

几种新型薄壁组合结构的轴向冲击吸能特性研究

万育龙 程远胜

(华中科技大学 交通科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 金属薄壁管是一种有效的吸能结构, 并且在吸能体系中得到了广泛应用。用非线性有限元方法研究了轴向冲击载荷作用下方形直壁管和锥壁管的吸能特性, 基于提高结构的吸能能力的考虑提出了几种锥壁组合结构和具有引发机制的直壁组合结构。数值计算结果表明组合结构的吸能能力较之原始结构有显著提高。

关键词: 薄壁结构; 组合结构; 吸能; 冲击; 非线性; 有限元法

中图分类号: U661.42

文献标识码: A

文章编号: 1673-3185(2006)05-06-15-04

Energy Absorption Characteristics of New Thin-walled Built-up Structures Subjected to Axial Impact

Wan Yu-long Cheng Yuan-sheng

(College of Traffic Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430064, China)

Abstract Thin-walled tube of metallic shell is a sort of effective energy absorption structure and widely adopted in energy absorption systems. The energy absorption characteristics of square straight and tapered tubes subjected to axial impact are firstly studied with non linear finite element method in this paper. Some new designs of built-up structures like tapered straight system with triggering feature are introduced for improving the structural properties of energy absorption. Numerical results indicate that the absorption properties of built-up structures are highlighted when compared with the original.

Key words thin-walled structure; built-up structure; energy absorption; impact; non linear; FEM

船舶碰撞和搁浅、车辆行驶安全、航天器软着陆等都提出了结构的耐撞性要求。薄壁结构在轴向冲击作用下能依靠自身结构的屈曲、断裂等破坏形式来吸收和耗散大量碰撞时产生的冲击动能, 因而受到国内外学者和工程师广泛的关注。碰撞是一种瞬态的复杂物理过程, 它包含以大位移、大转动和大应变为特征的几何非线性, 以材料弹塑性变形为特征的材料非线性和以接触摩擦为特征的边界非线性^[1]。对于复合材料薄壁结构, 由于破坏机理、影响因素及复合材料本身的复杂性, 通过理论或数值方法建立精确的能量吸收模型十分困难, 这方面的工作仍处于尝试、摸索阶段, 目前可获得的文献绝大多数属于实验研究^[2]。金属材料在撞击模式下的塑性变形比较稳定, 能够以可控的方式吸收能量。薄壁金属构件的碰撞吸能与材料性能、横截面、壁厚等因素密切相关。目前, 长方形、矩形、圆形截面由于其易

于制造而广泛地应用到吸能体系中。Nagel G M 等人^[3]研究了在准静态作用下一种矩形锥壁结构的吸能特性, 发现锥壁结构相对传统的直壁结构可以很好地降低初始载荷及避免总体失稳。Heung-Soo Kim^[4]设计出了几种组合直壁吸能结构, 这种结构能极大地提高结构的吸能效率。本文以 Nagel G M 及 Heung-Soo Kim 的研究结果为参考, 提出了几种锥壁组合结构和具有引发机制的直壁组合结构。数值分析的结果表明, 较之原始结构, 本文提出的几种新型薄壁组合结构的吸能能力得到了较大的改善。

1 非线性有限元模型的建立

1.1 薄壁管的几何特征

薄壁管分为正方形直壁结构 S-0 和正方形锥壁结构 T-0 两种类型。如图 1 所示, 两种类型的薄壁管的上端截面面积相同, 均为 $100 \text{ mm} \times$

收稿日期: 2006-04-19

作者简介: 万育龙 (1982-), 男, 硕士研究生。研究方向: 结构动力学。E-mail: flarsee@163.com

100 mm, 正方形锥壁管的下端截面尺寸为 125 mm × 125 mm, 故其锥角 $\theta = 24^\circ$; 两种类型薄壁管的长度均为 300 mm, 壁厚均为 1.5 mm。

