

SiC/Al 双连通复合装甲材料抗侵彻性能宏-微观跨尺度模拟

李国举, 范群波, 王扬卫, 史 然

(北京理工大学 材料学院, 冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081)

摘 要: SiC/Al 双连通复合装甲材料所具有的复杂三维微结构特征对其宏观抗侵彻性能具有重要影响。本文建立了从宏观靶试模型中 SiC/Al 靶板的典型微区提取动态边界条件, 并作用于相应微观组织模型的跨尺度数值模拟方法, 研究了 SiC/Al 靶板在抗侵彻过程中不同典型局部微区内的动态微结构损伤及失效过程。研究表明: 在弹着点正下方位置, 多个裂纹源萌生于两相界面处靠近陶瓷相一侧, 随后沿与弹道平行的方向扩展并形成轴向主裂纹; 在与弹体轴线呈 45°位置, 裂纹除了在靠近界面处的陶瓷相一侧萌生外, 在陶瓷相内部也出现了与弹道方向垂直的多条水平裂纹, 界面裂纹与水平裂纹进一步扩展并桥连成多个锥形主裂纹。相关模拟方法为将来该类材料的微结构优化提供了一种新的技术途径。

关 键 词: SiC/Al 双连通复合材料; 宏-微观跨尺度模拟; 动态损伤及失效过程

中图分类号: TB333 文献标识码: A

Multi-scale Simulation of Interpenetrating SiC/Al Composite Armor Materials Subjected to Impact Loading Using a Macro-micro Approach

LI Guo-Ju, FAN Qun-Bo, WANG Yang-Wei, SHI Ran

(National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under Shock and Impact, School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Since the macro anti-penetration performance of interpenetrating SiC/Al composite is controlled mainly by the complex three-dimensional microstructure features. Multi-scale simulation of SiC/Al composite under impact loading was performed by using a macro-micro method. The simulation for macro SiC/Al composite armor plate under impact loading was employed first, then the dynamic boundary conditions from the typical local regions in SiC/Al composite were obtained and applied on its microstructural finite element model as a loading condition to analyze the dynamic damage and failure process in the typical local regions. The results revealed that, in the local region right below the impact point, the cracks initiated mainly near the SiC/Al interface, just on the side of the SiC ceramic phase, then continuously propagated parallel to the direction of the bullet axis and eventually converged together to form axial main cracks. Meanwhile, in the region at a 45° angle to the direction of bullet axis, the cracks initiated not only near the SiC/Al interface but also inside the ceramic phase. Subsequently, these cracks propagated, bridged and finally formed cone main cracks. This simulation method provides a feasible technical approach for microstructure topology optimization of the material.

Key words: interpenetrating SiC/Al composites; macro-micro multi-scale simulation; dynamic damage and failure process

收稿日期: 2016-06-20; 收到修改稿日期: 2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(51571031) Natural National Science Foundation of China (51571031)

作者简介: 李国举(1986-), 男, 博士研究生. E-mail: guojuzuishuai@163.com

通讯作者: 范群波, 副教授. E-mail: fanqunbo@bit.edu.cn

陶瓷/金属双连通复合装甲材料具有高比强度和高比模量等优点^[1-3],且陶瓷相和金属相在三维空间互相穿插、连续分布,使其能够在受到冲击载荷作用的瞬间,大范围内传递和分散载荷、耗散动量,从而有效阻挡入射弹体的侵彻,并在宏观上保持一定的结构完整性。目前陶瓷/金属双连通复合装甲材料已成为最具潜力的轻质装甲防护材料之一,并且其在理论研究和工程应用上得到业界越来越多的关注^[4-6]。

