

Al-Mg-Si 多胞截面型材准静态轴向压缩

向东^{1,2}, 傅定发², 娄燕^{1,3}, 王冠^{1,2}, 李灿², 李落星^{1,2}

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082;

2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082; 3. 深圳大学 机电与控制工程学院, 深圳 518060)

摘要: 将 Al-Mg-Si 合金型材在 180 °C 条件下分别时效 30~540 min, 采用 WAW-E600 型微机控制电液伺服万能试验机研究不同时效状态的铝合金型材在准静态压缩条件下的变形模式与吸能性能。结果表明: 随时效时间的延长, Al-Mg-Si 型材的压缩变形模式由金刚石模式逐渐转变为手风琴模式, 型材吸能性能提高; 在 180 °C 时效 540 min 时, 型材变形完全转变为手风琴模式, 其吸能性能较未时效型材的提高 99%。通过在型材上端侧壁开孔可降低第一峰值载荷 7%~12%, 并影响型材的变形模式, 开孔后型材变形模式均为混合模式或手风琴模式, 该转变提高了型材变形的稳定性。对于原变形模式为金刚石模式的试样, 开设诱导孔后, 试样变形名义载荷增加, 吸能性能提高; 原变形模式为混合模式与手风琴模式的试样, 开设诱导孔后, 吸能性能降低。

关键词: Al-Mg-Si 型材; 时效; 诱导孔; 准静态压缩; 变形模式; 吸能性能

中图分类号: TB31

文献标志码: A

Quasi-static axial compression of Al-Mg-Si profiles with multi-cell section

XIANG Dong^{1,2}, FU Ding-fa², LOU Yan^{1,3}, WANG Guan^{1,2}, LI Can², LI Luo-xing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The deformation modes and energy absorption capacity of Al-Mg-Si profiles under quasi-static axial compression were studied by WAW-E600 microcomputer controlled electric-hydraulic servo universal testing machine. The Al-Mg-Si profiles were respectively aged at 180 °C from 30 min to 540 min. The results indicate that the deformation mode of the aluminum extrusions is gradually changed from diamond mode to concertina mode and the energy absorption of the extrusions increases with increasing aging time. When aged at 180 °C for 540 min, the deformation mode is completely transformed into concertina mode and the energy absorption increases by 99% compared with that of the unaged alloy. Drilling holes on the sidewalls near the upper end of the profiles can decrease the peak load by about 7%~12% and change the deformation mode into mixed mode or concertina mode, which improves the stability of sample during deformation. As to samples with diamond mode before drilling holes, the mean load of the samples during deformation increases and the energy absorption are improved after drilling induced holes. On the contrary, the energy absorption of the samples with mixed mode or concertina mode reduces after drilling holes.

Key words: Al-Mg-Si profiles; aging; induced hole; quasi-static compression; deformation mode; energy absorption capacity

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075132); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090161110027); 湖南省杰出青年基金资助项目(09JJ1007)

收稿日期: 2011-07-22; 修订日期: 2011-11-10

通信作者: 娄燕, 副教授, 博士; 电话: 0731-88821950; E-mail: llxy2000@163.com

随着汽车保有量的增加,与之相关的交通事故也随之增多。因此,汽车碰撞安全性能越来越受重视,而设计出质量轻且吸能效果好的薄壁结构可提高乘员的安全^[1]。圆管与方管等薄壁结构作为吸能装置已经在汽车行业广泛使用^[2]。

为了满足汽车安全与减重的要求,有研究者对薄壁件的变形模式以及吸能性能做了大量研究。1960年, ALEXANDER^[3]研究了金属圆管在轴向压力下的变形,并建立相应的能量吸收分析模型。ABRAMOWICZ 和 JONES^[4-5]对钢质圆管和方管分别在静态与动态载荷下进行试验,引入有效压溃距离后,发现试验结果与理论模型相吻合。LANGSETH 等^[6-7]将 T4、T4*与 T6 状态下不同壁厚的 AA6060 铝合金方管进行静压试验,发现方管总是呈轴对称模式变形,与方管的壁厚和热处理方式无关。TVERGAARD^[8]在对圆管的压缩过程中,发现其变形模式与圆管的半径与壁厚的比值(R/h)、材料的屈服强度 σ_y 以及应变硬化指数 n 有关。许多研究者^[9-10]发现了多胞管吸能效率远高于单管的吸能效率。尽管大量实验证明薄壁件经填充泡沫后可大大提高其吸能效果,但 ZHANG^[11]在数值模拟中却发现多胞管的吸能效率比填充泡沫后单胞管的吸能性能高 50%~100%,这意味着多胞管的吸能效率更具吸引力。考虑到多胞管的成型性能,6×××系(Al-Mg-Si)变形铝合金具有中高强度、优良的挤压加工性与耐蚀性等优点^[12],适合于复杂断面的挤压成型,同时 Al-Mg-Si 合金系可热处理强化合金,因而本实验选择 Al-Mg-Si 合金多胞截面型材作为研究对象,研究多胞截面型材作为汽车安全件在不同时效状态下的准静态压缩性能与吸能性能,为工业上热处理工艺制定提供参考;此外, ZHANG 等^[11,13]通过冲压使吸能盒发生预变形来获得稳定而规律的变形模式,并降低第一峰值载荷。本实验通过简单易控的开孔方式引入诱导孔,并研究诱导孔对不同热处理状态下合金型材压缩性能与吸能性能的影响。

1 实验

图 1 所示为 Al-Mg-Si 合金在线淬火的型材尺寸图。由图 1 可知,试样由内外两个八边形组成,内外层八边形沿轴心成 22.5°角,内层八边形棱边通过 4 条加强筋与外层八边形平面相连。试样直接从合金型材上截取,时效温度为 180 °C,时效时间分别为 30、60、90、120、150、180 和 540 min,未进行人工时效的试样为基准件,标记为 No-HT。硬度试样从型材外八边

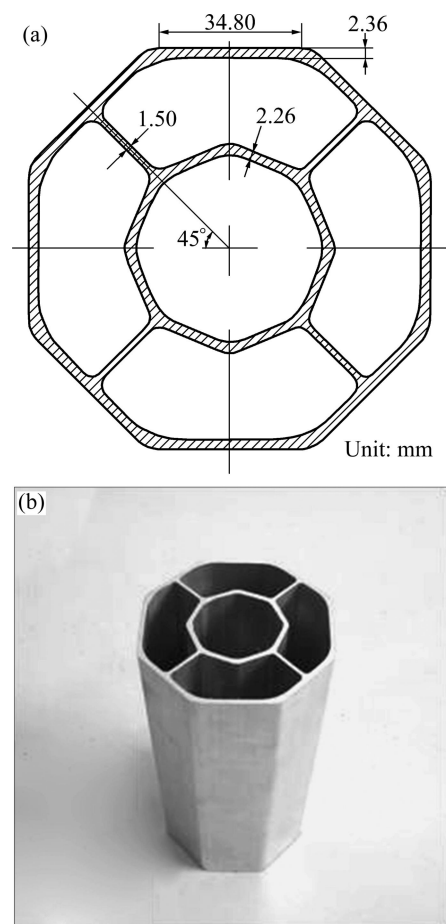


图 1 Al-Mg-Si 合金型材的几何形状与尺寸

Fig.1 Geometric shape and dimension of Al-Mg-Si profile: (a) Top view; (b) General view

