

# 列车车体铝合金动态力学性能及其对吸能的影响

杨超, 朱涛, 肖守讷

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都, 610031)

**摘要:** 为了研究车用 5083H111 铝合金材料的动态力学性能及其对结构吸能的影响, 分别对该材料进行动态冲击拉伸和动态冲击压缩试验, 获得不同应变率下的材料本构关系。以车辆防爬吸能结构为载体, 采用 3 种材料模型, 对比分析该铝合金材料的动态力学性能对车体吸能结构吸能容量的影响。研究表明: 5083H111 铝合金材料在低应变率情况下存在应变率软化效应, 在中低应变率范围内存在应变率软化再强化特性; 在高应变率情况下, 这种材料表现出明显的应变率强化效应; 列车碰撞的应变率数量级范围为 0~2, 属于中低应变率范围; 对于 5083H111 铝合金制成的车体吸能结构, 考虑应变率效应的结构的实际吸能量要比不考虑应变率效应的相同结构的吸能量小。

**关键词:** 5083H111 铝合金; 动态力学性能; 应变率; 能量

中图分类号: O313.4; U270.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2015)07-2744-06

## Dynamic mechanical properties of aluminum alloy used in carbodies of trains and effect on energy absorption

YANG Chao, ZHU Tao, XIAO Shoune

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to study dynamic mechanical properties of the aluminum alloy 5083H111 and the influence on energy absorption characteristics, dynamic impact tension tests and dynamic impact compression tests were conducted on the material. The material constitutive relations of different strain rates were obtained in terms of the tests. Three material models were performed on the anti-climbing energy absorption structure of railway vehicles. The influence of the material dynamic mechanical properties on the structure energy absorption was investigated. The results show that the aluminum alloy 5083H111 exhibits strain rate softening effect at low strain rates, and possesses the characteristic of first softening and then strengthening in the range of low-middle strain rates. The material presents distinct strengthening effect on the strain rate under the condition of high strain rates. The order of magnitudes of the strain rate for the train collision is 0-2, which belongs to the range of low-middle strain rates. For the energy absorption structure made of the aluminum alloy 5083H111, the practical absorbed energy of the structural model considering the strain rate effect is less than that of the same model without regarding the strain rate effect.

**Key words:** aluminum alloy 5083H111; dynamic mechanical property; strain rate; energy

铝合金是部分地铁列车和高速列车车体结构的主要材料之一, 除了 CRH1 动车组, 国内高速动车组车

体都是以铝合金为主要材料。在列车被动安全性研究中, 车体结构在碰撞过程中会发生大变形, 铝合金材

收稿日期: 2014-07-04; 修回日期: 2014-10-02

**基金项目(Foundation item):** 国家自然科学基金资助项目(51275432); 牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2014TPL\_T04) (Project(51275432) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2014TPL\_T04) supported by the Independent Research Project of State Key Laboratory of Traction Power)

