铝蜂窝"Y"形单元准静态压溃有限元模拟研究

王钰堃^{1,2},毛贺²,韩宝坤¹,何凯²,陈宁²

(1.山东科技大学,青岛 266590; 2.中国科学院深圳先进技术研究院,深圳 518055)

摘要:目的 基于胶接强度对铝蜂窝吸能特性的重要影响,利用铝蜂窝的最小周期结构——"Y"型单元研 究铝蜂窝结构的异面压缩变形过程和能量吸收特性,以了解不同胶黏剂对铝蜂窝吸能性能的影响。方法 以 Von Mises 本构模型来表征胶黏剂的力学性能,建立一种含胶层的"Y"型单元有限元模型,模拟铝蜂 窝结构的压溃变形过程,并得到胶层的变形和失效现象。结果 不同胶黏剂失效情况不同,与之对应"Y" 型单元的平均压缩强度和能量吸能值也有区别。该模型能够有效地模拟铝蜂窝结构的压溃变形过程,并 准确预报胶层的变形和失效。通过实验验证所建立的"Y"型单元有限元模型计算精度能够满足实际工程 需要。结论 通过对"Y"形的单元准静态的压溃有限元模拟,选择了合适的胶黏剂制造铝蜂窝,并为后续 包装缓冲件深入研究打下了基础。

关键词: 铝蜂窝; 异面压缩; 吸能特性; 结构胶接 中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)11-0088-08 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.11.016

Quasi-static Crushing Finite Element Simulation on Aluminum Honeycomb "Y" Shaped Cell

WANG Yu-kun^{1,2}, MAO He², HAN Bao-kun¹, HE Kai², CHEN Ning²
 (1.Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2.Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

ABSTRACT: The work aims to study the process of axial compression deformation and energy absorption characteristics of aluminum honeycomb structure with the minimum periodic structure of aluminum honeycomb—"Y" shaped cell, base on the important influence of adhesive strength on the energy absorption characteristics of aluminum honeycomb. The know about the influence of different adhesives on the energy absorption characteristics of aluminum honeycomb. The Von Mises constitutive model was used to characterize the mechanical properties of adhesives. A "Y"-shaped finite element model with adhesive layer was established to simulate the crush deformation process of aluminum honeycomb structure, and the deformation and failure phenomena of adhesive layer were obtained. As different adhesives had different failure situations, the average compression strength and energy absorption value of the corresponding "Y" shaped cell would be different. The model could effectively simulate the crush deformation process of aluminum honeycomb structure and predict the deformation and failure of the adhesive layer accurately. The calculation accuracy of the finite element model of "Y" shaped cell established through experimental verification could meet the needs of practical engineering. Through the quasi-static crushing finite element simulation on the "Y" shaped cell, the suitable adhesive is selected for the production of aluminum honeycomb and the foundation is laid for the further research on the subsequent package buffers. **KEY WORDS:** aluminum honeycomb; axial compression; energy absorption characteristics; structure bonding

铝蜂窝是一种具有正六边形孔穴的二维多孔材 料^[1]。由于铝蜂窝具有质量轻、比强度高、比刚度大

收稿日期: 2018-01-31

作者简介:王钰堃(1992-),男,山东科技大学硕士生,主攻机器人用 RV 减速器、泡沫吸能材料等。

通信作者:毛贺(1986—),女,硕士,中国科学院深圳先进技术研究院工程师,主要研究方向为机器人用 RV 减速器、泡沫 吸能材料等。

等特点,可以作为结构件使用,满足包装等众多工业领域中轻量化设计的需要。此外,铝蜂窝还具有优良的缓冲吸能性能,当受到外界冲击载荷时,能够承受较大的压缩应变,而且应力平稳,不会产生高的应力波动,在吸收大量冲击能量的同时,能够避免结构受到危险应力的作用^[2]。由于铝蜂窝具有优异的能量吸收性能,使其作为吸能材料已在航空航天、汽车、高铁、轮船等领域得到了广泛应用,未来在运输包装领域势必有着广阔的前景,如铝蜂窝夹芯板可用于制作特种包装箱,以保护货物免受运输过程的撞击和跌落伤害。