形平面取样,试样大小约 25 mm×25 mm,时效后硬度测试在 HBRUV-187.5 型布洛维光学硬度计上进行,加载载荷为 613 N。在制备拉伸试样与压缩试样时,为减小实验误差,将 Al-Mg-Si 型材 305 mm 长试样进行时效处理,待时效完成后分别锯成长度分别为 100 和 200 mm 试样,其中,长度为 100 mm 的型材沿挤压方向取拉伸试样,长度为 200 mm 的型材用作准静态压缩试样。拉伸试验在 WDW-E200 型微机控制电子万能试验机上进行,拉伸速度为 2 mm/min。准静压实验在 WAW-E600 型微机控制电液伺服万能试验机上进行,压头速度为 5 mm/min。

2 结果与分析

2.1 布氏硬度测试

每种时效状态试样的硬度测试结果为 7 个数据点的平均值,通过分析得到合金的硬度值随时效时间的

变化如图2所示。由图2可见, 在线淬火后材料的硬度值为51.3HB, 在180℃进行时效, 合金的硬度随时效时间的延长而升高, 直到540 min时达到峰值硬度, 为95.2HB, 之后便进入过时效阶段, 硬度值开始下降。经2880 min的时效后, 硬度值下降至83.7HB。该Al-Mg-Si型材在时效温度为180℃条件下, 达到峰值时效时间约为540 min, 由于过时效状态下, 材料塑性迅速降低, 因此, 本文作者研究时效工艺时间区间为0~540 min。

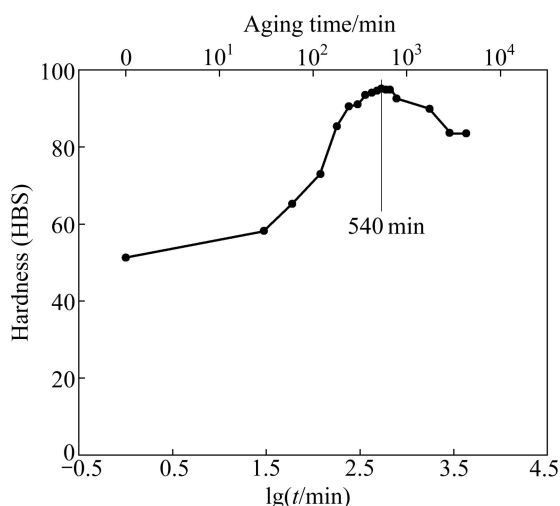


图2 不同时效状态下的硬度值

Fig. 2 Hardness values for various aging conditions

2.2 拉伸性能测试

图3所示为峰值时效以及欠时效状态下各试样的拉伸应力—应变曲线。由图3可知, 随时效时间的增加, 材料的屈服强度得到极大地提高而伸长率不断下降。540 min对应的曲线与未人工时效(No-HT)相比,

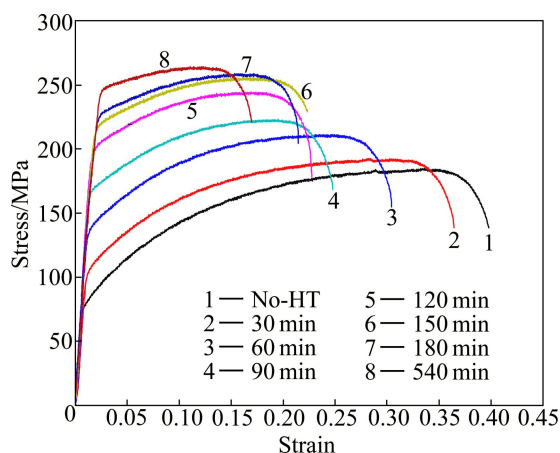


图3 180℃下不同时效时间各试样的应力—应变曲线

Fig. 3 Stress—strain curves of samples at 180℃ for various aging time

其屈服强度提高约210%, 抗拉强度提高约45%, 而伸长率由28.7%下降至16.4%。相关力学性能数据见表1。

表1 180℃下不同时效时间的力学性能

Table 1 Mechanical properties with different aging times at 180℃

Temper	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%
No-HT	76	186	28.7
30 min	99	190	27.4
60 min	132	211	22.4
90 min	156	223	20.7
120 min	185	242	18.7
150 min	205	255	17.7
180 min	221	264	16.9
540 min	239	269	16.4

2.3 时效对压缩性能的影响

ANDREWS等^[14]研究表明, 圆管在准静压过程中的变形模式主要有以下4种模式: 手风琴模式(Concertina mode), 金刚石模式(Diamond mode), 混合模式(Mixed mode)以及欧拉模式(Global buckling), 不同的变形模式主要与圆管的长度 L 、半径 R 以及壁厚 h 有关。本实验中各试样在准静压过程中随时效时间的不同呈现3种典型的变形模式, 其中No-HT试样、时效30、60、90和120 min的试样呈金刚石模式变形(D), 时效150和180 min的试样呈混合模式变形(C+D), 时效540 min的试样呈手风琴模式变形(C), 部分具有代表性试样的变形模式如图4所示, 表2列出了各试样在不同时效状态下的准静压实验结果。

2.3.1 金刚石模式变形

典型的金刚石模式的载荷—位移曲线如图5所示, 准静态压缩试样时效时间为30 min。由图5可知, 原点 $O-A$ 阶段为弹性屈曲阶段, 试样所承受的载荷迅速增加, 试样沿整个轴长同时形成若干个波纹; 载荷超过 A 点后, 弹性屈曲逐渐转变为塑性屈曲, 试样上某一波纹的波幅加大而开始屈曲失稳变形, A 点对应的照片中, 左右相对区域的外八边形开始内凹, 前后相对区域的外八边形开始外凸, 从而在上下两端分别形成一个未变形区, 同时, 从 $A-B$ 阶段可看出载荷增长速度减慢; 在 B 点处载荷达到峰值载荷(228.86 kN), 之后载荷缓慢下降, 经历较大位移后(53 mm)下降至最低点 C (101.76 kN), 此时, 试样未变形区的上下两端接触, 外凸—内凹变形结束。此后未变形区开始变形,