**通信作者:** 肖守讷, 研究员, 从事机车车辆结构设计及车体碰撞性研究; E-mail: snxiao@home.swjtu.edu.cn

料在塑性变形区的力学性质对车体结构的变形和吸能有很大的影响。在列车碰撞研究中,吸能结构一般都没有考虑材料的应变率效应<sup>[1-5]</sup>,钢质车体结构通常采用 Cowper-Symonds 本构模型来描述材料的应变率效应<sup>[6-8]</sup>。文献[9]以 Johnson-Cook 模型研究了一种新型的铁路车辆吸能装置。一般观点认为铝合金是应变率不敏感的材料,2024, 6061, 7050, 7A04, LC9 和 LY12-cz 等铝合金<sup>[10-13]</sup>在高应变率情况下的塑性流动应力几乎对应变率不敏感。然而,高强阻尼铝合金<sup>[14]</sup>和纯铝 L2<sup>[15]</sup>具有明显的应变率强化效应,普通铸造铝合金、高温阻尼铝合金和铝锂合金<sup>[14,16-17]</sup>却具有独特的应变率软化特性,即应变率负敏感效应。由于铝合金各成分所占比例的不同导致材料性质存在着巨大差异,所以对于列车车体铝合金动态力学性质的研究是非常必要的。列车碰撞是结构动态变形响应的过程,碰撞过程中,结构各点处的应力和应变率都不相同,并且应力和应变率随着时间变化而变化。以往的列车碰撞研究工作主要考虑铝合金的静态力学性质,对冲击载荷下材料的动态力学性能研究较少,少数研究工作采用了考虑应变率的材料本构模型,但材料模型参数都是以经验值为主。由于大多数列车碰撞事故的碰撞速度不高<sup>[8]</sup>,车体结构的动态力学响应主要是中低应变率下的响应过程<sup>[18]</sup>。本文作者以高速列车车体中常见的 5083H111 铝合金为研究对象,分别对该材料进行动态冲击压缩和动态冲击拉伸试验。通过冲击加载,获取铝合金在各个数量级应变率下的应力-应变曲线,展示不同应变率下的铝合金材料的动态冲击力学性能,并且对比分析这种材料的动态力学性能对车体吸能结构吸能容量的影响。

## 1 试验材料与方法

试验材料为车用 5083H111 铝合金,该铝合金具有良好的抗腐蚀和焊接性能,其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 5083H111 铝合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of aluminum alloy 5083H111			
%			
Mg	Si	Fe	Cu
4.40~4.90	0.40	0.40	0.10
Mn	Zn	Cr	Ti
0.30~1.00	0.25	0.05~0.25	0.15

准静态试验和动态冲击拉伸试验的试件为哑铃形片状,详见文献[15]。准静态试验采用 MTS 材料试验机。中低应变率的动态拉伸试验采用 INSTRON 试验机,可测试应变率范围为 1~1 000 s<sup>-1</sup>。

动态压缩试验试件是直径×高为 10 mm×8 mm 的圆柱体。高应变率动态压缩试验采用自制的分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)实验装置,该装置包括炮管、子弹、入射杆(输入杆)、透射杆(输出杆)、缓冲器、超动态应变仪以及计算机等,如图 1 所示,其中子弹、入射杆、透射杆直径均为 14.5 mm,入射杆长度为 400 mm,透射杆长度为 525 mm,弹速最高可达 60 m/s。SHPB 装置的基本工作原理是:子弹高速撞击输入杆,产生的弹性应力波(入射波)传入输入杆,被输入杆上的应变片接收到;当入射波到达输入杆与试件的界面时,发生反射和透射,反射回去的反射波再次被输入杆上的应变片接收,透射到试件中的应力波在试件与透射杆的界面再次发生反射和透射,透射波被透射杆的应变片接收。超动态应变仪记录了入射波、反射波和透射波信号。根据一维应力波理论,利用记录的应力波信号就可以得到试件的应变率、平均应变和平均应力。根据均匀性假设得到经典的二波法公式为

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \varepsilon_r \\ \varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \\ \sigma(t) = \frac{A}{A_s} E \varepsilon_t \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  和  $\sigma(t)$  分别为试件的应变率、平均应变和平均应力;  $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_t$  分别为反射波和透射波;  $l_s$  和  $A_s$  为试样的长度和横截面积;  $A$  和  $E$  为压杆的横截面积和弹性模量;  $C_0$  为应力波在压杆中的传播速度。