有限元方法已在工业界广泛应用,用其为铝蜂 窝仿真开发等效模型可以节约大量的时间和成本。 在使用数值仿真方法研究铝蜂窝的动态压溃时,简 化模型可极大地降低建模的复杂性并减少计算时 间。近年来,很多学者利用铝蜂窝的最小周期结构 ——"Y"型单元研究蜂窝结构的异面压缩变形过程 和能量吸收特性。Gotoh 和 Yamashita 等^[3-4]使用"Y" 型单元进行了有限元仿真,成功地预测了六边形铝 蜂窝的变形模式和压缩强度,研究了胞元形状、铝 箔厚度对铝蜂窝动态压溃变形的影响,并加以实验 验证。考虑到铝箔间的胶层, Zhang Xiong^[5]建立了 蜂窝整体模型和"Y"型单元模型用于仿真铝蜂窝试 件的压溃变形过程,并通过实验研究和理论分析验 证了仿真结果的准确性。王闯等^[6]利用"Y"型单元, 通过数值方法研究了3种蜂窝试件的动态压溃过程, 发现仿真得到的应力-应变曲线和塑性坍塌应力与试 验值具有一致性。以上研究表明,"Y"型单元简化模 型可以准确地模拟蜂窝动态压缩变形过程并得到可 靠的应力-应变曲线。

通过数值仿真模拟胶接结构的压溃变形,并预测 平均压缩强度是非常有意义的。Lu Jianping 等^[7]认为 在胶接结构压溃变形过程中,当胶接发生失效时,由 于胶层内部剪应力和母材间的剥离应力值非常高,导 致胶层也吸收了大量的能量,并针对管状结构用胶接 方式连接和铆接方式连接的情况下的屈曲载荷、初始 峰值应力和屈曲模式,设计采用了一组线性弹簧来模 拟胶黏剂并进行有限元屈曲分析,但在此过程中并没 有到考虑塑性渐进屈曲。Yamashita 等^[8]为了验证胶 接结构的压溃变形是否能通过有限元仿真得到,模拟 了2种管状胶接结构的轴向压溃,并与实验结果进行 对比。在此通过成形法制备了铝蜂窝试件,并对其进 行了准静态异面压缩实验。为了仿真胶接铝蜂窝结构 压溃变形过程,并预测平均压缩强度,文中提出一种 含胶层的"Y"型单元,并针对4种不同类型的胶黏剂 进行压溃仿真,用于研究"Y"型单元压溃变形过程中 胶黏剂的失效情况。

1 试样制备与实验

铝蜂窝的制造方法有拉伸法和成形法 2 种。拉伸 法是先胶接而后拉伸成正六边形,只能加工厚度小于 0.1 mm 的铝箔。成形法则是先将铝箔成形成波纹条 再胶接,可用于更大厚度的铝箔、钛箔、不锈钢箔等 高韧性难成形的箔材。在此采用成形法制备铝蜂窝试 件,其工艺见图 1。



图 1 成形法制备铝蜂窝 Fig.1 Preparation of aluminum honeycomb by forming method

制备铝蜂窝时所选用的铝箔材料为 Al 5052,厚 度为 0.15 mm,宽度为 100 mm。首先用一对成形辊 (见图 2)将铝箔辊压成边长为 3 mm 的半正六边形 的波纹状片材,后进行表面处理,将波纹状片材胶接 成铝蜂窝。波纹状片材的成形是蜂窝制备过程中最基 本的环节,成形质量的好坏直接影响胶接强度,进而 影响到铝蜂窝结构的强度^[9]。



图 2 辊压成形装置 Fig.2 Roll-in forming device

准静态压缩在 Instron 6699 万能实验机上进行, 见图 3。在实验中,铝蜂窝底面用胶水固定在支撑板 上,防止蜂窝试件和支撑板之间发生滑动。准静态实 验的加载速度设定为 60 mm/min。

2 胶接结构有限元仿真理论

胶接接头的失效模式有3种,包括界面失效、内 聚失效和混合失效。界面失效发生在胶层与母材的界 面处,内聚失效发生在胶层内部。混合失效包括界面 失效和内聚失效等2种模式。当胶接接头强度较低 时,易发生界面失效。如果对胶层和母材进行适当的



