文章编号:1000-5773(2013)03-0439-08

空心球/铝合金复合材料动态压缩性能与损伤破碎特性*

王少恒,杨震琦,管公顺,庞宝君,陈海波

(哈尔滨工业大学航天学院,黑龙江哈尔滨 150080)

摘要:采用压力浸渗法制备空心球/铝合金复合材料,并利用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)对其进行动态压缩实验。利用扫描电子显微镜(SEM)观察动态压缩后回收样品的显微结构,重点分析动态压缩后复合材料内部脆性空心球的微观损伤破碎模式。用 LS-DYNA 显式有限元软件对复合材料单胞模型动态压缩过程进行数值模拟,重现了内部空心球的损伤演化与破碎过程。结果表明,空心球/铝合金复合材料应力-应变曲线表现出明显的多孔介质压缩特征,即可划分为弹性、塑性崩塌和致密化 3 个变形阶段;随着压缩量的增大,材料内空心球损伤破碎模式由沿经线劈裂状裂纹逐渐过渡到在赤道方向的破碎,并最终崩塌。

关键词:动态损伤破碎;分离式 Hopkinson 压杆实验;铝基复合材料

中图分类号:O347.3;O346.1 **文献标识码**:A

1 引 言

空心球/铝合金复合材料是一种新型的铝基结构功能材料。其中空心球增强体是由电厂排出的煤灰废料粉中提取出来的微球形颗粒,具有轻质、形状规则、内部中空等特点。这种复合材料主要利用筛选出的球形颗粒作为填充项,通过一定的制备工艺,如粉末冶金法、搅拌铸造法和压力浸润法,将其与轻合金基体结合制成。空心球/铝合金复合材料与传统的泡沫铝合金相比,具有低成本、低密度、高强度、高阻尼、耐磨性好,更高的冲击能量吸收率等特性[1]。因此这种材料在国防、航空航天、交通运输等工程领域有着广阔的应用前景。作为一种极具潜力的新型材料,其宏观力学性能得到了国内外的广泛关注。Balch[2]通过比较不同热处理状态的纯铝基体和 7075 铝合金基体陶瓷空心球复合材料的准静态与动态压缩实验结果指出,空心球/铝合金复合材料的应变率与宏观塑性变形主要由铝合金基体决定;Olivier[3]利用实验与有限元分析的方法研究了在 500 ℃环境下复合材料的蠕变特性;Mondal[4]讨论了中低应变率范围内(10^{-2}～10^{1} s^{-1})空心球的体积掺量与压缩响应的关系,发现在复合材料的相对密度小于 0.1 时,应变率强化效应可以忽略;武高辉等[5-6]系统地分析了空心球/纯铝复合材料的压缩、吸能减震及电磁屏蔽等性能。目前,国内外对这类复合材料的研究主要集中在分析其宏观力学性能,而对于复合材料内部空心球在压缩过程中损伤破碎的研究相对较少。

本研究首先利用 LC4 硬铝合金 SHPB 设备,研究空心球/2024Al 合金复合材料在 1 000～4 000 s^{-1} 应变率范围内的动态应力-应变关系;然后基于扫描电子显微镜(SEM)显微照片分析在不同应变率压缩下,复合材料空心球增强体的动态破碎模式;最后利用 LS-DYNA 显式有限元模拟软件结合微观照片分析,再现了空心球/2024Al 合金复合材料的微观损伤破碎过程,通过对失效单元的应力三轴度分析,明确了失效单元在压缩过程中的受力状态。

* **收稿日期**:2011-03-22;**修回日期**:2011-04-09

基金项目:国家空间碎片专题研究项目(KJSP06211)

作者简介:王少恒(1987—),男,硕士,主要从事材料动力学行为及应力波传播研究. E-mail:wsh870510@sina.com

2 样品制备及实验方案

2.1 样品制备

复合材料中飞灰空心球的主要成分如表 1,铝合金基体材料选用 2024Al 合金。

表 1 空心球化学组分

Table 1 Chemical composition of hollow microsphere (%)

Al_2O_3	SiO_2	K_2O	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	N_2O	CaO
26.07	58.83	6.26	3.64	1.57	1.03	0.74	0.70

