

文章编号:1006-9941(2021)12-1176-06

锆基非晶活性材料动态力学性能及本构关系

罗普光¹,毛亮²,魏晨杨²,姜春兰²,卢士伟³,李杰³

(1.北京航天长征飞行器研究所,北京 100076; 2.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081; 3.山西江阳化工有限公司,山西 太原 030041)

摘要: 为了获得新型锆基非晶活性材料在动态加载条件下的力学性能及本构关系,采用压力渗透铸造法制备得到锆基非晶活性材料样品,借助分离式霍普金森压杆实验测量系统对其进行了不同应变率加载条件下的动态压缩实验,获得了应变率在300~1600 s⁻¹范围内材料的应力-应变曲线,利用高速摄影观察记录了不同应变率条件下试件的破碎以及释能过程。结果表明:锆基非晶活性材料性能表现为脆性材料特征,应力-应变曲线不存在屈服阶段,且当应变率由947 s⁻¹上升至1587 s⁻¹时,材料抗压强度由2.71 GPa上升至2.78 GPa,增幅较小,约为2.6%,而断裂应变由0.032下降至0.028,下降12.5%;材料的破碎程度以及释能反应现象随应变率增加较为明显,当加载应变率较大时,材料破碎过程中存在应变软化现象;根据实验数据,拟合得到了锆基非晶活性材料断裂失效前的一维弹脆性损伤动态本构方程。

关键词: 锆基非晶;活性材料;动态力学性能;分离式霍普金森压杆(SHPB);本构关系

中图分类号:TJ410.4

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2021068

1 引言

活性材料作为一种新兴的复合材料,自身具备一定的化学能,在高温、高压或者高速撞击等条件下若达到其临界反应阈值时,它能够发生剧烈的爆燃反应,释放大能量。由活性材料制成的活性毁伤元,因其独特的性能和广泛的军事应用前景,受到国内外学者的高度重视,是近年来高效毁伤技术领域研究重点^[1-6]。

目前国内外关于活性材料的研究,大多集中在聚四氟乙烯(PTFE)基活性材料,对于金属间化合物尤其是以锆基活性材料为代表的研究甚少。刘桂涛^[7]利用分离式霍普金森压杆实验测试系统研究了锆基合金材料的动态压缩性能,发现锆基合金具有较高的材料密度以及压缩强度。汪海峰^[8]和任会兰^[9]分别从宏观和

微观对锆基活性材料的动态力学行为以及微观结构进行了研究。张先锋等^[10]的研究表明,活性金属材料除了高密度、高强度,也具有高能量密度的特点,可直接作为破片应用于战斗部。Laszlo J Kecskes^[11]实验研究了锆基活性药型罩的聚能射流形态和破甲性能,并与传统铜制药型罩侵彻结果进行了对比,结果表明活性药型罩形成的聚能射流具有更高的横向破坏特性,但侵彻深度较浅。

锆基非晶活性材料由于在快速冷却过程中原子呈长程无序而短程有序排列,致使其强度、硬度以及冲击断裂能较普通锆基活性材料均有明显提升。因此,本研究主要针对锆基非晶活性材料的动态力学性能及本构关系开展研究,旨在对锆基非晶活性材料的工程化应用提供一定参考。

2 实验设计

2.1 锆基非晶活性材料制备

采用压力浸渗铸造法制备锆基非晶活性材料试件,试件尺寸为 $\Phi 9$ mm \times 9 mm,密度为12.6 g \cdot cm⁻³,锆基部分占比为12%。图1为制备加工后的典型圆柱形锆基非晶活性材料实验试件。

收稿日期:2021-04-01;修回日期:2021-04-14

网络出版日期:2021-10-22

作者简介:罗普光(1988-),男,博士,工程师。

e-mail:ml2012565@163.com

通信联系人:毛亮(1985-),男,博士,硕导。

e-mail:maoliang6419@163.com

引用本文:罗普光,毛亮,魏晨杨,等. 锆基非晶活性材料动态力学性能及本构关系[J]. 含能材料,2021,29(12):1176-1181.