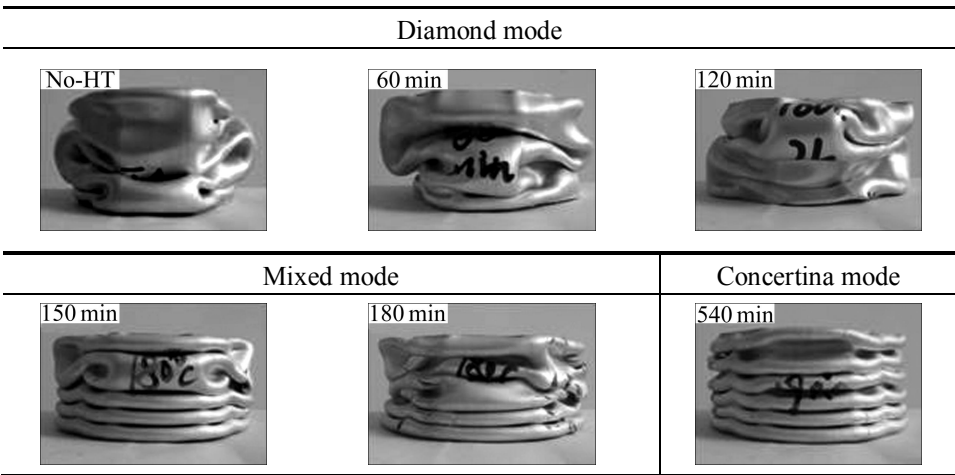


图 4 不同时效状态下试样的变形模式

Fig. 4 Deformation modes of samples for various aging conditions

表 2 不同时效状态下试样的准静压实验结果

Table 2 Quasi-static test results of samples for various aging conditions

Temper	F_p/kN	F_m/kN	δ_c/mm	U/J	Collapse mode	Collapse starting point
No-HT	215.36	154.28	112.5	17 356.49	D	Mid of specimen
30 min	228.86	158.98	122.5	19 475.66	D	Mid of specimen
60 min	256.27	174.74	128.9	22 528.67	D	Mid of specimen
90 min	304.09	188.76	127.8	23 869.21	D	Mid of specimen
120 min	322.81	189.82	127.5	24 202.28	D	Mid of specimen
150 min	332.38	234.10	139.6	32 690.67	C+D	Bottom of specimen
180 min	338.95	233.80	141.6	33 125.91	C+D	Bottom of specimen
540 min	357.98	246.06	141.0	34 701.59	C	Bottom of specimen

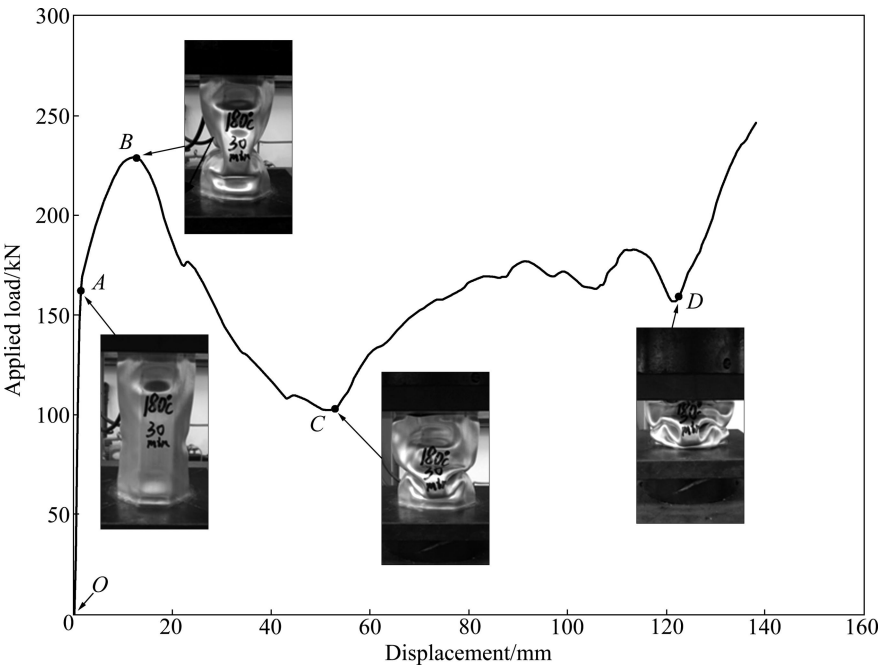


图 5 时效 30 min 试样的载荷—位移曲线

Fig. 5 Load—displacement curve of sample after aging for 30 min

载荷再次缓慢上升,在170 kN附近出现较小的波动。试样在D点被完全压缩,D点以后为致密化过程。

图6所示为金刚石模式下不同试样压缩性能与吸能性能的变化。由图6(a)可知,随时效时间的延长,试样的第一峰值载荷(F_p)由时效前(No-HT)的215.36 kN提高至时效120 min时的322.81 kN,提高程度约为50%,同时,第一峰值的位置出现左移,其中,No-HT试样在位移为14.5 mm处达到了第一峰值,而时效120 min后,试样的第一峰值出现在5.5 mm处。此外,峰值上升后,弹性屈曲阶段延长,第一峰值宽度逐渐减小,这表明试样在金刚石变形模式下,随时效时间的延长,试样从弹性屈曲转变塑性屈曲的临界点有所推迟,并逼近第一载荷峰值载荷。试样在压缩过程中的载荷越过峰值并经历较大位移后(约50 mm)降至最低点,之后开始缓慢上升,最终在均值载荷附近呈微小波动后实现完全压缩,而试样的压溃距离(δ_c)却有所不同,No-HT试样在112.5 mm处即完成了压缩,而时效60 min试样与时效120 min试样的压缩位移比较接近,约为128 mm。这说明时效有利于试样压溃距离的增加。由图6(b)可知,试样在压缩过程中的均值(F_m)随着时效时间的延长而有不同程度的增加,时效120 min试样的均值达到了189.82 kN,比时效前(No-HT)

的提高了约23%。此外,试样在压缩过程中的均值都经历了较大位移(60 mm)后才趋于平稳。图6(c)所示为不同时效时间下试样吸能性能的变化。由图6(c)可知,同一位移处(112.5 mm),时效120 min试样的吸能性能与时效前的相比提高约24%。

2.3.2 混合模式变形

典型的混合模式的载荷—位移曲线如图7所示,准静态压缩试样时效时间为150 min,混合模式即试样首先以手风琴模式变形,然后转化为金刚石模式变形。由图7可知,原点O-A阶段,试样在压缩过程中的载荷迅速增长,整个轴长处于均匀的弹性屈曲阶段,其斜率等于试样的轴向压缩刚度;载荷最终在A点处(332.38 kN)达到峰值,试样发生屈曲失稳,弹性屈曲逐渐转化为塑性屈曲,如A点处所示,在试样底端附近整个外八边形开始外凸变形,形成一个塑性绞^[3-4,15],进一步压缩,铰点上下等距的金属开始弯曲变形,同时绞点附近的金属发生伸张变形;越过峰值后,试样的承载能力迅速下降至B点(162.52 kN),此时,形成了第一个完整的褶皱。之后的载荷—位移重复上述过程,直至C点,试样形成3个完整的褶皱,手风琴变形模式结束,随着轴向位移继续进行,试样的变形模式转变为金刚石模式,载荷水平有所下降且

