



时效对多胞铝合金薄壁结构 压缩变形行为的影响

王冠^{1,2}, 寇琳媛¹, 刘志文², 易杰², 徐从昌², 李落星²

(1. 宁夏大学 机械工程学院, 银川 750021;

2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要:以 6063 铝合金多胞薄壁梁结构为研究对象, 采用准静态轴向加载的方式, 借助 WAW-E600 型微控万能试验机, 探明时效处理对铝合金薄壁梁压缩变形行为与吸能性能的影响规律。结果表明: 随着时效处理时间的延长, 6063 铝合金多胞薄壁梁试样的变形模式逐渐由欧拉模式转变为手风琴模式, 试样的峰值载荷、名义载荷与吸能性能也逐渐提高; 针对载荷-位移曲线进行二阶求导获得结构临界失稳载荷, 运用 Slogistic 函数拟合研究时效处理对试样承载性能的影响规律; 基于 T-Student 相关性参数评估方法, 通过主因子相关性分析引入 Ramberg-Osgood 硬化指数 n (n 为变量), 建立峰值载荷、名义载荷、可压缩变形量及吸能性能的二次多项式拟合模型, 该模型能够准确预测不同时效处理状态下 6063 铝合金薄壁梁结构的弹塑性变形行为, 为铝合金车身结构的概念设计提供理论指导。

关键词: 铝合金; 薄壁结构; 时效处理; 准静态压缩; 变形行为

文章编号: 1004-0609(2018)-07-1299-10

中图分类号: TG146.21

文献标志码: A

环境保护越来越受到汽车生产商的重视, 铝合金越来越多的用于白车身结构。采用铝合金材料的车身较传统的钢质结构质量能减轻 25%以上^[1]。铝合金薄壁梁结构在发生轴向压缩变形时, 其所吸收的能量比横向弯曲变形高出一个数量级, 而薄壁梁结构具有质量轻、强度高、变形稳定等特点, 能够在变形过程中提供稳定的轴向载荷, 具有优秀的吸能特性, 因此, 在现代汽车车身设计中, 充分利用薄壁梁轴向压缩特性, 能够有效提高车身的安全性能^[2-3]。薄壁梁结构的材料特性对其变形模式有重要的影响, 深入研究两者的联系, 对于准确地预测与描述梁的变形行为具有关键性的意义。

近年来, 众多学者对铝合金结构件的吸能性能以及各种截面形状结构单元的弹塑性变形行为开展了广泛的研究工作。1960 年, ALEXANDER^[4]最早对轴向圆柱管在手风琴模式下的平均压溃载荷进行了理论研究, 并提出了静态塑性铰的概念, 建立了相应的能量吸收模型。WANG 等^[5]研究了加工态、自然时效态、人工 T6 处理状态下泡沫铝合金材料的压缩变形行为

及吸能性能。结果表明, 在准静态与动态加载条件下, T6 态时效处理能够有效提高 Al-Mg-Si 泡沫铝合金的强度与吸能性能, 但对试样的致密化过程无明显影响。FARSHIDI^[6]通过在 6061 铝合金薄壁梁试样上开设诱导槽研究不同时效处理状态下试样的变形过程, 指出试样材料具有较低的应变硬化指数则容易发生开裂失效, 而较高的材料应变硬化指数会使结构的吸能性能降低。GHAI DAN^[7]通过试验、理论以及三维有限元仿真等手段研究了 L 形薄壁梁结构在不同时效处理状态下的轴向压缩弹塑性变形行为以及吸能性能, 结果表明, 时效处理对于试样的轴向压缩吸能性能非常关键, 随着时效处理时间增加吸能显著提高。WILLIAMS 等^[8]通过改变液压成型中管角填充半径, 深入研究了各向异性、随动硬化以及应变速率敏感性对铝合金管轴向压缩变形的影响, 指出应变速率敏感性能少量增加结构的吸能性能, 而各向异性以及随动硬化均会降低吸能性能。王光耀等^[9]确定了 6xxx 铝合金最优力学性能时效处理工艺参数为(510 °C, 45 min)+(175 °C, 7 h), 并研究不同时效处理状态下铝合金吸能盒的最

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51605234); 宁夏高校科学研究项目(NGY2016067); 汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金资助项目(31515007); 宁夏自然科学基金资助项目(NZ16046)

收稿日期: 2017-04-01; **修订日期:** 2017-07-01

通信作者: 李落星, 教授, 博士; 电话: 0731-8821445; E-mail: llxly2000@163.com

大压缩力及吸能性能。汪军等^[10]采用不同的工艺对汽车用 La/Y 稀土复合改性铝合金进行时效处理,表明分级均匀化处理和自然时效后强化烘烤,可以明显提高汽车用稀土复合改性铝合金的力学性能和耐腐蚀性能。王永进等^[11]讨论时效处理对 ZL101、ZL111 多孔铝合金压缩变形特征及能量吸收性能的影响,结果表明,时效处理对屈服强度及能量吸收效率有显著的影响,应尽可能施行 T6 时效处理。吴进等^[12]对 ZL101 泡沫铝合金进行变质处理和 T6 时效处理,并通过压缩试验验证了时效处理能够提升泡沫铝合金的强度以及吸能效率。曹晓卿等^[13]采用静态、动态冲击试验相结合的方式研究了时效处理对 Al-Cu-Mg 泡沫合金的变形特性,T6 时效处理使试样强度提高、压缩平台区缩短,在一定应变下单位体积吸收的能量提高,而且均表现出对应变率的敏感性。本文作者针对不同时效处理状态以及诱导结构的铝合金薄壁梁轴向压缩变形行为开展了较为系统的研究,初步探明了时效处理工艺对试样压缩变形模式的影响规律,并建立了失效预测模型^[14-16]。

目前,前人对薄壁梁轴向压缩变形的研究工作多集中在截面形状及尺寸对吸能性能的影响,而对于不同时效处理状态下铝合金材料特性的变化对薄壁梁结构压缩变形模式、吸能性能的影响缺少深入系统的研究。本文作者在前期研究工作的基础上,以 6063 铝合金多胞截面薄壁梁结构的轴向压缩变形为研究对象,进一步深入研究了低温时效处理工艺对其变形模式的影响,并借助理论手段分析了试样的变形特性,基于相关性分析,探明了材料特性与结构变形模式的关系,结合 Ramberg-Osgood 硬化指数建立了薄壁梁轴向压缩变形的预测模型,为汽车结构的轻量化设计提供理论依据。