长期以来,由于双连通结构的复杂性,对于该类材料理论方面的研究一直滞后于实验研究。随着近年来有限元技术的发展,通过数值模拟技术可以跟踪材料失效过程中的微结构演变历程,从而为理论分析提供技术支撑。Wegner 等^[7]和 Feng 等^[8]采用理想单胞模型模拟了不锈钢/青铜双连通结构复合材料在单轴压缩载荷下的弹塑性力学行为。Jhaver 等^[9]也基于理想单胞模型模拟了铝合金/复合塑料双连通结构复合材料在动态压缩载荷下的失效行为。但理想单胞模型简化了双连通复合材料内部各相的截面形状,忽略了三维取向等细节特征,因此会对计算结果精确性造成一定影响。Poniznik 等^[6]基于微观三维断层扫描设备构建了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 双连通结构复合材料三维微观组织模型,并研究了材料在单轴压缩载荷下的裂纹桥连过程。以上方法构建的微观组织模型更接近材料的真实三维微观组织,但由于采用了简化的周期性边界条件模拟材料宏观承载条件,无法体现材料在不同微区真实的复杂受力状态。

鉴于这一现状,本工作借助 Micro-CT 及有限元技术,针对 SiC/Al 双连通复合装甲材料建立了宏-微观跨尺度模拟方法^[10],再现了该类材料在抗 7.62 mm 穿燃弹侵彻过程中三维微观结构的动态损伤及失效行为,以期揭示其在近真实复杂加载条件下的失效机制。

1 SiC/Al 双连通复合装甲材料抗侵彻过程宏-微观跨尺度有限元模拟方法

本研究中 SiC/Al 双连通复合材料是采用 ZYQ250/400-2.1000 型真空压力浸渍炉在真空条件下向表观孔隙率为 21.88% 的 SiC 骨架多孔陶瓷预制体中浸渗金属铝熔体制得的一种轻质复合装甲材料,其中浸渗温度为 760℃,保温时间为 110 min,浸渗压力为 5 MPa。

1.1 靶板宏观结构抗侵彻过程有限元模拟

采用 53 式 7.62 mm 穿燃弹正面侵彻 100 mm×100 mm×5 mm SiC/Al 双连通复合装甲材料面板和 100 mm×100 mm×6 mm 45#钢板,弹体着靶速度为 800 m/s,利用非线性动力学有限元软件 LS-Dyna 模拟弹靶作用过程。为了节省计算时间,采用四分之一有限元模型,如图 1 所示。在 $x=0$ 和 $y=0$ 两个平面设置对称边界条件,对 45#钢背板底端面外侧 20~25 mm 区域内节点施加沿 y 方向的位移约束。接触类型为自动单面侵蚀接触,单元类型为 Solid164 单元。其中,弹体和 45#钢背板采用 Johnson-Cook 模型^[11-12],SiC/Al 双连通复合装甲材料采用 JH-2 模型^[13]。

对于 JH2 材料本构模型,对材料等效应力分量和静水压力分量进行归一化处理,使很多材料参数无量纲化。材料强度通过完整材料强度、材料破坏后强度、应变率和损伤来描述。强度的无量纲表达式如式(1~3)所示。

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D_{\text{JH2}} (\sigma_i^* - \sigma_f^*)_{0 < D_{\text{JH2}} < 1} \quad (1)$$

$$\sigma_i^* = A_{\text{JH2}} (P^* + T_{\text{JH2}}^*)^{n_{\text{JH2}}} (1 + C_{\text{JH2}} \ln \dot{\varepsilon}_{\text{JH2}}^*)_{D_{\text{JH2}}=0(\text{intact})} \quad (2)$$

$$\sigma_f^* = B_{\text{JH2}} P^{*m_{\text{JH2}}} (1 + C_{\text{JH2}} \ln \dot{\varepsilon}_{\text{JH2}}^*)_{D_{\text{JH2}}=1(\text{fractured})} \quad (3)$$

其中, σ^* 、 σ_i^* 、 σ_f^* 分别为材料归一化等效应力、完整材料等效应力和破坏后材料等效应力; P^* 是归一化静水压力,如式(4)描述; T_{JH2}^* 为归一化最大静水拉伸强度,如式(5)描述; A_{JH2} , B_{JH2} , C_{JH2} , n_{JH2} , m_{JH2} 为材料常数; $\dot{\varepsilon}_{\text{JH2}}^*$ 为归一化应变率,如式(6)描述; D_{JH2} 为材料损伤参数,如式(7)描述。

$$P^* = P/P_{\text{HEL}} \quad (4)$$

$$T_{\text{JH2}}^* = T_{\text{MAX}}/P_{\text{HEL}} \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\text{JH2}}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 \quad (6)$$

