

文章编号: 1673-5196(2006)02-0014-04

6063 铝合金薄壁方管耐轴向撞击性能研究

乔及森^{1,2}, 车洪艳¹, 陈剑虹^{1,2}

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对汽车用铝合金构件的安全设计要求, 采用关键试验加有限元仿真技术, 对 6063 铝合金薄壁方管轴向耐撞击性能进行了研究. 通过轴向静态压缩和落锤冲击试验, 获得了该薄壁试件静态和冲击载荷下的力学行为规律. 同时应用有限元模型对不同结构尺寸的试件进行了不同速度下的冲击仿真分析, 给出了试件变形和载荷预测. 研究表明, 6063 铝合金薄壁试件具有良好的吸能性, 试件的耐撞性和材料组织、加载速度及结构几何尺寸有密切关系. 降低冲击速度、减小构件长细比以及增大壁厚, 有利于改善试件屈曲过程的稳定性. 作为汽车用缓冲吸能结构, 该类薄壁铝合金试件的长细比不宜大于 12, 壁厚取 2 mm, 长度在 310 mm 左右为结构最优.

关键词: 铝合金; 薄壁方管; 冲击压缩加载; 屈曲变形; 有限元仿真

中图分类号: TG 146.2; TB 115 **文献标识码:** A

Investigation of axial anti collapse behavior of square aluminum alloy tube 6063

QI A O J i sen^{1,2}, C H E H o n g y a n¹, C H E N J i a n h o n g^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. State Key Lab. of Advanced Non ferrous Materials, Gansu Province, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aimed at the requirement of safety design of aluminum alloy components in automobiles and employing a key experiment and the simulation technique of finite element the axial anti collapse behavior of thin-walled square aluminum alloy tube 6063 was investigated. The pattern of mechanical behavior of this thin-walled specimen under static and impact load was obtained by means of the experiments on axial static compression and drop hammer impact. Meantime simulation analysis of the specimen with different configurational dimensions and under different impact speeds was performed by using finite element model so that the prediction of its deformation and load was given. It was shown by the investigation that such specimen possesses good energy absorbability there is a close relationship of anti collapse ability to the microstructure of material loading speed and structural dimension. Lowering of the impact speed and slenderness ratio as well as increasing the wall thickness would be beneficial to improvement of buckling stability. As a damping mechanism for energy absorption in automobiles the slenderness ratio of its thin-walled tube is to be less than 12, the wall thickness — 2 mm, and length — about 310 mm for an optimal construction.

Key words: aluminum alloy; thin-walled square tube; impact compression loading; buckling deformation; finite element simulation

铝合金试件因具有很高的比强度和良好的延展性, 已应用于移动装置中来取代钢制结构^[1~5]. 但在移动装置中的安全问题成为国内外研究热点. 研究表明, 汽车在碰撞发生时梁和杆件是主要吸能试

件, 因此通过轴向压缩或扭转、弯曲等变形吸收碰撞时的能量以保护车内乘员的安全. 为此本文模拟正碰事故, 选用一类薄壁铝合金方管作为基本单元试件, 对其在轴向加载时的动力学响应进行了研究.

1 试验过程与仿真模型的建立

1.1 试验材料及基本试件尺寸

选用变形铝合金 6063-T6 挤压型材作为研究的

收稿日期: 2005-06-14

基金项目: 甘肃省重大基础研究项目(2004CCA 04900), 甘肃省自然科学基金(3ZS 042-B 25-008)

作者简介: 乔及森(1973-), 男, 山西太原人, 博士生, 讲师.