LUO Pu-guang, MAO Liang, WEI Chen-yang, et al. Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Relations of Zr-based Amorphous Reactive Material[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(12):1176-1181.

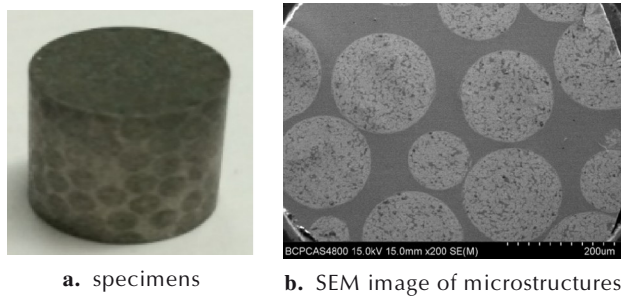


图1 实验试件及其微观组织结构

Fig.1 Experimental specimens and the SEM image of microstructures

2.2 动态压缩实验方法

采用西安应立波机电科技有限公司 $\Phi 14$ 分离式霍普金森杆装置(SHPB)及数据采集系统对铅基非晶活性材料试件进行动态压缩实验,实验测试装置示意图如图2所示。实验用撞击杆长度为200 mm,入射杆、透射杆长度均为1 m,压杆直径为14.5 mm。实验前调整实验杆位置,确保实验杆与试件中心在一条直线上。为防止试件在实验过程中由于试件的破碎飞散以及材料发生反应时对其他实验设备的损伤,实验过程中将试件置于透明树脂盒中。同时,利用高速摄影仪同步触发记录试件的破碎及反应过程。

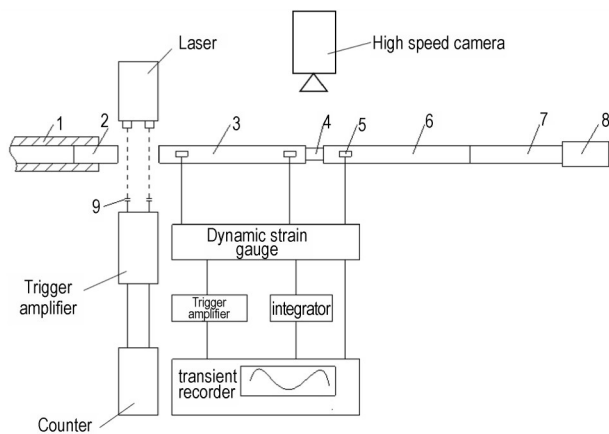


图2 SHPB实验装置图

1—空气炮,2—撞击杆,3—入射杆,4—试件,5—应变传感器,6—透射杆,7—吸收杆,8—缓冲器,9—光电管

Fig.2 Diagram of SHPB experimental device

1—air cannon, 2—impact bar, 3—incident bar, 4—specimen, 5—strain gauge, 6—transmitted bar, 7—absorption bar, 8—damper, 9—signal acquisition devices

实验过程中,通过改变空气炮内的压缩空气的压力调节撞击杆的撞击速度,从而使试件获得不同的应变率。高压气室驱动撞击杆撞击入射杆的端面,所产

生的应力波在入射杆、试件以及透射杆中传播,在入射杆中可测得入射波和反射波信号,在透射杆中可测得透射波信号。通过粘贴在入射杆和透射杆上的应变片所采集的应变-时间信号,经动态应变仪进行应变放大,即可将材料不同应变率下的入射波、反射波、透射波的变化过程记录在瞬态记录仪中,再通过二波法对获得的数据进行处理,便可得到试件内部应力、应变、应变率及时间的相互关系。

3 结果与讨论

3.1 实验过程现象

实验过程中发现,当试件应变率较低,约为 300 s^{-1} 时,铅基非晶活性材料试件在撞击处出现少量碎片飞出并伴有火光,试件整体并未发生破碎且产生的火光很快熄灭,撞击杆迅速被弹回,撞击过程如图3所示。