1 实验

1.1 材料及制备工艺

本研究所采用的 6063 铝合金由半连续铸造加工,表 1 所列 6063 铝合金各元素质量分数实测值。

实验所采用的材料为在线淬火的铝合金多胞截面

表 1 6063 铝合金各元素含量

Table 1 Chemical composition of 6063 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
0.65	0.65	0.35	0.15	<0.10	0.10	0.10	0.10	Bal

型材,如图 1 所示。由图 1 可知,型材试样为多胞结构,内外两层为八边形结构,其轴向夹角为 22.5°,内外两层八边形结构通过 4 条轴呈对称分布的加强筋相连接。

挤压加工在 XJ-2500 挤压机上进行,挤压过程中挤压温度控制在 450~500 °C。具体挤压工艺参数如表 2 所列。

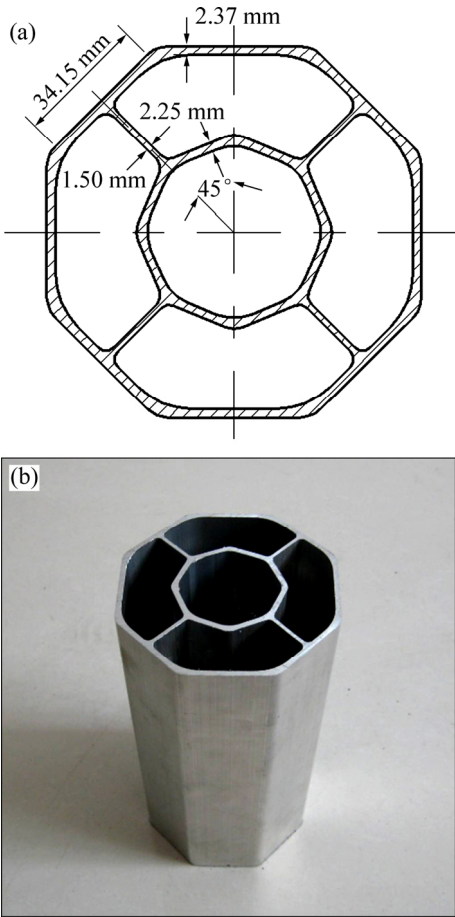


图 1 铝合金薄壁梁形状尺寸图
Fig. 1 Dimensions and geometric shape of aluminum profile:
(a) Cross-section dimensions; (b) Practicality diagram

表 2 6063 铝合金挤压工艺参数

Table 2 Extrusion process parameters of 6063 aluminum alloy

Extrusion speed/(mm·s ⁻¹)	Blank temperature/°C	Die temperature/°C	Cylinder temperature/°C	Extrusion ratio
4	480	400	430	30.3

试样时效处理温度为 180 ℃, 时效处理时间分别为 30、60、90、120、150、180、540 min, 未进行时效处理的试样标记为 No-HT, 其他试样均以时效处理时间标记。时效处理使用 DHG 高温鼓风干燥箱进行, 控温精度为±0.1 ℃。在时效处理过程中, 试样随炉加热, 在炉温达到 180 ℃时开始计时, 每组试样的时效处理过程单独进行, 且均保证炉温冷却至室温后再开始下一组试验。

1.2 试验方法

1.2.1 材料力学性能拉伸试验

研究中拉伸试样从在线淬火的铝合金多胞薄壁型材上沿挤压方向取样, 拉伸试样的取样位置为型材外八边形中无加强筋的 4 个面, 并通过 DK7716D 型电火花数控线切割机床加工成型。拉伸试样的尺寸参考 GB/T 228—2002 《金属拉伸实验方法》标准中的相关规定, 其尺寸如图 2 所示。

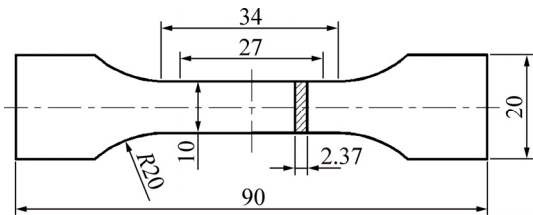


图 2 拉伸试样尺寸图
Fig. 2 Drawing of tensile sample (unit: mm)

在室温条件下, 使用 WDW-E200 型微机控制电子万能试验机进行准静态拉伸实验, 拉伸速度为 2 mm/min。每次试验结束后记录试样的抗拉强度 σ_b (MPa)、屈服极限 σ_s (MPa)与伸长率 δ (%), 其中抗拉强度 σ_b 由计算机直接获得, 屈服强度 σ_s 为试样发生 0.2%塑性变形时的应力, 也记为 $\sigma_{0.2}$ 。所有状态的拉伸试验数据均取 3 组稳定试验的平均值。

1.2.2 铝合金薄壁梁准静态轴向压缩试验

从时效处理后的挤压型材上切取长度为 201~203 mm 的准静态压缩薄壁梁试样, 并用车床切削试样的两个端面, 以保证薄壁梁试样的长度一致(200 mm), 同时满足试样两端的平行度要求。使用 WAW-E600 型微机控制电液伺服万能试验机进行铝合金薄壁梁试样的准静态轴向压缩实验。实验压缩速率为 5 mm/min, 载荷数据由计算机采集, 采样频率为 1 Hz。使用相机拍摄记录载荷-位移曲线波峰与波谷所对应的试样变形状态, 试验完成后记录试样的变形模式及失效状态。由于试样压缩末期进入致密化阶段, 其载荷迅速增加并超过峰值载荷, 该阶段不记入试样的吸