图 3 蜂窝测试装置 Fig.3 Honeycomb test device

表面处理,可有效地避免界面失效。从吸收更多能量的角度来看,当金属胶接接头发生失效时,内聚失效的影响更小。

在胶接接头的有限元分析中,通常采用平面应力 单元、平面应变单元、梁单元、弹簧单元或内聚单元 以精确模拟胶接接头的应力分布、损伤及断裂^[10-12]。 由于平面单元在三维模型中无法使用,梁单元和弹簧 单元在模拟材料扭转变形时具有局限性,内聚单元的 变形和应力状态遵循的假定只适用于简单的胶接结 构,同时以上模型又仅适用于胶接接头的数值仿真, 在复杂胶接结构的变形和失效模拟方面并不合适,因 此,文中通过实体单元模拟母材和胶层,在母材和胶 层之间定义接触,见图 4。这种模型不需要使用较小 的网格尺寸,也能够满足复杂胶接结构计算精度的 需要。





线弹性材料模型、弹塑性材料模型和断裂力学模型均可用于模拟胶黏剂。其中断裂力学模型通常用于 分析裂纹扩展和胶接接头的失效模式。弹性和弹塑性 模型则可准确地得到应力分布,但当接头某处产生了 塑性变形时,弹性模型即不再适用。胶黏剂作为一种 聚合物,具有典型的非线性特性。由于非线性模型能 很好地描述这些特性,当简化成一种双线性弹塑性材 料时,只需要使用弹性模量、泊松比、屈服强度、硬 化模量就可以很好地表征其力学性能^[13],因此文中采 用双线性弹塑性材料模型进行数值模拟。

由于胶黏剂和被粘物都为弹塑性材料,且胶黏剂的压缩屈服应力和拉伸屈服应力相差不大,因此可使用传统的 Von Mises 屈服准则,并用 Von Mises 应变来预报胶黏剂的失效:

$$(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2} = \sigma_{s}^{2}$$
(1)

3 有限元模型建立

"Y"型单元是正六边形铝蜂窝的最小周期结构, 常作为等效模型用于铝蜂窝的动力学仿真中,以研究 蜂窝结构的异面压缩过程和能量吸收特性^[14]。文中取 出"Y"型单元(见图 5,三角形所包围的区域)作为 分析对象。



图 5 蜂窝"Y"型单元结构 Fig.5 "Y" shaped cell structure of the honeycomb

在 LS-DYNA 软件中采用实体单元对铝箔和胶层 进行建模和仿真。"Y"型单元有限元模型见图 6,"Y" 型单元壁厚为 0.15 mm,胶层的厚度为 0.01 mm,在 辊压成形的六边形的 120°内角处留有半径为 0.4 mm 的圆角,以尽量和实际蜂窝试件保持一致。"Y"型单 元的高度为 15 mm,比实际蜂窝试件高度短,但这个 高度对于变形模式和应力-应变曲线中平台阶段的研 究已经足够。

"Y"型单元的截面积可由式(2)计算。

$$S = 3\sqrt{3}/4l^2 \tag{2}$$

铝合金 Al 5052 是一种弹塑性材料,使用双线性 弹塑性材料模型进行模拟,无需考虑应变率效应。胶 黏剂也采用双线性弹塑性材料进行数值模拟,使用 Von Mises 模型来表征其力学性能,用 Von Mises 应 变预报胶黏剂的失效。除了实验中使用的环氧树脂胶 黏剂外,文中还仿真了另外3种胶黏剂,丙烯酸酯、 聚氨酯和酚醛树脂。铝箔和4种胶黏剂的力学性能见 表1^[15]。



图 6 蜂窝"Y"型单元有限元模型 Fig.6 Finite element model for "Y" shaped cell

表 1 铝合金 AI 5052 和胶黏剂的力学性能 Tab.1 Mechanical properties of aluminum alloy AI 5052 and adhesive

材料	弾性模量/	泊松比	屈服强度/	硬化模量/
	MPa		MPa	MPa
5052	69 000	0.33	175	460
环氧树脂	1888	0.33	50	50
丙烯酸酯	50	0.45	40	40
聚氨酯	825	0.33	30	19
酚醛树脂	2875	0.42	90	500