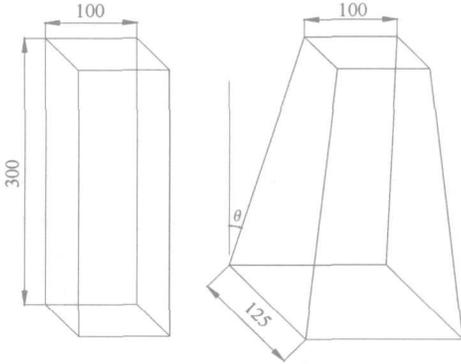


图 1 两种类型的薄壁管结构

1.2 薄壁管轴向冲击数值模拟的参数选择

数值模拟的物理模型如图 2 所示, 薄壁管固定在质量块上以 $V = 15 \text{ m/s}$ 的初速度撞向薄壁管一端的固定墙壁。质量块的质量 $M = 720 \text{ kg}$, 采用 ANSYS/LS-DYNA 分析软件。薄壁管的单元类型均选为四节点 Blystckho-Lin-Tsay 壳单元, 单元尺寸为 5 mm, 壳体厚度方向取为 5 个积分点。材料模型为分段线性塑性模型 Piecewise Linear Plasticity, 薄壁管的材料为可锻钢, 其密度为 7700 kg/m^3 , 杨氏模量 $E = 205 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$, 屈服应力 $\sigma_0 = 304.6 \text{ MPa}$ 图 3 是该材料的有效应力应变关系曲线。质量块和固定墙壁分别用刚性墙 1 和刚性墙 2 来模拟。刚性墙 1 仅保留沿薄壁管轴向的自由度, 约束其他方向的自由度。刚性墙 2 的全部自由度都加以约束。

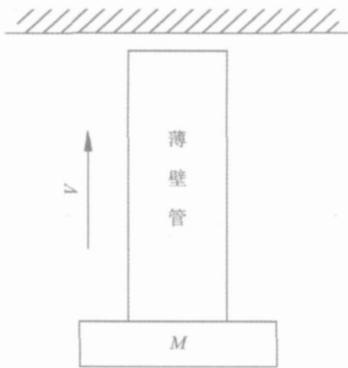


图 2 薄壁管轴向冲击的物理模型

对于弹塑性材料来说, 应变的变化快慢会影响到材料的塑性行为, 高应变率会导致材料的动

力硬化行为^[5]。本模型采用 Cowper-Symonds 公式来考虑应变率影响:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \sigma_0 s^{-1} \quad \sigma_y \geq \sigma_0$$

式中: σ_y 为在单轴塑性应变率 $\dot{\epsilon}$ 时的动屈服应力; σ_0 为相应的静屈服应力; C、P 为材料常数。对于本文中的材料来说, $C = 6844 \text{ s}^{-1}$, $P = 3.91$ 。

接触界面算法选择对称罚函数法。刚性墙 1 与薄壁管的接触为自动面面接触, 薄壁管本身面与面之间的接触为自动单面接触, 薄壁管与刚性墙 2 的接触为自动面面接触。采用刚度沙漏控制法限制可能产生的沙漏模式。时间步长系数为 $0.68^{[6]}$ 。

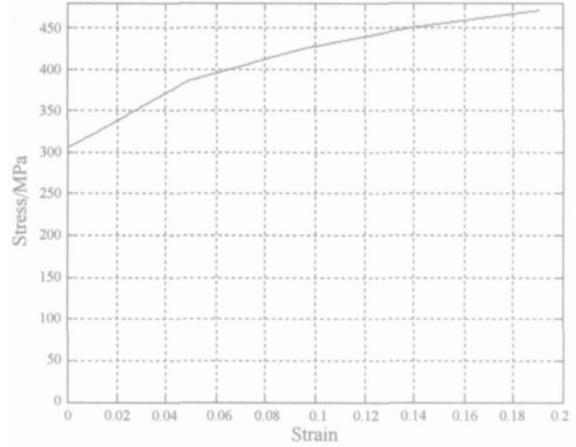


图 3 可锻钢的有效应力应变曲线

2 数值算例分析

2.1 简单方形直壁管和锥壁管

图 4 是 S-0 和 T-0 结构的压溃载荷曲线, 图 5 是用非线性有限元数值仿真的 S-0 和 T-0 结构的压溃破坏过程。表 1 是 S-0 和 T-0 结构的数值结果比较。从图中可以看出, 在压缩过程中两种结构都是以塑性较叠缩形式逐次渐进向下移行。在碰撞接触的初期都形成了一个较大的初始峰值载

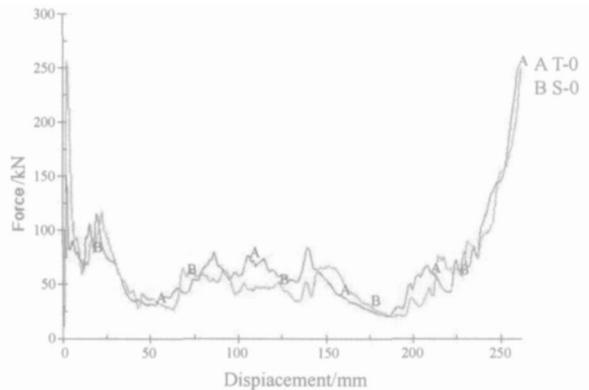


图 4 压溃载荷曲线

荷, 锥壁结构 T-0 的峰值要比直壁结构 S-0 的要小得多。随后载荷在一个较小的范围内波动。在此过程中, 载荷一位移曲线并没有像文献 [3] 中相关图例那样保持较强的规律性和周期性, 这主要是因为文献 [3] 中是一种准静态压缩过程, 无须考虑应变率的影响, 而对于本文中这种中速冲击过程, 应力波的传播掩盖了载荷一位移曲线的规律性, 破坏模式也发生了相应的改变。载荷一位移曲线的最后阶段, 压溃载荷突然快速增加, 这主要是因为此时已经进入了压实阶段。