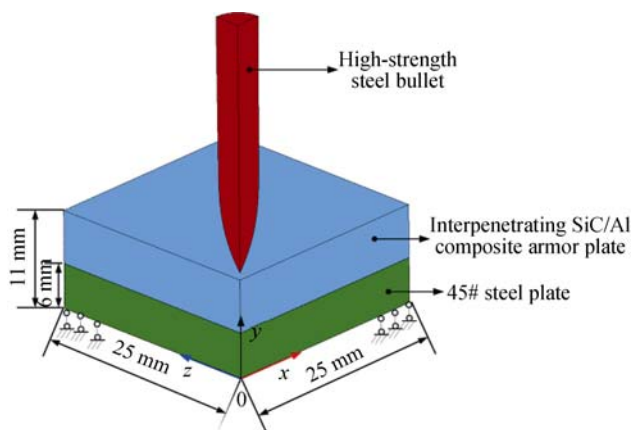


图 1 宏观靶试 1/4 有限元模型

Fig. 1 Macro 1/4 finite element model under impact loading

$$D_{JH2} = \sum \Delta \varepsilon_e^p / \varepsilon_f^p \quad (7)$$

其中, P 为静水压力, P_{HEL} 为雨贡纽弹性极限下静水压力, T_{MAX} 为材料承受最大静水拉伸强度, $\dot{\varepsilon}$ 是材料实际等效应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为材料参考应变率, $\Delta \varepsilon_e^p$ 是等效塑性应变在任意载荷步下的增量, ε_f^p 为在静水压力 P 下材料断裂应变, 见式(8)描述。

$$\varepsilon_f^p = D_{JH2-1} (P^* + T_{JH2}^*)^{D_{JH2-2}} \quad (8)$$

其中, D_{JH2-1} 、 D_{JH2-2} 为材料损伤常数。

Johnson-Cook 本构描述了材料在塑性变形过程中流动应力和有效塑性应变、应变率、温度的关系, 如式(9)所示。

$$\sigma_y = [A + B(\varepsilon_e^p)^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (9)$$

其中, σ_y 为等效应力; ε_e^p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^*$ 归一化等效塑性应变率; T^* 为归一化温度, 如式(10)描述, A 、 B 、 n 、 C 和 m 为材料常数。

$$T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r) \quad (10)$$

其中, T_m 与 T_r 为材料的熔点与室温。

材料失效应变由式(11~12)描述, 当损伤参数 $D_{J-C}=1$ 时材料完全失效。

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma_{JC}^*)^n][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^{*m}] \quad (11)$$

$$D_{J-C} = \sum \Delta \varepsilon_e^p / \varepsilon_f^p \quad (12)$$

其中, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 为材料失效相关常数, σ_{JC}^* 为应力三轴度, D_{J-C} 为材料损伤参数, $\Delta \varepsilon_e^p$ 是等效塑性应变在任意载荷步下的增量, ε_f^p 为在静水压力 P

下材料断裂应变。

1.2 基于材料真实微观组织的三维建模

为了增强两相衬度, 实现 SiC/Al 双连通复合材料三维微结构的准确采集, 本研究利用 Micro-CT (Sky-Scan1172) 首先对 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ SiC 多孔陶瓷预制体进行三维断层扫描与重构, 之后通过反填充技术在孔隙位置构建 Al 相的三维结构。如图 2 所示, 样品固定在样品台上随样品台一起旋转, 每旋转 0.7° 获得一张样品 X 射线投影图, 旋转角度范围为 180° , X 射线管电压为 70 kV, 扫描样品分辨率为 $2.2 \mu\text{m}$; 随后利用 NRecon 软件对不同角度获得的一系列投影图进行选区和重构处理, 获得尺寸为 $660 \mu\text{m} \times 660 \mu\text{m}$ 共 300 层的一系列断层图片; 利用 CTan 软件对断层图片进行二值化处理(见图 3), 之后将二值化处理后的图片导入到 Simpleware 软件内获得 SiC 陶瓷预制体微结构三维模型, 利用反填充技术获得金属 Al 相的微观结构三维模型及复合材料模型(见图 4); 最后利用 Simpleware 软件的 Scan+FE 模块进行基于体素的网格剖分操作, 获得具有纯六面体网格的 SiC/Al 双连通复合装甲材料三维微观组织结构有限元模型(见图 5)。这里 SiC 多孔陶瓷相和金属铝相的材料本构分别采用 JH-2 模型^[14]和 Johnson-Cook 模型^[15]。