试验材料,其化学成分见表 1,金相组织及力学性能见图 1 和表 2。经过热挤压成型和人工时效处理,材质晶粒比较细小,基体为 $\alpha(\text{Al})$,在晶界和晶粒内部弥散分布着 Mg_2Si 强化相,材质整体机械性能良好。由于薄壁结构在压缩失稳时对于结构的初始构形比较敏感,为保证试验数据的集中,试验前须对试件几何外形尺寸进行控制,要求方管壁厚偏差为

$$\Delta\delta = \frac{|\hat{q} - \bar{\delta}|}{\bar{\delta}} \times 100\% < 5\%$$

式中: $\Delta\delta$ 为壁厚相对偏差, \hat{q} 为测定壁厚, $\bar{\delta}$ 为平均壁厚。管壁外表平面高差控制在 $\pm 0.4 \text{ mm}$ [6,7]。

表 1 6063 铝合金材料的质量分数(w)

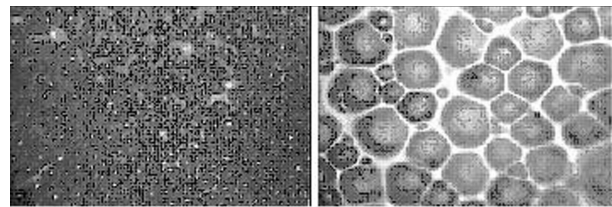
Tab.1 Chemical compositions of aluminum alloy 6063 %

材料	Mg	Si	Zn	Cu
质量分数	0.45~0.90	0.20~0.60	<0.10	<0.10
材料	Cr	Ti (Zr)	Mn	Fe
质量分数	<0.10	<0.10	<0.35	—

表 2 6063 铝合金机械性能

Tab.2 Mechanical properties of 6063 aluminum alloy

合金 牌号	供货 状态	屈服强度 $\sigma_{R0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 σ_b/MPa	剪切强度 τ_s/MPa	伸长率 $\delta/\%$	布氏硬 度 HB
6063	T6	186	226	150	16	73



(a) 金相组织 100× (b) 金相组织 400×

图 1 6063 高强铝合金型材组织

Fig.1 Microstructure of 6063 aluminum alloy

1.2 薄壁方管静载轴向压缩试验及仿真分析

在室温条件下将试件竖立于材料试验机工作台上,两端加约束盖板及垫板,沿方管轴向进行静态压缩(见图 2),试验机压缩速度 v_0 为 1 mm/min 。多次试验表明,试件失稳变形首先发生在两个长边截面上,失稳瞬间管臂发生内凹或外凸是随机的,在随后的屈曲过程中管壁将交替进行规则的内翻和外翻,

最终长边管壁和短边管壁将形成规则的十字叠缩变形。压缩过程中的载荷-位移曲线见图 3。图中可得第一个叠缩时出现最大峰值压力 $F_{\max} = 16.9 \text{ kN}$,后屈曲阶段中一个叠缩周期中的平均压力约为 $F_e = 6.05 \text{ kN}$,塑性较长长度 $2H_e = 10 \text{ mm}$ 。

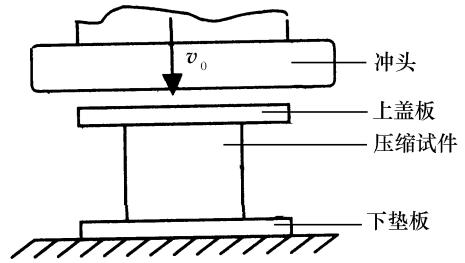


图 2 薄壁构件静态及动态轴向压缩试验

Fig.2 Static and dynamic experiment on axial compression of thin-walled component

利用 ABAQUS STANDARD 隐式计算程序对该试验进行仿真,选取实体四边形壳单元 S4R,网格尺寸 5 mm ,所得仿真结果与试验结果对比见图 3。由图可见,仿真结果和试验吻合很好,结果可信。