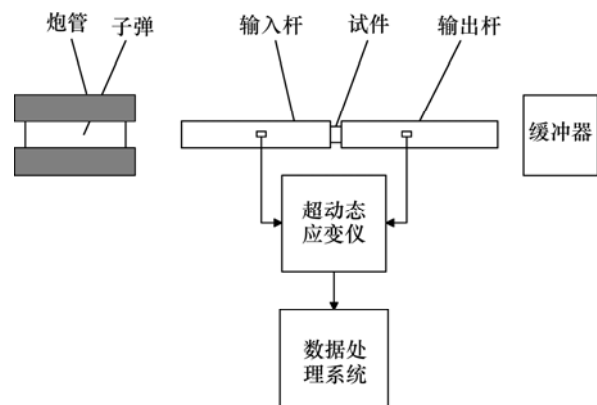


图 1 动态冲击压缩试验装置

Fig. 1 Test device of dynamic impact compression

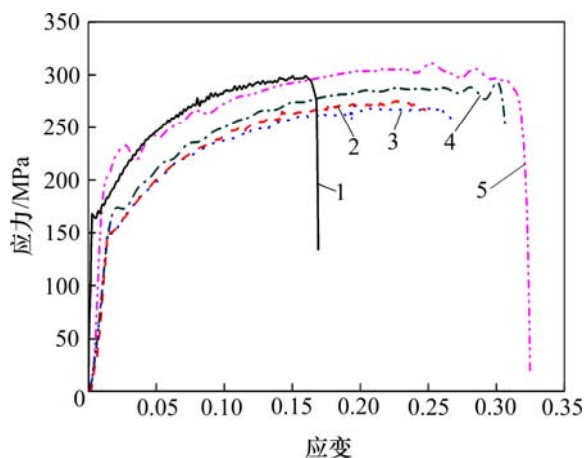
## 2 试验结果与分析

在 MTS 试验机上所得的静态试验的应力-应变曲线被用于与动态冲击拉伸和动态冲击压缩试验结果进行比较。动态冲击拉伸和动态冲击压缩试验中,对相同应变率进行了多次试验,下面采用试验结果较好且处于中间位置的曲线。

### 2.1 动态冲击拉伸试验结果

对 5083H111 铝合金分别进行应变率为 5, 10, 100 和  $400 \text{ s}^{-1}$  的动态冲击拉伸试验,所有的拉伸试件都进行到拉断为止。动态冲击拉伸试验得到的应力-应变曲线如图 2 所示,图 2 还给出了 MTS 试验机的准静态材料试验结果。从图 2 可以看出:材料的屈服强度基本未发生变化,都在 150 MPa 左右,材料的失效应变随着应变率的增大而增大,该材料具有应变率增塑效应。5, 10 和  $100 \text{ s}^{-1}$  等中低应变率的应力-应变曲线明显低于准静态结果,相同应变下的塑性流动应力明显低于准静态情况,但随着应变率增大至  $400 \text{ s}^{-1}$  时,动态拉伸曲线有接近准静态的应力-应变曲线的趋势。

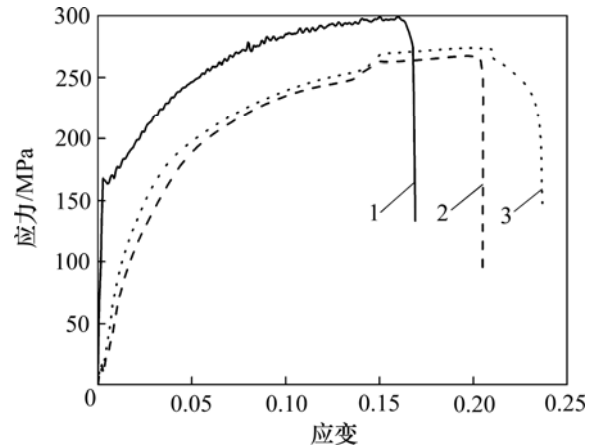
为了验证试验的有效性,在 INSTRON 试验机上又进行了 2 次应变率为  $10 \text{ s}^{-1}$  的拉伸试验,并与准静态结果进行比较,结果如图 3 所示。低应变率的拉伸试验的应力-应变曲线仍然低于准静态情况。综上所述,对于 5083H111 铝合金,应变率在某值以下时动态试验曲线是低于准静态试验曲线的;随着应变率的进一步增加,当高于这个值时,动态试验的应力-应变曲线就可能接近或高于准静态试验的应力-应变