本研究中飞灰空心球/2024Al 合金复合材料采用压力浸渗的方法制备而成[5]。其制备的工艺流程为:首先将空心球颗粒搅拌均匀并预制成块,将空心球预制块装入模具。然后将模具和预制块一同预热至设定温度(600～650 ℃),同时将铝合金加热融化并保持适当温度(700～800 ℃),以备浇注。最后将液态铝合金浇入磨具,并施加压力,铝液在压力的作用下自上而下渗入预制块直至冷却凝固,制得空心球/铝合金复合材料。图 1 为空心球/2024Al 合金复合材料的 SEM 微观组织显微照片,由图可见,空心球增强体分布均匀,组织中微空洞与缺陷较少。

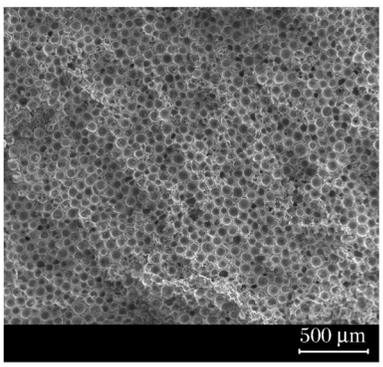


图 1 空心球/铝合金基体复合材料微观结构

Fig. 1 Microstructure of the hollow microsphere/aluminum alloy composite

2.2 实验方案

空心球/铝合金复合材料的动态压缩实验是在∅12.7 mm 口径的 LC4 硬铝合金 SHPB 设备上进行,图 2 为 SHPB 动态实验简图。入射杆与透射杆的长度均为 1.2 m,子弹长为 0.5 m,子弹的速度范围为 5～20 m/s,对应的应变率为 1 000～4 000 s^{-1}。动态压缩实验试件为∅8 mm×3 mm 的短圆柱体,采用线切割加工而成。

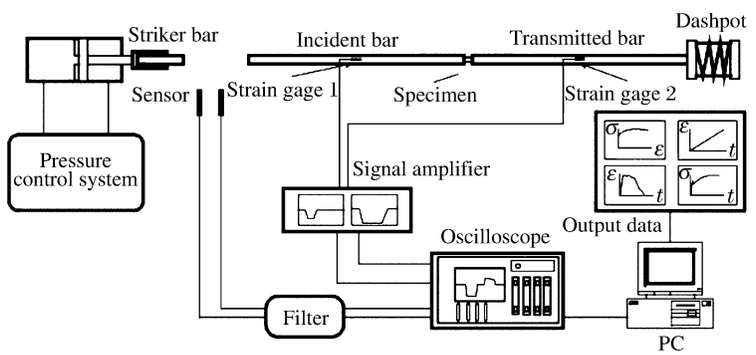


图 2 SHPB 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic of the SHPB experimental system

3 实验结果与分析

3.1 2024 铝合金基体及其复合材料动态压缩力学性能测试

由于空心球/2024Al 合金复合材料的波阻抗较低,为保证波阻抗匹配,采用∅12.7 mm 口径的 LC4 硬铝合金压杆系统。图 3 为空心球/2024Al 合金复合材料的动态压缩波形信号,入射波有一定的平台段,透射波信号具有较大的幅值,表明复合材料的波阻抗与压杆波阻抗较匹配,保证了实验结果的可靠性。

图 4(a)为 2024Al 合金基体材料在不同加载应变率下的动态压缩应力-应变曲线,图中各个应变率下铝合金的流动应力-应变曲线几乎重合,表明 2024Al 合金材料的流动应力对应变率不敏感。图 4(b)为空心球/2024Al 合金复合材料在不同加载应变率下的动态压缩应力-应变曲线,与铝合金基体类似,图中各种应变率下的应力-应变曲线也近似重合,表明其流动应力对应变率同样不敏感,这可能是因为在动态压缩条件下复合材料的基体变形和载荷传递过程中仍起着主导作用。在不同动态加载应变率下,2024Al 合金材料与空心球/2024Al 合金复合材料均呈现明显的应变硬化特性。