能性能。

2 实验结果

2.1 不同时效处理状态材料的力学性能

图 3 所示为不同时效处理状态下各试样准静态拉伸试验得到的应力-应变曲线。由图 3 可知, 随着时效处理时间的增加, 材料的屈服强度不断增加而伸长率逐渐减小。时效处理时间为 540 min 与未人工时效处理(No-HT)的材料相比, 屈服极限提高约 210%, 同时抗拉强度也有小幅度的提高(约 45%), 而材料的伸长率则由 28.70%减少为 16.38%。不同时效处理条件下材料的力学性能见表 3。

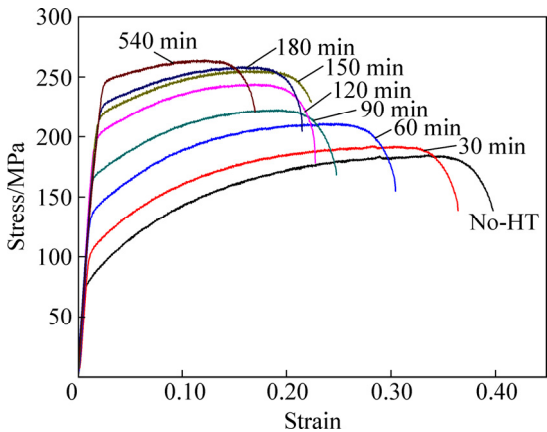


图 3 不同时效处理状态 6063 铝合金的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of 6063 aluminum at various aging conditions

表 3 不同时效处理状态 6063 铝合金的力学性能

Table 3 Mechanical properties of 6063 aluminum at various aging conditions

Aging time/min	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	n
No-HT	76.41	186.41	28.7	2.75
30	99.7	190.77	27.35	3.4
60	132.58	211.21	22.42	4.07
90	156.06	223.53	20.7	5.29
120	184.93	242	18.67	6.54
150	205.58	255.58	17.71	7.44
180	220.8	264.25	16.9	8.07
540	239.76	269.21	16.38	12.64

为了准确描述不同时效处理状态下铝合金的硬化属性, 采用 Ramberg-Osgood 模型进行拟合分析。基

于真应力-真应变曲线进行拟合, 其公式如下^[17]:

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} = 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

式中: ε_p 为塑性应变; ε 为真应变; σ 为真应力; E 为弹性模量; $\sigma_{0.2}$ 为屈服极限; n 为硬化指数。

通过对比分析可知, 6063 铝合金弹塑性段界线不明显, 通过 n 能够直观地反映材料在弹塑性过渡段及塑性段中的硬化速率。此外, 材料发生颈缩的塑性应变值 $\varepsilon_{pu}=1/n$, 因此, 硬化指数 n 与材料的伸长率呈负相关, 结合表 3 中的数据可知, 随着 n 的增加, 材料的伸长率迅速下降。

2.2 不同时效处理状态铝合金薄壁梁压缩变形行为

通过准静态条件下铝合金薄壁梁结构轴向压缩试验可知, 试样在压缩过程中随时效处理时间的变化表现出 4 种不同的变形模式^[14-15]: 其中编号为 No-HT、30 min 的试样以欧拉模式变形(Euler mode, 简称 E): 薄壁梁结构在中部首先发生失稳弯曲变形; 编号 60、90、120 min 的试样以钻石模式变形(Diamond mode, 简称 D): 薄壁梁结构从一端开始逐级发生非对称变形, 在变形过程中, 薄壁梁的截面形状发生较大的变化; 编号 150 min 与 180 min 的试样以混合模式变形(Mixed mode, 简称 C+D): 薄壁梁结构首先以手风琴模式发生顺序变形, 在形成若干个褶皱后, 变形模式逐渐转变为钻石模式, 截面变形失去规律性; 编号 540 min 的试样以手风琴模式变形(Concertina mode, 简称 C): 薄壁梁结构从一端开始逐级发生顺序外延变形。表 4 所列为试样在不同时效处理状态下 6063 铝合金薄壁梁试样的准静态压缩实验结果, 图 4 所示为部分典型试样的载荷位移曲线。

表 4 不同时效处理状态下 6063 铝合金试样的变形模式

Table 4 Deformation mode of 6063 aluminum samples at various aging conditions

Euler mode		Diamond mode	
No-HT	30 min	60 min	120 min
Mixed mode		Concertina mode	
150 min	180 min	540 min	

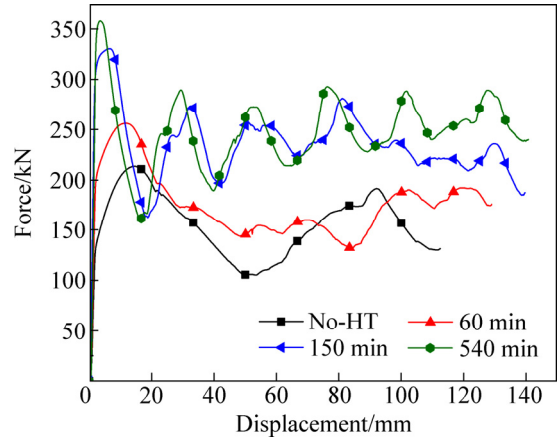


图 4 不同时效处理状态 6063 铝合金的载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of 6063 aluminum alloy at various aging conditions

3 分析与讨论

3.1 时效处理对峰值载荷的影响

为了探明时效处理对铝合金薄壁梁结构峰值载荷的影响, 选取一组典型载荷-位移曲线第一峰值前的部分作为研究对象, 如图 5 所示。由图 5 可知, 试样在第一峰值前的载荷-位移曲线呈现出较大的差异, 在达到峰值前, 载荷曲线可以分为 3 个阶段: 呈线性增长的弹性变形阶段、失稳阶段、失稳后的塑性变形阶段。

铝合金薄壁梁结构在压缩变形初期, 其载荷-位移曲线可近似为线性关系, 但由于结构失稳发生在试样的局部区域, 其中包含了材料的弹性变形以及少量的塑性变形, 因此, 虽然不同时效处理时间下 6063