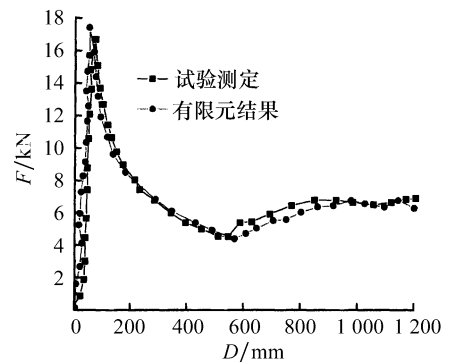


图 3 静态轴向压缩载荷-位移曲线

Fig.3 Force vs displacement curves of static axial compression

1.3 薄壁方管轴向落锤压缩试验与仿真分析

表 3 为试验所得试件的载荷-位移及冲击能的特征值。在落锤冲击试验机上对 $100 \times 75 \times 25 \times 1$ 型试件进行轴向动载压缩试验,落锤最大冲击能量 4 kJ ,冲击速度 v 为 $1.49 \sim 3.34 \text{ m/s}$,在冲击过程中,

表 3 落锤冲击试验数据

Tab.3 Results of drop hammer test

试验序号	总冲击能 E/J	冲击速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	峰值载荷 F/kN	峰值载荷处 能量 E_1/J	峰值载荷处 时间 t/s	峰值载荷对应 变形/mm	冲击过程总吸 收能 E_2/J
1	277.681 2	2.288 9	21.957 6	5.811 3	0.207 0	0.476 4	70.122 2
2	352.412 7	2.578 6	21.518 5	6.186 5	0.194 0	0.506 1	80.605 5
3	589.095 5	3.333 9	22.315 0	6.394 8	0.161 0	0.543 2	98.245 3
4	284.908 0	2.318 5	22.315 0	5.695 5	0.201 0	0.471 6	65.124 6
5	236.230 2	2.111 2	20.339 2	4.939 7	0.206 0	0.439 4	58.830 1
6	117.808 8	1.490 9	19.075 8	4.025 3	0.252 0	0.377 3	36.299 3
平均值	309.689 4	2.353 7	21.253 5	5.508 9	0.203 5	0.469 0	68.204 5
标准偏差	157.318 9	0.603 3	1.296 0	0.882 6	0.029 2	0.057 0	20.857 7

若保证落锤对试件端面正压条件不变,则试件出现规则的对称叠缩变形.但根据试验的冲击功不同,试件最终的变形和吸收能量不同,

现根据试验建立仿真模型,选用上下两块刚体代表试验中上盖板及下垫板,并施加与落锤试验中相同的等效约束条件,同时对上盖板赋予与落锤相等的初速度及质量,来模拟对试样的冲击效果.仿真时仍采用实体壳单元S4R,单元尺寸5 mm.首先在ABAQUS STANDARD 中计算在冲击初始瞬间试件内所产生的应力波振动模态,然后输入到ABAQUS EXPLICIT 中进行试件冲击过程屈曲分析,为了模拟薄壁屈曲失稳,计算中引入缺陷因子,使试件的变形更为平滑,接近实际情况.仿真所得试件在不同冲击速度下的载荷-位移曲线见图4,变形状况与试验对比见图5.可见从试件承载和变形上,模拟与试验都吻合良好,说明仿真模型是可靠的.

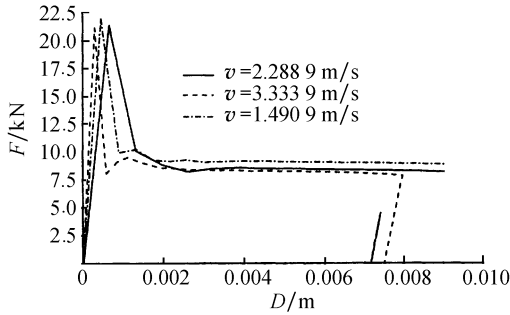


图 4 仿真不同冲击速度下的载荷-位移曲线

Fig. 4 Curves of force vs displacement with different impact speed

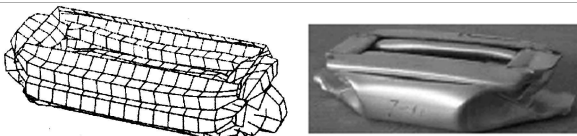


图 5 实验冲击变形与仿真对比 ($v = 1.4909 \text{ m/s}$)

Fig. 5 Comparison of impact deformation between tested and simulated data

2 耐冲击性影响因素分析

2.1 冲击初速度对试件吸能性和变形的影响

对于短小试件的试验和仿真结果表明,初始冲击速度的变化对试件的峰值载荷、平均载荷以及变形模态影响不明显,但是试件在冲击过程中所吸收能量随冲击速度的上升而提高,见图6和表3.这说明6063铝合金材料的力学特性对应变率不敏感.