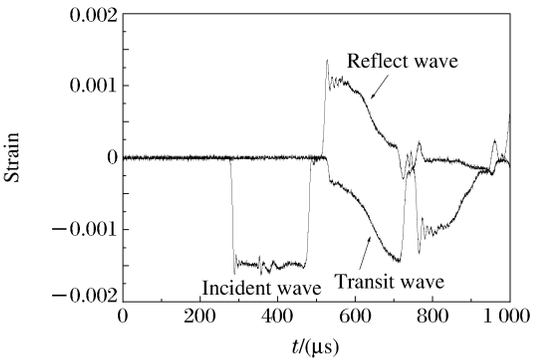


图 3 空心球/2024Al 合金动态压缩波形信号

Fig. 3 Dynamic compression experimental wave of hollow microsphere/aluminum 2024 alloy composite

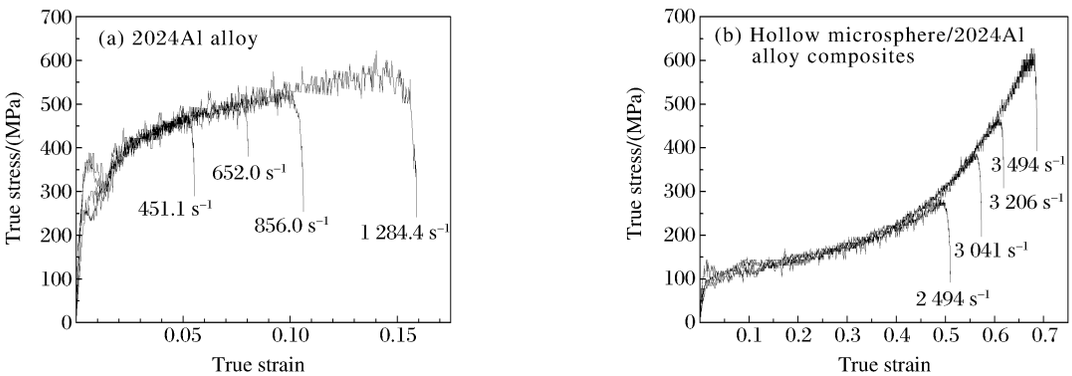


图 4 2024Al 合金基体及其复合材料动态压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of 2024Al alloy and hollow microsphere/aluminum 2024 alloy composite

由于铝合金基体与复合材料在动态压缩过程中没有明显的屈服点,因此取应变为 0.01 时对应的应力值作为材料的屈服应力。2024Al 合金材料在动态压缩条件下的屈服应力约为 300 MPa,而空心球/2024Al 合金复合材料的屈服应力为 100 MPa。复合材料的屈服强度较基体明显降低,这主要是由于复合材料内部的空心球破碎后材料内部的孔壁迅速坍塌)、材料快速进入塑性造成的。当应变介于 0～0.4之间时,空心球/2024Al 合金复合材料的的流动应力随应变增加缓慢增加,具有较长的应力平台,表明其在变形过程中能吸收较多的能量,具有良好的缓冲吸能效果。空心球/2024Al 合金复合材料在动态压缩条件下,其应力-应变曲线呈现类似多孔介质的变形特性[7],即呈现明显的 3 个阶段:线弹性阶段、塑性崩塌阶段、致密化阶段。在线弹性阶段,流动应力随应变增加快速增加,应力-应变关系呈线弹性。在塑性崩塌阶段,流动应力随应变增加缓慢增加。在致密化阶段,流动应力随应变增加快速增加,在整个动态压缩过程中,应力-应变曲线呈应变硬化特性。

图 5(a)为对空心球/2024Al 合金复合材料和普通泡沫铝材料进行相同冲击速度的 SHPB 实验得到的两者的应力-应变曲线,子弹撞击速度为 15 m/s,泡沫铝的相对密度为 0.4,平均孔径 1.5 mm。利用单位体积材料压缩到一定应变时的能量吸收量来表征复合材料的能量吸收能力[8]。图 5(b)为计算得到的空心球/2024Al 合金复合材料及泡沫铝材料的单位体积能量吸收量,W 为不同应变时的单位体积能量吸收量。在应变达到 0.4 时,空心球/2024Al 合金复合材料的单位体积能量吸收量达到了 60 MJ/m^3,而普通泡沫铝的单位体积的能量吸收量约为 12 MJ/m^3,这也表明空心球/2024Al 合金复合材料具有非常优良的缓冲吸能特性。

