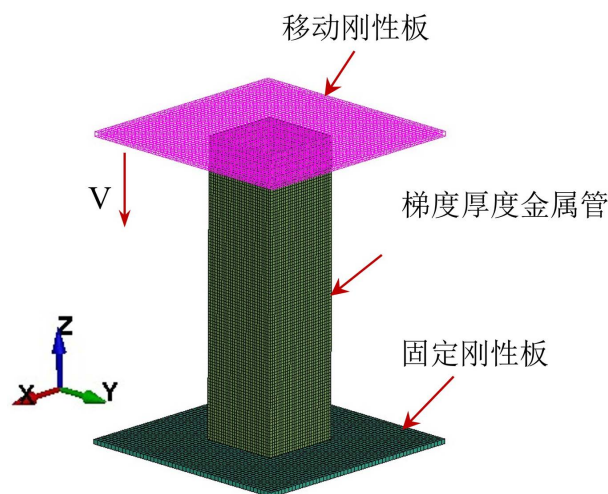


Figure 3. Finite element model of thin-walled tubes subjected to axial loading
图 3. 轴向载荷作用下薄壁管的有限元模型

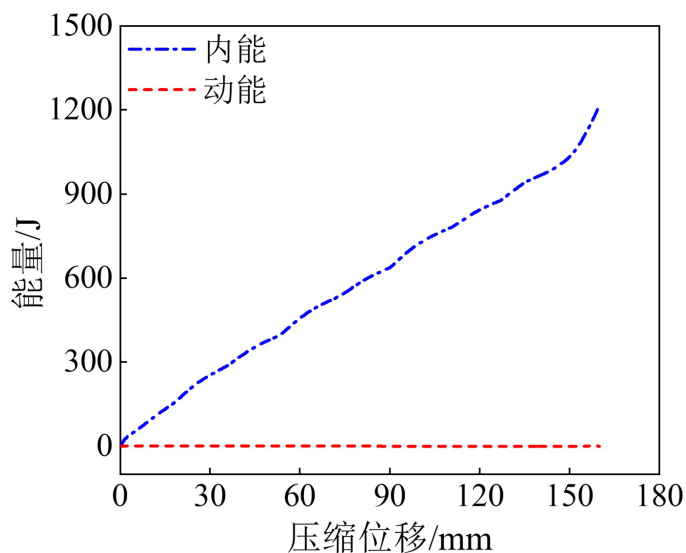


Figure 4. Kinetic and internal energy evolution during compression under quasi-static loading
图 4. 准静态加载下动能与内能随压缩过程变化曲线

选取文献[8]中梯度厚度金属管和文献[15]中金属管实验结果进行对比分析。如图 5 所示，有限元模型能够较为准确地复现梯度厚度管的整体变形特征，以及实验中观测到的外延模式与对称模式的演化过程。进一步对比力 - 位移曲线(图 6)可知，数值模拟结果在整体演化趋势及波峰位置上与实验曲线吻合良好。