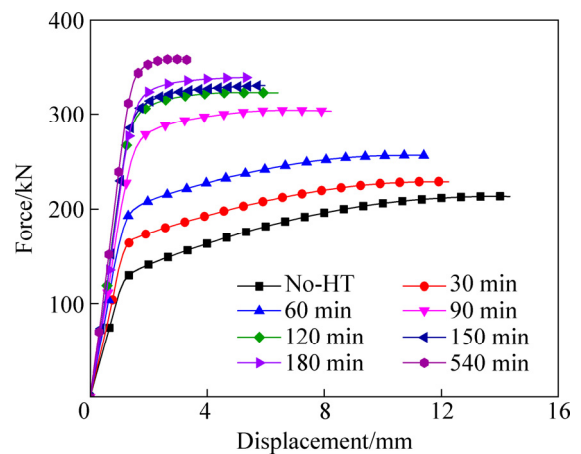


图 5 第一峰值前试样的载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of samples before 1st peak

铝合金的弹性模量没有发生明显变化, 但是由于材料屈服点以及弹塑性过渡区域的差异, 导致试样变形初期的载荷-位移曲线斜率表现出一定的不同。由图 5 可知, 由于时效处理状态的差异, 不同铝合金薄壁梁结构的载荷曲线存在明显的区别。随着时效处理时间的增加, 试样弹性加载阶段的斜率逐渐提高, 其中时效处理 540 min 试样弹性段斜率最高, 相同变形量条件下承载能力明显优于未进行时效处理的 No-HT 试样。

弹性段后, 试样发生失稳, 载荷增速减慢但仍继续增大, 当载荷增大至第一峰值后开始出现下降。同时, 试样峰值对应的变形量与时效处理时间成反比, 随着时效处理时间的增加, 峰值出现的时间提前而峰值载荷增大, 对于未时效处理试样, 在变形达到 14.33 mm 时才出现峰值载荷, 形成第一个塑性铰, 而时效处理 540 min 试样载荷已经降至谷值, 形成一个完整的褶皱。说明时效处理对于 6063 铝合金薄壁梁第一峰值前结构的承载有显著影响, 通过合理设计时效处理工艺能够灵活调整薄壁梁的承载性能。表 5 所列为不同时效处理状态下 6063 铝合金薄壁梁结构的峰值载荷以及相对应的压缩变形量。

表 5 不同时效处理状态 6063 铝合金试样的峰值载荷及变形量

Table 5 Peak load and collapsed length of 6063 aluminum samples at various aging conditions

Aging time/min	F_p/kN	δ_p/mm
No-HT	215.36	14.33
30	228.86	12.24
60	256.27	11.39
90	304.09	8.23
120	322.81	6.42
150	332.38	5.97
180	338.95	5.49
540	357.98	3.31

3.2 时效处理对临界失稳载荷的影响

为准确地获得铝合金薄壁梁结构发生失稳时的临界载荷, 对试样的载荷-位移曲线进行微分, 并结合 LangevinMod 非线性拟合, 获得载荷的变化率曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 曲线由 3 个典型阶段组成, 在压缩变形初期, 一阶求导的载荷-位移曲线缓慢的下降, 但整体变化平稳, 说明铝合金薄壁梁试样在弹性压缩阶段中, 载荷与位移的关系并非完美的线性关系, 这与铝合金塑性屈服特性有关^[18]。对比不同时效

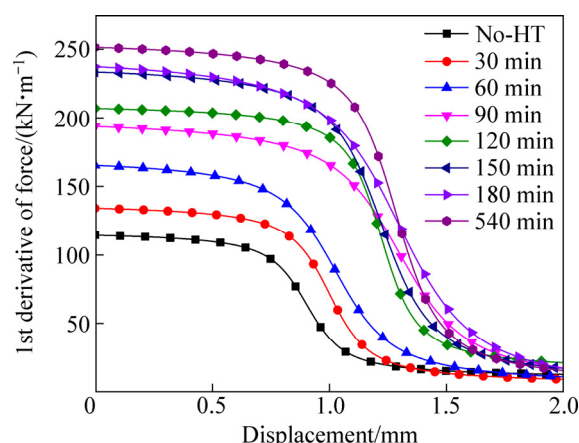


图 6 试样的载荷-位移曲线的 1 阶导数

Fig. 6 1st derivative of load-displacement curves

处理状态的铝合金薄壁梁试样, 未时效处理试样 (No-HT) 的斜率最小, 在变形约为 0.6 mm 时, 载荷曲线的斜率开始快速降低, 当压缩变形至约 1.3 mm 时, 斜率变化减慢并趋于稳定。随着时效处理时间的增加, 在弹性加载阶段, 载荷曲线的斜率逐渐增大, 斜率下降点后延; 在失稳阶段, 试样斜率的变化率较未时效处理试样 (No-HT) 明显提高, 下降过程更加突然; 随着压缩变形量的增大, 所有试样的载荷变化率在发生失稳后均趋于一致。说明时效处理状态不但会改变试样的压缩变形模式, 同时也会对试样的加载过程产生影响。随着时效处理时间的减小, 弹性变形阶段与塑性变形阶段之间的过渡更加光滑, 试样由于结构失稳产生的载荷波动越来越不明显。

Ramberg-Osgood 模型的硬化指数 n 能够同时描述材料的弹塑性阶段, 可用于表征不同时效处理状态下试样变形前期的载荷-位移曲线斜率变化趋势。图 7 所示为采用 Slogistic 函数对不同时效处理状态下试样载荷-位移曲线初始斜率的拟合结果, 其中 $a=249.6$, $k=0.52$, $x_c=3.1326$ 。由图 7 可知, 硬化指数 n 作为重要的材料性能表征参数与结构弹塑性变形行为具有显著的相关性, 所建立的拟合模型能够准确预测不同时效处理状态下试样结构的弹塑性变形特性。

对图 6 再次进行微分求导, 能够获得试样载荷斜率的变化率曲线, 如图 8 所示。曲线的最低点对应结构承载能力的突变, 即为发生失稳的临界变形量 D_{cr} 。由图 6 可知, 未时效处理试样 (No-HT) 在压缩量为 0.85 mm 时最先发生失稳, 而 540 min 处理试样发生失稳对应的压缩变形量较大。根据图 8 得到结构失稳时的临界变形量 D_{cr} , 结合图 5 能够准确获得铝合金薄壁梁结构的压缩失稳临界载荷 F_{cr} , 如表 6 所列。