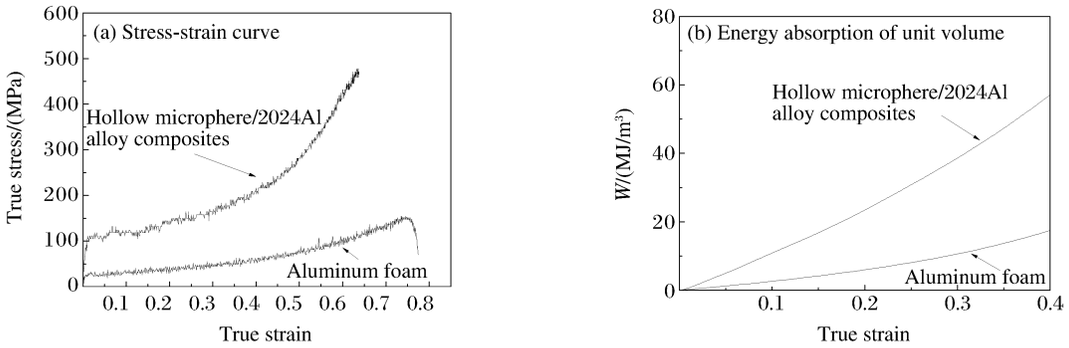


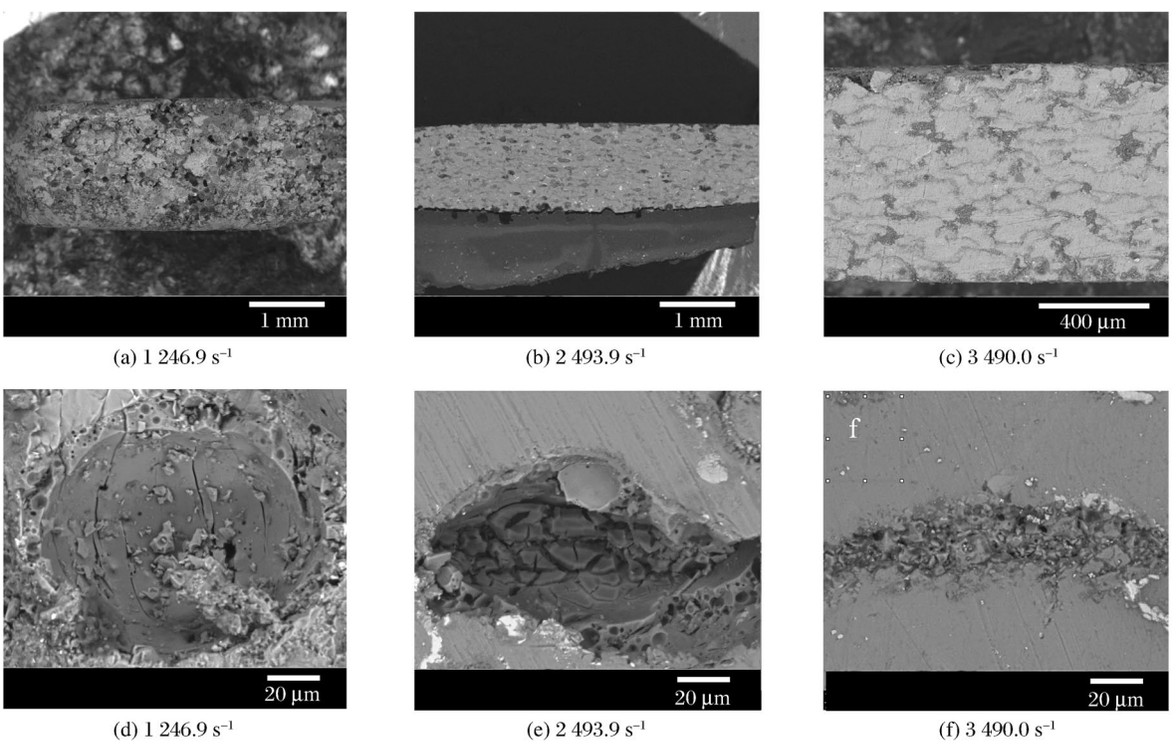
图 5 泡沫铝和空心球复合材料的应力-应变曲线及能量吸收能力

Fig. 5 Stress-strain curves and energy absorption of the aluminum and hollow microsphere/aluminum 2024 alloy composites

3.2 扫描电镜分析

为了进一步研究空心球/2024Al 合金基体复合材料中空心球的损伤模式，利用扫描电子显微镜对不同加载应变率压缩后的试样进行了观察。

图 6 是空心球/2024Al 合金复合材料在不同加载应变率下的断口形貌及空心球破坏形态，其中图 6(a)、图 6(b)和图 6(c)分别是应变率为 1 246.9、2 493.9 和 3 490 s^{-1}时的断口形貌，图 6(d)、图 6(e)和图 6(f)分别为 3 种应变率下的复合材料内部空心球破坏形态。在 1 246.9 s^{-1}的加载应变率下，试样沿冲击方向发生了一定的压缩量，材料中的空心球压缩不明显，试样发生微量塑性变形，在此加载条件下，空心球的破坏形式主要是沿空心球经线方向出现劈裂状微裂纹。在应变率为 2 493.9 s^{-1}的加载条件下，试样发生较大的塑性变形，空心球沿经线发生劈裂破坏，同时沿赤道方向也发生破坏，同时产生大量的碎片。在 3 490 s^{-1}的加载应变率下，试样被完全压扁，原空心球的空洞全部被压扁，空心球被完全压碎。



(a) 1 246.9 s^{-1} (b) 2 493.9 s^{-1} (c) 3 490.0 s^{-1}