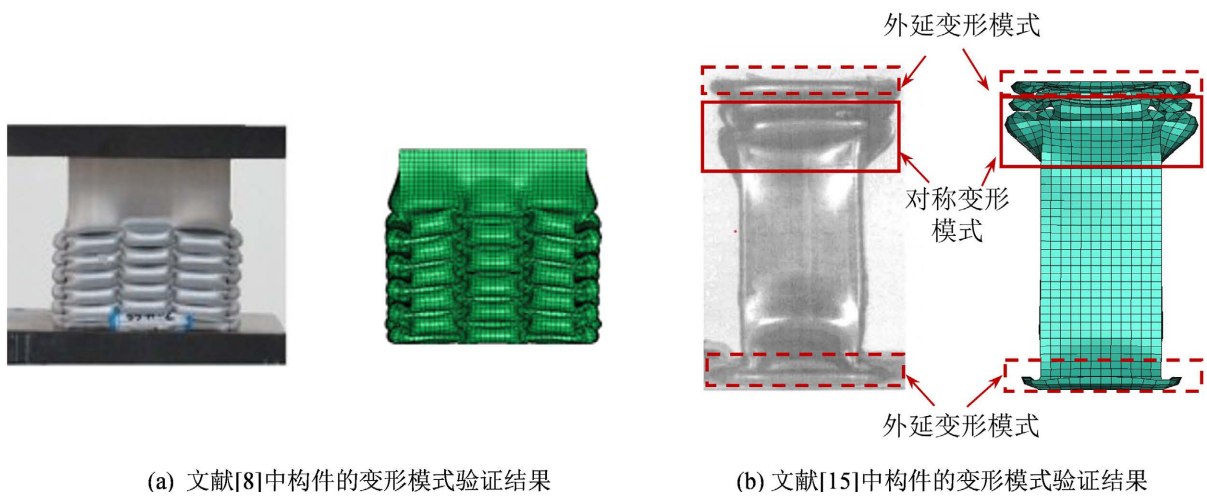


Figure 5. Verification results of deformation modes
图 5. 变形模式的验证结果

为系统评估结构的吸能性能，本文采用初始峰值压溃力(IPCF)、能量吸收(EA)、平均压溃力(MCF)及压溃力效率(CFE)作为吸能性能评价指标。其中，EA 定义为有效压缩范围内的力 - 位移曲线积分，MCF 定义为 EA 与相应压缩位移的比值，CFE 则为 MCF 与 IPCF 之比[5]。表 1 汇总了关键吸能指标的定量对比，结果显示各指标误差基本控制在 10% 以内。上述验证结果证明了本文有限元模型在模拟薄壁管压溃行为方面的可靠性与准确性。

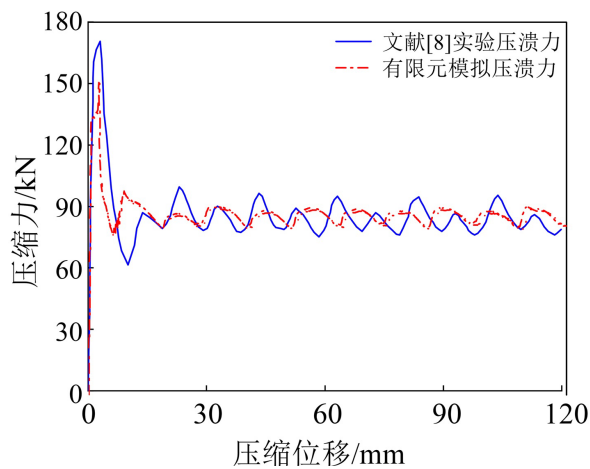


Figure 6. Comparison of force-displacement curve between the experiment test and simulation
图 6. 实验测试与有限元模拟力 - 位移曲线对比

Table 1. Validation of energy absorption indicators
表 1. 吸能指标的验证

文献	类型	EA/kJ	IPCF/kN	MCF/kN
[8]	实验	10.27	170.59	85.58
	有限元	10.38	153.47	86.50
	误差	1.07%	10.04%	1.08%

续表

	实验	2.469	N/A	30.1
[15]	有限元	2.251	N/A	27.45
	误差	8.83%	N/A	8.80%

3. 梯度厚度管的轴向压溃行为分析

3.1. 梯度厚度管的吸能特性

本节以截面边长 $c = 40 \text{ mm}$ ，长度 $L = 200 \text{ mm}$ ，平均厚度 $t_{\text{ave}} = 1 \text{ mm}$ 的薄壁方管为研究对象。以均匀厚度管($G=0$)为基准，进一步设计四种梯度厚度管，其梯度系数 G 分别为 0.001、0.002、0.004 和 0.006。各构型的最终变形模式如图 7 所示。研究发现，所有梯度管均呈现由外延模式起始、向对称模式过渡的混合变形特征。但两类模式的占比差异显著。基于图 8 的示意图，对不同变形模式的轴向长度进行量化，并将结果汇总于表 2。结果表明，引入微小梯度($G=0.001$)时，可使外延模式占比从 0% 跃升至 51.02% 的峰值；然而，随着 G 的进一步增大，外延模式占比呈现明显的单调递减趋势。