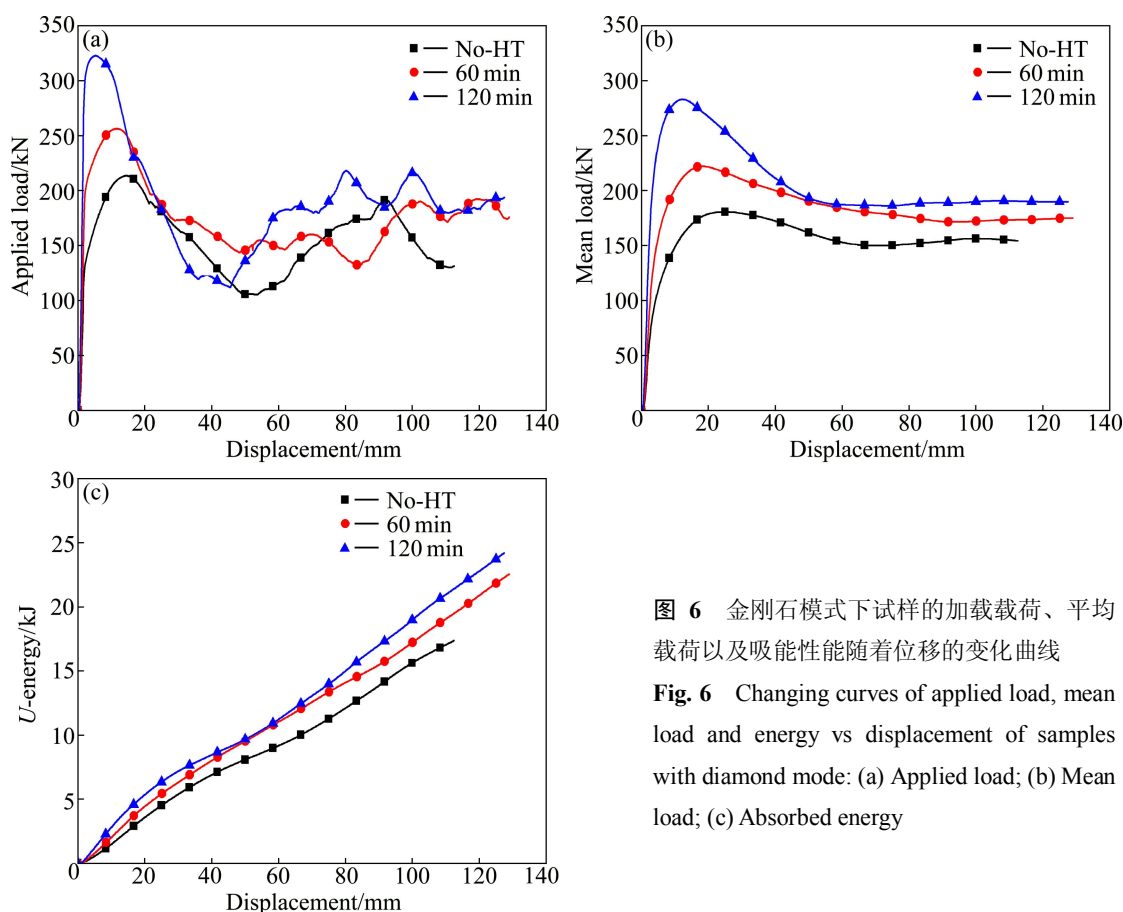


图6 金刚石模式下试样的加载载荷、平均载荷以及吸能性能随着位移的变化曲线

Fig. 6 Changing curves of applied load, mean load and energy vs displacement of samples with diamond mode: (a) Applied load; (b) Mean load; (c) Absorbed energy

波动幅度减小。在 D 点试样被完全压缩, D 点以后为致密化过程。

时效 150 min 试样与时效 180 min 试样在准静压

过程中均以混合模式(C+D)进行压溃变形。图 8 所示为混合模式下不同试样压缩性能与吸能性能的变化曲线。由图 8(a)可知,时效 150 min 的试样与时效 180 min