(d) 1 246.9 s^{-1} (e) 2 493.9 s^{-1} (f) 3 490.0 s^{-1}

图 6 空心球/2024Al 合金复合材料不同加载应变率下材料的断口形貌及空心球破坏形态

Fig. 6 Fracture morphology and failure node of the hollow microsphere/aluminum 2024 alloy composites under different strain rates

由此可以得出,空心球/2024Al 合金复合材料在动态压缩过程中 3 个阶段的变形机理:在线弹性阶段,应变较小,材料呈现线性应力-应变关系,这是由于此阶段基体和空心球共同承受载荷,空心球处于弹性阶段,支撑基体承受载荷,基体也处于弹性阶段,故应力-应变关系表现为线弹性;在塑性崩塌阶段,试件中的应力水平达到空心球的破碎应力后,空心球发生破碎,基体发生塑性变形,此阶段流动应力随应变增加缓慢增加;在致密化阶段,空心球进一步发生破碎,材料内部变得非常致密,流动应力随应变增加也开始快速增加。

3.3　数值模拟

3.3.1　单胞模型参数及材料模型

通过对压缩前试样的扫描电镜图片分析可以看出,空心球/2024Al 合金复合是一种比较均匀的材料,空心球在复合材料中近似均匀分布。因此可以采用立方体单胞模型来研究空心球在动态压缩条件下的损伤模式,图 7 给出了空心球/2024Al 合金复合材料 1/8 单胞模型。。

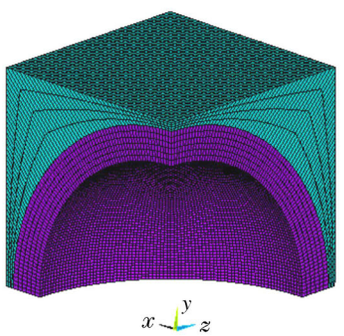


图 7　空心球/2024Al 合金复合材料 1/8 单胞模型

Fig. 7　The single-cell model of the hollow microsphere/aluminum 2024 alloy composite