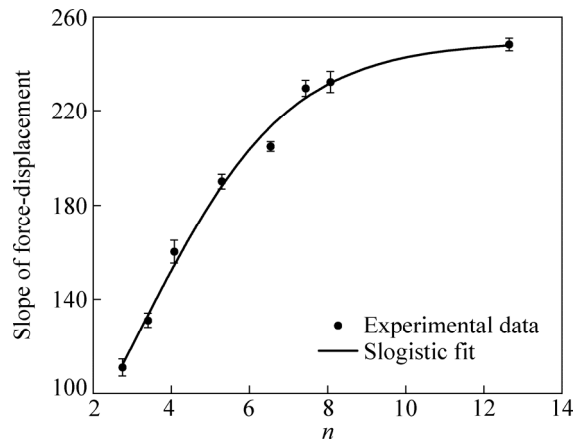


图 7 试样的载荷-位移曲线弹性段的 1 阶导数

Fig. 7 1st derivative of load-displacement curve of samples at elastic state

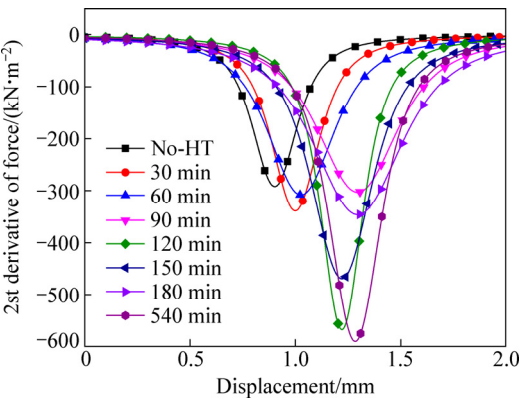


图 8 试样的载荷-位移曲线的 2 阶导数

Fig. 8 2nd derivative of load-displacement curves of samples

3.3 时效处理对吸能性能的影响

薄壁梁结构的吸能性能与承载能力、可压缩变形

量、变形模式等有直接联系。试样在变形过程中将外力做功转化为内部的变形能，其吸能性能 U ，可以根据下式求解得到^[14-15]：

$$U = \int_0^S F(S) dS \quad (2)$$

式中： F 为试样在轴向压缩过程中的瞬时载荷； S 为瞬时位移。则试样的名义载荷 F_m 可以通过下式计算^[14-15]：

$$F_m = \frac{1}{\delta_e} \int_0^S F(S) dS \quad (3)$$

式中： δ_e 为试样的可压缩变形量，最终得到的结果见表 7。由表 7 可知，随着时效处理时间的增加，6063 铝合金薄壁梁试样的名义载荷以及可压缩变形量均有所增加，试样的吸能性能显著提高，未时效处理时 No-HT 试样的吸能为 17356.49 J，而时效处理 540 min 后，试样的吸能提高近 100%。

表 6 不同时效处理状态 6063 铝合金试样的峰值载荷及变形量

Table 6 Critical displacement and load of 6063 aluminum samples at various aging conditions		
Aging time/min	D_{cr}/mm	F_{cr}/kN
No-HT	0.9008	101.88
30	1.0004	138.85
60	1.0248	166.31
90	1.3008	236.63
120	1.2209	262.45
150	1.2305	264.97
180	1.2976	271.94
540	1.2881	307.62

表 7 不同时效处理状态下铝合金试样的压缩实验结果

Table 7 Compression results of aluminum samples at various aging conditions

Aging time/min	F_m/kN	δ_e/mm	U/J	Collapse mode	Collapse starting point
No-HT	154.28	112.5	17356.49	E	Mid of specimen
30	158.98	122.5	19475.66	E	Mid of specimen
60n	174.74	128.9	22528.67	D	Bottom of specimen
90	188.76	127.8	23869.21	D	Bottom of specimen
120	189.82	127.5	24202.28	D	Bottom of specimen
150	234.10	139.6	32690.67	C+D	Bottom of specimen
180	233.80	141.6	33125.91	C+D	Bottom of specimen
540	246.06	141.0	34701.59	C	Bottom of specimen

图9所示为不同时效处理条件下试样在准静态压缩过程中平均-峰值载荷比 γ 的变化曲线。由图9可知,在欧拉模式与钻石变形模式下,随着时效处理时间的增加,平均-峰值载荷比不断减小,从未时效处理No-HT状态下的0.72迅速减小为时效处理120 min状态下的0.58,且钻石变形模式下,试样的平均-峰值载荷比减小速度更快。平均-峰值比的降低说明载荷波动较大,薄壁梁变形过程中峰值载荷远高于其他变形时刻。由于在汽车车身结构设计中,峰值载荷受到设计准则的约束,不允许超过后端传力结构的承载上限。因此,过低的平均-峰值比不利于充分发挥薄壁梁结构的吸能性能。当试样时效处理150 min以上,其变形模式转变为混合模式或手风琴模式,平均-峰值载荷比(0.7)与钻石模式相比骤然增大。在混合模式及手风琴模式变形条件下,随着时效处理时间的增加,试样的平均-峰值载荷比曲线缓慢下降。

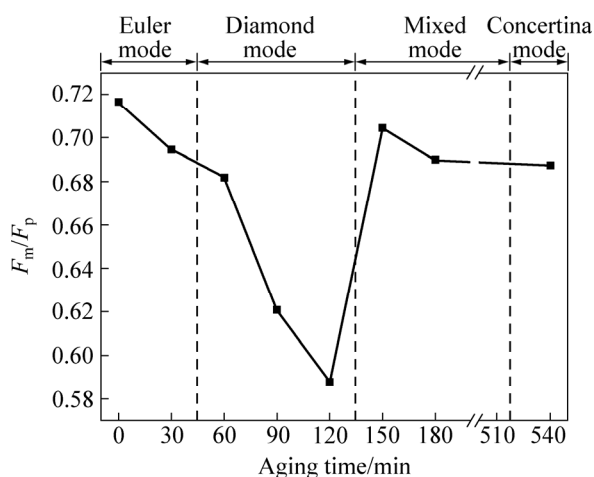


图9 平均-峰值载荷比随时效处理时间的变化

Fig. 9 Change of mean-peak load ratio of samples with aging time

图10所示为不同时效处理状态下薄壁梁结构平均吸能性能 η 的变化曲线,其中 $\eta=U/\delta_c$ 。由图10可知,随着时效处理时间的增加,试样的平均吸能性能不断提高。当试样以欧拉模式或钻石模式变形,延长时效处理时间对平均吸能性能的影响较小,但当试样的变形模式由钻石模式转变为混合模式或手风琴模式,其平均吸能性能突然增加,说明变形模式对试样的吸能性能有较大的影响。