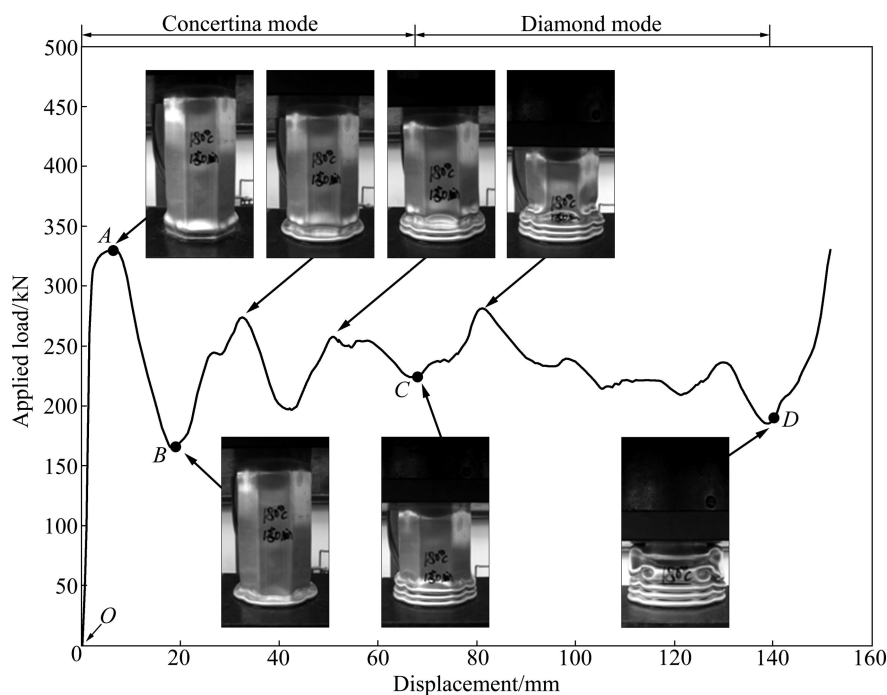


图 7 时效 150 min 试样的载荷—位移曲线

Fig.7 Load—displacement curve of sample after aging for 150 min

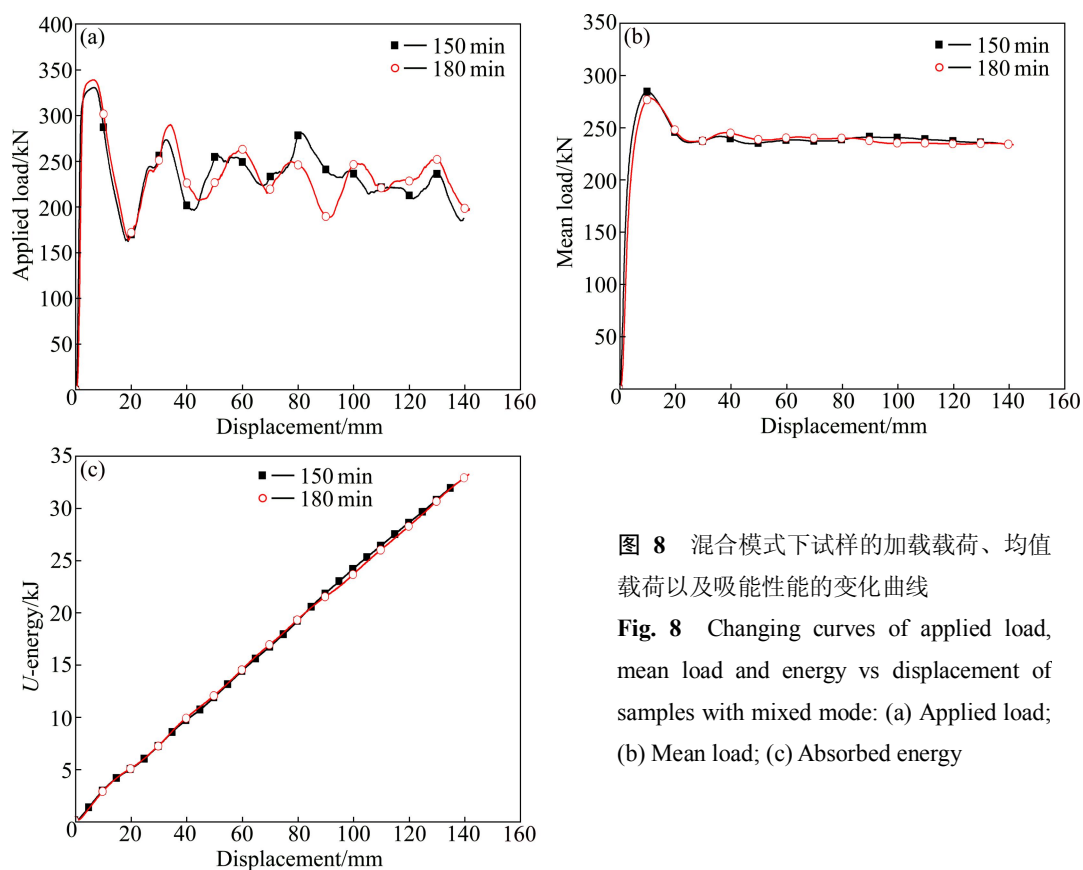


图 8 混合模式下试样的加载载荷、均值载荷以及吸能性能的变化曲线

Fig. 8 Changing curves of applied load, mean load and energy vs displacement of samples with mixed mode: (a) Applied load; (b) Mean load; (c) Absorbed energy

的试样在准静压过程中达到第一峰值的位移基本相同(约 6 mm 处), 所不同的是后者的第一峰值载荷比前者略高, 两者分别为 338.95 和 332.38 kN。载荷越过峰值后, 两者又在同一位移处(20 mm)降至最低点, 此时, 两者均形成一个完整的褶皱。之后载荷重新上升至第二峰值, 其中, 时效 150 min 的试样和时效 180 min 的试样的第二峰值分别为 273.52 和 289.34 kN。这表明试样在压缩过程中的峰值载荷随时效时间的延长而增加。时效 150 min 的试样在完成 3 个褶皱后以金刚石模式变形, 载荷水平降至均值以下; 而时效 180 min 的试样在完成 2 个褶皱以后呈金刚石模式变形时, 尽管载荷也呈微小波动, 但波动的幅度远小于第二峰的幅度。这一结果说明呈混合模式变形的试样在准静压过程中, 当其变形模式由手风琴模式转变为金刚石模式后, 其载荷水平将大大降低。此外, 由 8(b)与 8(c)对比可知, 两者在变形过程中均值载荷与吸能性能几乎一致。

2.3.3 手风琴模式变形

典型的手风琴模式的位移—载荷曲线如图 9 所示, 准静态压缩试样时效时间为 540 min。由图 9 可知, 试样第一个褶皱的形成过程与上述混合模式的第一个褶皱形成过程相同, 即原点 O - A 阶段为均匀的弹性屈曲阶段, 至 A 点处(358 kN)载荷达到峰值, 试样发生屈曲失稳, 弹性屈曲逐渐转化为塑性屈曲, 越过

峰值后, 试样的承载能力迅速下降至 B 点(160 kN), 此时, 形成了第一个完整的褶皱。之后的载荷—位移重复上述过程, 呈现周期性的波峰与波谷。至 C 点时, 试样被完全压缩, 试样从底部往上依次形成 6 个褶皱, 图中每一个波谷对应着一个完整褶皱的形成, 而每一个波峰对应着一个塑性铰的形成。此外, 试样在准静压过程中的第一峰值约为 358 kN, 而后继的峰值约为 290 kN, 比第一峰值低 19%。这是由于第一个褶皱的形成时对下一个塑性铰的形成产生了局部弯曲, 相当于引入了轴对称的几何缺陷, 从而后面形成褶皱时所需的载荷就会减小, C 点以后为致密化过程。

2.3.4 不同变形模式间的对比

图 10 所示为不同变形模式下试样在准静压过程的第一峰值载荷(F_p)与引发长度(L_u)随时效时间的变化曲线。由图 10 可知, 随时效时间的延长, 峰值载荷近似地呈指数增长, 其中, 在时效 30~180 min 阶段, 第一峰值载荷增长速度较快, 时效 180 min 后, 第一峰值载荷增长速度减慢, 时效至 540 min 时第一峰值载荷为 358 kN。相反, 试样的引发长度随时效时间的延长却逐渐缩短, 其中 No-HT 试样的引发长度为 14.5 mm, 时效至 540 min 时试样的引发长度缩短为 3.5 mm。均值载荷和吸能性能随时效时间的变化曲线如图 11 所示。从图 11 可以看到, 在

