

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0374

Mo-ZrC 梯度金属陶瓷的冲击响应行为*

谢雨珊¹, 陆建华¹, 徐松林^{1,2}, 舒在勤³, 张金咏³

1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;
2. 中国地震局地震预测研究所高压物理与地震科技联合实验室, 北京 100036;
3. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 分层梯度材料特定的梯度变化能有效增强材料性能。为研究梯度结构、冲击方向对分层梯度材料冲击响应的影响, 利用分离式霍普金森压杆结合高速摄影技术对 Mo-ZrC 分层梯度金属陶瓷进行了动态压缩实验, 基于数字图像相关技术讨论了梯度结构、冲击方向对金属陶瓷材料破坏模式的影响, 利用 Mori-Tanaka 理论计算得到金属陶瓷等效性质, 结合应力波理论研究波在分层梯度复合材料中的传播规律。结果表明: (1) 相同加载条件下, 梯度结构对材料的强度、韧性和破坏产物的完整性具有重要影响, 在冲击过程中, 样品响应可以分为压紧阶段、裂纹成核发展阶段和贯穿阶段, 对于不同梯度结构和冲击方向, 样品在加载过程中呈现出不同的破坏时序和失效模式; (2) 利用数字图像相关方法跟踪分层梯度陶瓷的局部变形发展, 分析发现局部增量达到临界状态后, 局部变形发展转化为微裂纹的形成和累积, 最终导致整体性破碎失效; (3) 通过分层梯度材料一维应力波传播理论推导得到, 改变冲击梯度方向对应力波透反射系数存在一定影响, 不同梯度结构设计对改变冲击梯度方向敏感性不同, 且存在极值情况。

关键词: 冲击动力学; Mo-ZrC 金属陶瓷; 分层结构; 应力波传播

中图分类号: O382 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

On impact properties of Mo-ZrC gradient metal ceramics

XIE Yushan¹, LU Jianhua¹, XU Songlin^{1,2}, SHU Zaiqin³, ZHANG Jinyong³

(1. CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;

2. United Laboratory of High Pressure Physics and Earthquake Science, Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Molybdenum (Mo) and zirconium carbide (ZrC) ceramic possess high strength and good wear resistance. Specific gradient changes of layered gradient structure can effectively take advantage of the two materials. To study the effects of gradient structure and impact direction on the dynamic responses of Mo-ZrC layered gradient cermet, the low-speed dynamic compression test of layered gradient cermet was launched by the split Hopkinson pressure bar device combined with high-speed photography technology, and three kinds of samples with different graded structures were pre-designed and sintered. Based on the digital image correlation (DIC) technology, the effects of gradient structure and impact direction on the failure modes of layered gradient cermet were discussed in detail. The propagation of the one-dimensional stress wave in the layered

* 收稿日期: 2022-08-26; 修回日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(11672286, 11602267, 11872361); 安徽省自然科学基金(1708085MA05); 高压物理与地震科技联合实验室室开放基金(2019HPPES01)

第一作者: 谢雨珊(1998—), 女, 硕士, sa20005048@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 徐松林(1971—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, slxu99@ustc.edu.cn

gradient composite was analyzed according to the equivalent properties of each layer of graded cermet calculated by the Mori-Tanaka theory. Results show as follows. (1) Under the same loading condition, the layered gradient structure has an important influence on material strength and integrity of the damaged product. Samples with a higher overall metal content exhibit better performance. In the process of impactation, the dynamic impactation responses can divide into three stages: compression, crack nucleation, and penetration. According to the results of high-speed photography, different gradient structure and direction of impact damage present different temporal and modes. (2) With the help of the calculation results based on the DIC method, the local deformation development of layered gradient cermet is tracked. When the local incremental development reaches a critical state, the local deformation development turns to the formation and accumulation of micro-cracks, which would lead to overall failure eventually. (3) Based on the one-dimensional stress wave propagation theory of layered gradient materials, the changing of impact direction influences the permeability and reflection coefficient of the stress wave, different gradient structure design shows sensitivity difference to the impact direction change, and there are extreme values.

Keywords: impact dynamics; Mo-ZrC cermet; layered structure; stress wave propagation

20 世纪 80 年代, Udupa 等^[1]首次提出了功能梯度材料(functionally graded materials, FGM)。最初功能梯度材料是用于解决航天器外表面的巨大温差, 随着研究深入逐渐扩展至更多领域。功能梯度材料在宏观和微观尺度上表现出规律的梯度变化, 包括连续变化和分层变化, 能有效增强材料某一特定区域的强度、韧性、耐磨性等, 使材料寿命和应用性能有了质的飞跃, 通过金属、陶瓷、塑料等材料的巧妙结合, 已被应用于航空航天、核能、生物、电磁、光学、能源等多个领域^[2]。

功能梯度材料在研究中表现出优秀的力学性能, 同时由于结构的可设计性, 其性能具有极大的优化空间。Larson 等^[3]研究了由 Ti-TiB 组成的功能梯度板在低速冲击载荷下的整体响应问题, 并通过梯度结构设计来提高 FGM 材料性能。Qi 等^[4]设计了不同梯度成分的 ZrC-Mo 多层 FGM, 发现与均质陶瓷相比, 热冲击载荷下复合材料能够更好地保持结构完整性。Li 等^[5]测试了金属陶瓷多层梯度复合板, 发现尖锐或不连续的界面在结构设计中具有很强的价值, 分级和分层设计为材料性能优化提供了更多机会。因此结构的最佳选择将在很大程度上取决于特定应用的关键设计条件。有研究发现分层梯度复合材料层间协同作用对于裂纹发展具有重要影响, 并且与层间成分和梯度结构密切相关^[6-8]。有学者研究功能梯度材料在冲击载荷在不同速度下的冲击响应, 发现明显的动态强化作用^[9], 伴随出现过渡变形和冲击变形模式^[10-12]。Koohbor 等^[13]在研究梯度密度聚酯氨泡沫准静态和冲击压缩行为时发现, 相同加载条件下不同梯度方向表现出不同的变形机理。

由于复合材料结构细节的高度复杂性, 分层材料被作为理论模型系统来研究材料在冲击载荷作用下应力波传播行为。Chen 等^[14]确定了阻抗匹配、界面密度和厚度比对波散射的影响, 发现冲击载荷下分层异质材料的响应在很大程度上取决于层间多个波的相互作用。Bruck 等^[15]提出了一维模型并从离散分层体系扩展到连续分级的体系结构, 发现分层材料中应力波的传播行为高度依赖于成分梯度和基材性能的差异, 但是分层梯度结构中应力波传播并未得到很好揭示。

基于此, 利用霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置, 结合高速摄影, 对不同梯度结构和冲击方向的 Mo-ZrC 分层梯度复合金属陶瓷进行动态压缩实验, 通过数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术表征应变场的演化特征, 以揭示材料的波动行为; 利用一维应力波理论, 考虑分层梯度结构层间的多波相互作用问题, 研究梯度结构和梯度增长方向对分层梯度材料应力波传播行为的影响。