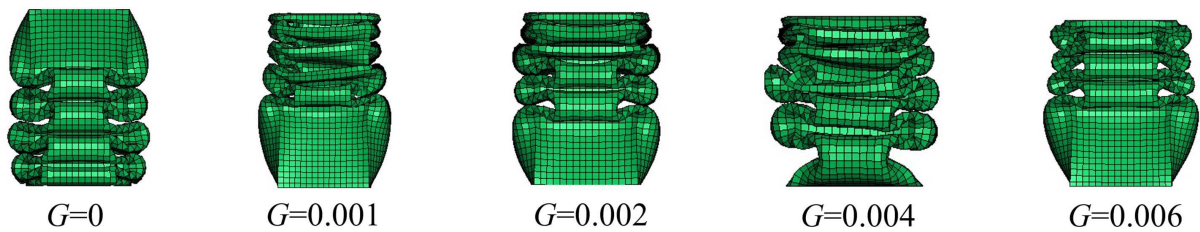


Figure 7. Final crushing modes of thin-walled tubes under quasi-static loading
图 7. 准静态条件下薄壁管最终形态图

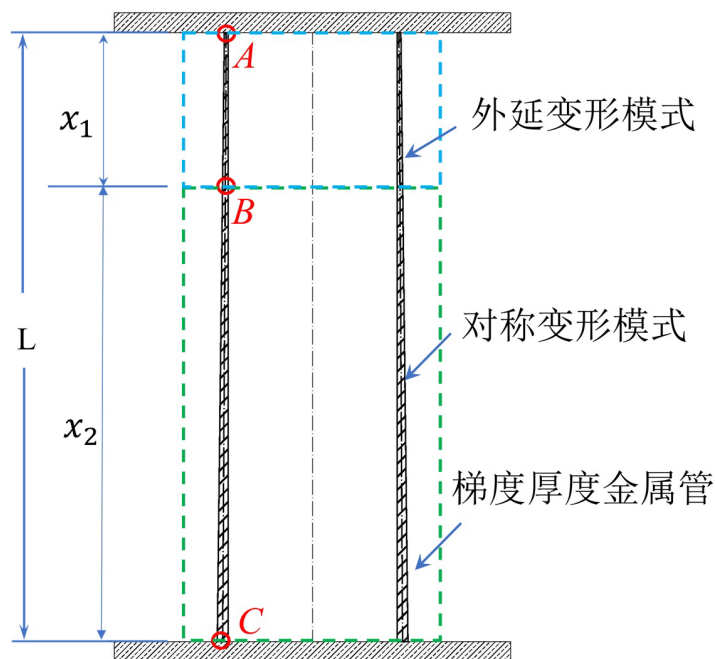


Figure 8. Measurement diagram of deformation mode ratio
图 8. 变形模式比测量示意图

Table 2. Statistical data on the proportion of deformation modes
表 2. 变形模式比例的统计数据

梯度系数 G	$L(E)$ (mm)	$L(S)$ (mm)	$L(E)/L$	$L(S)/L$
0	0	200	0	100%
0.001	102.04	97.96	51.02%	48.98%
0.002	64.60	135.4	32.30%	67.70%
0.004	44.60	155.4	22.30%	77.70%
0.006	22.30	177.7	11.15%	88.85%

注：表中 $L(E)$ 、 $L(S)$ 以及 L 分别表示外延变形模式的长度、对称变形模式的长度以及薄壁管的总长度 L ； $L(E)/L$ 与 $L(S)/L$ 分别表示外延变形模式的长度、对称变形模式的长度占薄壁管总长度 L 的比值。

表 3 系统对比了梯度厚度管与均匀厚度管在不同梯度系数 G 条件下的耐撞性指标变化规律(括号内为相对均匀管结果的增减比例)，结果表明，梯度厚度设计在各工况下均表现出显著的性能优势。在能量吸收(EA)方面，梯度管的 EA 较均匀管提升了 14.2%~28.6%。其中， $G = 0.001$ 时因外延模式占比最高而达到吸能峰值；此后 EA 出现一定程度的回落，但随着 G 继续增大又呈持续上升的趋势。其次，随着 G 的增大，初始峰值力(IPCF)单调下降(最大降幅 58.4%)，压溃力效率(CFE)显著提升(最高增幅 186.6%)。这一结果说明梯度设计能够有效抑制压溃初期的峰值载荷，从而降低第一峰值力带来的冲击风险。

Table 3. Comparative analysis of crashworthiness of thin-walled tubes
表 3. 薄壁管耐撞特性对比分析