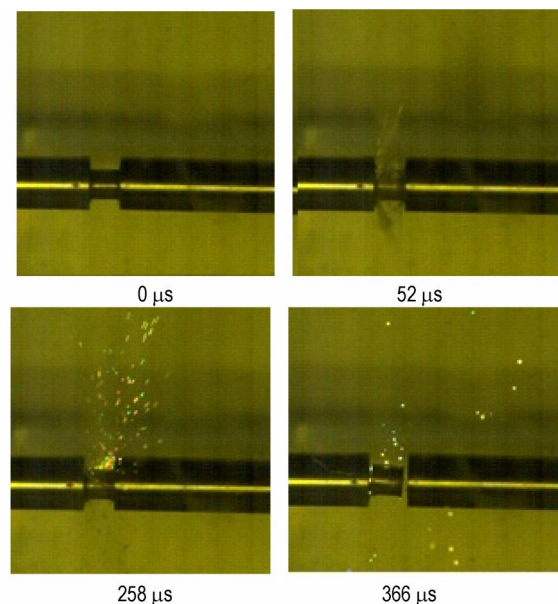


图3 应变率为 316 s^{-1} 时试件未破碎

Fig.3 The specimen did not fracture with a strain rate of 316 s^{-1}

当试件应变率较高,约为 1400 s^{-1} 时,试件破碎并伴有剧烈反应,产生明亮的火光,撞击过程如图4所示。从图4以及实验回收到的碎片还可以得知,对于铅基非晶活性材料,当实验应力大于其抗压强度时,试件发生剪切断裂,试件碎裂不均匀,小块碎片群发生剧烈反应,大块碎片并未反应。对比试件在高低应变率下的撞击过程可以发现,铅基非晶活性材料在中低应变率加载条件下即可发生反应,但反应延续与否与材料的颗粒大小有关。

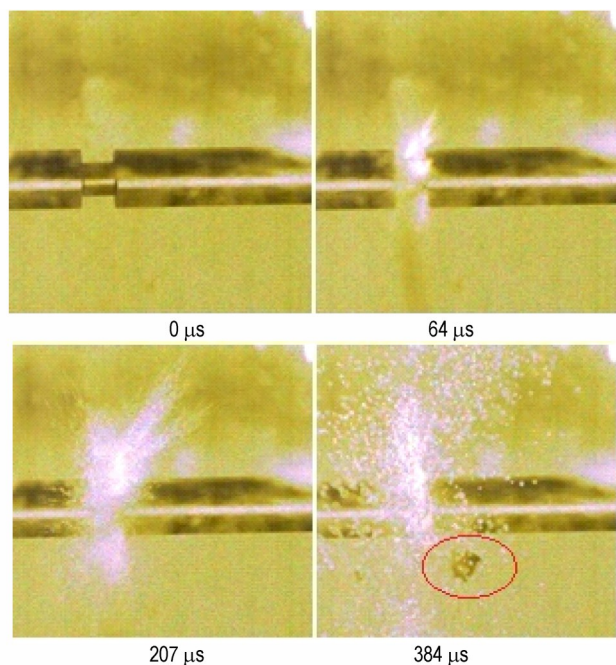


图4 应变率为 1375 s^{-1} 时试件破碎并发生剧烈反应
Fig.4 The specimen fractured and reacted violently with a strain rate of 1375 s^{-1}

3.2 冲击压缩特性分析

图5为锆基非晶活性材料在不同应变率条件下的应力-应变曲线图。从图5中可以看出,材料的应力-应变曲线均不存在屈服阶段,而是在应力达到抗压强度后断裂卸载,进一步反映了此材料的脆性特征。

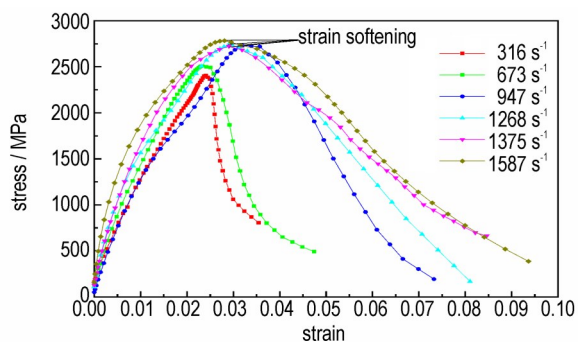


图5 不同应变率条件下的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves with different strain rates