为防止在压溃过程中单元之间发生穿透,在铝箔 与胶层之间、铝箔单元之间设置接触。"Y"型单元置 于 2 个刚性墙中间。底部的刚性墙固定,顶部的刚性 墙以一定的质量和速度撞击模型上端。为防止模型节 点沿刚性墙滑动,模型和刚性墙之间的摩擦因数设置 为 1^[16]。"Y"型单元的侧面末端的节点施加对称约束。

当使用 LS-DYNA 分析大变形非线性的准静态压 溃问题时,多采用显示积分方法,并可以通过合理增 加加载速度的方法来缩短计算时间。为得到较好的计 算精度,动能和内能的比值应小于 2%^[17-18]。对"Y" 型单元在 0.36~28.8 km/h 的不同加载速度下的计算结 果进行比较分析,见图 7。当加载速度低于 3.6 km/h



图 7 加载速度对应力-应变曲线的影响 Fig.7 Effect of loading speed on stress-strain curve

时,不同加载速度所得到的应力-应变曲线基本相同。 如表 2 所示,当加载速度为 3.6 km/h 时,计算时间为 217.17 min,相对也比较合理,因此文中在"Y"型单元 准静态压溃有限元仿真时,采用显示积分方法,并设 定加载速度为 3.6 km/h,可保证计算结果的准确性。

表 2 不同加载速度对应的计算时间 Tab.2 Calculation time corresponding to different loading speeds

初始速度/(km·h ⁻¹)	计算时间/min			
28.8	24.98			
18	39.7			
7.2	105.2			
3.6	217.17			
1.8	402.18			
0.36	1503.45			

4 结果与讨论

根据能量守恒定律,"Y"型单元的总能量吸收可 由式(3)可得。

$$W = \int_{0}^{\delta} F(\delta) \mathrm{d}\delta \tag{3}$$

式中:W为吸收的总能量; δ 为压缩行程; $F(\delta)$ 为相应的力。

"Y"型单元的平均压缩强度定义为:

$$\sigma_{\rm m} = \frac{F_{\rm m}}{S} = \frac{W}{\delta \cdot S} \tag{4}$$

式中: F_m为平均压溃载荷; S 为"Y"型单元的横 截面积。

铝蜂窝的平均压缩强度可采用经验公式:

$$\overline{\sigma} = 6.6 \times \sigma_s \times \left(\frac{t}{l}\right)^{\frac{3}{3}}$$
(5)

式中: σ_s 为铝箔的屈服强度。

由式(5)可知,铝蜂窝的平均压缩强度仅与铝 箔的参数有关,与蜂窝的高度无关,因此仿真分析构 建的试样无需与实际蜂窝试件高度相同。

蜂窝试件呈现为渐进压溃变形模式,变形从模型的上端开始,和"Y"型单元所对应的蜂窝孔壁发生了 塑性屈曲,紧密地折叠在一起,见图 8。测得的应力-应变曲线见图 9,通过曲线可以看出试件的变形过程 可以描述为 3 个阶段:弹性变形段、平台区、压实段。 弹性变形段:压缩的初始阶段,蜂窝材料在载荷的作 用下,首先发生弹性屈曲。平台区:随着压缩的继续 进行,蜂窝材料发生塑性坍塌。压实段:在大压力作 用下,蜂窝材料孔穴的相对壁面压坍在一起,且孔壁 材料本身也被压缩,此时,应力-应变曲线会陡然上升。

仿真得到的"Y"型单元变形过程见图 10a。"Y" 型单元的变形模式与铝蜂窝试件一致,从模型的顶端



图 8 蜂窝试件及变形结果 Fig.8 Honeycomb specimens and deformation results

开始产生压溃变形,变形过程中产生了塑性屈曲。

从铝蜂窝变形试件中截取一部分进行放大,并和 仿真结果放大图进行对比,见图 11。蜂窝壁的折叠 情况和胶层的变形情况与实验结果相比基本一致,由 此可见,"Y"形单元有限元模型可有效地模拟铝蜂窝 的准静态压溃变形过程。胶层失效情况见图 12,由 实验结果与仿真结果的对比可以看出,有一部分胶层 发生了失效,折叠在一起的孔壁产生了剥离。