在空心球/2024Al 合金复合材料中,空心球的体积分数均约为 46%。因此,在 LS-DYNA 数值模拟中建立单胞模型的尺寸为:立方体铝合金基体的边长为 100 μm;脆性空心球的外半径为 48 μm、内半径 40 μm、壁厚 8 μm。复合材料的动态压缩实验中加载应变率在 3 000 s^{-1}左右,因此数值模拟中加载应变率也设定为 3 000 s^{-1}。

为了保证数值模拟的正确性,采用 8 节点 Solid164 动态显式单元划分网格。立方体单胞模型中,铝合金基体采用弹塑性材料模型。脆性空心球增强体采用 Johnson-Holmquist Ⅱ(JH-2)本构模型[9],输入参数见表 2。JH-2 模型利用强度的连续损伤劣化效应来描述材料的梯度破坏过程,能够较好地模拟陶瓷材料在动载荷下的损伤演化过程。

表 2　Johnson-Holmquist Ⅱ(JH-2)模型参数

Table 2　Parameters of material model for Johnson-Holmquist Ⅱ(JH-2)

Parameter	Value	Parameter	Value
Density ρ_0/(g/cm^3)	3.89	Shear modulus G/(GPa)	152
Hugoniot elastic limit σ_{HEL}/(GPa)	7.00	Intact strength constant A	0.88
Intact strength constant N	0.64	Strain rate constant C	0.007
Fracture strength constant B	0.45	Fracture strength constant M	0.60
Max. strength of failed material/HEL stress	1.0	Tensile strength T/(GPa)	0.462
Pressure(EOS) constant K_1/(GPa)	0.462	Pressure(EOS) constant K_2/(GPa)	−160
Pressure(EOS) constant K_3/(GPa)	2774	Bulking constant	1.0
Damage constant D_1	0.0125	Damage constant D_2	0.70

3.3.2　数值模拟结果

为了更好地观察复合材料中空心球的破碎过程,在数值模拟结果中只显示空心球部分,图 8 为空心球/2024Al 合金复合材料单胞模型在不同压缩时刻含损伤的等效应力云图。

由图 8 可见,在加载初期(1 μs),空心球中赤道位置处等效应力达到最大,两极位置应力最小,整体

应力分布较不均匀。随着时间的增加(20 μs),应力波在空心球内部发生连续的反射、透射,使材料应力分布趋于均匀。由图 8(c)可见,裂纹首先由空心球的两端沿经线位置产生,随着进一步压缩,裂纹逐渐沿轴向扩展;在 60 μs 时,观察到沿空心球的赤道位置开始破碎;随着压缩的进行损伤不断加剧,最后导致空心球崩塌。

通过对不同时刻动态压缩的损伤演化,可以看出空心球在动态压缩过程中先沿空心球顶部产生纵横交错裂纹,裂纹沿经线方向扩展,后期空心球赤道位置发生破裂,损伤程度进一步加剧,最后空心球发生崩塌,这与扫描电镜结果较一致。图 9 为空心球不同位置失效单元的应力三轴度。