对于较长试件(如400 mm长试件)的仿真结果表明,冲击速度的变化不仅影响试件能量吸收,而且对变形模态有明显影响,如图7~11所示,当初始冲

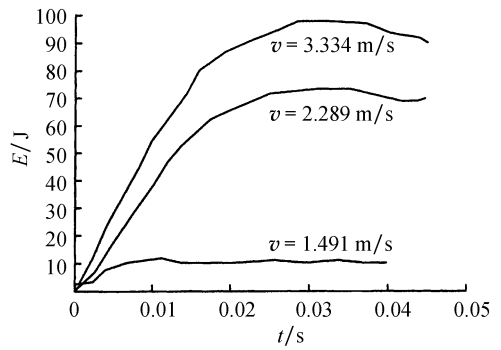
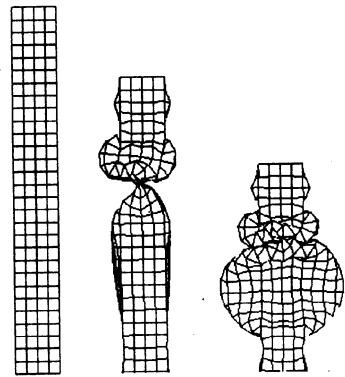


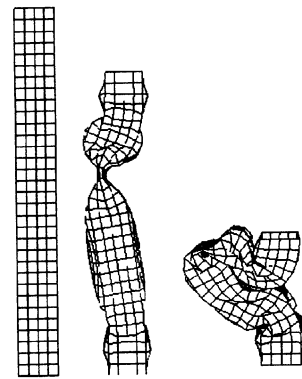
图 6 不同冲击速度下试件能量变化

Fig. 6 Curve of energy vs time at different impact speed



7 400×75×25×1型试件冲击变形过程 ($v = 8.94 \text{ m/s}$)

Fig. 7 Impact deformation modes of specimen with dimension of 400×75×25×1, $v = 8.94 \text{ m/s}$



8 400×75×25×1型试件冲击变形过程 ($v = 9.55 \text{ m/s}$)

Fig. 8 Impact deformation modes of specimen with dimension of 400×75×25×1, $v = 9.55 \text{ m/s}$

击速度 $v \leq 8.94 \text{ m/s}$ 试件发生对称叠缩变形, $v \geq 9.55 \text{ m/s}$, 310和400 mm长试件在冲击过程中皆出现明显的偏转失稳变形, $v \geq 9.55 \text{ m/s}$. 310和400 mm长试件在冲击过程中皆出现明显的偏转失稳变形,其能量吸收也变得不稳定.这说明提高冲击速度会使试件的屈曲出现失稳,同时降低结构吸能性.