因此,当试样以混合模式或手风琴模式变形时,其平均-峰值载荷比较高,试样的平均吸能性能提高。在汽车车身结构设计中,应尽可能使薄壁梁结构发生混合模式或手风琴模式的变形,有利于提高汽车的安全性能。

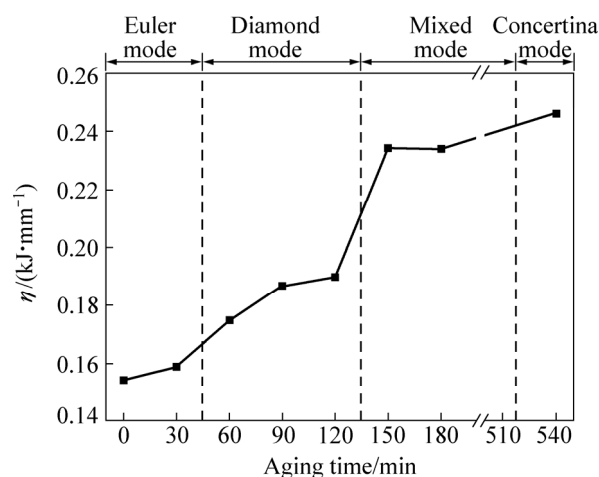


图10 平均吸能性能随时效处理时间的变化

Fig. 10 Change of average energy absorption of samples with aging time

3.4 材料性能与薄壁梁变形行为的关系

在汽车设计中,薄壁梁结构的峰值载荷 F_p 、名义载荷 F_m 、可压缩变量 δ_c 及吸能性能 U 是关键设计参数。通常,在车型研发前期,准确预测薄壁梁结构的变形行为对于样车的概念开发与材料选型有重要的帮助作用。

在薄壁梁结构确定的条件下,时效处理的时间对材料的力学性能产生较大的影响,并最终影响薄壁梁试样的变形过程。典型的材料性能参数为屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_b 、Ramberg-Osgood硬化指数 n 、伸长率 δ 等。根据实验数据进行数值分析,可以获得不同时效处理状态下材料性能对铝合金薄壁梁结构变形行为的影响规律。

为了快速筛选出最大相关性影响因子,将 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_b 、 n 、 δ 作为输入变量, F_p 、 F_m 、 δ_c 、 U 作为输出变量,采用T-Student参数评估各变量之间的关系。与传统的数据分析不同,由于输入变量的数量级存在较大的差异,可能会对变量的相互关系(Main effect)产生较大的影响,因此必须首先将变量归一化处理,使输入变量的范围为 $[-1, 1]$,则对于任意输入变量的T-Student相关性参数可以通过式(4)计算:

$$t = \frac{|M_- - M_+|}{\sqrt{\frac{S_G^2}{n_-} + \frac{S_G^2}{n_+}}} \quad (4)$$

式中: $S_G^2 = \frac{(n_- - 1)S_-^2 + (n_+ - 1)S_+^2}{n_- + n_+ - 2}$ 为广义方差。将输入变量以均值为界线根据数值大小分为上下两部分

(域), 其中上半部分域中对应输出变量 x 的方差 $S_+^2 = \frac{\sum (x_+ - M_+)^2}{n_+ - 1}$, 下半域的方差 $S_-^2 = \frac{\sum (x_- - M_-)^2}{n_- - 1}$; M_+ 为上半域中输出变量的平均值; M_- 为下半域中输出变量的平均值; n_+ 为上半域中数据点的个数; n_- 为下半域中数据点的个数。通过计算, 可以准确定量分析输入变量与输出变量间的相关性, 如表 8 所列。

由表 8 可知, 硬化指数 n 与薄壁梁变形过程中的峰值载荷 F_p 、名义载荷 F_m 、可压缩变形量 δ_e 及吸能

性能 U 有非常显著的相关性。同时, 伸长率 δ 由于和硬化指数 n 存在负相关, 也表现出相对较高的显著性。因此, 基于 n 结合二次多项式建立各关键参数的数学拟合函数, 通过采用最小二乘法拟合实验数据点高效获得多项式的各项系数, 最终得到峰值载荷 F_p 、名义载荷 F_m 、可压缩变形量 δ_e 及吸能性能 U 的多项式拟合, 所建立的二次多项式与数据点的位置关系如图 11 所示。

通多对比拟合优度判定系数 R^2 可知, 采用硬化指数 n 作为基础变量能够较为准确地预测 6063 铝合金薄壁梁结构的变形行为与变形模式, 尤其对于承载能力的预测精度较高(峰值载荷 $R^2=0.98$)。这是由于试样出现峰值时正处于弹性与塑性的过渡阶段, 明确的变形模式尚未完全形成, 因此, 峰值载荷与试样的变形模式相关性较低, 随着硬化指数 n 的增大峰值载荷表现出稳定的增长趋势; 而对于可压缩变形量 δ_e , 由于随着时效处理时间的变化, 试样的变形模式发生了改变, 尤其是当变形模式由欧拉模式转化为钻石模式后, 试样的可压缩变形量 δ_e 出现了相反的变化趋势。同样, 对于吸能性能 U , 当试样的变形模式由钻石模式转为

表 8 输入变量与输出变量的主效应

Table 8 Main effect of input and output variables

Main effect	F_m	F_p	U	δ_e
n	5.71	7.26	1067.74	1.50
δ	-4.43	-7.84	-820.10	-1.37
$\sigma_{0.2}$	0.35	0.53	63.50	0.09
σ_b	0.69	1.05	125.27	0.18