1 实验

1.1 实验材料

碳化锆(ZrC)陶瓷具有高硬度(25.5 GPa)、高熔点(3400 °C)、低密度(6.56 g/cm³)和良好的化学稳定性, 被广泛应用于发射器表面涂层、核燃料颗粒涂层、热光电辐射器等超高温耐火材料等领域^[16]。与多

数陶瓷类似, 较低的断裂韧性和冲击损伤敏感性阻碍了 ZrC 陶瓷的应用。钼(Mo)的熔点高(2 620 ℃), 具有优异的耐高温、耐腐蚀特性。通过在 ZrC 陶瓷中加入 Mo, 可以有效提高材料韧性, 充分发挥其性能^[17]。ZrC 和 Mo 的力学性能如表 1 所示。

表 1 Mo 和 ZrC 材料力学能参数^[16, 18]

Table 1 Mechanical properties of Mo and ZrC^[16, 18]

材料	密实度	密度/(kg·m ⁻³)	模量/GPa	波速/(m·s ⁻¹)	泊松比	熔点/℃
Mo	0.95	10200	279	5230	0.32	3400
ZrC	0.98	6510	390	7740	0.191	2620

实验所用 Mo-ZrC 梯度金属陶瓷样品采用等离子放电烧结(spark plasma sintering, SPS)工艺制备, 致密度可以达到 98% 及以上^[4], 样品组分如表 2 所示。样品具有较好的梯度结构, 随着陶瓷含量的增加, 样品沿厚度方向从金属色光泽逐渐变为灰黑色。

Mo-ZrC 梯度金属陶瓷样品不同层内 Mo 的体积分数 V_{Mo} 可以先通过质量换算, 再由幂函数 $V_{Mo}=(1-x)^n$ 拟合, 其中 n 为拟合指数, x 为归一化梯度方向坐标, 拟合结果如图 1(a) 所示。规定由金属到陶瓷为冲击加载时的正方向, 用 G^+ 表示; 由陶瓷到金属为冲击加载时的负方向, 用 G^- 表示。以样品 2 为例, 不同位置的显微结构如图 1(b)

表 2 Mo-ZrC 梯度金属陶瓷梯度结构

Table 2 Gradient structure of Mo-ZrC gradient metal ceramics

层编号	质量分数/%					
	样品 1		样品 2		样品 3	
	Mo	ZrC	Mo	ZrC	Mo	ZrC
1	100	0	100	0	100	0
2	80	20	90	10	65	35
3	60	40	80	20	30	70
4	40	60	70	30	20	80
5	20	80	35	65	10	90
6	0	100	0	100	0	100

所示, 样品 2 为将不同质量比 Mo 金属粉末和 ZrC 陶瓷粉均匀混合制备而成^[19], 金属 Mo 和 ZrC 陶瓷分布均匀、层间无明显缺陷。样品尺寸为 (5.60±0.1) mm×(5.70±0.1) mm×(5.70±0.15) mm。

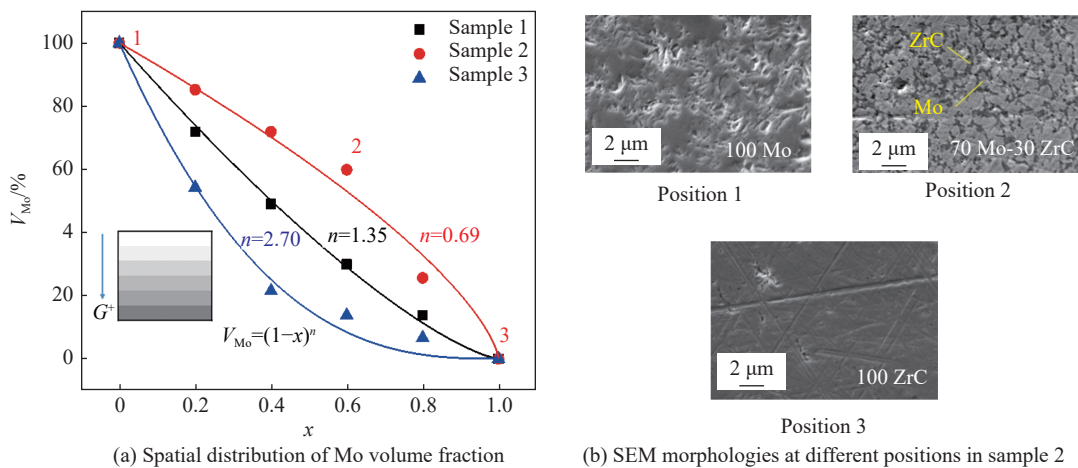


图 1 不同 Mo-ZrC 梯度金属陶瓷样品中 Mo 体积分数的空间分布及样品 2 中不同位置的 SEM 形貌

Fig. 1 Spatial distribution of Mo volume fraction in different Mo-ZrC gradient metal ceramics samples and SEM morphologies at different positions in sample 2

1.2 实验装置及方法

实验搭载 SHPB 装置如图 2 所示, 撞击杆长 300 mm, 入射杆长 1 000 mm, 透射杆长 1 000 mm, 均为直径 14.5 mm 钢制杆。撞击速度控制在 (16.45±0.16) m/s, 为实现充分加载, 入射杆撞击端加整形器。入射

杆和样品以及样品和透射杆之间加入碳化钨垫块, 进行 2 次重复性实验。高速摄影相机拍摄帧率为 $2.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, 图像分辨率为 120×120 。

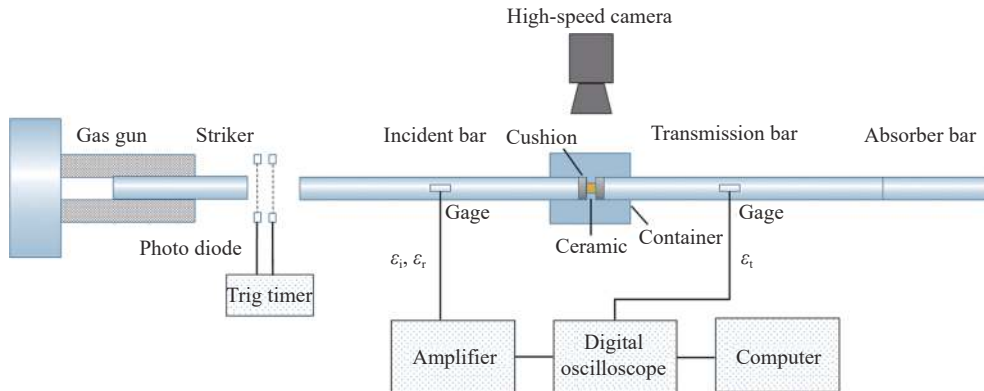


图 2 实验装置示意简图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental devices

2 冲击加载状态分析

2.1 应力-应变关系

对实验信号进行处理, 得到样品工程应力-应变曲线如图 3 所示。统计表 2 中样品各层组分质量分数, 样品 2 整体金属质量分数最高, 为 62.5%, 其工程应力-应变曲线表现出一定的金属塑性, 即峰值过后应力下降较慢。样品 1、3 整体金属质量分数较低, 分别为 50% 和 37.5%, 应力-应变曲线表现出脆性特征, 达到破坏强度后, 应力迅速下降。在相同的加载速度下, 3 种梯度结构中样品 2 动态强度最高。以 50% 的整体金属质量分数为界, Mo-ZrC 复合金属陶瓷在低速动态压缩下计算得到的工程应力-应变曲线表现出不同的性质。

