

高应变率下阻尼铝合金的动态力学性能研究

The Dynamic Mechanical Properties of Damping Aluminum Alloys Under High Strain Rate

姚俊臣, 文丽芳, 韩寿波, 马 岳

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

YAO Jun-chen, WEN Li-fang, HAN Shou-bo, MA Yue (School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 针对航空用高阻尼铝合金在高应变率载荷下的服役特征, 研究了两种高阻尼铝合金在高应变率下的动态力学性能。采用分离式霍布金森(Hopkinson)压杆对高阻尼铝合金进行了动态压缩实验, 获得了应变率($140, 275, 500\text{s}^{-1}$) 对材料应力-应变曲线的影响规律, 并同普通铸造铝合金 ZL101A 的动态压缩力学性能进行比较分析。结果表明: 高阻尼铝合金在高应变率下的力学性能明显优于普通铸造铝合金; 第一种高性能阻尼铝合金的动态压缩力学性能优异。第二种高性能阻尼铝合金随着应变率的提高, 材料的弹性模量和应力均有所下降, 但是形变强化效果显著。

关键词: 阻尼; 铝合金; 高应变率; 动态力学性能

中图分类号: TG146.2+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2006)06-0046-03

Abstract: The dynamic mechanical properties of two kind of high damping materials were studied under high strain rate. Separated Hopkinson pressure bar was used to perform the compressive test. Stress and strain curves were obtained at three different strain rates, 140, 275 and 500s^{-1} . The corresponding results derived were compared with those of cast aluminum ZL101A alloy. It is shown that the dynamic mechanical properties of the two kinds of high damping materials are much better than that of ZL101A alloy. FM S0714/y (Zn-30Al) alloy exhibited the excellent dynamic mechanical property. With increasing strain rate, the elastic modulus and stress of X7093/y (Zn-30Al) alloy somewhat decreased.

Key words: damping; aluminum alloy; high strain rate; dynamic mechanical property

为提高飞机和航天器的运行可靠性和使用寿命, 部分金属结构材料需要同时具有较好的力学性能和较佳的阻尼性能^[1,2]。近年来先进航空国家都投入大量人力和财力开展了航空用高强度高阻尼轻合金的研究^[3-5], 以满足航空航天工业的发展对高阻尼金属材料的需求。20 世纪 90 年代初, 本国相关研究单位采用快速凝固/粉末冶金 RS/PM (Rapidly Solidified/Powder Metallurgy) 工艺来制备金属/金属复合材料, 并成功研制出系列新型高性能阻尼金属/金属复合体材料^[6]。研究表明, 这些复合材料阻尼性能均达到了高阻尼合金的阻尼水平 ($Q^{-1} \geq 10^{-2}$), 室温和高温静态拉伸性能均优于变形铝合金^[7]。该类合金比传统的阻尼合金具有更低的密度, 比变形铝合金具有更优异的阻尼性能, 因而在航空航天领域显示出优良的应用前景, 可代替部分变形铝合金, 用于航空航天领域需要减振的场合。由于这些材料长期服役在高应变率的载荷下, 研究其高应变率下的动态力学性能对评价该

类材料的服役性能具有重要参考价值。本工作采用分离式 Hopkinson 压杆装置, 研究了高应变率下高性能阻尼铝合金的动态力学性能, 并同铸造铝合金 ZL101A 进行了比较。

1 实验方法

实验用高性能阻尼铝合金材料由北京航空材料研究院提供。合金材料采用快速凝固/粉末冶金的工艺制备成两种成分的阻尼铝合金, 其中第一种为承受大载荷的高强阻尼铝合金 I, 第二种为耐高温的高温阻尼铝合金 II。并在压力机上挤压成棒材。采用电火花切割方法将合金棒材切割成尺寸为 $\phi 10\text{mm} \times 7\text{mm}$, $\phi 10\text{mm} \times 5\text{mm}$, $\phi 11\text{mm} \times 9\text{mm}$ 的压缩试样。