1.3 宏-微观跨尺度数值模拟方法

本文中的“宏观尺度”是指尺度在毫米量级及以上; “微观尺度”是指尺度在微米量级。长期以来, 针对这两个尺度的数值模拟研究相对独立, 缺乏有效的跨尺度模拟方法将两者关联起来, 特别是难以再

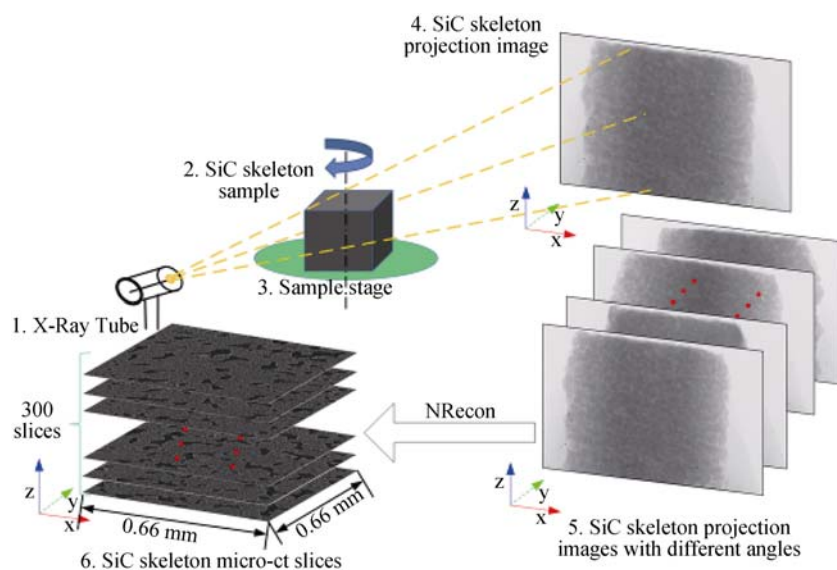


图2 SiC 多孔陶瓷预制体样品 CT 扫描及重构过程

Fig. 2 Process of micro-CT scanning and reconstruction of SiC skeleton

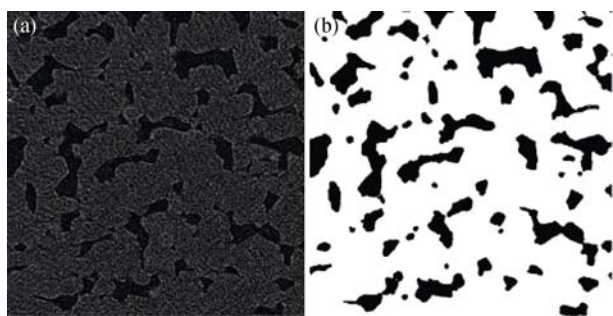


图 3 Micro-CT 三维断层图像二值化处理示意图

Fig. 3 Schematic of binarization process of Micro-CT slice images

(a) Unprocessed Micro-CT slice image; (b) Processed Micro-CT slice image

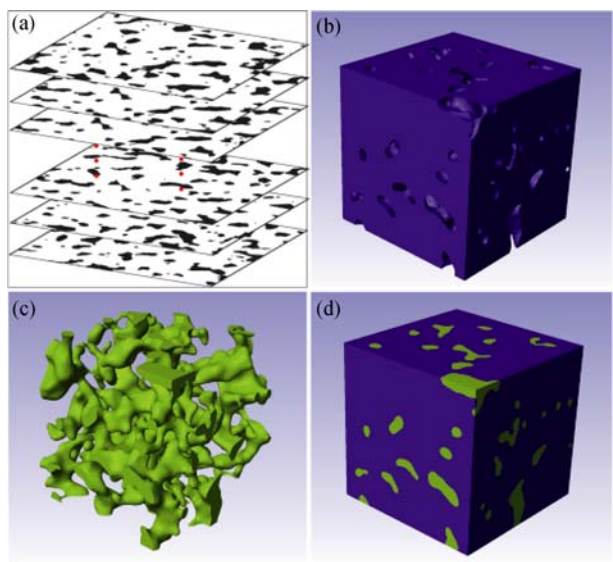


图 4 基于 Simpleware 生成 SiC/Al 双连通复合装甲材料三维微观组织模型构建过程

Fig. 4 Process of reconstruction of 3D microstructure model for SiC/Al composite using Simpleware software