低速冲击加载下 ZrC 陶瓷的抗压强度约 1600 MPa, 金属 Mo 的流动应力约 1000 MPa^[16,18]。分层梯度金属陶瓷作为一种结构性材料, 其性能与两种组分间的协同作用密切相关。两种组分以微米级颗粒的形式均匀混合, 通过烧结得到复合结构。陶瓷组分作为骨架, 金属组分作为结合剂, 可以有效提高整体抗变形能力。实验中, 整体金属 Mo 质量占比更高的样品 2 表现出更高的强度, 主要是因为金属 Mo 的高韧性在抵抗变形过程中发挥作用, 并在当前组分比下表现出优异性能。

2.2 样品冲击加载破碎过程

利用高速摄影相机记录 Mo-ZrC 梯度金属陶瓷样品的冲击加载过程, 并对这一过程进行初步分析。3 种样品高速摄影相机记录结果分别如图 4~6 所示, 左侧红色虚线框为选取 DIC 计算区域, 为减小边界影响, 选择边界向内选取计算区域。为便于描述, 根据表 2 中材料组分的分布, 将质量占比大于 50% 的层区描述为富金属区, 小于 50% 的层区描述为富陶瓷区。

以样品 1 正方向冲击作为参照, 样品左侧为入射端, 以入射杆加载前一帧作为初始时刻, 样品在 20 μs 右侧边缘产生碎片飞溅, 根据层间位置判断初始缺陷发生于右侧纯陶瓷层附近。40 μs 时刻富陶瓷区发生整体性的破坏, 表现出脆性破坏特征, 富陶瓷区破碎引起富金属区中心主裂纹贯穿失效。

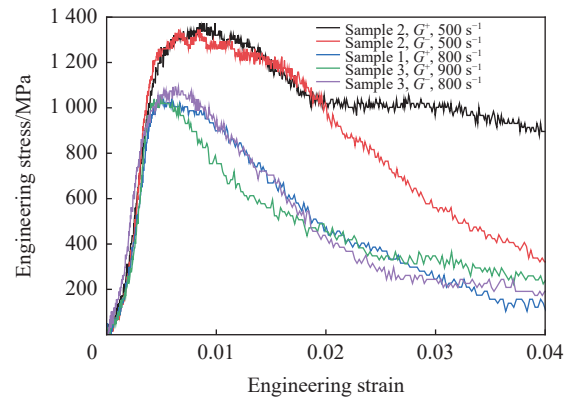


图 3 不同 Mo-ZrC 梯度金属陶瓷样品的工程应力-应变曲线
Fig. 3 Engineering stress-strain curves of different Mo-ZrC gradient metal ceramics samples