从图5可以得知,在加载初期,应力-应变呈现出线弹性特性,随着应变的增加,应力曲线上升速率逐渐减小。在此阶段由于试件随着应变的不断增加,内部孔隙与裂纹沿晶界间不断累积从而形成裂纹网,裂纹网的扩展导致材料损伤不断增加。当加载应变率较小时(300 s^{-1}),试件内部应力小于其抗压强度,试件应力到达一定值后入射杆被弹回,试件内部应力迅速降为零;而当加载应变率较大时(1000 s^{-1}),试件内部应力达到抗压强度后试件开始破碎。此时试件内部应力并非直

接降为零,而是以应变软化形式缓慢下降。分析认为,这与试件制备过程中由工艺、环境、工具等因素影响导致的内部不均匀以及试件内部裂纹扩展不稳定相关。

图6为锆基非晶活性材料在不同应变率下的抗压强度、断裂应变的对比图。从图6中可以看出,锆基非晶活性材料表现出应变率硬化效应,在实验应变率范围内,材料的动态抗压强度均随应变的增加而逐步提高,断裂应变值逐渐减小。当应变率由 947 s^{-1} 上升至 1587 s^{-1} 时,材料抗压强度由 2.71 GPa 上升至 2.78 GPa ,增幅 2.6% ,基本保持不变;而断裂应变由 0.032 下降至 0.028 ,下降了 12.5% 。

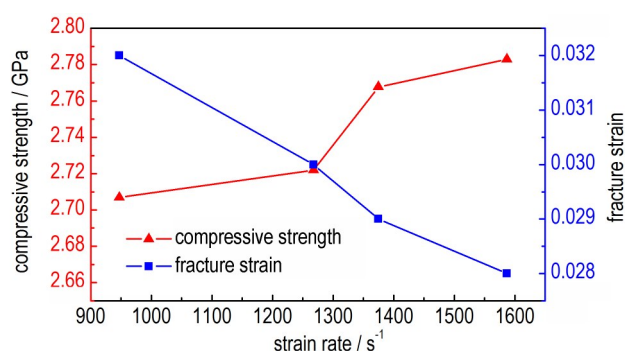


图6 不同应变率下抗压强度与断裂应变
Fig.6 Comparison of compressive strength and fracture strain with different strain rates

图7为试件在不同应变率条件下发生断裂时的断口的微观形貌图,从图7中可以看出试件在不同应变率下的断口表现为沿晶脆性断裂模式。随着应变率增加,试件断口处的晶界轮廓越来越清晰,沿晶脆性断裂的特征更为明显。这是由于随着撞击速度的升高,试件发生变形的速度加快,导致材料在制备过程中形成的孔隙来不及被压缩,而是直接发展成为裂纹,裂纹沿晶界快速扩展,从而加快了试件失效断裂的速度,导致其塑性降低。这也从侧面验证了锆基非晶活性材料的应变率敏感特性。此外,试件断口处的白色碎末随着加载应变率的增加而逐渐增多,这些白色碎末是冲击载荷造成材料内部的局部绝热剪切形成局部高温,导致破碎的细小的锆颗粒与空气剧烈反应生成的 ZrO_2 ^[12]。由于材料内部的剪切温升也随加载应变率的增加而不断升高,从而引发更多的破碎锆颗粒更充分的与空气反应生成 ZrO_2 附着在断口表面。

从以上实验现象及特性分析可知,锆基非晶活性材料为脆性材料,断裂时的断口为沿晶脆性断裂模式,并且在加载过程中表现出应变率硬化效应,同时伴随氧化反应发生,反应的剧烈程度与应变率大小相关。