(a) Binary micro-CT slice images of SiC skeleton; (b) 3D microstructure model of SiC skeleton; (c) 3D microstructure model of Al phase; (d) 3D microstructure model of SiC/Al composite

现宏观结构件局部微区复杂的受力状态。而本工作所提出的跨尺度数值模是基于 LS-Dyna 软件具有的载荷信息提取和施加功能, 首先针对宏观结构件按真实的服役环境加载, 进行有限元模拟; 之后, 利用其模型边界载荷信息提取功能, 在宏观结构模型中选定待研究的微区, 并获得微区边界处应力、应变、位移等随时间变化的载荷信息; 最后, 利用其载荷施加功能将载荷信息施加至复合材料 3D 微观组织有限元模型上, 进行有限元模拟。按此方法, 可以提取出宏观结构件任意微区的复杂载荷信息, 并施加至微观尺度的 3D 微观组织有限元模型中, 从而建立起宏观与微观两种尺度的有效关联。在本工作中, SiC/Al 双连通复合材料抗侵彻宏-微观跨尺度模

拟实现过程如图 6 所示, 利用 LS-Dyna 软件首先在靶板宏观结构模型中选定待研究微区, 进行如前述的弹靶作用过程模拟并输出该微区载荷信息; 将载荷施加于前述的 SiC/Al 双连通复合材料微观组织三维模型轮廓上, 模拟其动态响应过程, 最终实现宏观靶试-复合材料微观组织的跨尺度有限元模拟。

2 有限元模拟结果及讨论

2.1 宏观靶板结构抗侵彻过程模拟结果分析

图 7 为 SiC/Al 双连通复合装甲材料靶板抗侵彻过程中损伤云图, 可见 SiC/Al 材料损伤位置主要分布在弹着点位置正下方(微区 I)和与弹道方呈 45°角的锥形区域(微区 II)。图 8 为靶试试验后的 SiC/Al 双连通复合装甲材料的 SEM 照片, 可知模拟结果中的损伤区域与靶试试验后的裂纹分布区域

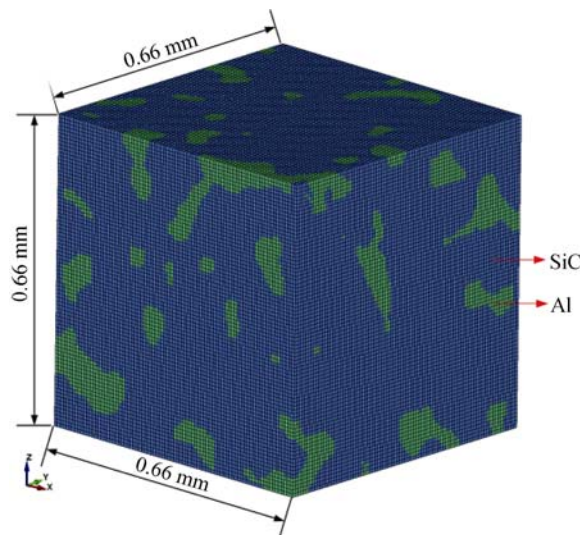


图 5 SiC/Al 双连通复合材料微观组织有限元模型

Fig. 5 3D finite element microstructure model of SiC/Al composite

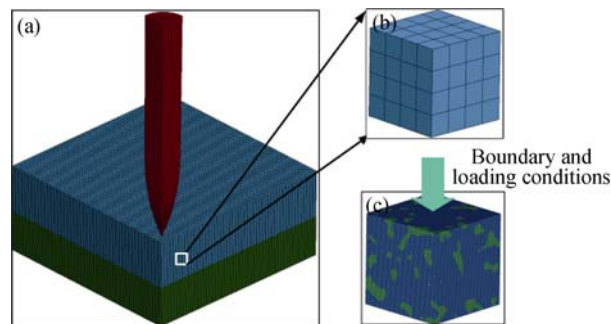


图 6 跨尺度有限元模拟示意图

Fig. 6 Schematic of multi-scale simulation

(a) Macro finite element model for SiC/Al composite armor under impact loading, (b) local 3D model and (c) 3D microstructure finite element model