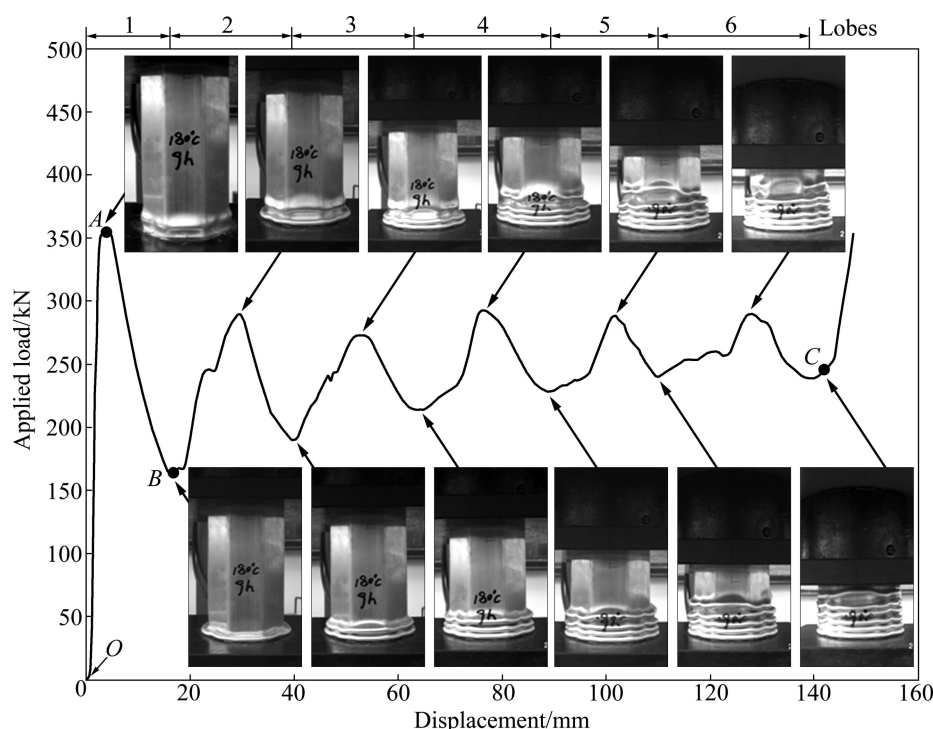


图 9 时效 540 min 试样的载荷—位移曲线

Fig. 9 Load—displacement curve of sample after aging for 540 min

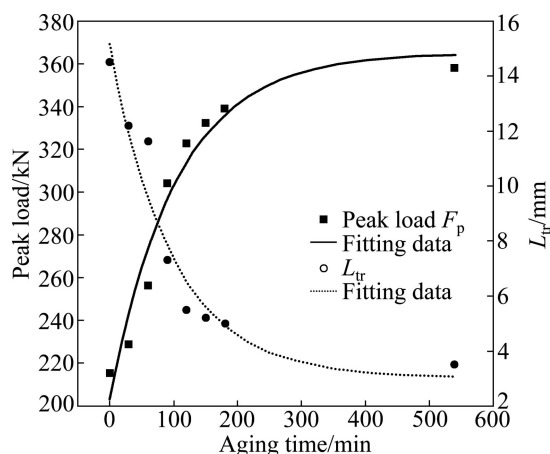


图 10 峰值载荷与引发长度随时效时间的变化曲线

Fig. 10 Changing curves of peak load and triggered length vs aging time

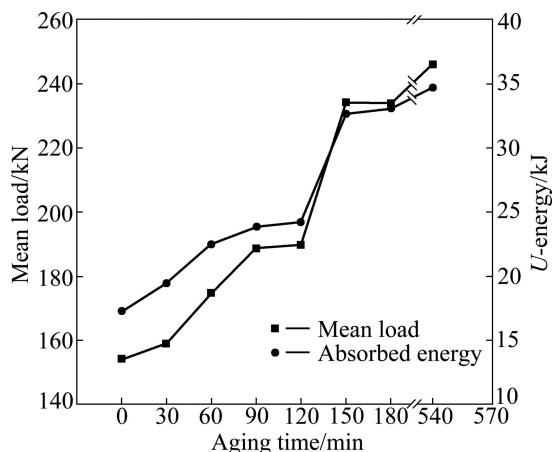


图 11 均值载荷与吸能性能随时效时间的变化曲线

Fig. 11 Changing curves of mean load and absorbed energy vs aging time

时效 0~120 min 阶段, 时效试样的均值载荷和吸能性能都随时效时间的延长而增加, 时效 120 min 试样的均值载荷为 189 kN, 吸收的能量为 24 202 J。时效至 150 min 时, 试样的变形模式转变为混合模式, 压缩后试样的均值载荷陡然增至 234 kN, 吸收的能量也大大增加, 为 32 690 J, 与时效 120 min 的试样相比, 吸能性能提高了 35%。这主要是由于时效 150 min 时, 试样的变形模式由原来的金刚石模式转变为混合模式, 试样的塑性变形程度增加, 材料的利用率提高, 加工硬化得以充分发挥, 因而试样的吸能性能大大提高。时效至 540 min 时, 试样的均值载荷与吸能性能进一步提高, 其中, 均值载荷为 246 kN, 吸收的能量为 34 701 J, 与时效前试样相比, 试样的吸能性能提高了 99%。

2.4 诱导孔对压缩性能的影响

试样在碰撞过程中的撞击力峰值不能超过许可力值, 否则会引起其它部件的破坏。ZHANG 与 CHENG^[11]研究了预变形对多胞管以及单胞方管(填充泡沫铝)压缩性能的影响, 发现预变形凹槽有效降低了两种吸能盒在压缩过程中的峰值力, 同时提高材料的利用率。本实验在八边形侧面没有加强筋的四边开孔以达到诱导变形的目的, 孔中心距试样顶端 13.5 mm, 孔径为 10 mm, 开孔后试样标记为时效时间-hole(如时效 30 min 试样开孔后记为 30 min-hole)。开孔后试样如图 12 所示。



图 12 开孔后试样的照片

Fig. 12 Photo of sample after drilling holes

2.4.1 开孔后试样的变形模式

引入诱导孔后试样的变形模式比没有诱导孔时的更加有规律, 部分具有代表性的试样变形模式如图 13 所示。在实验过程中, 所有试样都从开孔处发生屈曲, 外八边形开始外翻, 然后由上往下逐级压溃, 其中 No-HT-hole 试样与 30 min-hole 试样在完成 2 个完整的褶皱之后其变形模式便由手风琴模式向金刚石模式转变, 形成混合模式变形, 这种转变主要归因于材料较低的屈服强度^[8]; 而 60 min-hole 至 540 min-hole 试样均发生手风琴模式变形。这一结果表明, 诱导孔的引入能有效改变试样在轴向压缩过程中的变形模式, 没有诱导孔时, 试样因时效时间不同而呈现出 3 种变形模式; 引入诱导孔后, 试样在变形过程中只有混合变形与手风琴变形两种变形模式。