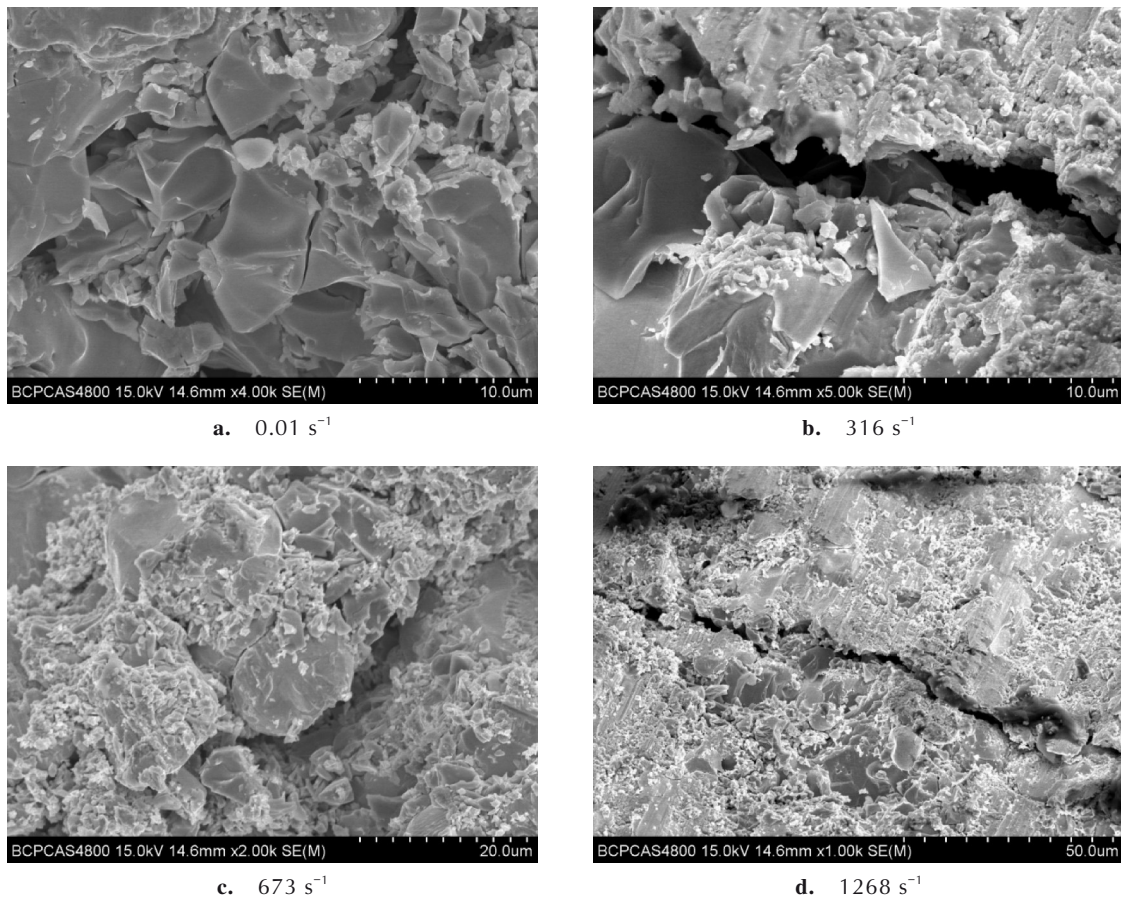


图7 不同应变率条件下试件断口微观形貌图

Fig.7 Fracture morphologies of specimens with different strain rates

3.3 本构关系建立

不同的材料在冲击载荷下均会表现出不同的动态响应行为,因此需要不同的本构模型对其进行描述。Johnson-Cook模型和一维弹脆性损伤本构模型是用来描述金属和合金材料本构关系的常用模型^[13]。蒋邦海^[14]前期通过试验曲线拟合了钨铅活性材料的J-C模型,而在前述实验结果中发现,铅基非晶活性材料可视作为一种弹脆性材料,J-C模型无法描述材料在加载过程中的损伤变形,故本研究选用一维弹脆性损伤本构模型对其力学响应行为进行描述。

铅基非晶活性材料在制备过程中会在材料内部出现孔隙和细微裂纹,当材料受到冲击载荷作用时,材料内部的孔隙形成联通,导致内部裂纹的不断扩展。材料内部缺陷的扩展是不可逆的动态损伤过程,宏观上表现为在材料初始弹性阶段,应力应变关系曲线呈非线性变化。当损伤累积到一定程度后,材料最终表现为宏观裂纹和破坏断裂。