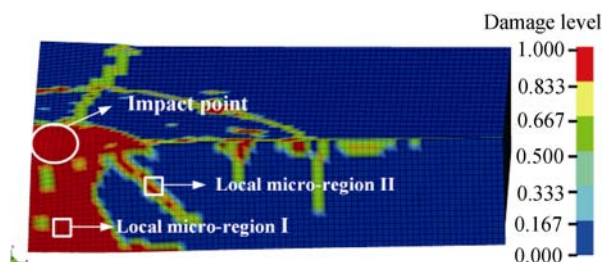


图7 SiC/Al 双连通复合装甲材料抗侵彻损伤云图
Fig. 7 Damage contour of SiC/Al armor composite

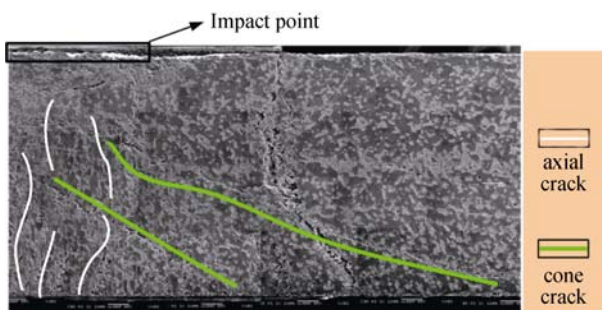


图8 靶试试验后的 SiC/Al 双连通复合装甲材料 SEM 照片
Fig. 8 SEM image of SiC/Al composite after target test

吻合,在此基础上,基于1.3节所述宏观结构局部微区位置载荷等效移植方法,分别提取靶板内不同损伤位置区域(微区 I、微区 II)内的载荷信息并加载到1.2节所构建的基于真实微观结构的三维微观组织有限元模型上并进行求解。

2.2 SiC/Al 双连通复合装甲材料靶板典型区域内破坏过程分析

如图9所示,为了更直接体现 SiC/Al 双连通复合材料内部失效过程,通过平行于 yz 面的平面切割模型得到模型后半部分,并将失效过程按程度分为沿界面萌生和扩展及桥连形成主裂纹两个过程。

2.2.1 微区 I 位置处失效过程

微区 I 材料内部裂纹萌生过程如图10所示:当 $t=2.5 \mu\text{s}$ 时,裂纹首先在两相界面处靠近陶瓷相一侧产生,直到 $t=2.5 \mu\text{s}$ 时裂纹在材料内部各个界面

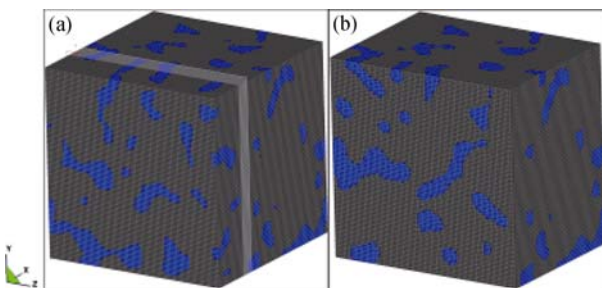


图9 SiC/Al 双连通复合装甲材料三维微观组织模型
Fig. 9 3D microstructure model of SiC/Al composite
(a) Schematic of the vertical cutting site and (b) cross-section after cutting