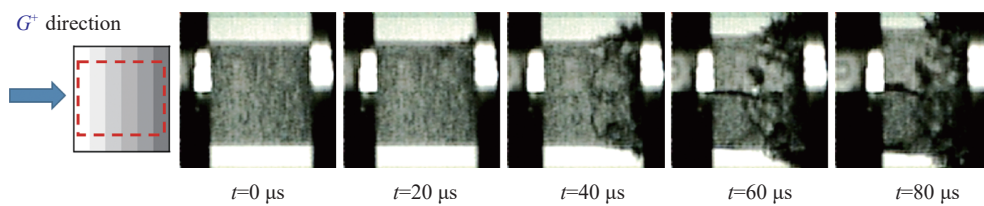


图 4 样品 1 冲击加载破碎过程

Fig. 4 Crushing process of sample 1 under impact loading

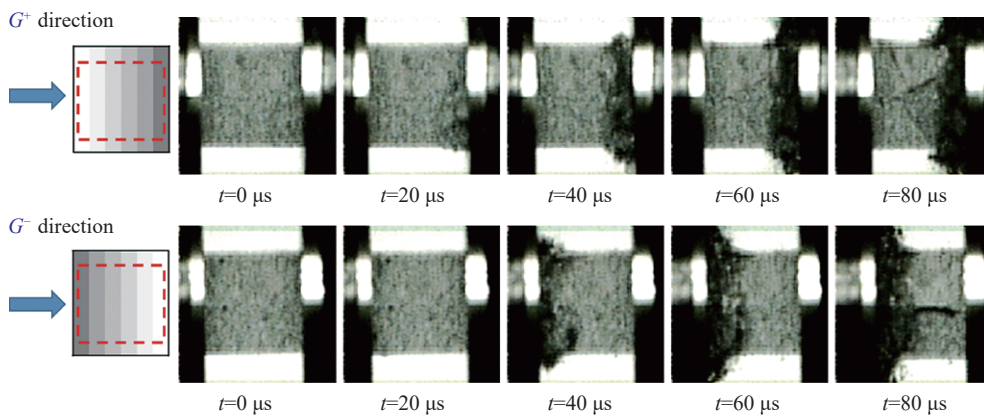


图 5 样品 2 冲击加载破碎过程

Fig. 5 Crushing processes of sample 2 under impact loading

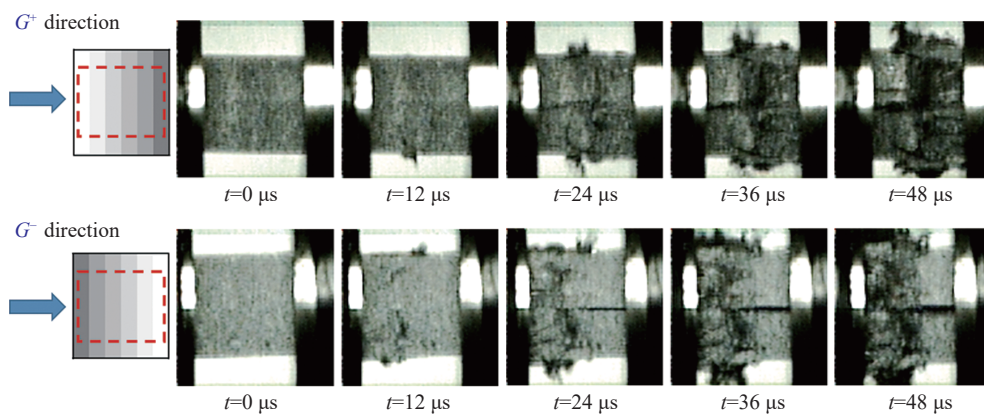


图 6 样品 3 冲击加载破碎过程

Fig. 6 Crushing processes of sample 3 under impact loading

样品 2、3 正方向加载时出现相似的破坏次序, 表现为富陶瓷区域和富金属区域先后破坏。样品 1 的初始缺陷发生于纯陶瓷层, 随后富陶瓷区发生粉碎性破坏。以正方向为例, 样品 3 的初始缺陷发生于第 2 层和第 3 层之间, 第 2、3 层金属 Mo 质量分数分别为 65% 和 30%, 其左右两侧分别划分为富金属区和富陶瓷区, 富陶瓷区发生粉碎性破坏, 富金属区保持较好的完整性。样品 3 整体陶瓷含量更高, 破碎程度更大, 破碎过程中样品 3 富陶瓷区生成数条平行裂纹, 形成裂纹网络并集中于富陶瓷区, 产生大尺寸的片状产物。其可能原因是样品 1、2 中金属含量较高, 金属粉末的加入提高了局部韧性, 富金属区和富陶瓷区性能具有趋韧性和趋脆性差异, 促使破碎产物形态产生较大差异。改变冲击方向, 样品发生破坏位置根据梯度结构发生相应变化, 整体破坏模式表现出梯度结构和冲击方向的相关性。综上, 通过成分梯度设计, 可以在一定程度上对裂纹发展模式、破碎区域以及破碎产物形态进行控制, 在冲击防护领域具有一定的应用价值。

3 应变场演化分析

3.1 灰度分析

结合数字图像相关技术, 在样品拍摄表面设置均匀分布的高质量散斑, 计算样品表面应变场分布, 同时对图像进行灰度校正^[20], 计算公式如下:

$$I_c(x, y) = \frac{I(x, y)}{I_0(x, y)} I_0^* \quad (1)$$

式中: $I_c(x, y)$ 为校正后灰度场, $I(x, y)$ 为某时刻图片灰度场, $I_0(x, y)$ 为未加载初始图像灰度场, I_0^* 为初始平均灰度值。

灰度对比度曲线一定程度上可以反映样品的压实过程, 即通过灰度标准差曲线来对样品的冲击过程进行初步划分^[20]。样品 2 灰度对比度曲线如图 7~8 所示, 可以划分为压紧阶段、裂纹成核发展阶段和贯穿阶段。取梯度方向灰度标准差得到分布曲线如图 7 所示。可以发现, 初始压紧阶段和后期贯穿失效阶段, 曲线重合度较高, 在裂纹成核发展阶段, 曲线随时间发展逐步上移, 反映了从初始阶段到贯穿阶段的过渡过程。如图 8 所示, 为全场灰度标准差分布, 初始压实阶段其值趋近零, 裂纹成核发展阶段对应于黄色区域数据点分布, 贯穿阶段对应于红色区域数据点分布。

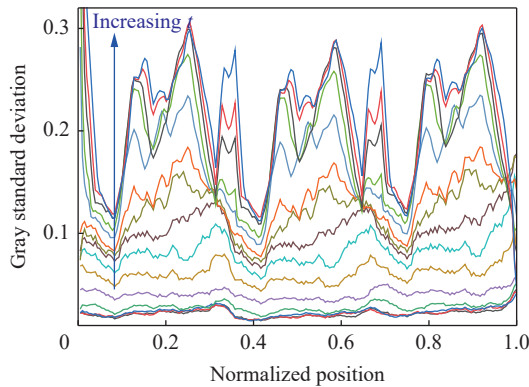


图 7 冲击过程中样品 2 的灰度标准差沿梯度方向的分布

Fig. 7 Distribution of gray standard deviation of sample 2 along the graded direction during impact

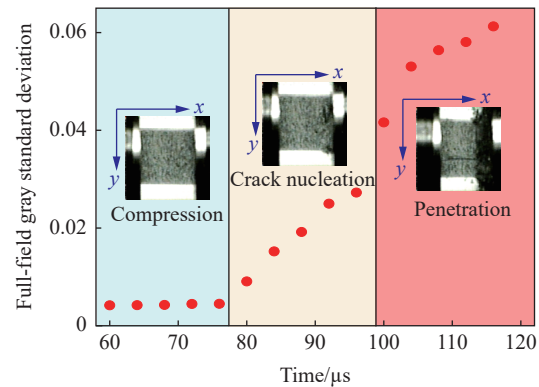


图 8 样品 2 全场灰度标准差分布

Fig. 8 Distribution of full-field gray standard deviation of sample 2 at different times

3.2 等效应变场发展分析

基于高速摄影相机记录图像对样品冲击加载响应进行了初步分析, 为了进一步研究样品表面为变形, 考虑拉应力和剪应力的综合作用, 利用等效应变追踪低速冲击加载过程中样品的变形演化规律, 等效应变 γ 表达式如下:

$$\gamma = \sqrt{2\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \quad (2)$$

式中: ε_{xx} 为冲击方向正应变, ε_{xy} 为剪应变。

图 9~11 分别为样品 1~3 在不同时刻等效应变场增量形式伪彩图。入射杆端的应力波传播至试样, 试样经历初始阶段的小变形, 载荷逐渐加载到临界值后, 样品内部裂纹和缺陷开始产生和发展。如图 9 所示, 应力波由左侧入射杆传入, 首先作用样品左侧, 发生变形, 随后向右传播。当变形承载较弱区域达到临界状态, 等效应变场集中在右侧 1/2 处的富陶瓷区, 样品内部及表面表现为富陶瓷区为主的微裂纹的成型及发展, 形成密集的网络, 不断累积造成损伤失效, 应力卸载^[21]。材料平均波速为 5 000~7 000 m/s, 在样品中传播的单程时长约为 1 μ s, 成像时间间隔为 4 μ s, 样品内部未达到平衡状态, 而且根据加载时间可知, 加载仍在继续, 所以可以在一定程度上反映样品在小变形阶段内部等效应变的一个发展过程。