2.4.2 开设诱导孔后的压缩性能

表 3 所列为不同时效状态下试样开设诱导孔后的准静压实验结果, 图 14 所示为部分试样开孔前与开孔后压缩性能与吸能性能的对比。由表 3 可知, No-HT-

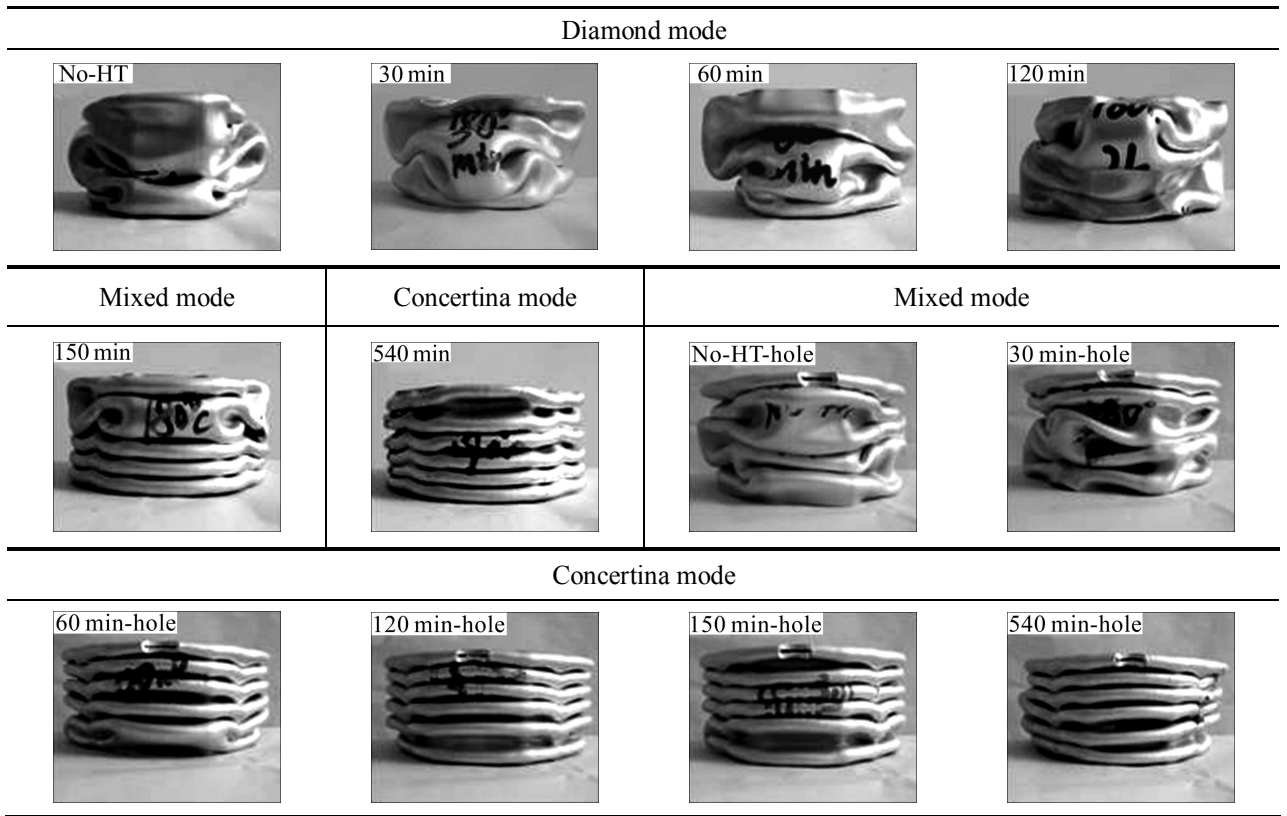


图 13 不同时效状态下试样开孔前、后变形模式的对比

Fig. 13 Comparison of deformation modes of samples before and after drilling holes for various aging conditions

表 3 不同时效状态下试样开设诱导孔后的准静压实验结果

Table 3 Quasi-static test results of samples after drilling holes for various aging conditions

Temper	F_p/kN	Decrease percentage/%	F_m/kN	Increase percentage/%	U/J	Increase percentage/%	Collapse mode
No-HT-hole	194.29	9.8	154.79	0.30	21 309.28	22.0	C+D
30 min-hole	207.14*	9.5	168.13	1.80	21 199.06	8.0	C+D
60 min-hole	252.35	1.5	197.36	12.9	25 696.49	14.0	C
90 min-hole	265.26	12.7	202.47	7.30	26 322.00	10.2	C
120 min-hole	287.91	10.8	214.25	12.8	30 426.99	25.7	C
150 min-hole	298.12	10.3	215.85	-7.8	31 623.10	-3.2	C
180 min-hole	305.65	9.8	219.14	-6.3	32 066.76	-3.1	C
540 min-hole	330.19	7.7	229.24	-6.8	34 106.99	-1.7	C

hole 试样至 120 min-hole 试样在开设诱导孔后, 其平均值 F_m 与未开设诱导孔时的相比, 均有不同程度的提高, 其中 60 min-hole、90 min-hole 和 120 min-hole 试样的平均值提高程度较大, 分别为 12.9%、7.3%和 12.8%。此外, 从图 14(a)~(c)可以看出, 对于没有诱导孔时呈金刚石变形的试样, 开孔后由于变形模式的转变, 其载荷一位移呈周期性波动, 从而提高了均值

载荷水平。而对于 150 min-hole、180 min-hole 和 540 min-hole 试样, 由图 14(d)~(f)可以看出, 开诱导孔之后, 载荷一位移曲线仍然呈规律性波动, 但均值载荷水平比没有诱导孔时低, 因此, 对于没有诱导孔时呈混合模式或手风琴模式变形的试样, 开诱导孔后其平均值 F_m 均有所降低。