2.2 试件几何尺寸对冲击性能的影响

研究表明,不同的几何尺寸的试件其耐冲击性能是不同的.在汽车试件中不仅要选用优良的材料

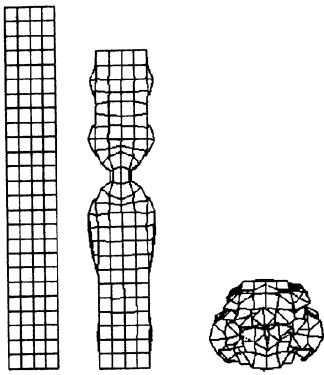
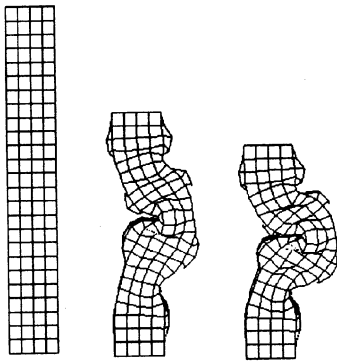
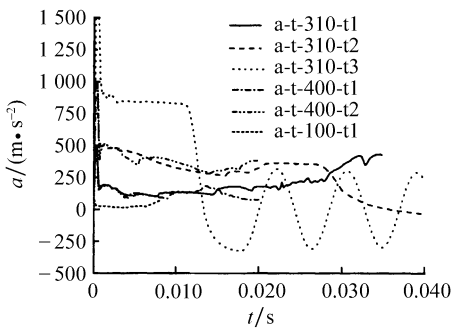
图9 310×75×25×2型试件冲击变形过程($v=10\text{ m/s}$)Fig.9 Impact deformation modes of specimen with dimension of 310×75×25×2, $v=9.8\text{ m/s}$ 图10 310×75×25×2型试件冲击变形过程($v=9.8\text{ m/s}$)Fig.10 Impact deformation modes of specimen with dimension of 310×75×25×2, $v=9.8\text{ m/s}$ 

图11 落锤加速度随时间变化的关系

Fig.11 Dependence of acceleration of drop hammer on time

来提高车体的耐冲击性能,同时还应注意合理的结构设计.为了探讨几何尺寸的作用,分别选用不同长度和壁厚的试样在相同冲击速度下进行有限元仿真.从图11可以看出,不同壁厚对试件冲击性的影响很大,当壁厚较大($\delta=2\text{ mm}$),试件的刚度显著增强,因而其承载能力加强,在冲击过程中的最大载荷及平均载荷都上升.同时整体变形更为均匀稳定,出现规则的周对称叠缩(见图9);壁厚减小($\delta=1\text{ mm}$),对于细长试件 $L/A \geq 12$ (L 为试件长度, A 为

最小截面尺寸),冲击过程中易发生失稳偏折,使试件的耐冲击性变差,见图8.

不同的长度对试件冲击性影响表现为在相等冲击初速度下,当 $L=100\text{ mm}$ 试件冲击变形过程中侧壁出现1个叠缩,当 $L=310\text{ mm}$ 和 400 mm 时分别为2至3个叠缩,说明试件的吸能性随长度增加而增加.

综合以上不同条件下试件的冲击响应,可以得到对于本文所讨论的6063T6挤压铝型材,当截面形状一定时取 75×25 ,壁厚和长度分别取 2 mm 和 310 mm 的试件结构为最优.

3 结论

1) 对铝合金薄壁方管结构进行了轴向动静载挤压试验和仿真研究,二者结果符合良好,说明有限元模型是准确可靠的.

2) 初始冲击速度对该类铝合金薄壁试件的承载性能无明显影响,但对变形有着较大影响.高速冲击时,对于长细比大于12的细长试件将出现不对称失稳变形,耐冲击性变差.

3) 增加壁厚将明显提高试件的承载能力,同时改善结构屈曲过程的稳定性.但又会导致结构刚度增大,变形困难,从而降低试件在冲击过程中的能量吸收.仿真表明,汽车缓冲吸能试件壁厚取 2 mm ,长度在 310 mm 左右为结构最优.

参考文献:

- [1] LANGSETH M, HOPPERSTAD O S. Crash behaviour of thin-walled aluminum members [J]. Thin-Walled Structures, 1998, 32: 127-150.
- [2] HANSEN A G, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S. Static and dynamic crushing of square aluminum extrusions with aluminum foam filler [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24: 347-383.
- [3] SONG H W, WAN Z, SIE Z, et al. Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24: 385-401.
- [4] 车洪艳. 铝合金薄壁方管在轴向载荷作用下的力学行为研究及有限元模拟 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005.
- [5] 车洪艳, 乔及森, 陈剑虹. 铝合金薄壁方管在轴向载荷作用下力学行为研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(4): 6-9.
- [6] ANDREWS K R F, ENGLAND G L, GHANI E. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading [J]. Int J Mech Sci, 1983, 25(9-10): 87-96.
- [7] 杜星文, 宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1999.