基于损伤力学理论^[15],弹脆性材料的一维应力应

变可表示为:

$$\sigma = E(1 - D)\varepsilon \tag{1}$$

式中, σ 为材料应力,MPa; ε 为材料应变; E 为材料带损伤的弹性模量,MPa; D 为损伤变量。对于铅基非晶活性材料,损伤变量与应变之间关系可表示为:

$$D = m\varepsilon^n \tag{2}$$

m 、 n 分别为应变率相关量。然而该式只考虑了损伤变量与材料应变之间的关系,而忽略了材料在烧结过程中形成的孔隙以及材料内部微裂纹形成的初始损伤。因此,李强^[16]提出了用初始损伤量 D_0 来描述烧结材料在受加载载荷前的损伤情况,将式(2)改进为:

$$D = m\varepsilon^n + D_0 \tag{3}$$

将式(3)带入式(1)可得材料的本构关系为:

$$\sigma = (1 - D_0)E\varepsilon - Em\varepsilon^{n+1} \tag{4}$$

根据上述实验结果,采用最小二乘法对不同应变率下材料的应力应变曲线进行拟合,得出铅基非晶活性材料带初始损伤的应力应变关系函数。拟合得出材料在不同应变率下的相关指数如表1所示,各个相关

指数的决定系数 R^2 均趋近于 1, 表明拟合曲线能够较为真实的反映出材料在非线性阶段的动态力学性能。同时说明式(4)本构关系可以很好地用来描述铅基非晶活性材料的脆性动态力学响应过程。图 8 为材料各状态下实验曲线与拟合曲线得对比图。

表 1 不同应变率下拟合参数

Table 1 Fitting parameters with different strain rates

$\dot{\varepsilon} / \text{s}^{-1}$	D_0	E / GPa	m	n	R^2
316	0.0134	151.46	14.3	1	0.9890
673	0.0139	179.14	16.79	1	0.9919
947	0.0125	136.18	13.8	1	0.9925
1268	0.0116	184.46	16.99	1	0.9779
1375	0.0107	208.79	18.9	1	0.9839
1587	0.0099	238.14	21.38	1	0.9837

Note: $\dot{\varepsilon} (\text{s}^{-1})$ is strain rate, R^2 is coefficient of determination.

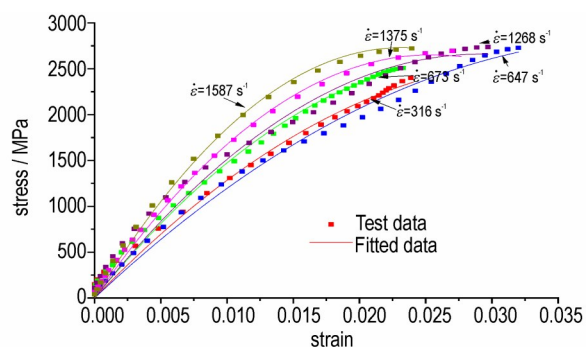


图 8 不同应变率下压缩试验数据与拟合数据对比

Fig.8 Comparison of experimental data and fitting data with different strain rates

图 9 为铅基非晶活性材料 E 、 m 随应变率的变化情况。李朋辉^[17]的研究表明,弹性模量 E 以及应变率相关量 m 与应变率的线性拟合相关指数分别为 0.99608 以及 0.9509, 即线性拟合效果较好。从图 9 中可以看出,铅基非晶活性材料弹性模量随着应变率的增加呈增长趋势。对表 1 所得弹性模量 E 的数据进行线性拟合,可得铅基非晶活性材料弹性模量 E 与应变率关系表达式为:

$$E = 132.05 + 0.05829\dot{\varepsilon} \quad (5)$$

此外,从图 9 中还可以看出,对于铅基非晶活性材料,随着应变率的增加, m 也呈增长趋势,根据表 1 中的不同应变率下应变率相关量 m 的数据,对 m 和应变率进行线性拟合,可得铅基非晶活性材料应变率相关量 m 与应变率关系表达式为:

$$m = 12.15 + 0.00474\dot{\varepsilon} \quad (6)$$

综上所述,铅基非晶活性材料在一维冲击压缩载

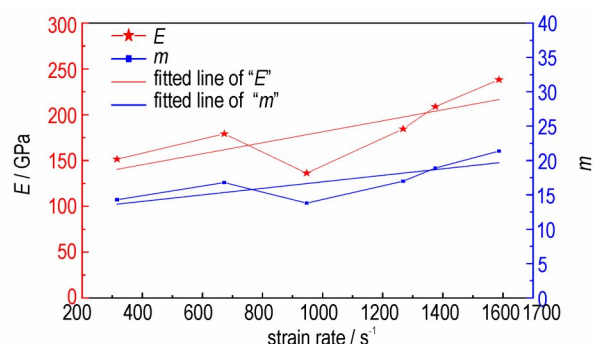


图 9 E 、 m 与应变率的关系

Fig.9 Relationship between E , m and strain rates

荷下断裂失效前的动态本构方程可归纳为:

$$\begin{cases} \sigma = (1 - D_0)E\varepsilon - mE\varepsilon^2 \\ E = 132.05 + 0.05829\dot{\varepsilon} \\ m = 12.15 + 0.00474\dot{\varepsilon} \end{cases} \quad (7)$$

4 结论

采用分离式霍普金森压杆测试系统对铅基非晶活性材料试件进行了动态压缩实验,并利用高速摄像机对试件的破碎过程进行了记录观察,主要结论为:

(1) 铅基非晶活性材料在动态压缩条件下表现出应变率硬化效应,当应变率由 947 s^{-1} 上升至 1587 s^{-1} 时,材料抗压强度由 2.71 GPa 上升至 2.78 GPa ,增幅 2.6% ,基本保持不变;而断裂应变由 0.032 下降至 0.028 ,下降 12.5% 。试件破碎过程中存在应变软化现象,主要是试件内部不均匀以及试件内部裂纹扩展不稳定导致。

(2) 试件在不同应变率下的断口表现为沿晶脆性断裂模式;此外,随着应变率的增加,材料内部剪切温升升高,断口处生成的白色 ZrO_2 数量明显增多,破碎的铅颗粒与氧气的反应剧烈程度明显增加。

(3) 一维弹脆性损伤本构模型可较为准确描述铅基非晶活性材料的动态力学响应行为,结合实验数据拟合出的本构模型参数可为此材料的工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] 杨华楠,廖雪松,王绍慧,等. 含能破片技术与应用[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(12): 4-7.
YANG Hua-nan, LIAO Xue-song, WANG Shao-hui, et al. Technology and application of reactive fragment[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2010, 31(12): 4-7.
- [2] 徐璐萍,李邦贵,胡米. 国外高效毁伤技术简析[J]. 飞航导弹, 2010, 11: 71-75.
XU Lu-ping, LI Bang-gui, HU Mi. Brief analysis of high-efficiency damage technology abroad[J]. *Aerodynamic Missiles Journal*, 2010, 11: 71-75.