高阻尼铝合金高应变率下的动态力学性能测试采用分离式 Hopkinson 压杆装置, 示意图见图 1。

Hopkinson 压杆法基本测试原理^[8]如下:

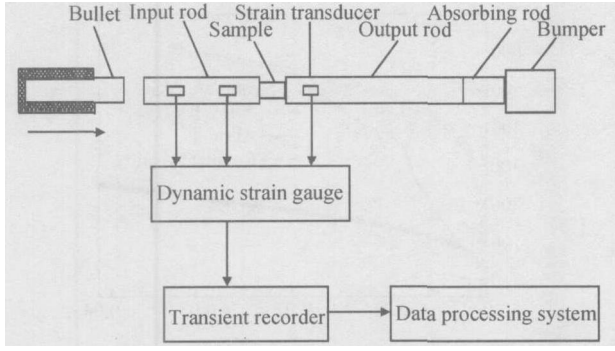


图1 Hopkinson 压杆装置示意图

Fig. 1 The schematic of device of Hopkinson measurement

子弹和压杆由相同的高强度合金钢材料制成。当子弹以某一速度撞击输入杆时,产生的撞击应力波(称为入射波)无反射地传入输入杆;入射波达到试件界面时,一部分被反射,另一部分通过输出杆成透射波。入射、反射和透射波的大小取决于试件材料的性质。通过安装在压杆径向表面上的应变传感器记录这些波连续的应变-时间历史,就可以决定试件界面上所受的力和位移的边界条件。假设测试记录的入射、反射和透射波分别用 ε_i , ε_r 和 ε_t 表示,根据试样与压杆的界面条件,按照一维弹性波传播理论,可以得到试件的平均应力、平均应变和平均应变率的表达式为:

$$\sigma_s = \frac{F_1 + F_2}{2A_s} = \frac{EA}{2A_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = \frac{C_0}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{C_0}{l_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (3)$$

式中: E 是压杆的弹性模量; A/A_s 是压杆与试件的截面比; l_0 是试件的初始长度; C_0 是压杆的弹性纵波速度。应变以入射波的方向为正。

如果假设通过短试件的应力为常量,这意味着试件长度 $l_0 \rightarrow 0$, 即:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t - \varepsilon_i \quad (4)$$

则(1) - (3)式分别简化为:

$$\sigma_s = \frac{F_1 + F_2}{2A_s} = \frac{EA}{A_s} \varepsilon_i \quad (5)$$

$$\varepsilon_s = - \frac{2C_0}{l_0} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = - \frac{2C_0}{l_0} \varepsilon_r \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 合金的动态力学性能

采用 Hopkinson 压杆测试高阻尼铝合金的动态力学性能时,子弹的速度范围是 4~10m/s, 应变率的

范围是 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。实验得到了不同应变率下的应力-应变曲线。图 2 和图 3 给出了应变率 140, 275, 500 s^{-1} 时的实验结果。

从图 2 和图 3 可见, 两种高阻尼铝合金的压缩 σ - ε 曲线大致可分为弹性阶段和塑性阶段, 而没有出现明显的屈服平台。对于高性能阻尼铝合金 I, 在高应变率下具有明显的应变强化效应和应变率强化效应, 变形抗力和断裂强度随着应变率的增加而提高, 材料在服役过程中, 应变率提高, 屈服应力明显提高, 表明具有较长的寿命。应变率对压缩弹性模量的影响不明显。

两种高性能阻尼铝合金, 应变率对压缩弹性模量的影响较为显著, 随着应变率增大, 阻尼铝合金 II 的动态压缩弹性模量减小, 但是断裂强度提高; 应力-应变曲线的形状和阻尼铝合金也不相同, 随着应变的增加, 应力值增大很快, 应变的强化效果十分明显。

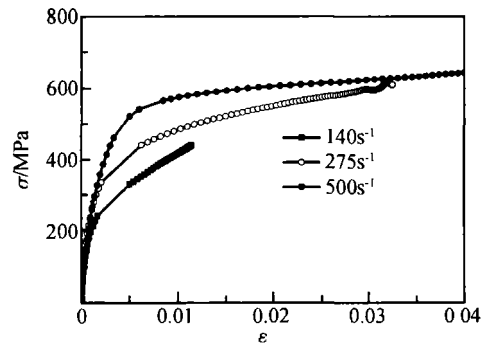


图2 高性能阻尼铝合金 I 的应力-应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curves of aluminum alloy I