应变率/ $\text{s}^{-1}$ : 1— $2 \times 10^{-4}$ ; 2—5; 3—10; 4—100; 5—400

图 2 第 1 批次铝合金动态拉伸试验结果

Fig. 2 Results of dynamic tension test of the first aluminum alloy



应变率/ $\text{s}^{-1}$ : 1— $2 \times 10^{-4}$ ; 2—10; 3—10

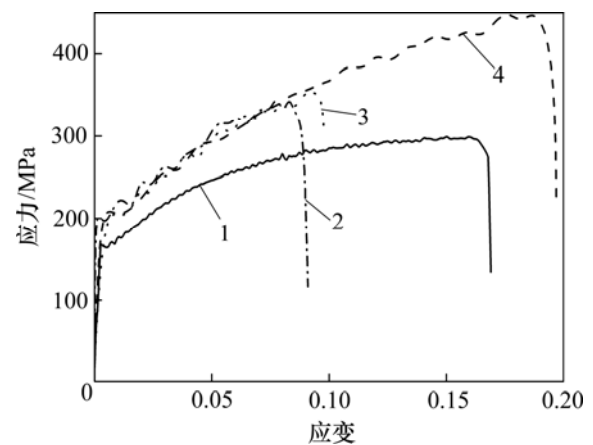
图 3 第 2 批次铝合金动态拉伸试验结果

Fig. 3 Results of dynamic tension test of the second aluminum alloy

曲线,所以,这种铝合金材料在低应变率情况下存在应变率软化效应,即应变率负敏感效应,在中低应变率范围内存在应变率软化再强化特性。

### 2.2 动态冲击压缩试验结果

用 SHPB 装置对 5083H111 铝合金做了高应变率的动态冲击压缩试验,相同尺寸的试样在不同的冲击速度下产生不同的应力-应变结果,子弹速度为 20.6 m/s 时的应变率分别为  $1064 \text{ s}^{-1}$  和  $1171 \text{ s}^{-1}$ ,子弹速度为 23.5 m/s 时的应变率为  $2317 \text{ s}^{-1}$ ,结果如图 4 所示。从图 4 可见:与准静态应力-应变曲线相比,高应变率动态压缩试验的屈服强度提高至 200 MPa 左右, $2317 \text{ s}^{-1}$  时的失效应变大于  $1171 \text{ s}^{-1}$  时的失效应变,



应变率/ $\text{s}^{-1}$ : 1— $2 \times 10^{-4}$ ; 2—1064; 3—1171; 4—2317

图 4 铝合金动态压缩试验结果

Fig. 4 Results of dynamic compression test of aluminum alloy

前者的失效应变和强度极限比后者的大。相同应变时, 高应变率的塑性流动应力基本重合且高于准静态的结果, 所以 5083H111 铝合金在高应变率下具有明显的应变率强化效应。

### 3 动态本构关系适用性讨论

在考虑应变率效应的动态塑性本构关系中, Cowper-Symonds 模型和 Johnson-Cook 模型是最经典的模型, 公式分别为:

$$\sigma_f = (\sigma_s + \beta E_p \varepsilon_c^n) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^P \right] \quad (2)$$

$$\sigma_f = (\sigma_s + B \varepsilon_c^n) \left( 1 + D \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中:  $\sigma_f$  和  $\sigma_s$  分别为塑性流动应力和准静态屈服应力;  $\varepsilon_c$  为有效塑性应变;  $\dot{\varepsilon}$  和  $\dot{\varepsilon}_0$  分别为实际应变率和准静态试验的应变率;  $T$ ,  $T_r$  和  $T_m$  分别为材料温度、室温和材料熔点;  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $P$ ,  $\beta$ ,  $m$  和  $n$  为材料常数。式(2)和式(3)第一大项描述了材料的塑性硬化效应, 第二大项描述了材料的应变率效应; 式(3)的第三大项描述了材料的温度效应。