- [3] 余庆波, 刘宗伟, 金学科, 等. 活性破片战斗部威力评价方法[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(7): 661-664.
YU Qing-bo, LIU Zong-wei, JIN Xue-ke, et al. Method for assessing lethality of reactive fragment warhead[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(7): 661-664.
- [4] 叶小军, 李向东. 含能破片撞击引燃屏蔽炸药的实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(6): 131-134.
YE Xiao-jun, LI Xiang-dong. Experimental study on reactive fragments ignited charge covered with a metal plate after the impact[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(6): 131-134.
- [5] 谢长友, 蒋建伟, 帅俊峰, 等. 复合反应破片对油箱目标的毁伤实验研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 447-452.
XIE Chang-you, JIANG Jian-wei, SHUAI Jun-feng, et al. Experimental study on the damage effect of compound reactive fragment penetrating diesel oil tank[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(6): 447-452.
- [6] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引燃航空煤油实验研究. 兵工学报, 2012, 33(9): 1148-1152.
WANG Hai-fu, ZHENG Yuan-feng, YU Qing-bo, et al. Experimental research on igniting the aviation kerosene by reactive fragment[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(9): 1148-1152.
- [7] 刘桂涛, 梁栋, 赵文天, 等. 锆基多功能合金的动态压缩性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(2): 73-75.
LIU Gui-tao, LIANG Dong, ZHAO Wen-tian, et al. Dynamic compression properties of Zr-based multi-function alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2012, 35(2): 73-75.
- [8] 汪海峰, 李文. W 丝/Zr 基复合材料的压缩变形行为[J]. 沈阳理工大学学报, 2010, 29(1): 80-82, 94.
WANG Hai-feng, LI Wen. Deformation Behavior of W/Zr-based Amorphous Composite under Compression [J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 2010, 29(1): 80-82, 94.
- [9] Ren H L, Liu X J, Ning J G. Microstructure and mechanical properties of W-Zr reactive materials [J]. *Materials science & Engineering A*, 2016, 660: 208-212.
- [10] 张先锋, 赵晓宁. 多功能含能结构材料研究进展[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 731-739.
ZHANG Xian-feng, ZHAO Xiao-ning. Review on multifunctional energetic structural materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 731-739.
- [11] Laszlo J K, William P W. Investigation of a bulk metallic glass as a shaped charge liner material [C]//23 International Symposium on Ballistics Tarragonard, Tarragona, Spain 2007: 31-38.
- [12] 刘晓俊. 活性材料动态力学性能及冲击反应机理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
LIU Xiao-jun. Research of mechanical behavior and impact-induced reaction mechanism for reactive Materials [D]. Beijing: Beijing Institute of technology, 2017.
- [13] 贾翠玲, 陈芙蓉. 7A52 铝合金 Johnson-Cook 本构模型的有限元模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(1): 30-33.
JIA Cui-ling, CHEN FU-rong. Finite element simulation of Johnson-Cook constitutive model for 7A52 aluminum alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(1): 30-33.
- [14] 陈鹏, 卢芳云, 覃金贵, 等. 含钨活性材料动态压缩性能研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(10): 1861-1866.
CHEN Peng, LU Fang-yun, QIN Jin-gui, et al. Dynamic compressive mechanical properties of tungsten reactive material [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(10): 1861-1866.
- [15] Lemait J. A Course on damage mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1966: 68.
- [16] 李强, 姜春兰, 王在成. 细晶富铝 Al/Fe 复合材料动态力学性能及本构关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(5): 1124-1128.
LI Qiang, JIANG Chun-lan, WANG Zai-cheng. Dynamic mechanical properties and constitutive relationship of fine-grained Al/Fe composite materials with rich aluminium [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(5): 1124-1128.
- [17] 李朋辉. 钨锆活性材料动态力学性能[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
LI Peng-hui. Dynamic mechanical properties of tungsten zirconium active material [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.

Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Relations of Zr-based Amorphous Reactive Material

LUO Pu-guang¹, MAO Liang², WEI Chen-yang², JIANG Chun-lan², LU Shi-wei³, LI Jie³

(1. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China; 2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd, Taiyuan 030041, China)

Abstract: In order to acquire the mechanical properties and constitutive relations of Zr-based amorphous reactive material under dynamic loading, the specimens were made by pressure infiltration casting, and the dynamic compression experiments under loading with different stain rates were conducted with the split Hopkinson bar (SHPB) test system. The stress-strain curves were acquired under different strain rates of 300-1600 s⁻¹, and a high-speed camera was used to record the fracture and energy output process of the specimens under different strain rates. Results show that the Zr-based amorphous reactive material belongs to brittle materials that no yielding stage exists in stress-strain curves. With the increase of strain rates from 947 s⁻¹ to 1587 s⁻¹, the compressive strength of materials increases from 2.71 GPa to 2.78 GPa with a small increase of 2.6%, while the fracture strain decreases from 0.032 to 0.028 with a decrease of 12.5%. The degree of fracture and reaction of the specimen is more evident with higher strain rate and the strain softening phenomenon occurred during the fracture of materials. According to experimental data, a one-dimensional elasto-brittle constitutive model with damage was fitted for the Zr-based amorphous reactive material before the fracture failure of specimens.

Key words: Zr-based amorphous; reactive material; dynamic mechanical property; SHPB; constitutive relation

CLC number: TJ410.4

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021068

(责编: 王艳秀)