梯度系数 G	EA (J)	IPCF (kN)	CFE (%)
0	1069.1	28.1	25.4
0.001	1375.3 (28.6%)	25.9 (-7.8%)	35.4 (39.4%)
0.002	1220.4 (14.2%)	22.5 (-19.9%)	35.9 (41.3%)
0.004	1239.1 (15.9%)	13.6 (-51.6%)	60.6 (138.6%)
0.006	1275.4 (19.3%)	11.7 (-58.4%)	72.8 (186.6%)

EA 随梯度系数波动的原因可结合文献[5]提出的平均压溃力(MCF)的理论进行解释。在相应几何尺寸下，外延变形模式对应的 MCF 显著高于对称变形模式。当 $G = 0.001$ 时，外延变形模式在整体变形中的占比最高，较大的 MCF 使其获得较大的能量吸收能力。随着 G 增至 0.002，薄端壁厚进一步减小，在一定程度上削弱了外延变形区域的能量耗散能力，导致 EA 下降。然而，根据文献[5]中给出的对称变形模式 MCF 表达式(2)，其能量耗散能力与壁厚满足 $t^{5/3}$ 的幂函数关系，即厚度增加区域对能量的贡献大于减薄区域的损失。因此，当 G 从 0.002 继续增大至 0.006 时，尽管外延占比较少，薄壁管 EA 再次呈现上升趋势。

$$MCF = 13.055 \cdot \sigma_0 \cdot c^{1/3} t^{5/3} \quad (2)$$

3.2. 初始扭转缺陷对吸能特性的影响

3.2.1. 缺陷构型与参数设置

扭转型初始几何缺陷可理解为构件某一截面相对于理想位置绕构件轴线发生小角度旋转 Y ，如图 9 所示。依据规范[16]限值，当截面宽度 $c = 40$ mm 时，允许扭转角为 $1.64^\circ/\text{m}$ 。因此，当薄壁管长度 $L = 200$

mm 时, 选取 $Y=0.025^\circ$ 、 0.05° 、 0.075° 、 0.1° 以及 0.3° 作为随机扰动因素, 以系统评估其对梯度厚度薄壁管变形模式与吸能性能的影响。

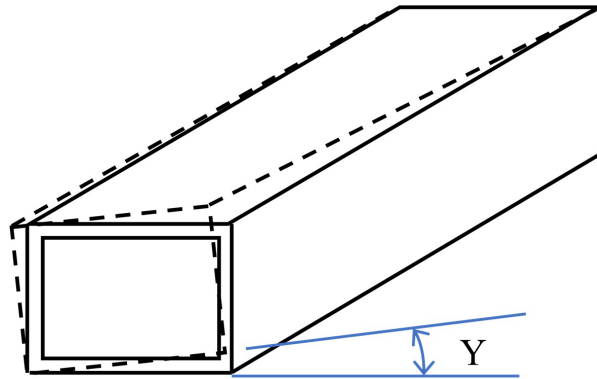


Figure 9. Schematic diagram of torsional initial imperfections
图 9. 扭转型初始缺陷示意图

3.2.2. 变形模式稳定性与吸能特性分析

在不同梯度系数 G 与扭转角度 Y 的组合条件下, 薄壁管的最终变形形态如图 10 所示, 并按 “ $G-Y$ ” 的方式进行命名。结合图 10 以及表 4 中对外延变形模式占比的统计结果可以看出: 在小幅扭转 ($Y < 0.075^\circ$) 作用下, 梯度管仍能维持一定比例的外延模式, 表现出较强的模式保持能力。但随着扭转角增大至 $Y = 0.1^\circ$ 及以上, 高耗能的外延模式受到严重抑制, 变形演化逐渐向不对称模式转变。而在 $G = 0.006$ 工况下, 由于无缺陷时薄壁管外延占比本身较低, 因此受扭转缺陷影响相对有限, 基本维持在约 11.15% 左右。



Figure 10. Final deformation modes of thin-walled tubes with torsional initial geometric imperfections
图 10. 扭转型初始几何缺陷下薄壁管的最终变形模式

Table 4. Proportion of extensional deformation modes in thin-walled tubes with torsional initial geometric imperfections
表 4. 扭转型初始几何缺陷下薄壁管外延变形模式占比