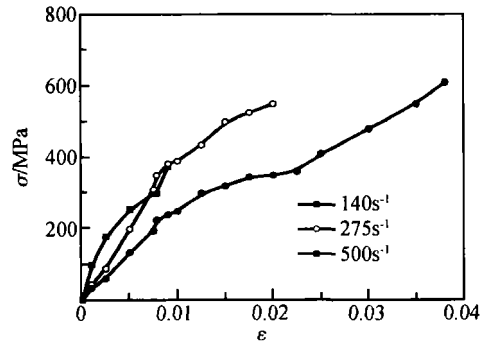


图3 高性能阻尼铝合金 II 的应力-应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curves of aluminum alloy II

表 1 列出了 3 种应变率下两种系列的高阻尼铝合金的压缩弹性模量的数值。

2.2 同普通铸铝合金的动态力学性能比较

采用同样方法分析了高应变率下普通铸造铝合金 ZL 101A 的动态压缩力学性能, 用于同以上两种阻尼

表 1 两种材料在不同应变速率下的压缩弹性模量

Table 1 The compressive elastic modulus of the alloys under different strain rates

Alloy	Elastic modulus / GPa		
	$\dot{\epsilon}=140\text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon}=275\text{s}^{-1}$	$\dot{\epsilon}=500\text{s}^{-1}$
Alloy I	≈ 210	≈ 210	≈ 210
Alloy II	≈ 100	≈ 40	≈ 27

材料进行比较分析。子弹的速度为 5~ 10mm/s, 应变率为 270~ 1100s⁻¹。测试结果见图 4。可以看出, 随着应变率的提高, ZL101A 的动态压缩弹性模量和应力基本呈下降趋势, 同高温合金的应变率效应一致, 但影响程度不大。

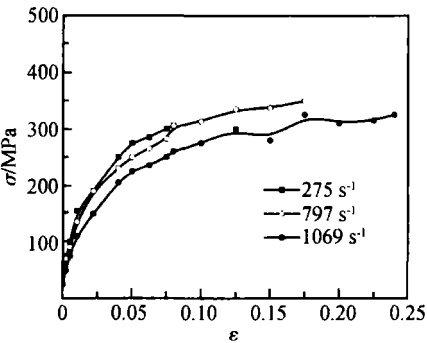


图 4 普通铸造铝合金 ZL101A 的应力-应变曲线
Fig. 4 The stress-strain curves of ZL101A alloy

图 5 为高性能阻尼铝合金 I 和 II 和普通铸造铝合金 ZL101A 三种材料在同一应变率($\dot{\epsilon}=275\text{s}^{-1}$)下的应力-应变曲线比较图。可见, 两种高性能阻尼铝合金的力学性能明显高于普通铸铝。在 $\epsilon < 0.0025$ 时, 三种材料处于弹性阶段, 按照弹性模量值的大小排序为: 阻尼铝合金 I, 普通铸铝, 阻尼铝合金 II。其中阻尼铝合金 II 和铸铝的弹性模量相差不大。当 $\epsilon > 0.0025$ 时, 阻尼铝合金 I 和普通铸铝基本进入塑性阶段, 而阻尼铝合金 II 仍处于弹性变形阶段, 弹性变形一直持续到 $\epsilon=0.008$ 附近, 才发生屈服, 开始塑性变形, 且表现出明显的应变强化效应。

两种阻尼铝合金具有良好动态力学性能的原因可能在成型工艺不同, 微观组织不同。图 6 为材料内部组织结构。可以看出, 阻尼铝合金的内部组织结构呈细小的颗粒组织, 材料的颗粒内部和结合边界存在大量的缺陷, 如滑移、位错、微孔洞等^[9]。高应变率下压缩时, 颗粒内部和颗粒之间的缺陷先被焊合, 缺陷的存在对于外载荷起到一定的缓冲作用; 同时滑移和位错的大量存在也使高强阻尼铝合金变形需要克服更高的