Cowper-Symonds 模型的应变率效应只与材料常数  $C$  和  $P$  有关, 一般只用于描述材料的应变率强化效应, 不适于描述材料的应变率弱化效应。Johnson-Cook 模型可以适用于大多数金属材料的低应变率和高应变率变形, 当  $D$  为负数时可以描述材料的应变率弱化效应, 但是对于 5083H111 铝合金在中低应变率下先软化后强化的特殊性质, Johnson-Cook 模型也无法进行描述。

为了准确描述 5083H111 铝合金的这种特殊性质, 本文主要使用列表插值法来描述这种材料的软化再强化效应, 即将试验得到的材料本构关系曲线列于表格中, 每个应变率对应一条材料本构关系曲线, 未知应变率下的应力-应变曲线通过已知的相邻曲线进行平滑插值获得, 这样就可以直接得到该应变率下某应变对应的应力。塑性流动应力与应变率之间一般存在对数或指数关系, 所以只要给出各个数量级应变率的应力应变关系就可以达到一定的精度。列表插值法不受材料本构关系变化趋势的影响, 适用性强, 只要有足够多的不同应变率下的材料本构关系试验曲线, 就可以描述材料的特殊应变率效应。

## 4 头车吸能装置特性分析

列车碰撞时, 应变率一般只对产生塑性大变形的部分车体结构产生影响, 而占绝大部分的弹性小变形车体结构的材料特性不随应变率变化, 所以产生塑性大变形的车体吸能结构的应变率变化可以代表列车碰撞的应变率情况。假设列车碰撞时, 不考虑材料破坏, 耗散的能量主要被钩缓装置与车体的吸能结构吸收, 则只需要在车体吸能结构上使用考虑应变率的材料模型, 其他车体结构部分可以不考虑应变率效应。

本文采用刚柔混合车辆模型, 车体吸能结构考虑为弹塑性体, 而车体其他部分考虑为刚体, 弹塑性体和刚体之间采用刚性连接, 模型如图 5 所示。因为车体吸能结构是主要的研究对象, 所以, 可以将刚柔混合车辆模型与刚性墙进行恒速碰撞来研究吸能结构的吸能特性以及该铝合金材料性能对结构吸能的影响。

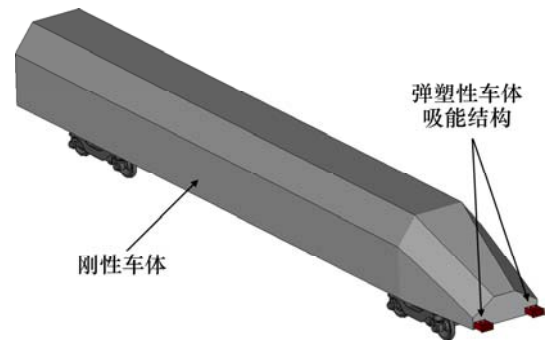


图 5 刚柔混合车辆模型

Fig. 5 Rigid-flexible vehicle model

车体防爬吸能结构如图 6 所示, 吸能管长 400 mm, 按照 75% 的压缩行程考虑, 吸能长度则为 300 mm。图 6 中还标出了 3 个考察应变率变化的位置。车辆质量为 60 t, 碰撞速度设置为 36 km/h。

考虑 3 种材料本构模型: 模型 1 是双线性塑性硬化模型, 模型 2 是分段线性弹塑性模型, 模型 3 是以列表插值法描述应变率效应的分段线性弹塑性模型, 前 2 个模型不考虑应变率效应。根据试验结果, 双线性塑性硬化模型中切线模量设置为 1 000 MPa, 分段线性弹塑性模型采用图 2 所示的准静态应力-应变曲线, 模型 3 将图 2 和图 4 所示的曲线全部输入到列表插值法对应的表格中。