	$Y = 0^\circ$	$Y = 0.025^\circ$	$Y = 0.05^\circ$	$Y = 0.075^\circ$	$Y = 0.1^\circ$	$Y = 0.3^\circ$
$G = 0$	0%	0%	0%	0%	0%	0%
$G = 0.001$	51.02%	31.02%	29.77%	28.52%	14.77%	16.02%
$G = 0.002$	32.30%	32.50%	29.99%	15.00%	15.00%	31.04%
$G = 0.004$	22.30%	14.85%	28.59%	14.85%	14.85%	14.85%
$G = 0.006$	11.15%	11.15%	11.15%	11.15%	11.15%	11.14%

图 11 进一步揭示了扭转型初始几何缺陷对薄壁管能量吸收(EA)性能的影响规律。结果显示,引入扭转型初始几何缺陷后,各梯度系数下的 EA 相较于理想工况(Y_0)普遍呈现衰减趋势,证实了扭转扰动对梯度厚度薄壁管耗能能力的削弱作用。其核心原因在于:扭转缺陷显著降低了高耗能理想变形模式的触发概率。尽管吸能表现有所下降,梯度厚度设计仍展现出优异的工程鲁棒性:在同等缺陷水平下,梯度厚度管的 EA 普遍高于均匀厚度管,始终保持着相对更优的耗能水平。值得注意的是,理想工况下表现最优的 $G = 0.001$ 工况对缺陷扰动较为敏感,其外延模式占比在缺陷影响下下降剧烈;相比之下, $G = 0.002$ 由于其梯度分布优势,在与 $G = 0.001$ 相近外延占比条件下仍可维持较高的耗能效率,从而表现出 EA 峰值的特征。

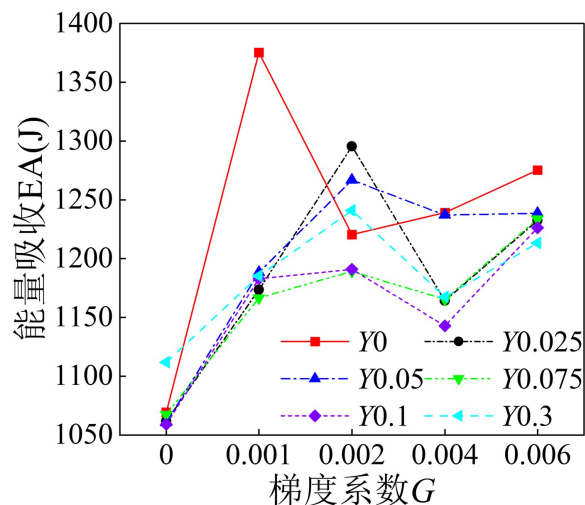


Figure 11. Energy absorption of thin-walled tubes with torsional initial geometric imperfections
图 11. 扭转型初始几何缺陷下薄壁管的能量吸收

4. 讨论

本文研究了具有初始扭转型几何缺陷的梯度厚度方形薄壁管在轴向压缩下的变形模式与吸能性能。研究表明,在理想构型下,极小梯度(如 $G = 0.001$)虽能激发高耗能的外延变形模式,实现吸能性能最优,但其对初始缺陷较为敏感,易发生模式退化;而适度增大梯度(如 $G = 0.002$)在缺陷干扰下仍能维持相对可观能量吸收性能,展现出更好的鲁棒性。基于此,本文给出差异化的设计策略:在能够严格控制制造偏差的高精度场景下,可采用较小梯度($G = 0.001$)以追求性能极限;在汽车、建筑等大批量生产的普通工况下,建议首选 $G = 0.002$ 梯度,以牺牲少量的理论吸能换取更高的工程可靠性;若设计重心侧重于降低

峰值荷载冲击, 则 $G = 0.006$ 梯度更具优势。总之, 具体的工程应用中梯度的选取应在制造精度信心与缺陷容忍度之间寻求最优平衡点。

5. 结论

(1) 在准静态轴向压缩下, 梯度厚度薄壁管主要表现出外延与对称模式并存的混合变形特征, 且初始屈曲始终以外延模式主导。随着梯度系数 G 的增大, 外延变形模式的占比呈规律性下降, 结构变形机制逐渐向对称模式过渡。

(2) 梯度厚度设计能够显著优化薄壁管的吸能性能。依托于初期触发的高耗能外延模式以及沿轴向递增的壁厚分布, 小梯度工况下的能量吸收总量相较均匀厚度管最高提升 28.6%, 而大梯度工况下的压溃力效率最高可提升 186.6%。