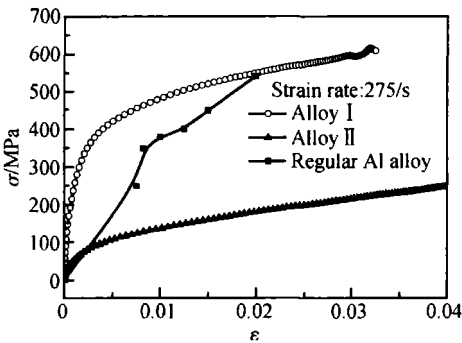


图 5 高强、高温阻尼铝合金和 ZL101A 的应力-应变曲线比较
Fig. 5 The comparison of stress-strain curves of high performance damping Al alloys and ZL101A

变形抗力, 这是高阻尼铝合金对应变率敏感的原因。ZL101A 为粗大的铸造组织。因此, 高性能阻尼铝合金表现出与普通铸造铝合金不同的阻尼和力学性能。

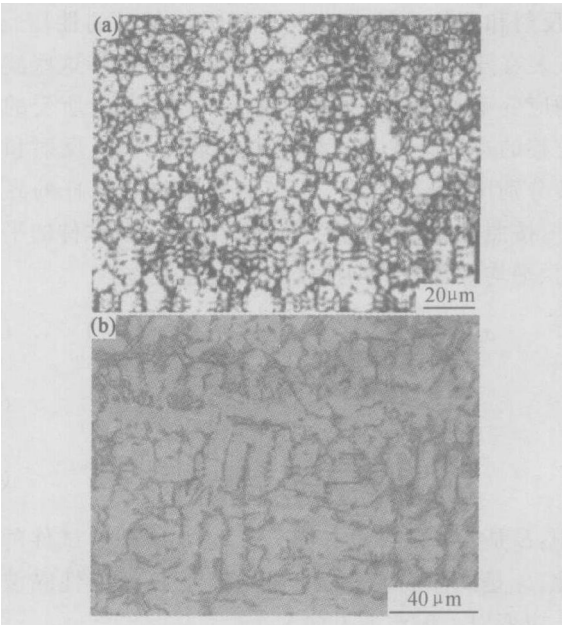


图 6 阻尼铝合金(a)和普通铸造铝合金(b)的微观组织结构
Fig. 6 The microstructures of damping Al alloy (a) and regular casting Al alloy(b)

3 结论

- (1) 高性能阻尼铝合金 I 属于应变率和应变强化材料, 随着应变率的提高, 材料的屈服应力和断裂强度明显提高; 而动态压缩弹性模量与应变速率基本无关。
 - (2) 高性能阻尼铝合金 II 与 I 不同, 随着应变率的增大, 动态压缩弹性模量和应力均减小, 断裂强度提高; 动态压缩弹性模量与应变速率相关, 应变率提高, 弹性模量明显下降, 但是应变强化效果很明显。
 - (3) 和普通铸造铝合金 ZL101A 相比, 高应变率下
- (下转第 67 页)

用超声声速仪测量球墨铸铁的球化率

德华材料检测有限公司 方远

1 测量原理

超声波在材料中的传播速度受材料的组织结构和特性的影响。就铸件而言,铸造工艺和后续的热处理决定了铸件的微观结构,包括金相组织、石墨的形状、尺寸大小和分布状态。特别是石墨的形态明显影响铸铁的力学性能。同样,石墨的形态也明显影响超声波在铸件中的传播速度。因此,利用测量超声波声速就可以控制铸铁中石墨状态。

超声波在材料中的传播速度可用 $C = D/2t$ 表示。其中: C 为超声波在材料中传播速度; t 为超声波在材料中的传播时间,由仪器自动测量出来; D 为待测零件的厚度,测量前输入。