计算分析结果如图 7~9 所示。图 7 所示为防爬吸能结构的 3 个位置的应变率时间历程曲线, 应变率随时间不规则变化, 应变率的数量级范围为 0~2, 属于

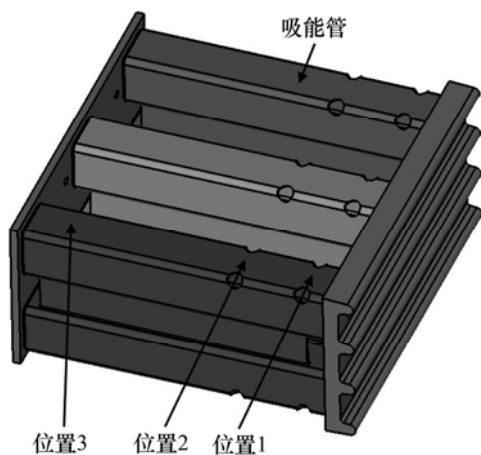
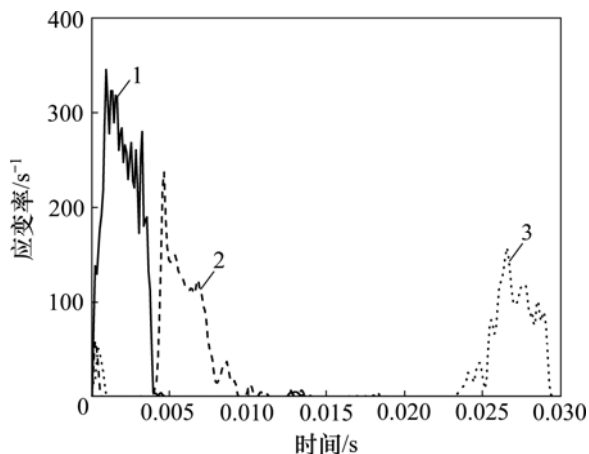


图 6 防爬吸能结构

Fig. 6 Anti-climbing energy absorption structure

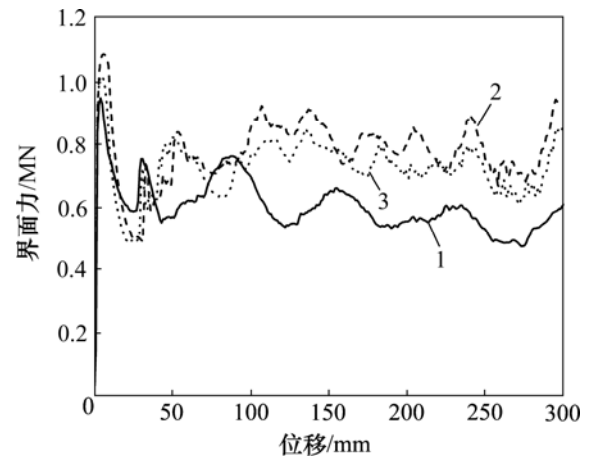
中低应变率。3 个位置的应变率在塑性大变形初期都出现了峰值, 随后振荡下行, 到该位置的结构变形稳定后降为 0, 这与霍普金森杆试验中金属材料的应变率变化趋势是一致的。图 8 所示为 3 种材料模型的界面力比较, 力随位移增长而不断振荡, 最小界面力基本相同, 但出现的位置不同; 模型 2 最大界面力最大, 模型 3 的最大界面力次之, 模型 1 的最大界面力最小。图 9 所示为 3 种材料模型的结构吸能比较, 能量大小顺序与最大界面力的趋势是一致的, 模型 3 的吸能量比模型 2 的吸能量少 7.05%。模型 1 的吸能量是最小的, 因为该模型对应的结构变形模式不稳定, 没有形成多个完整的叠缩。由于 5083H111 铝合金在中低应变率下的弱化再强化特性, 考虑应变率效应的模型 3 的吸能量要少于不考虑应变率效应的相同材料模型的吸能量, 简言之, 实际中的结构碰撞时存在应变率效应的, 不考虑应变率效应的设计用吸能容量要比实际