图 9 铝蜂窝试样的应力-应变曲线





图 10 "Y"型单元的渐进压溃变形过程 Fig.10 Progressive crushing and deforming process of "Y" shaped cell

如图 9 和图 13a, 在实验和仿真中, 应力-应变曲 线首先是线弹性变形至初始峰值应力, 屈服后产生塑 性坍塌, 形成一个长的平台区段, 最后是密实化阶段, 曲线陡然上升。与实验相比, 仿真的初始峰值应力比 实验值要高, 平台区的应力水平值略低, 振幅略大。 原因可能是实验铝蜂窝由很多个"Y"型单元构成, 尺 寸效应不明显。如图 14 所示, "Y"型单元的平均压缩 强度是实验值的 83.6%,由此可知文中所建立的"Y" 型单元有限元模型可有效预测铝蜂窝的平均压缩 强度。

在压溃变形过程中,胶层的受力状态主要是拉伸 和剪切。由于当塑性应变大于失效应变时,胶层单元 会发生失效。"Y"型单元的中心区域变形最为严重, 因此这个区域的胶层最易发生失效,严重时可能造成



图 11 "Y"型单元变形 Fig.11 "Y" shaped cell deformable

蜂窝开裂。聚氨酯胶黏剂在动态压缩开始时,胶层即 产生了明显的失效,但由于有限元模型设置了对称边 界,"Y"型单元并没有在胶接处产生开裂。



图 12 胶层失效情况 Fig.12 Failure of adhesive layer

使用另外 3 种胶黏剂的"Y"型单元的变形过程见 图 10b, c, d, 应力-应变曲线见图 13b, c, d。不同的胶 黏剂所对应的"Y"模型的变形过程略有区别。比较 "Y"形单元经过压溃变形后, 4 种胶黏剂的变形和失 效见图 15。环氧树脂和丙烯酸酯胶黏剂失效较少或 未发生失效, 而聚氨酯和酚醛树脂胶黏剂则发生了严 重失效。比较 4 种"Y"型单元的平均压缩强度, 由图 16 可见, 在胶层力学性能和失效情况不一致的情况 下, 平均压缩强度也会有所不同。由图 17 可以看出, 环氧树脂和酚醛树脂的能量吸收性能较好, 丙烯酸酯 和聚氨酯的能量吸收性能较差。



图 13 "Y"型单元的应力-应变曲线 Fig.13 Stress-strain curve of "Y" shaped cell







图 15 胶黏剂的变形和失效 Fig.15 Deformation and failure of adhesives





Fig.17 Energy absorption of "Y" shaped cell

5 结语

为了减少铝蜂窝压溃变形过程的仿真计算量,文 中基于铝蜂窝的结构特点,建立了一种含胶层的"Y" 型单元有限元模型,作为简化模型模拟了铝蜂窝结构 压溃过程。通过铝蜂窝试件准静态压缩实验,验证了 该计算方法能够保证一定的计算精度。文中得出了如 下结论。

文中建立的"Y"型单元有限元模型尝试使用实体 单元模拟母材和胶层,并在母材和胶层之间定义接 触。在使用较大的网格尺寸的情况下,同样可有效地 模拟铝蜂窝准静态压溃的变形模式和平均压缩强度, 其计算效率和模拟精度也均可满足工程实际需要。

在胶接结构准静态压溃仿真中,胶黏剂材料模型 选用双线性弹塑性模型,并采用 Von Mises 本构模型 模拟胶黏剂的力学模型,用 Von Mises 应变来预报胶 层的失效。通过较复杂胶接结构-铝蜂窝结构准静态 压溃实验,验证了该模型的有效性。

在相同的加载条件下,仿真了不同类型的胶黏剂 对"Y"型单元压溃变形的影响。结果表明除环氧树脂 外,丙烯酸酯胶黏剂用于制造铝蜂窝也可达到很好的 胶接强度。

参考文献:

- [1] 孙德强. 多孔缓冲材料有限元结构分析与设计方法
 [M]. 北京:化学工业出版社, 2014.
 SUN De-qiang. Finite Element Structure Analysis and Design Method of Porous Buffer Material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids[M]. Oxford: Pergamon Press, 1988.
- [3] GOTOH M, YAMASHITA M, KAWAKITA A. Crush Behavior of Honeycomb Structure Impacted by Drop-hammer and Its Numerical Analysis[J]. Materials Science Research International, 1996, 2(4): 261—266.
- [4] YAMASHITA M, GOTOH M. Impact Behavior of

Honeycomb Structures with Various Cell Specifications-Numerical Simulation and Experiment[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1): 618-630.