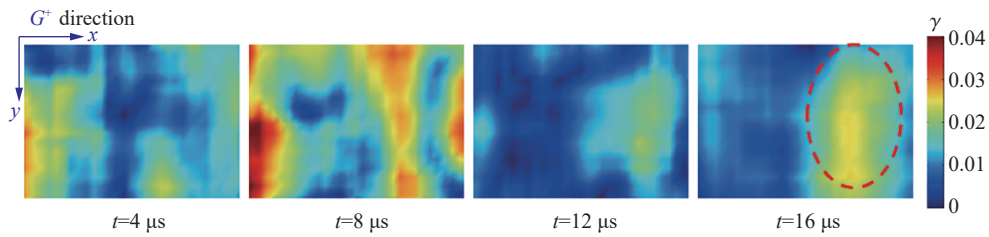


图 9 不同时刻, 样品 1 等效应变场

Fig. 9 Equivalent shear strain fields of sample 1 at different times

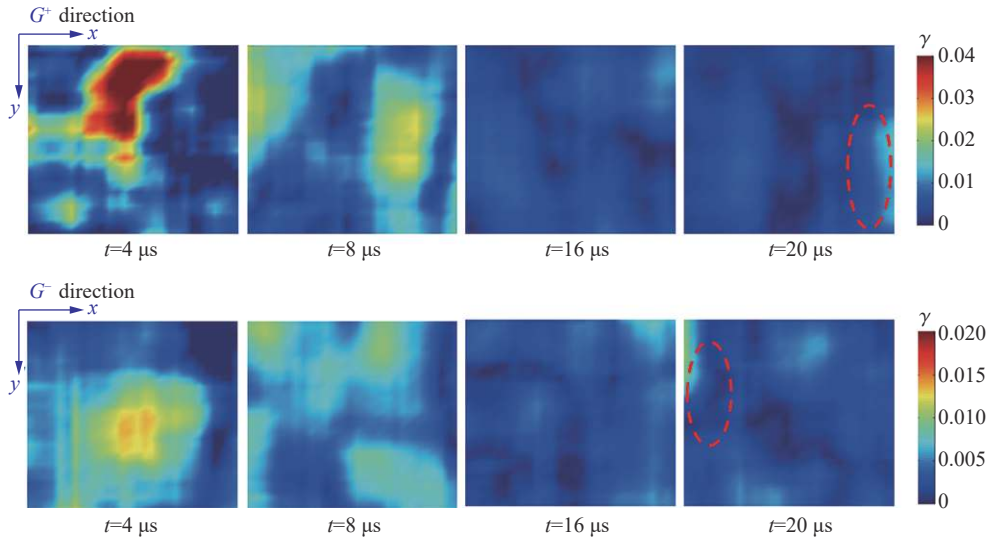


图 10 不同时刻, 样品 2 的等效应变场

Fig. 10 Equivalent shear strain fields of sample 2 at different times

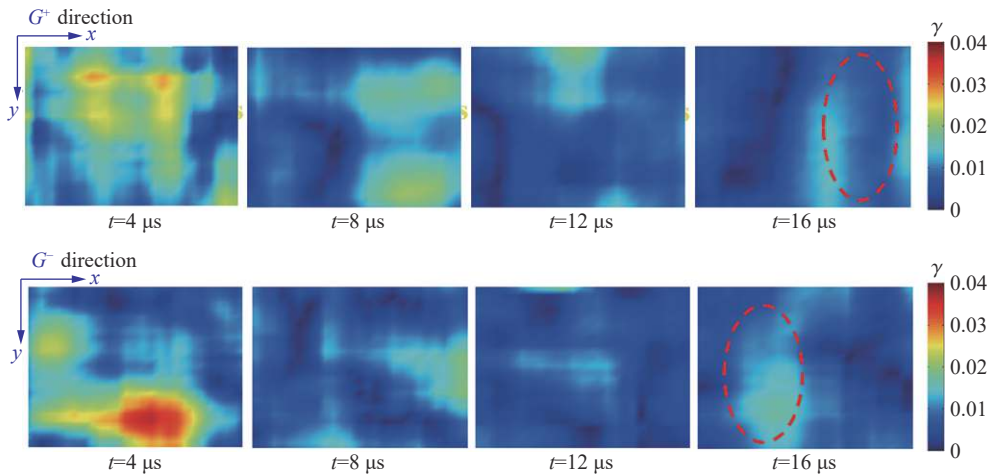


图 11 不同时刻, 样品 3 的等效应变场

Fig. 11 Equivalent shear strain field of sample 3 at different times

样品 2、3 等效应变发展过程和样品 1 趋势一致。样品被正方向冲击, 在 8 μs 时, 富陶瓷区等效应变增幅明显, 在 12 μs 时达到临界状态, 即等效应变无明显增幅, 并下一时刻开始发生破碎(图 10、11 红色虚线位置)。负方向冲击等效应变的积累也主要集中在富陶瓷区。2 种冲击方向的主要区别在于加载端初始变形程度。正方向入射端接触的纯金属 Mo 可承载较大的变形发生塑性变形, 负方向冲击接触纯碳化锆陶瓷层, 可承载且传递变形较小。样品 3 整体陶瓷含量更高, 趋向脆性破坏, 承载时间更短。

4 分层梯度材料中的波传播问题

4.1 金属陶瓷各层等效力学性能

利用 Mori-Tanaka 理论确定材料各梯度的等效力学性质^[9], 各梯度任意位置体积模量 $K(x)$ 和剪切模量 $G(x)$ 分别等效为:

$$\frac{K(x) - K_m}{K_c - K_m} = \frac{V_c}{1 + (1 - V_c) \frac{3(K_c - K_m)}{3K_m + 4G_m}} \quad (3)$$

$$\frac{G(x) - G_m}{G_c - G_m} = \frac{V_c}{1 + (1 - V_c) \frac{G_c - G_m}{G_m + f_m}} \quad (4)$$

$$f_m = \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)} \quad (5)$$

式中: x 为梯度变化方向; V_c 和 V_m 分别为陶瓷和金属的体积分数, 满足 $V_c + V_m = 1$; K_c 和 K_m 分别为纯陶瓷和纯金属的体积模量; G_c 和 G_m 分别为纯陶瓷和纯金属的剪切模量。

等效杨氏模量 $E(x)$ 和泊松比 $\nu(x)$ 可以分别表示为:

$$E(x) = \frac{9K(x)G(x)}{3K(x) + G(x)} \quad (6)$$

$$\nu(x) = \frac{3K(x) - 2G(x)}{2(3K(x) + G(x))} \quad (7)$$

密度关系为:

$$\rho(x) = V_c\rho_c + V_m\rho_m \quad (8)$$

式中: ρ_c 和 ρ_m 分别为纯陶瓷和纯金属的密度。

4.2 多层结构中的应力波传播

基于 Mori-Tanaka 理论, 利用式 (3)~(8) 确定不同梯度位置金属陶瓷的等效力学性质, 然后考虑分层材料层间应力波传播相互作用^[22]。定义第 i 种材料的波阻抗为 Z_i , 第 j 种材料的波阻抗为 Z_j , 则第 i 种和第 j 种材料界面的应力反射系数 $R_{ij} = (Z_j - Z_i)/(Z_i + Z_j)$, 应力透射系数 $T_{ij} = 2Z_j/(Z_i + Z_j)$ 。考虑谐波入射^[23], 入射、透射和反射波函数分别为:

$$\phi_{\text{int}} = e^{i\omega t}, \quad \phi_r = A_r e^{i\omega t}, \quad \phi_t = A_t e^{i\omega t} \quad (9)$$

式中: ϕ 为波函数, A_r 为反射系数, A_t 为透射系数, ω 为角频率, t 为时间。

4.2.1 单层材料透反射系数

对于单层材料, 假设层厚为 L , 波速为 c , 令 $\delta = \omega t = \omega L/c$ 。单次透反射如图 12(a) 所示^[22], 样品左右两端分别为入射端和透射端。假设逐次透射系数共有 M 项, 累加得到单层结构透射系数表达式如下:

$$A_t = T_{12}T_{23}e^{i\delta} + T_{12}R_{23}R_{21}T_{23}e^{3i\delta} + T_{12}(R_{23}R_{21})^2T_{23}e^{5i\delta} + \cdots + T_{12}(R_{23}R_{21})^{M-1}T_{23}e^{(2M-1)i\delta} = T_{12}T_{23}e^{i\delta} [1 + R_{23}R_{21}e^{2i\delta} + (R_{23}R_{21}e^{2i\delta})^2 + \cdots + (R_{23}R_{21}e^{2i\delta})^{M-1}] \quad (10)$$