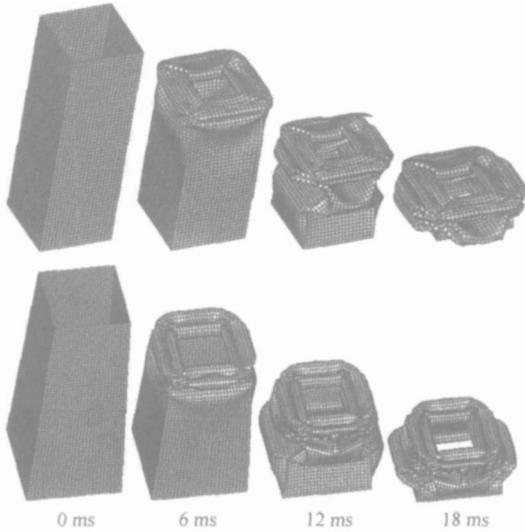


图 5 S-0 和 T-0 结构的模拟变形序列图

初始峰值载荷 P_{cr} 、平均压溃载荷 P_m 和比吸能 E_s 是衡量结构的能量吸收能力的重要参数。 P_{cr} 反映结构的缓冲能力, 较大的初始峰值载荷直接影响到连接薄壁结构的主体结构的冲击响应; P_m 反映了结构最终能吸收能量的多少; E_s 则反映了结构的吸能效率。从图 4 和表 1 可以看出, 相对于直壁结构 S-0 锥壁结构 T-0 的初始峰值载荷 P_{cr} 下降了 37%, 平均压溃载荷增加了 4%, 但同时比吸能 E_s 下降了 7.7%。锥壁结构纵向刚度比直壁结构小是引起初始载荷下降的主要原因。锥壁结构的截面积自上而下不断增大, 这意味着随着压缩的进行, 将有更多的材料参与褶皱, 所以锥壁结构比直壁结构吸收了更多的能量, 但是其吸能效率没有直壁结构高。

表 1 S-0 和 T-0 结构的数值计算结果

	P_{cr} / kN	P_m / kN	$E_s / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
S-0	257.61	52.76	8.46
T-0	162.56	54.85	7.81

2.2 组合结构

为了提高结构的吸能能力, 对原有薄壁结构

S-0 的 4 个边角作一定的处理, 形成 4 个小的直壁结构, 同时对 4 个小直壁结构的连接方式加以变换, 形成如图 6 所示的三种组合结构。对锥壁结构作同样的处理。各种组合结构的有限元模型及模拟变形图如图 7 所示。图中 $a = 100 \text{ mm}$, $b = 25 \text{ mm}$ 。

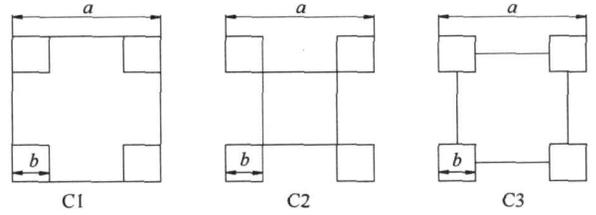


图 6 组合结构截面示意图

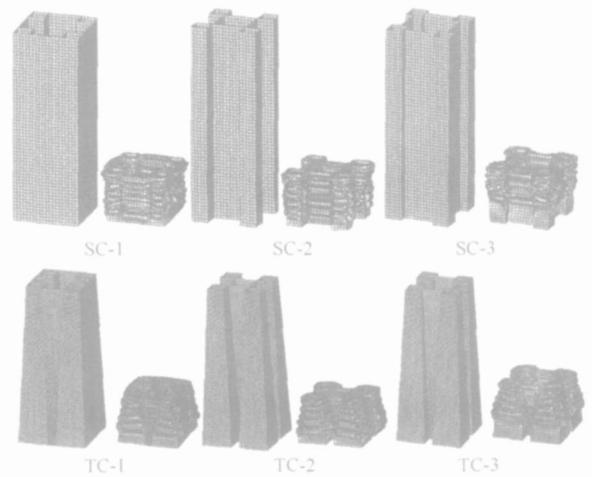


图 7 组合结构的模拟变形序列图

2.3 采用引发机制的组合结构

为了降低直壁组合结构的压溃力初始峰值, 考虑在结构的顶端进行适当的削弱处理。具体做法是将连接 4 个边角直壁管的侧壁沿纵向削去 5 mm 的距离。图 8 是采用了削弱处理引发机制的组合直壁结构的有限元模型及模拟变形图。表 2 是各种组合结构的数值结果。