- [5] ZHANG Xiong, ZHANG Hui, WEN Zhu-zhu. Experimental and Numerical Studies on the Crush Resistance of Aluminum Honeycombs with Various Cell Configurations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 66: 48—59.
- [6] 王闯,刘荣强,邓宗全,等. 铝蜂窝结构的冲击动力
 学性能的试验及数值研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(11):56—61.

WANG Chuang, LIU Rong-qiang, DENG Zong-quan, et al. Test and Numerical Study of Impact Dynamic Properties of Aluminum Honeycomb Structure[J]. Vibration and Shock, 2008, 27(11): 56—61.

- [7] LU Jian-ping, GOLAM N, RONALD G. The Role of Adhesive in the Mechanical Response of Adhesively Bonded Aluminum Hat Sections under Axial Compression[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(16): 4757–4767.
- [8] YAMASHITA M, HIROMASA K, TOSHIO H. Dynamic Crush Behavior of Adhesive-bonded Aluminum Tubular Structure-Experiment and Numerical Simulation[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 69: 45—53.
- [9] 郭忠信. 铝合金结构胶接[M]. 北京: 国防工业出版 社, 1993.
 GUO Zhong-xin. Aluminum Alloy Structure Adhesive[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993.
- [10] DROSTE A, AUTOMOTIVE D O W. Crash Stable Adhesives in Application and Simulation[C]// Proc 5th German LS-DYNA Forum, 2006.
- [11] 杨辛. 胶焊接头在碰撞载荷下失效的模拟方法研究及其应用[D]. 北京:清华大学,2010.
 YANG Xin. Research and Application of The Simulation Method for the Failure of Adhesive Welded Joint under Collision Load[D]. Beijing: Tsinghua Universi-

ty, 2010.

- [12] 王孝慧,姚卫星.复合材料胶接结构有限元分析方法研究进展[J].力学进展,2012,42(5):562—570.
 WANG Xiao-hui, YAO Wei-xing. Research Progress on Finite Element Analysis of Composite Bonding Structure[J]. Mechanics Progress, 2012, 42(5): 562—570.
- [13] 游敏,郑小玲. 胶接强度分析及应用[M]. 武汉: 华 中科技大学出版社, 2009.
 YOU Min, ZHENG Xiao-ling. Analysis and Application of Bonding Strength[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009.
- [14] 邓宗白, 闫景玉. 对铝蜂窝夹层板 Y 等效模型的动力学数值仿真[J]. 机械与电子, 2013(4): 15—18.
 DENG Zong-bai, YAN Jing-yu. The Dynamic Numerical Simulation of Aluminum Honeycomb Sandwich Plate Y Equivalent Model[J]. Mechanical and Electronic, 2013(4): 15—18.
- [15] 严沾谋, 游敏, 余海洲, 等. 胶黏剂弹性模量对铝合 金单搭接接头应力应变分布的影响[J]. 航空材料学 报, 2006, 26(4): 39—42.
 YAN Zhan-mou, YOU Min, YU Hai-zhou, et al. Influence of Elastic Modulus of Adhesive on the Stress and Strain Distribution in Aluminum Single Lap Joint[J]. Aerospace Materials, 2006, 26(4): 39—42.
- [16] HALLQUIST J O. LS-DYNA Keyword User's Manual[J]. Livermore Software Technology Corporation, 2007, 970: 1-2.
- [17] SANTOSA S P, WIERZBICKI T, HANSSEN A G, and LANGSETH M. Experimental and Numerical Studies of Foam-filled Sections[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(5): 509–534.
- [18] 王青春,范子杰.利用 Ls-Dyna 计算结构准静态压溃的改进方法[J].力学与实践,2003,25(3):20—23.
 WANG Qing-chun, FAN Zi-jie. Using Ls-Dyna to Calculate The Improved Method of Quasi-static Crushing of Structure[J]. Mechanics and Practice, 2003, 25(3): 20—23.