1—位置 1; 2—位置 2; 3—位置 3

图 7 应变率时间历程

Fig. 7 Time history of strain rate



1—材料模型 1; 2—材料模型 2; 3—材料模型 3

图 8 3 种材料模型的界面力比较

Fig. 8 Comparisons of interfacial force of three material models

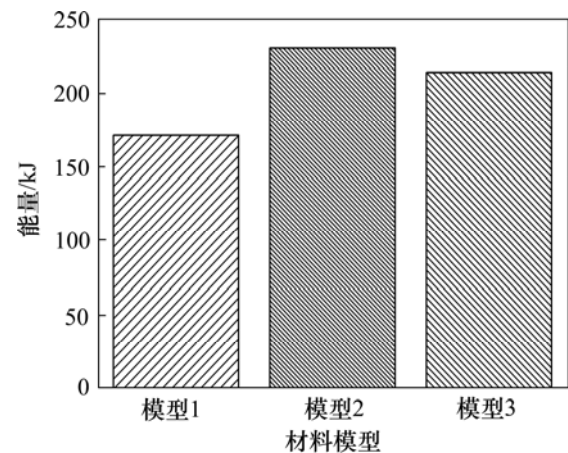


图 9 3 种材料模型的结构吸能比较

Fig. 9 Comparisons of structural absorbed energy of three material models

的吸能容量大。由于车体吸能结构设计一般都是基于准静态材料特性, 考虑到材料的特殊应变率效应, 在设计 5083H111 铝合金吸能结构时, 建议将其额定吸能容量至少增加 10%。

## 5 结论

1) 在中低应变率情况下, 5083H111 铝合金材料在动态拉伸试验中的应力-应变曲线基本上都比准静态的应力-应变曲线低, 但是随着应变率的继续增大, 动态曲线逐渐接近准静态曲线。这种铝合金材料在低应变率情况下存在应变率软化效应, 在中低应变率范围内存在应变率软化再强化特性。

2) 在高应变率情况下, 5083H111 铝合金材料在

动态压缩试验中表现出明显的应变率强化效应。高应变率的材料屈服应力和塑性流动应力比准静态时的高。

3) 在中低速碰撞时, 5083H111 铝合金吸能结构的动态力学响应大部分集中于中低应变率范围, 数量级为 0~2。由于这种铝合金在中低应变率下的软化再强化特性, 考虑应变率效应的结构的实际吸能量要少于不考虑应变率效应的相同结构的吸能量, 但相差较小。