实验中, $|R_{23}R_{21}e^{2i\delta}| = \left| \frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right| < 1$, 有:

$$A_t = \frac{T_{12}T_{23}e^{i\delta}}{1 - R_{23}R_{21}e^{2i\delta}} \quad (11)$$

同理, 可以得到单层结构反射系数表达式:

$$A_r = R_{12} + \frac{T_{12}R_{23}T_{21}e^{2i\delta}}{1 - R_{21}R_{23}e^{2i\delta}} = \frac{R_{12} - R_{32}e^{2i\delta}}{1 - R_{21}R_{23}e^{2i\delta}} \quad (12)$$

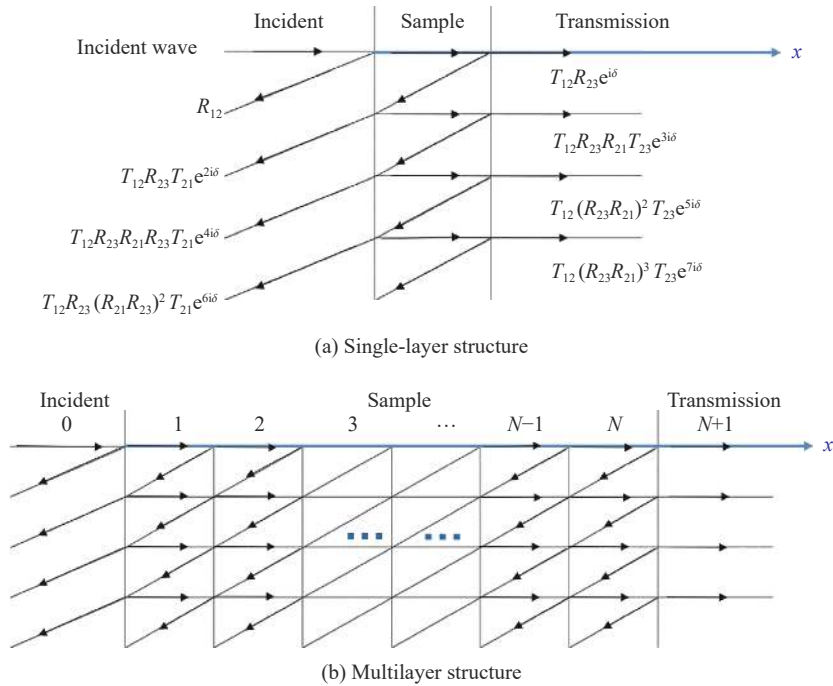


图 12 一维应力波在不同结构中的传播^[22]

Fig. 12 One-dimensional stress wave propagation in different structures^[22]

4.2.2 分层材料透反射系数

假设样品有 N 层, 0 层和 $N+1$ 层分别为 SHPB 实验中试样两侧的人射端和透射端。如图 12(b) 所示^[22], 假设各层层厚均为 L , 波速为 c_j , 令 $\delta = \omega t = \omega L / c_j$ 。

首先, 考虑基础透射次数, 保证入射波能够从入射端经过多层结构传播至透射端, 得到的基础项 A 为:

$$A = \prod_{j=1}^{N+1} T_{j-1,j} \cdot e^{\sum_{j=1}^N i\delta_j} \tag{13}$$

然后, 考虑各层层间反射次数分别为 n_j , 透射次数为 m_j , 可以得到成对反射项 B 和多次反射透射项 C :

$$B = \prod_{j=1}^N (R_{j,j+1} R_{j,j-1} e^{2i\delta_j})^{n_j} \tag{14}$$

$$C = \prod_{j=1}^{N-1} (T_{j,j+1} T_{j+1,j} R_{j,j-1} e^{i(\delta_j + \delta_{j+1})})^{m_j} \tag{15}$$

最后, 通项求和:

$$A_t = A \sum_{n_j=0}^{\infty} \sum_{m_j=0}^{\infty} (BC) \tag{16}$$

计算得到透射系数:

$$A_t = \prod_{j=1}^{N+1} T_{j-1,j} \cdot e^{\sum_{j=1}^N i\delta_j} \cdot \prod_{j=1}^{N-1} \frac{1}{1 - T_{j,j+1} T_{j+1,j} R_{j,j-1} e^{i(\delta_j + \delta_{j+1})}} \cdot \prod_{j=1}^N \frac{1}{1 - R_{j,j+1} R_{j,j-1} e^{2i\delta_j}} \tag{17}$$

反射系数的计算与透射系数计算类似, 首先需要考虑波的往返问题, 引入一个定位参数 k , 即认为计算统计至 k 层 ($k < N$)。基础项为:

$$A = \prod_{j=1}^k T_{j-1,j} T_{j,j-1} \cdot e^{\sum_{j=1}^k 2i\delta_j} \cdot R_{k,k+1} \quad (18)$$

然后, 考虑 k 层内层间反射次数分别为 n_j , 透射次数为 m_j , 可以得到成对反射项 B 和多次反射透射项 C :

$$B = \prod_{j=1}^k (R_{j,j+1} R_{j,j-1} e^{2i\delta_j})^{n_j} \quad (19)$$

$$C = \prod_{j=1}^{k-1} (T_{j,j+1} T_{j+1,j} R_{j+1,j+2} e^{i(\delta_j + \delta_{j+1})})^{m_j} \quad (20)$$

最后, 通项求和:

$$A_r = \sum_{k=1}^N \left(A \sum_{n_j=0}^{\infty} \sum_{m_j=0}^{\infty} (BC) \right) \quad (21)$$

计算得到反射系数:

$$A_r = \sum_{k=1}^N \left(\prod_{j=1}^k T_{j-1,j} T_{j,j-1} \cdot e^{\sum_{j=1}^k 2i\delta_j} \cdot R_{k,k+1} \cdot \prod_{j=1}^{k-1} \frac{1}{1 - T_{j,j+1} T_{j+1,j} R_{j+1,j+2} e^{i(\delta_j + \delta_{j+1})}} \cdot \prod_{j=1}^k \frac{1}{1 - R_{j,j+1} R_{j,j-1} e^{2i\delta_j}} \right) + R_{01} \quad (22)$$

4.3 冲击方向对透射系数和反射系数的影响

根据入射信号及高速摄影图像确定 3 种试样的平均加载时长为 15 μ s, 周期为 2 倍加载时长, 确定谐波入射角频率 $\omega = 2\pi/T = 157000 \text{ s}^{-1}$, 样品层厚取 $L = 5.60/6 \text{ mm} = 0.93 \text{ mm}$, 层数 $N = 6$ 。利用幂函数: $V_{\text{Mo}} = (1-x)^n$ 设计样品梯度结构, 指数 n 取值范围 [0.001, 5]。指数 n 越小, 样品整体金属含量越高。根据 4.2 节理论关系计算得到透射信号随指数 n 变化曲线, 同时考虑冲击方向对透射情况的影响。利用 SHPB 实验信号, 计算得到透射系数的实验结果分布如图 13 所示。归一化透射系数差值(normalized transmission difference)用 D 表示, 计算公式如下:

$$D = 2 \times \frac{|A_{\text{t,CM}} - A_{\text{t,MC}}|}{A_{\text{t,CM}} + A_{\text{t,MC}}} \quad (23)$$