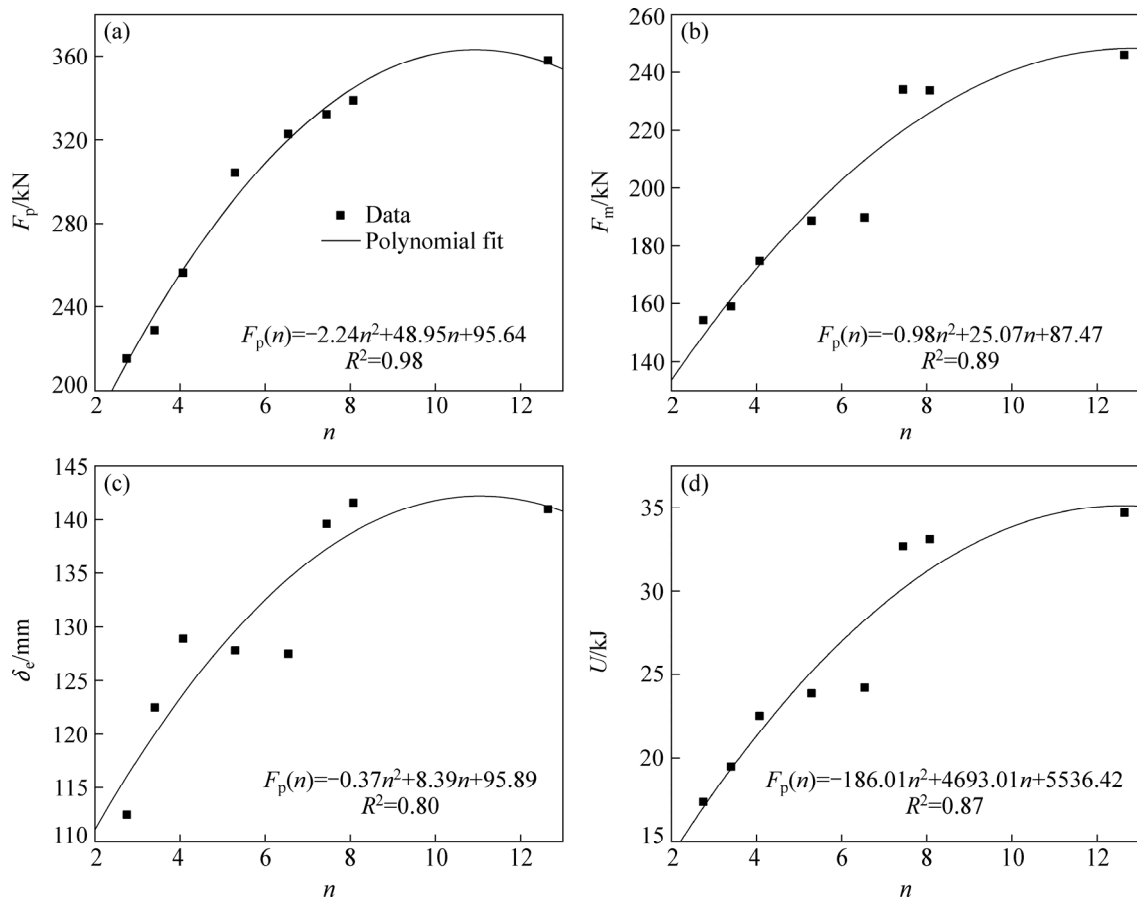


图 11 二次多项式拟合曲线及数据点

Fig. 11 Quadratic polynomial fitting of data points: (a) Peak load; (b) Mean load; (c) Collapse length; (d) Energy absorption

混合模式时,吸能性能 U 突然增大,其数据点呈现出明显的波动。正是由于变形模式的改变导致可压缩变形量 δ_c 和吸能性能 U 的波动,影响了二次多项式拟合的精度。

综上所述可知,Ramberg-Osgood 硬化指数 n 能够较为准确地描述随着时效处理时间的变化材料弹塑性力学性能的波动,因此,在预测变形初期的载荷时精度较高,而对于压缩过程中,变形模式突变导致的性能波动上预测存在一定的误差,但整体趋势准确,仍具有较高的精度。

4 结论

1) 通过准静态压缩实验表明,随着时效处理时间的延长 6063 铝合金薄壁梁结构的变形模式会逐渐发生转变。在 180 °C 条件下,时效处理 0~30 min 试样为欧拉模式(E)变形,60~120 min 试样为金刚石模式(D)变形,时效 150~180 min 试样为混合模式(C+D)变形,时效 540 min 试样为手风琴模式(C)变形。

2) 随着时效处理时间的延长,6063 铝合金薄壁梁结构准静态轴向压缩的峰值载荷、临界失稳载荷均有所提高,特别对于试样的吸能性能,试样时效处理 540 min 后的吸能较未时效处理状态的提高 100%。

3) 硬化指数 n 与薄壁梁变形过程中的峰值载荷 F_p 、名义载荷 F_m 、可压缩变形量 δ_c 及吸能性能 U 有显著的相关性,基于硬化指数 n 建立各参数的二次多项式拟合模型,能够准确预测不同时效处理状态下 6063 铝合金薄壁梁结构的变形行为。