(3) 扭转型初始几何缺陷对高耗能的外延变形模式具有显著的抑制作用, 且该削弱效应随扭转角的增大而加剧。尽管缺陷的引入导致多数工况的总能量吸收普遍衰减, 但梯度厚度管在缺陷工况下的 EA 仍稳定高于均匀厚度管, 展现出较好的工程鲁棒性。

基金项目

国家自然科学基金(52278500)。

参考文献

- [1] Fan, W., Shen, D., Zhang, Z., Huang, X. and Shao, X. (2020) A Novel UHPFRC-Based Protective Structure for Bridge Columns against Vehicle Collisions: Experiment, Simulation, and Optimization. *Engineering Structures*, **207**, Article ID: 110247. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110247>
- [2] 张景峰, 季浩浩, 冯良, 等. ECC板-薄壁钢管组合防护装置抗撞性能分析及优化[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(4): 40-49.
- [3] Baroutaji, A., Sajjia, M. and Olabi, A. (2017) On the Crashworthiness Performance of Thin-Walled Energy Absorbers: Recent Advances and Future Developments. *Thin-Walled Structures*, **118**, 137-163. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018>
- [4] 余同希. 能量吸收研究 60 年——来自何处? 走向何方? [J]. 力学与实践, 2024, 46(1): 1-17.
- [5] Jones, N. and Abramowicz, W. (1985) Static and Dynamic Axial Crushing of Circular and Square Tubes. In: Reid, S.R., Ed., *Metal Forming and Impact Mechanics*, Elsevier, 225-247. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-031679-6.50021-7>
- [6] Ge, C., Gao, Q. and Wang, L. (2018) Theoretical and Numerical Analysis of Crashworthiness of Elliptical Thin-Walled Tube. *International Journal of Mechanical Sciences*, **148**, 467-474. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.008>
- [7] 孔志成, 胡俊, 郭智平. 星形混合多胞管的耐撞性数值与理论研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(8): 43-55.
- [8] Wu, S., Zheng, G., Sun, G., Liu, Q., Li, G. and Li, Q. (2016) On Design of Multi-Cell Thin-Wall Structures for Crashworthiness. *International Journal of Impact Engineering*, **88**, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.09.003>
- [9] 谢素超, 杨广辉, 周辉. 开孔多管组合式吸能结构轴向压缩力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(15): 250-259.
- [10] Xue, L., Lin, Z. and Jiang, Z. (2000) Effects of Initial Geometrical Imperfection on Square tube Collapse. *Proceedings of the 6th International LS-DYNA Conference*, Dearborn, Michigan/Detroit, USA, 9-11 April 2000, 9-31-9-46.
- [11] Li, M., Yang, F. and Lu, W. (2021) Enhanced Structural Imperfection Resistance in Thin-Walled Tubes Filled with Liquid Nanofoam. In: Singh, R.P. and Chalivendra, V., Eds., *Mechanics of Composite, Hybrid and Multifunctional Materials, Volume 6*, Springer, 89-94. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59868-6_13
- [12] Sun, G., Xu, F., Li, G. and Li, Q. (2014) Crashing Analysis and Multiobjective Optimization for Thin-Walled Structures with Functionally Graded Thickness. *International Journal of Impact Engineering*, **64**, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2013.10.004>
- [13] Zhang, X., Wen, Z. and Zhang, H. (2014) Axial Crushing and Optimal Design of Square Tubes with Graded Thickness. *Thin-Walled Structures*, **84**, 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.07.004>

- [14] Santosa, S.P., Wierzbicki, T., Hanssen, A.G. and Langseth, M. (2000) Experimental and Numerical Studies of Foam-Filled Sections. *International Journal of Impact Engineering*, **24**, 509-534.
[https://doi.org/10.1016/s0734-743x\(99\)00036-6](https://doi.org/10.1016/s0734-743x(99)00036-6)
- [15] Yang, C.C. (1997) Dynamic Buckling of Square Tubes. Ph.D. Thesis, University of Liverpool.
- [16] Aluminum, K. (2011) Soft Alloy Tube & Pipe: Extruded Seamless Aluminum Tube Capabilities. Kaiser Aluminum.