式中: A_t 为透射系数, $A_{\text{t,MC}}$ 为正方向透射系数, $A_{\text{t,CM}}$ 为负方向透射系数。

图 13 中幂函数拟合指数 $n = 0.69, 1.35, 2.70$ 分别对应于样品 2、样品 1 和样品 3。黑色圆点和红色圆点分别表示冲击正方向和负方向数据点。其中正方向表示样品金属端接触入射杆, 负方向表示样品陶瓷端接触入射杆。利用 SHPB 实验数据处理得到透射、入射比值关系。正方向透射系数略小于负方向, 透射系数 A_t 随着指数 n 逐渐减小, 实验结果和理论预测趋势一致, 但是由于样品在实际加载中金属塑性、加载时间以及样品加工缺陷等, 所以在数值上可能有一定差异。改变冲击方向, 归一化透射差值 D 的理论计算分布情况如图 14 所示。指数 n 越小, 代表整体金属含量越高。可以发现, 金属含量不同, 改变冲击方向对透射信号影响不同, 在指数 $n = 1$ 附近, 透射差值 D 出现极大值, 此时改变冲击方向对透射结果影响最大, 即此材料在该梯度成分下冲击方向敏感性最高。

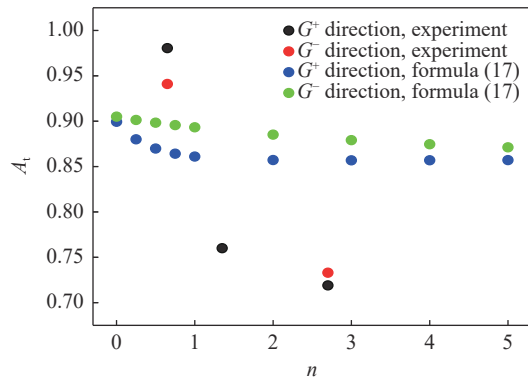


图 13 透射系数的实验结果及理论分布情况
Fig. 13 Variation of the transmission coefficient with gradient direction based on experiment and theoretical calculation

考虑谐波入射, 即进一步分析谐波频率对透射信号的影响, 改变入射角频率 ω 得到不同入射频率下透射系数 A_t 指数 n 变化曲线如图 15 所示。根据加载时长, 角频率 ω 取值范围为 $100\,000 \sim 250\,000 \text{ s}^{-1}$, 增量为 $50\,000 \text{ s}^{-1}$ 。随着角频率的增大, 透射信号 A_t 曲线逐渐向下偏移, 偏移幅值接近 0.04。如图 16 所示, 改变冲击方向, 归一化透射系数差值 D 略有下降。对于相同梯度指数 n , 角频率 ω 越大, 对应归一化透射系数差值 D 越小。综上, 谐波入射频率对分层梯度材料透射系数具有一定影响, 不同频率入射频率下, 材料表现出不同程度的冲击方向敏感性。

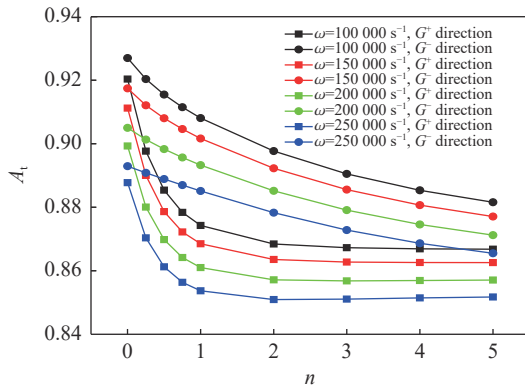


图 15 不同入射角频率下透射系数的分布
Fig. 15 Distribution of transmission coefficients at different incident angular frequencies

实验加载过程中, 复合材料内部部分金属颗粒会进入塑性状态, 同时制造工艺存在差异, 会导致材料的实际模量和理论值有所不同。对金属模量进行折减, 陶瓷材料模量保持不变, 讨论不同模量组合对透射信号冲击方向敏感性的影响。金属材料模量 E 取值范围为 $150 \sim 225 \text{ GPa}$ 。如图 17 所示, 改变金属模量取值, 归一化透射系数差值 D 分布分化明显。模量取值越大, 参数 D 的极大值越小。已知 ZrC 陶瓷材料模量为 390 GPa , 金属模量越小, 则陶瓷组分和金属组分的模量比越大, 波阻抗差异越大, 此时, 改变冲击方向对归一化透射系数差值 D 的影响也更大。综上, 将归一化透射系数差值 D 作为材料冲击方向的敏感性参数, 可以得到的结论是: 金属模量越小, 陶瓷材料和金属材料模量比越大, 两者波阻抗差异越大, 透射系数对冲击方向的敏感性更高。

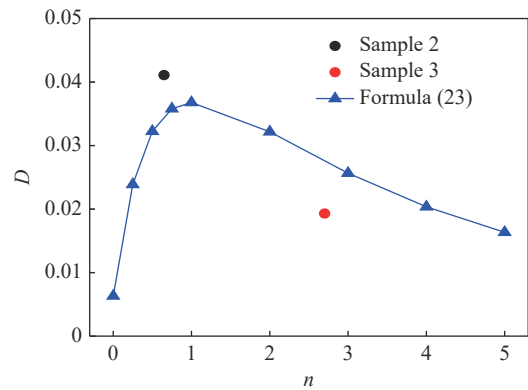


图 14 改变冲击方向归一化透射系数差值分布情况
Fig. 14 Variation of the normalized transmission difference with gradient exponent

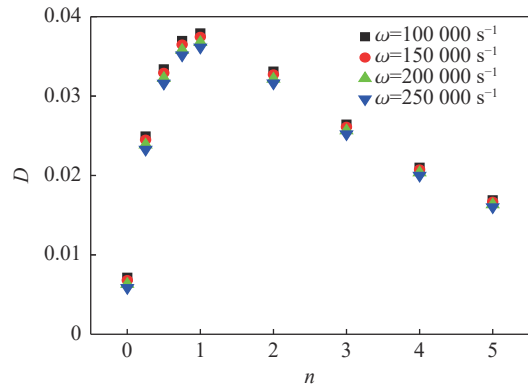


图 16 不同入射角频率下归一化透射系数差值的分布
Fig. 16 Distribution of normalized transmission differences at different incident angular frequencies