REFERENCES

- [1] 张金换,杜汇良,马春生. 汽车碰撞安全性设计[M]. 北京:清华大学出版社,2010: 190–204.
ZHANG Jin-huan, DU Hui-liang, MA Chun-sheng. Automotive design for crash safety[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 190–204.
- [2] POGATSCHER S, ANTREKOWITSCH, LEITNER H, EBNER T, UGGOWITZER P J. Mechanisms controlling the artificial aging of Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3352–3363.
- [3] WERINOS M, ANTREKOWITSCH H, KOZESCHNIK E, EBNER T, MOSZNER F, LÖFFLER J F, UGGOWITZER P J, POGATSCHER S. Ultrafast artificial aging of Al-Mg-Si alloys[J]. Scripta Materialia, 2016, 112: 148–151.
- [4] ALEXANDER J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 1960, 13(1): 10–15.
- [5] WANG Z, LI Z, NING J, ZHAO L. Effect of heat treatments on the crushing behaviour and energy absorbing performance of aluminium alloy foams[J]. Materials & Design, 2009, 30(4): 977–982.
- [6] FARSHIDI M. Effect of aging treatment on the crushing behavior of aluminum 6061 alloy tube[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design & Applications, 2014, 229(5): 389–397.
- [7] GHADIAN A A. The effect of heat treatment on elastic-plastic behavior and absorbing energy for L-shaped mild steel under compressive axial load[J]. Al-Rafadain Engineering Journal, 2013.
- [8] WILLIAMS B W, SIMHA C H M, ABEDRABBO N, MAYER R, WORSWICK M J. Effect of anisotropy, kinematic hardening, and strain-rate sensitivity on the predicted axial crush response of hydroformed aluminium alloy tubes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(6): 652–661.
- [9] 王光耀,万鑫铭,李阳,高丽,周佳,赵清江. 时效处理工艺对铝合金吸能盒力学性能和吸能性能影响的研究[C]//2012 重庆汽车工程学会年会论文集. 重庆: 重庆汽车工程学会, 2012.
WANG Guang-yao, WAN Xin-ming, LI Yang, GAO Li, ZHOU Jia, ZHAO Jiang-qing. Effect of heat treatment parameters on the mechanical property and energy absorbing capability of aluminum crash boxes[C]//Proceedings of 2012 Chongqing Automotive Engineering Society Annual Conference, 2012.
- [10] 汪军,马军. 时效处理对汽车用改性铝合金性能的影响分析[J]. 热加工工艺, 2014(20): 143–145.
WANG Jun, MA Jun. Analysis on effects of heat treatment on property of modified aluminum alloy for automobile[J]. Hot Working Technology, 2014(20): 143–145.
- [11] 王永进,陈策,何德坪. 时效处理对多孔铝合金压缩吸能性能的影响[J]. 金属时效处理, 2002, 27(8): 3–6.
WANG Yong-jin, CHEN Ce, HE De-ping. Influence of heat treatment on compressive deformation and energy absorption properties of porous aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(8): 3–6.
- [12] 吴进,程和法,黄笑梅,张燕瑰,胡志君. 变质处理及时效处理对泡沫铝合金压缩吸能性的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(4): 373–376.
WU Jin, CHENG He-fa, HUANG Xiao-mei, ZHANG Yan-gui, HU Zhi-jun. Effects of modification and heat treatment on energy absorption capacities of aluminum alloy foams[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(4): 373–376.
- [13] 曹晓卿,杨桂通. 时效处理对开孔泡沫 Al-Cu-Mg 合金力学性能及吸能性的影响[J]. 金属时效处理, 2005, 30(9): 33–37.
CAO Xiao-qing, YANG Gui-tong. Effects of Heat treatment on the mechanical properties and energy absorption characteristics

- of open cell Al-Cu-Mg alloy foams[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2005, 30(9): 33–37.
- [14] 王冠, 向东, 李落星. 时效不同时间铝镁硅合金型材的准静态轴向压缩性能[J]. *机械工程材料*, 2012, 36(10): 81–85.
- WANG Guan, XIANG Dong, LI Luo-xing. Quasi-static axial compressive properties of Al-Mg-Si alloy profiles aged for different times[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(10): 81–85.
- [15] 王冠, 刘志文, 徐从昌, 李落星. 诱导孔对铝合金薄壁梁轴向压缩变形行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(3): 494–506.
- WANG Guan, LIU Zhi-wen, XU Cong-chang, LI Luo-xing. Effect of cut-outs on axial collapse behaviors of aluminum with thin-walled structure[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(3): 494–506.
- [16] 叶拓, 王冠, 姚再起, 李落星. 汽车用6xxx系铝合金薄壁件的韧性断裂行为[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(4): 878–887.
- YE Tuo, WANG Guan, YAO Zai-qi, LI Luo-xing. Ductile fracture behavior of 6xxx aluminum alloy thin-walled components of automobile[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(4): 878–887.
- [17] MOSTAGHEL N, BYRD R A. Inversion of Ramberg–Osgood equation and description of hysteresis loops[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2002, 37(8): 1319–1335.
- [18] 李雪春, 杨玉英. 塑性变形对铝合金弹性模量的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(4): 701–705.
- LI Xue-chun, YANG Yu-ying. Effect of plastic deformation on elastic modulus of aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(4): 701–705.

Effect of aging treatment on axial collapse behaviors of aluminum alloy with multi cell thin-walled structure

WANG Guan^{1,2}, KOU LIN-yuan¹, LIU Zhi-wen², YI Jie², XU Cong-chang², LI Luo-xing²

(1. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The effect of heat treatment on collapse behaviors and energy absorption of 6063 aluminum alloy with multi cell thin-walled structure was investigated by quasi-static axial compression using WAW-E600 microcomputer controlled universal testing machine. The results show that the deformation mode of the 6063 aluminum alloy with multi cell thin-walled structure changes from Euler mode to concertina mode with the increase of aging time, while the peak load, mean load and energy absorption of the sample also enlarge. The critical buckling load of the structure is obtained by the second order derivation of the load-displacement curve. The influence of aging treatment on the bearing performance of the specimen was studied by Slogistic function fitting. Based on the T-Student evaluation method, the Ramberg-Osgood hardening parameter n is introduced as a variable by the main effect analysis. The quadratic polynomial fitting models of peak load, mean load, collapsed length and energy absorption performance were established. The models can accurately predict the elastic-plastic deformation behavior of 6063 aluminum alloy thin-walled structure under different aging conditions, which can provide theoretical guidance for the conceptual design of aluminum alloy automotive body.

Key words: aluminum alloy; thin-walled structure; aging treatment; quasi-static compression; collapse behavior

Foundation item: Project(51605234) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(NGY2016067) supported by the University Scientific Research Project of Ningxia, China; Project(31515007) supported by the Open Fund of State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, China; Project(NZ16046) supported by Natural Science Foundation of Ningxia, China

Received date: 2017-04-01; **Accepted date:** 2017-07-01

Corresponding author: LI Luo-xing; Tel: +86-731-8821445; E-mail: llxly2000@163.com

(编辑 王超)