由图 14(a)~(c)中吸能一位移曲线可知, 对于未开

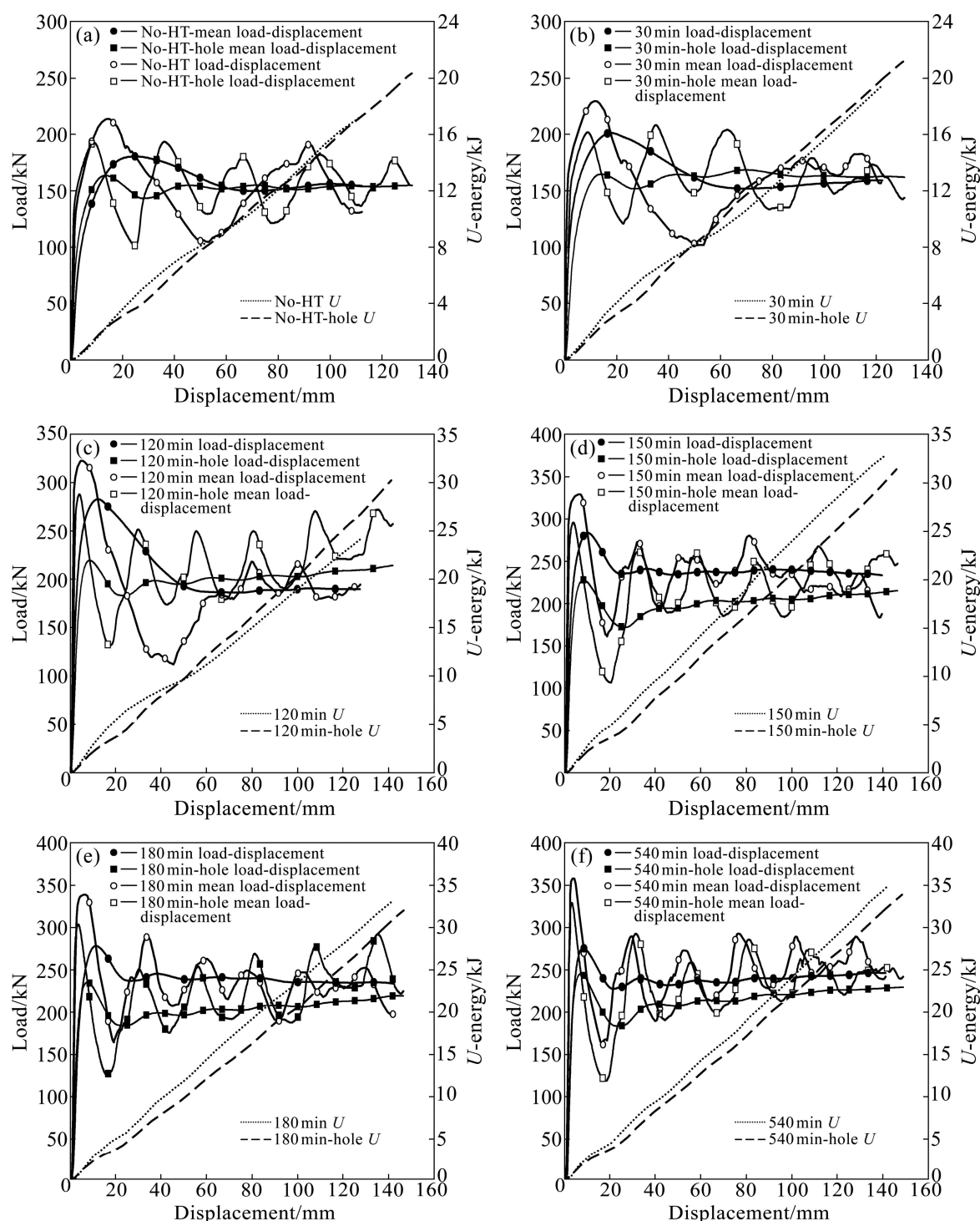


图 14 不同时效状态下试样开孔前与开孔后的加载载荷、平均载荷和吸能性能对位移的变化曲线

Fig. 14 Changing curves of applied load, mean load and energy absorption vs displacement of samples before and after drilling holes for various aging conditions: (a) No-HT; (b) 30 min; (c) 120 min; (d) 150 min; (e) 180 min; (f) 540 min

孔时呈金刚石模式变形的试样，开孔后吸能均有所增加，且随时效时间的延长，图中吸能曲线增长速度越快，表明试样吸收的能量越多。此外，由于开诱导孔后变形模式的转变引起的压溃距离的增加，试样在压缩过程中吸收的能量 U 与没有诱导孔时的相比也相应

地增加。这一结果表明：对于压缩过程中呈模式变形的试样，在其壁上引入诱导可有效地提高薄壁件的吸能性能。从图 14(d)~(f) 中吸能—位移曲线可以看出，由于开设了诱导孔，150 min-hole、180 min-hole 和 540 min-hole 试样的吸能效果大大降低了。

峰值载荷是衡量汽车安全性能的重要指标之一, 并作为吸能盒设计的约束。如表3所示, 引入诱导孔能够有效降低试样在压缩过程中的峰值载荷, 但其降低程度不随时效时间呈规律性变化, 其中90 min 试样开诱导孔降低程度最大, 达12.7%。值得一提的是, 开孔试样在压缩时所有的峰值载荷对应着最初的屈曲失稳阶段, 而30 min-hole 试样例外, 该试样在压缩过程中形成第二个褶皱时产生峰值载荷, 其值在表3中用星号标记。

3 结论

1) 通过准静态压缩实验表明, 随着时效时间的延长, Al-Mg-Si 多胞型材的变形模式会逐渐发生转变。在180 ℃条件下, 时效0~120 min 时试样为金刚石模式(D)变形, 时效150~180 min 的试样为混合模式(C+D)变形, 时效540 min 的试样为手风琴模式(C)变形。

2) 诱导孔能够影响 Al-Mg-Si 多胞型材在压缩过程中的变形模式, 开设诱导孔后 No-HT 试样和时效30 min 的试样的变形模式由金刚石模式转变为混合模式, 时效60~540 min 试样的变形模式均转变为手风琴模式。同时, 开设诱导孔能够有效降低试样在变形过程中的第一峰值载荷(约7%~12%)。

3) 开设诱导孔能够改善 Al-Mg-Si 多胞型材压缩变形的稳定性。对于原变形模式为金刚石模式的试样, 开设诱导孔后, 试样变形名义载荷增加, 吸能性能提高; 但原变形模式为混合模式与手风琴模式的试样, 开设诱导孔后, 试样变形名义载荷降低, 吸能性能降低。

符号注释

S 试样在轴向压缩过程中的瞬时位移。
 δ_c 压溃距离, 即试样被完全压缩时压头向下运动的距离。
 L_{tr} 引发长度^[16], 即达到第一峰值载荷时的轴向压缩长度。
 F_p 峰值载荷, 即试样在准静压过程中的第一峰值载荷。
 F_m 均值载荷, 即试样在准静压过程中的名义(均值)载荷, 由 $F_m = \frac{1}{S} \int_0^S F(S) dS$ 计算得出。
 U 吸收能, 即试样在准静压过程中吸收的能量, 由 $U = \int_0^S F(S) dS$ 计算得出。

σ_b 抗拉强度。
 $\sigma_{0.2}$ 0.2%应变处的应力(屈服强度)。
 δ 伸长率(%)。

REFERENCES

- [1] ALAVI NIA A, HAMEDANI J H. Comparative analysis of energy absorption and deformations of thinwalled tubes with various section geometries [J]. *Thin-Walled Structures*, 2010, 48(12): 946–954.
- [2] CHEN D H, USHIJIMA K. Estimation of the initial peak load for circular tubes subjected to axial impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(7): 889–898.
- [3] ALEXANDER J M. An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading [J]. *Q J Mech Appl Math*, 1960, 13(1): 10–15.
- [4] ABRAMOWICZ W, JONES N. Dynamic axial crushing of square tubes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1984, 2(2): 179–208.
- [5] ABRAMOWICZ W, JONES N. Dynamic axial crushing of circular tubes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1984, 2(3): 263–281.
- [6] LANGSETH M, HOPPERSTAD O S. Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminum extrusions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1966, 18(7/8): 949–968.
- [7] LANGSETH M, HOPPERSTAD O S, HANSEN A G. Crash behavior of thin-walled aluminum members [J]. *Thin-Walled Structures*, 1998, 32(1/3): 127–150.
- [8] TVERGAARD V. On the transition from a diamond mode to an axisymmetric mode of collapse in cylindrical shells [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1983, 19(10): 845–856.
- [9] CHEN W G, WIERZBICKI T. Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption [J]. *Thin-Walled Structures*, 2001, 39(4): 287–306.
- [10] ZHANG Xiong, CHENG Geng-dong, ZHANG Hui. Theoretical prediction and numerical simulation of multi-cell square thin-walled structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2006, 44(11): 1185–1191.
- [11] ZHANG Xiong, CHENG Geng-dong. A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(11): 1739–1752.
- [12] 潘青林, 李绍禄, 邹景霞, 尹志民. 微量 Mn 对 Al-Mg-Si 合金微观组织与拉伸性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(5): 972–976.

- PAN Qing-lin, LI Shao-lu, ZOU Jing-xia, YIN Zhi-min. Effects of minor manganese addition on microstructures and tensile properties of Al-Mg-Si alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(5): 972–976.
- [13] ZHANG Xiong, HUH H. Energy absorption of longitudinally grooved square tubes under axial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(12): 1469–1477.
- [14] ANDREWS K R F, ENGLAND G L, GHANI E. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-static loading [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1983, 25(9/10): 687–696.
- [15] WIERZBICKI T, BHAT S U. A moving hinge solution for axisymmetric crushing of tubes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1986, 28(3): 135–151.
- [16] 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: 38–65.
- DU Xing-wen, SONG Hong-wei. Impact dynamics and crashworthiness design of cylindrical shell [M]. Beijing: Science Press, 2004: 38–65.
- (编辑 何学锋)