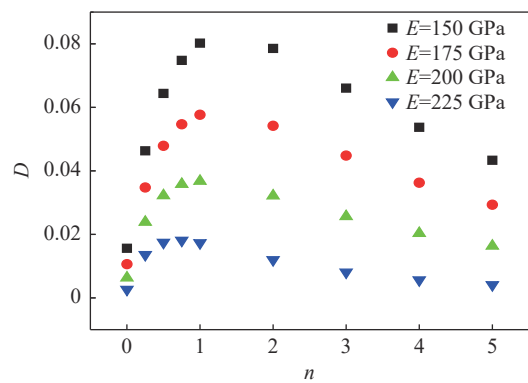


图 17 不同模量下归一化透射系数差值的分布
Fig. 17 Distribution of normalized transmission differences at different moduli

5 结 论

利用 SHPB 结合高速摄影技术, 对不同梯度结构和冲击方向的 Mo-ZrC 分层梯度金属陶瓷低速冲击响应进行了研究。通过 DIC 技术追踪了材料表面变形演化过程。以一维应力波理论为基础揭示了分层梯度材料内部波传播规律, 获得如下主要规律。

(1) 在相同加载条件下, 样品整体性质与金属 Mo 的含量密切相关, 金属含量较高的梯度结构表现出更高的强度, 同时能够更好地保持破碎产物完整性。梯度结构设计对分层梯度材料的冲击响应起到重要调控作用, 对材料优化具有重要意义。

(2) 样品的冲击压缩过程主要包括压紧阶段、微裂纹成核发展阶段和中心贯穿阶段。样品初始缺陷产生位置、破碎次序以及破坏模式与梯度结构密切相关。改变梯度结构, 可以起到控制破坏模式发展的作用。

(3) 结合 DIC 技术以等效应变增量的形式追踪材料表面变形发展过程, 发现存在富陶瓷区域从等效应变场发展向微裂纹成核累积的阶段转变。

(4) 改变冲击方向对分层梯度材料应力波传播行为具有一定影响, 不同梯度结构、材料模量组合对冲击方向敏感性不同。

参考文献:

- [1] UDUPA G, RAO S S, GANGADHARAN K V. Functionally graded composite materials: an overview [J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 5: 1291–1299. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.442.
- [2] SALEH B, JIANG J H, FATHI R, et al. 30 years of functionally graded materials: an overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 201: 108376. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108376.
- [3] LARSON R A, PALAZOTTO A N, GARDENIER H E. Impact response of titanium and titanium boride monolithic and functionally graded composite plates [J]. *AIAA Journal*, 2009, 47(3): 676–691. DOI: 10.2514/1.38577.
- [4] QI Q, JI W, LI Q N, et al. Integrated preparation and enhanced performance of high-melting-point ZrC-Mo multilayer graded materials [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(14): 20769–20777. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.04.057.
- [5] LI Y, RAMESH K T, CHIN E S C. Dynamic characterization of layered and graded structures under impulsive loading [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(34/35): 6045–6061. DOI: 10.1016/S0020-7683(00)00364-4.
- [6] WU T, HU Y, LENG Y L, et al. *In situ* observation of fracture in homogeneous and functionally graded 6061Al/SiC_p composites [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 830: 142279. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142279.
- [7] JIA M Y, CHEN F, WU Y Q, et al. Microstructure and shear fracture behavior of Mo/AlN/Mo symmetrical compositionally graded materials [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 834: 142591. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142591.
- [8] KEDIR N, KIRK C D, GUO Z R, et al. Real-time visualization of impact damage in monolithic silicon carbide and fibrous silicon carbide ceramic composite [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 129: 168–179. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.01.012.
- [9] ZHU B, CAI Y J. A strain rate-dependent enhanced continuum model for elastic-plastic impact response of metal-ceramic functionally graded composites [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 133: 103340. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103340.
- [10] MOVAHEDI N, FIEDLER T, TAŞDEMIRCI A, et al. Impact loading of functionally graded metal syntactic foams [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 839: 142831. DOI: 10.1016/j.msea.2022.142831.
- [11] KOOHBOR B, KIDANE A. Design optimization of continuously and discretely graded foam materials for efficient energy absorption [J]. *Materials and Design*, 2016, 102: 151–161. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.031.
- [12] XIAO D B, DONG Z C, LI Y, et al. Compression behavior of the graded metallic auxetic reentrant honeycomb: experiment and finite element analysis [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 758: 163–171. DOI: 10.1016/j.msea.2019.04.116.

- [13] KOOHBOR B, RAVINDRAN S, KIDANE A. *In situ* deformation characterization of density-graded foams in quasi-static and impact loading conditions [J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2021, 150: 103820. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103820.
- [14] CHEN X, CHANDRA N. The effect of heterogeneity on plane wave propagation through layered composites [J]. [Composites Science and Technology](#), 2004, 64(10/11): 1477–1493. DOI: 10.1016/j.compscitech.2003.10.024.
- [15] BRUCK H A. A one-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves [J]. [International Journal of Solids and Structures](#), 2000, 37(44): 6383–6395. DOI: 10.1016/S0020-7683(99)00236-X.
- [16] KATOH Y, VASUDEVAMURTHY G, NOZAWA T, et al. Properties of zirconium carbide for nuclear fuel applications [J]. [Journal of Nuclear Materials](#), 2013, 441(1/2/3): 718–742. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.05.037.
- [17] LANDWEHR S E, HILMAS G E, FAHRENHOLTZ W G, et al. Microstructure and mechanical characterization of ZrC-Mo cermets produced by hot isostatic pressing [J]. [Materials Science and Engineering: A](#), 2008, 497(1/2): 79–86. DOI: 10.1016/j.msea.2008.07.017.
- [18] CHENG J Y, NEMAT-NASSER S, GUO W G. A unified constitutive model for strain-rate and temperature dependent behavior of molybdenum [J]. [Mechanics of Materials](#), 2001, 33(11): 603–616. DOI: 10.1016/S0167-6636(01)00076-X.
- [19] LI Y, FENG Z Y, HAO L, et al. A review on functionally graded materials and structures via additive manufacturing: from multi-scale design to versatile functional properties [J]. [Advanced Materials Technologies](#), 2020, 5(6): 1900981. DOI: 10.1002/admt.201900981.
- [20] HUANG J Y, LU L, FAN D, et al. Heterogeneity in deformation of granular ceramics under dynamic loading [J]. [Scripta Materialia](#), 2016, 111: 114–118. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.08.028.
- [21] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale [J]. [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts](#), 1980, 17(3): 147–157. DOI: 10.1016/0148-9062(80)91361-3.
- [22] 徐松林, 刘永贵, 席道瑛. 岩石物理与动力学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2019: 159–163.
XU S L, LIU Y G, XI D Y. Rock physics and dynamics principle [M]. Beijing, China: Science Press, 2019: 159–163.
- [23] 李毅, 苗春贺, 徐松林, 等. 梯度密度黏弹性材料的波传播研究 [J]. [爆炸与冲击](#), 2021, 41(1): 013202. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0313.
LI Y, MIAO C H, XU S L, et al. Wave propagation in density-graded viscoelastic material [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2021, 41(1): 013202. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0313.

(责任编辑 张凌云)