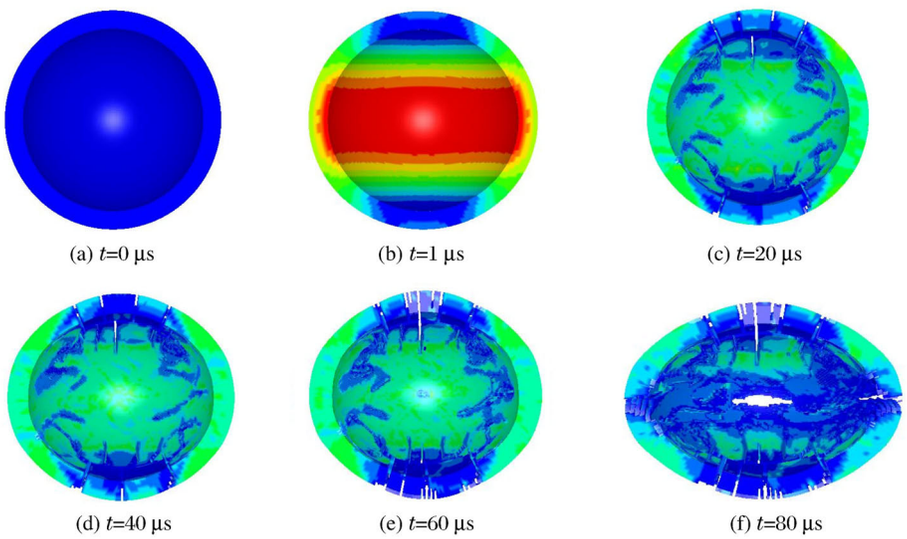


图 8 不同时刻的空心球等效应力云云图

Fig. 8 The V-M stress of the hollow microsphere at different time

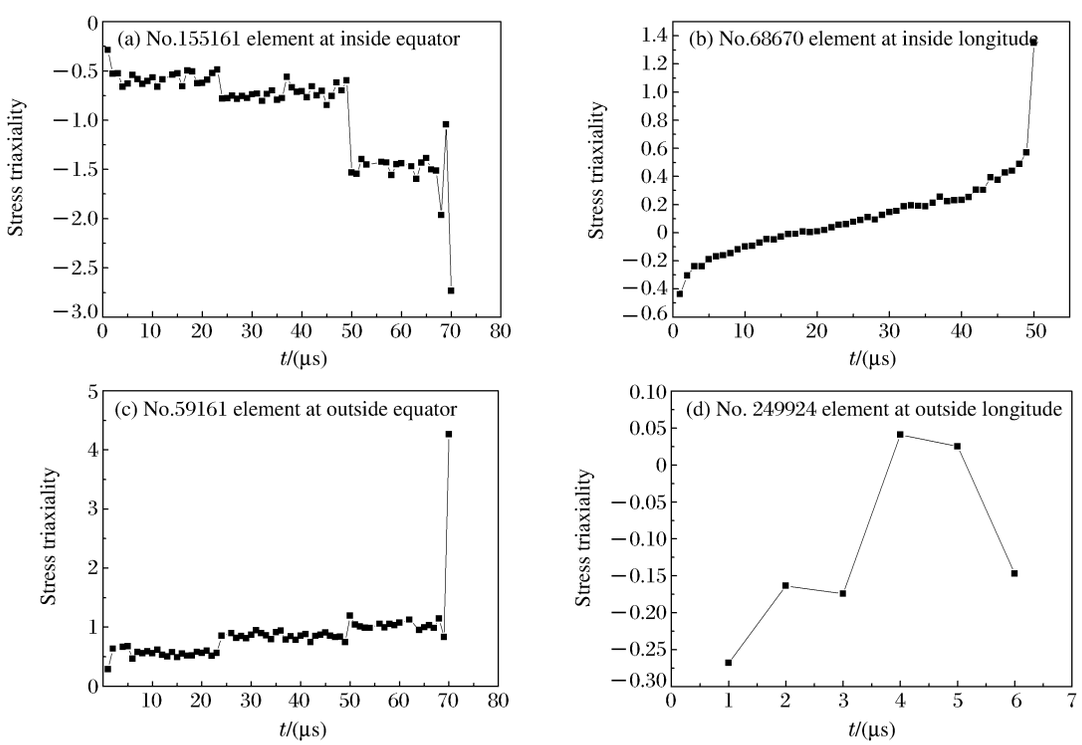


图 9 不同位置失效单元的应力三轴度

Fig. 9 The stress tri-axiality of damage element at different positions

从图 9 可以看出,空心球在动态压缩过程中,空心球内侧赤道单元(单元 155 161)在整个压缩过程中均承受压应力作用,而空心球外侧赤道单元(单元 59 161)则承受拉应力作用,并最终失效。空心球沿经线内侧单元(单元 68 670)在动态压缩过程中主要承受压剪、拉剪和拉应力作用,空心球沿经线外侧单元(单元 249 924)主要承受压剪和拉剪作用并最终失效。