## 参考文献:

- [1] 刘金朝, 王成国, 房加志. 薄壁圆柱在轴向冲击力作用下的动力学响应[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 19-25.  
LIU Jinzhao, WANG Chengguo, FANG Jiazhi. Dynamic response of thin-wall cylindrical shell under axial impact[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 19-25.
- [2] Zhou H C, Wang W B, Hecht M. Three-dimensional override analysis of crashed railway multiple units[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(4): 663-674.
- [3] 张志新, 田爱琴, 车全伟, 等. 高速列车车体端部吸能结构研究[J]. 机车电传动, 2013(1): 43-47.  
ZHANG Zhixin, TIAN Aiqing, CHE Quanwei, et al. Research on energy-absorbing structures for two ends of high-speed train car body[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(1): 43-47.
- [4] 王晋乐, 李幸人, 张江田, 等. 机车吸能装置结构设计及其耐撞性研究[J]. 机车电传动, 2013(6): 36-39.  
WANG Jinle, LI Xingren, ZHANG Jiangtian, et al. Structural design and crashworthiness study of locomotive energy absorption device[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(6): 36-39.
- [5] 雷成, 肖守讷, 罗世辉. 城际动车组头车耐碰撞性研究[J]. 机车电传动, 2013(1): 60-63.  
LEI Cheng, XIAO Shoune, LUO Shihui. Researching on head car crashworthiness of inter-city EMUs[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(1): 60-63.
- [6] 谢素超, 田红旗, 周辉. 耐冲击地铁车辆设计及整车碰撞研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(5): 65-70.  
XIE Suchao, TIAN Hongqi, ZHOU Hui. The design of crashworthy subway vehicle and crash research of whole car-body[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(5): 65-70.
- [7] 谢素超, 田红旗. 铁道车辆承载吸能结构优化研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(6): 60-68.  
XIE Suchao, TIAN Hongqi. Optimization research on the energy absorbing bearing structure of railway vehicle[J]. China Railway Science, 2012, 33(6): 60-68.
- [8] 张乐乐, 张啸雨, 崔进, 等. 地铁头车车体耐撞性仿真分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(3): 22-27.  
ZHANG Lele, ZHANG Xiaoyu, CUI Jin, et al. Numerical analysis on crashworthiness of subway head-car body[J]. Journal of The China Railway Society, 2012, 34(3): 22-27.
- [9] 雷成, 肖守讷, 罗世辉. 轨道车辆新型车端专用吸能装置[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(4): 738-744.  
LEI Cheng, XIAO Shoune, LUO Shihui. New special energy-absorbing component at vehicle end of rail vehicles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(4): 738-744.
- [10] 郭伟国, 田宏伟. 几种典型铝合金应变率敏感性及其塑性流动本构模型[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 56-61.  
GUO Weiguo, TIAN Hongwei. Strain rate sensitivity and constitutive models of several typical aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 56-61.
- [11] 刘再德, 王冠, 冯银成, 等. 6061 铝合金高应变速率本构参数研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(6): 120-123.  
LIU Zhaide, WANG Guan, FENG Yincheng, et al. High-strain-rate constitutive parameters of 6061 aluminum alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(6): 120-123.
- [12] 覃金贵, 卢芳云, 郭弦, 等. LC9 铝合金动态力学性能研究[C]// 第六届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 长沙: 爆炸力学学会, 2010: 404-408.  
QIN Jingui, LU Fangyun, GUO Xian, et al. Study on the dynamic mechanical property of the aluminum alloy LC9[C]// Proceedings of the 6th National Conference on the Experiment Technologies of Mechanics of Explosion. Changsha: Mechanics of Explosion Society, 2010: 404-408.
- [13] 张伟, 肖新科, 魏刚. 7A04 铝合金的本构关系和失效模型[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(1): 81-87.  
ZHANG Wei, XIAO Xinke, WEI Gang. Constitutive relation and fracture model of 7A04 aluminum alloy[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(1): 81-87.
- [14] 姚俊臣, 文丽芳, 韩寿波, 等. 高应变率下阻尼铝合金的动态力学性能研究[J]. 材料工程, 2006(6): 46-48.  
YAO Junchen, WEN Lifang, HAN Shoubo, et al. The dynamic mechanical properties of damping aluminum alloys under high strain rate[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(6): 46-48.
- [15] 黄文, 周元鑫, 马钢, 等. 工业纯铝 L2 应变率相关的拉伸力学性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(3): 263-267.  
HUANG Wen, ZHOU Yuanxin, MA Gang, et al. An experimental study on strain rate-dependent tensile properties of aluminium L2[J]. Materials Science and Technology, 2002, 10(3): 263-267.
- [16] 郭扬, 李永池, 姚磊, 等. 铝锂合金材料的极限应变率软化特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(1): 54-58.  
GUO Yang, LI Yongchi, YAO Lei, et al. Study on the limit strain-rate softening property of Al/Li alloy[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(1): 54-58.
- [17] Kobayashi T. Strength and fracture of aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 286(2): 8-16.
- [18] 曾必强, 胡远志, 谢书港. 材料应变率强化效应对结构碰撞响应的影响[C]// 第八届国际汽车交通安全学术会议论文集. 芜湖, 2010: 134-140.  
ZENG Biqiang, HU Zhiyuan, XIE Shugang. The influences of material strain-rate strengthen effect on the response of structure collision[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Vehicle Traffic Safety. Wuhu, 2010: 134-140.

(编辑 杨幼平)