表 2 各种组合结构的数值结果

	P_{cr} / kN	P_m / kN	$E_s / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
SC-1	391.60	246.55	26.31
SC-2	391.86	254.98	27.21
SC-3	400.12	270.65	28.88
TC-1	341.45	251.23	20.38
TC-2	348.36	259.33	21.04
TC-3	353.83	298.09	24.18
SC-1.1	301.88	237.27	25.46
SC-1.2	325.84	252.37	27.08
SC-1.3	339.31	264.84	28.42

从表 2 中可以看出, 无论是对于直壁还是锥壁结构, 第三种组合形式 C3 均表现出了最好的

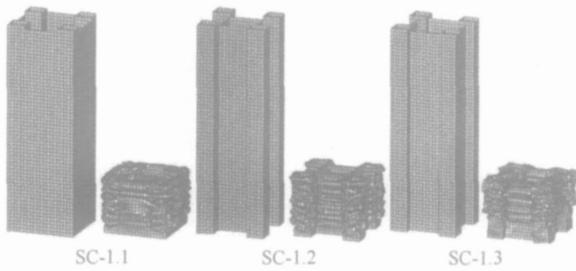


图 8 采用引发机制的组合结构的模拟变形序列图

吸能特性。三种组合形式的锥壁结构的压溃力初始峰值都比直壁组合结构要小,降幅均在 12% 左右。对于前两种组合形式 C1 和 C2,锥壁结构平均压溃载荷比直壁组合结构略有提高但相差不大;对第三种组合形式 C3 锥壁组合结构的平均压溃载荷比直壁组合结构提高了 10%。但是三种组合形式的锥壁组合结构的比吸能均略小于直壁组合结构。采用了引发机制的组合结构的平均压溃力和比吸能都没有太大的改变,但它们的压溃力峰值出现了大幅的降低。

3 结 论

薄壁管是一种重要的承载和吸能构件。在轴向撞击载荷作用下,构件会发生褶皱和板内部之间的相互作用,很难用理论方法解决。本文采用有限元程序 ANSYS/LS-DYNA,充分考虑材料非线性、几何非线性和接触非线性,对方形直壁和锥

壁管及几种组合结构进行了数值模拟。计算结果表明,相对于简单的直壁和锥壁结构,组合结构在能量吸收总量及吸能效率方面都有成倍的增加。锥壁组合结构和直壁结构相比,有效地降低了压溃初始峰值;最优化的锥壁组合结构比最优化的直壁组合结构吸收了更多的能量;同时可以预见锥壁结构具有更好的稳定性。本文提出的具有引发机制的组合结构对原始结构的吸能量及吸能效率没有太大的影响,但较大程度上降低了压溃初始峰值。运用时可以根据实际需要,结合各种结构吸能性能的优缺点和制造的难易程度选择合适的形式。

参考文献

- [1] 钟志华,张维刚,曹立波等.汽车碰撞安全技术[M].北京:机械工业出版社,2003
- [2] 杜星文,宋宏伟.圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计[M].北京:科学出版社,2004
- [3] NAGEL G M, THAM BRATNAM D P. Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes [J]. Thin-Walled Structures 2005, 43(8): 1225-1242
- [4] HEUNG-SOO K M. New extruded multi-cell aluminum profile form maximum crash energy absorption and weight efficiency [J]. Thin-Walled Structures 2002, 40(4): 311-327
- [5] 赵海欧. LS-DYNA 动力分析指南[M].北京:兵器工业出版社,2003
- [6] 贾宏波,黄金陵.汽车车身碰撞建模影响因素的研究[J].汽车技术,1998(1): 12-15

(上接第 14 页)

1) 应用 ABAQUS 软件计算舰船的总纵弯曲,距离中和轴越近的地方,误差越大,距离中和轴越远的地方,误差越小,在舰船的剖面上,距离中和轴越远,应力就越大,因此就越危险。这也是被校核的位置,而有限元的方法在这些位置的计算结果的误差较小,满足工程要求。

2) 在计算出各点的节点力以后,要进行船体的平衡调整,使得船体处于刚体平衡状态。

3) 合理地施加边界条件对计算结果有一定影响,合理与否的判断是看约束的地方有无应力集中。

参考文献

- [1] 王杰德等.船体强度与结构设计[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [2] 杨代盛.船体强度与结构设计[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.
- [3] 哈尔滨工业大学理论力学教研室.理论力学[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [4] (苏)库尔久莫夫.船体强度[M].北京:高等教育出版社,1960.
- [5] 陈铁云,陈伯真.船舶结构力学[M].北京:国防工业出版社,1980.
- [6] 朱锡,吴梵.舰艇强度[M].北京:国防工业出版社,2005
- [7] 石德新,王晓天.潜艇强度[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1997.