由此可以得出空心球在动态压缩过程中的损伤破坏特性。在动态压缩过程的初期阶段,空心球沿经线外侧单元在压剪和拉剪作用下发生失效,随着压缩的继续,沿经线内侧单元在压剪、拉剪和拉应力作用发生失效。在压缩的中期阶段,空心球沿赤道方向发生失效,赤道外侧单元主要承受拉应力,内侧单元主要承受压应力。在压缩后期阶段,空心球沿赤道和经线发生坍塌,空心球被压实。

4　结　论

研究了空心球/2024Al 合金复合材料在动态压缩条件下的力学性能,并结合扫描电镜和数值模拟对复合材料内部空心球的损伤破碎特性进行了研究,主要得到如下结论。

(1) 通过对空心球/2024Al 合金复合材料的动态压缩实验,发现在动态加载条件下,其应力-应变曲线具有明显的 3 个阶段:线弹性阶段、塑性崩塌阶段和致密化阶段。

(2) 动态加载条件下,在应力-应变曲线的线弹性阶段,铝合金基体和空心球共同承受载荷,空心球和基体处于弹性阶段。在塑性崩塌阶段,试件中的应力水平达到空心球的破碎应力,空心球沿经线方向产生裂纹,裂纹随压缩的进行不断扩展,并沿赤道方向发生破坏,损伤进一步加剧。在致密化阶段,空心球发生坍塌,空心球被压实。

(3) 空心球赤道外侧单元在动态压缩过程中均承受拉应力作用,而内侧单元承受压应力作用。沿空心球经线外侧单元在压缩过程中主要承受压剪和拉剪,沿经线外侧单元主要承受压剪、拉剪和拉应力作用。

References:

[1] Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of of fly ash [J]. Prog Energ Combust, 2010, 36: 327-363.

[2] Balch D K, O'Dwyerb J G, Davisc G R, et al. Plasticity and damage in aluminum syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions [J]. Mater Sci Eng A, 2005, 391: 408-417.

[3] Olivier C, David C. Creep of aluminum syntactic foams [J]. Mater Sci Eng A, 2008, 488: 573-579.

[4] Mondal D P, Goel M D, Das S. Effect of strain rate and relative density on compressive deformation behaviour of closed cell aluminum-fly ash composite foam [J]. Mater & Design, 2009, 30: 1268-1274.

[5] Dou Z Y, Jiang L T, Wu G H, et al. High strain rate compression of chemosphere-pure aluminum syntactic foams [J]. Scripta Mater, 2007, 57: 945-948.

[6] Wu G H, Dou Z Y, Jiang L T, et al. Damping properties of aluminum matrix-fly ash composites [J]. Mater Lett, 2006, 60(24): 2945-2948.

[7] Pang B J, Yang Z Q, Wang L W, et al. Dynamic compression properties and constitutive model with strain rate effect of rubber material [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(5): 407-415. (in Chinese)
庞宝君,杨震琦,王立闻,等. 橡胶材料的动态压缩性能及其应变率相关的本构模型 [J]. 高压物理学报, 2011, 25(5): 407-415.

[8] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[9] Holmquist T J, Johnson G R. Response of silicon carbide to high velocity impact [J]. J Appl Phys, 2002, 91(9): 5858-5866.

Dynamic Compression and Damage Pattern of Hollow Microsphere/Aluminum Alloy Composites

WANG Shao-Heng, YANG Zhen-Qi, GUAN Gong-Shun,
PANG Bao-Jun, CHEN Hai-Bo

(*School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: The hollow microsphere/aluminum alloy composites was fabricated by press infiltration. The dynamic compression behavior of the composites was investigated by using split Hopkinson pressure bar (SHPB). The microstructure of the specimen after compression was characterized by scanning electron microscopy, and the damage patterns of the hollow microsphere was primarily studied. A single-cell model of the composites was established, and the dynamic compression process of the single-cell was simulated by using the LS-DYNA explicit finite element software. With dynamic loading, mechanical behavior of hollow microsphere/aluminum alloy composites showed three typical stages: elastic deformation, plastic collapse and densification. With the increasing of the decrement, the hollow microsphere appeared cracks along the meridians, gradually transitioned into the fragmentation of the equator, and eventually collapsed.

Key words: dynamic damage; split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment; aluminum alloy matrix composites