2 测量仪器及方法

2.1 手动测量方法

这是一种脉冲回波方法,利 VX 声速仪,将待测零件的厚度输入仪器,将探头耦合到零件上,仪器即显示出声速。图 1 是手持式 VX 声速仪的外形,其外形尺寸为 $63\text{mm} \times 114\text{mm} \times 31\text{mm}$,重量 285g,4.5 位液晶显示。测量零件厚度范围 0.63~500mm,分辨率 0.001mm。声速范围 1250~10000m/s。

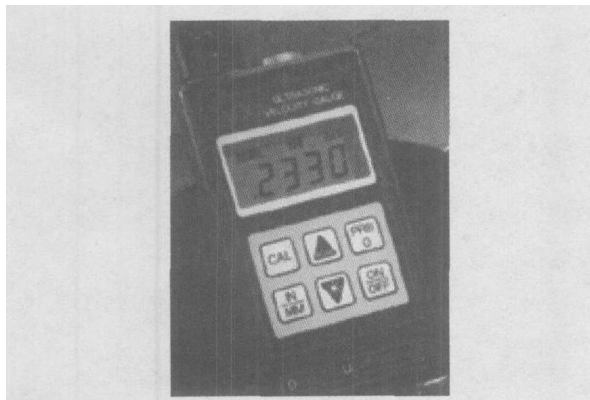


图 1 声速仪 VX 外形

2.2 自动测量方法

这种测量方法是水浸穿透法,将零件放在水槽中,探头在零件一侧发射超声波,在另一侧接收超声波,测量结果不受零件厚度影响,但要求零件的上下表面平行。自动测量的代表性仪器是 Autoscan 2400,配用机械装置,使探头或零件移动,可对零件进行单点测量或扫描测量。在扫描测量时,可以绘制出 C 扫描图。

3 应用

铸铁生产时按不同工艺可将铸铁分为球墨铸铁、灰口铸铁和可锻铸铁。如图 2 所示。球墨铸铁石墨成



图 2 铸铁的金相组织

球状,灰口铸铁石墨成片状,可锻铸铁石墨成团状。石墨形状直接影响球墨铸铁的综合力学性能,因此,严格控制石墨的球化情况,是控制球墨铸铁质量的重要措施。研究表明,石墨形态对超声传播速度的影响比材料的基体组织结构的影响更为显著。因此,测量超声波声速就成为控制铸铁球化率的一种有效手段。

(上接第 48 页)

两种阻尼铝合金具有很好的力学性能和阻尼性能。

参考文献

- [1] 田蔚,李秀臣,刘正堂.金属物理性能[M].北京:航空工业出版社,1994.143.
- [2] 葛庭燧.非线性滞弹性内耗的实验和理论研究[J].金属学报,1997,33(1):9-11.
- [3] 李沛勇,戴圣龙.高阻尼铝基复合材料的研究动向[J].航空材料学报,2000,20(3):164-171.
- [4] 张小农,吴人杰.高阻尼金属基复合材料的发展途径[J].材料开发和应用,1997,12(3):4548-4552.
- [5] SASTRY S, KRISHNA M, UCHIL J. A study on damping behavior of acuminate particulate reinforced ZA227 alloy metal matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2001, (314): 268-274.
- [6] 李沛勇,戴圣龙,刘大博,等.低密度高阻尼金属 P 金属复合材料[J].材料科学与工艺,1999,7(增刊):91-95.
- [7] 李沛勇,戴圣龙,柴世昌,等.新型高阻尼金属材料的研究进展[J].材料工程,2000,(1):38-41.
- [8] 马晓青.冲击动力学[M].北京:北京理工大学出版社,1992.196-207.
- [9] 赵海涛.粉末冶金工艺制备阻尼铝合金的稳定性和阻尼性机理研究[D].北京:北京航空航天大学材料科学与工程学院,2005.

收稿日期:2005-08-21;修订日期:2006-03-20

作者简介:姚俊臣(1963-),男,博士研究生,主要从事铝合金研究工作,联系地址:北京航空航天大学材料科学与工程学院(100083)。