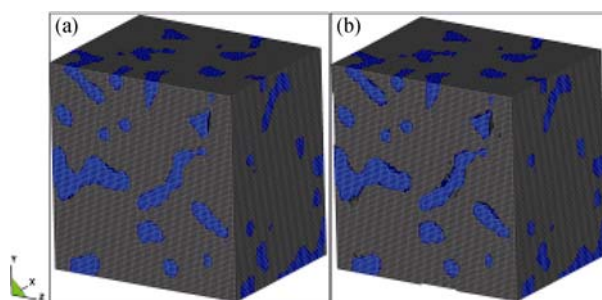


图10 裂纹在界面处的萌生过程
Fig. 10 Initiation process of crack near the interface of SiC and Al phases
(a) $t=2.5 \mu\text{s}$; (b) $t=3.5 \mu\text{s}$

处产生多处裂纹,此阶段材料界面处开裂是最主要现象。

接着各个离散分布的裂纹开始互相连接并形成与2.1节试验观察到的轴向主裂纹,其主裂纹形成过程如图11所示:当 $t=4.0 \mu\text{s}$ 时,裂纹继续在界面处扩展并开始向陶瓷内部扩展,扩展方向大致与轴向平行;当 $t=6.0 \mu\text{s}$ 时,离散分布的裂纹之间开始产生桥连;当 $t=6.5 \mu\text{s}$ 时,形成了贯穿整个模型的两个轴向主裂纹。随后,在主裂纹部分产生更多的分支裂纹,在 $t=8.5 \mu\text{s}$ 时最终交织成网状。

2.2.2 微区 II 位置处失效过程

微区 II 模型中裂纹萌生过程如图12所示:在 $t=4.5 \mu\text{s}$ 时,界面靠近陶瓷相一侧开始产生裂纹,随后,裂纹绕界面扩展并在陶瓷相内部产生新的垂直于轴向的水平裂纹,当 $t=7.0 \mu\text{s}$ 时模型内部产生多处离散分布的界面裂纹和陶瓷相内部的水平裂纹。

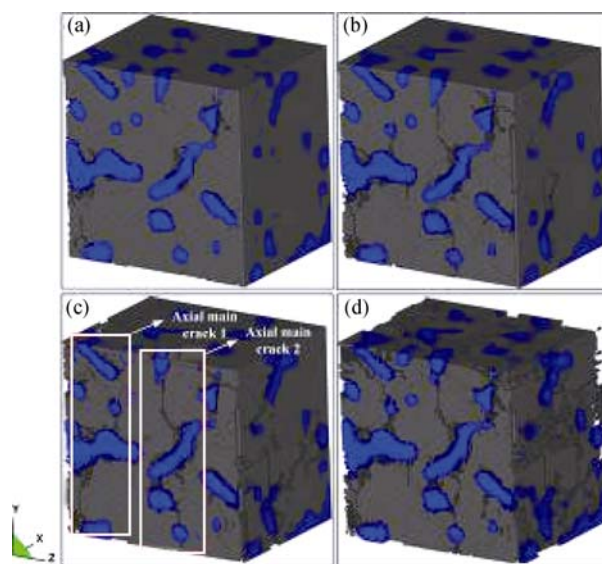


图11 轴向主裂纹的形成过程
Fig. 11 Formation process of axial cracks
(a) $t=4.0 \mu\text{s}$; (b) $t=6.0 \mu\text{s}$; (c) $t=6.5 \mu\text{s}$; (d) $t=8.5 \mu\text{s}$

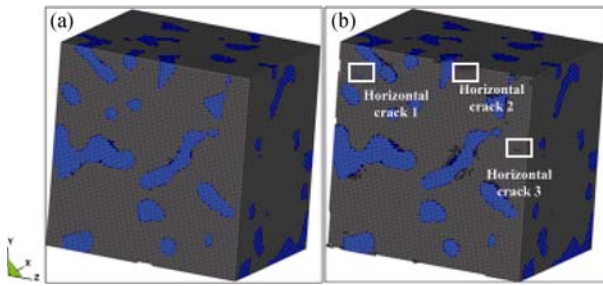


图 12 裂纹绕界面的扩展过程

Fig. 12 Propagation process of crack along the interface of SiC and Al phases

(a) $t=4.5 \mu\text{s}$; (b) $t=7.0 \mu\text{s}$

之后, 各个离散的界面裂纹和陶瓷相内部的水平裂纹进一步扩展并桥连形成 2.1 节试验观察到的锥形裂纹, 其锥形主裂纹形成过程如图 13 所示: 当 $t=7.5 \mu\text{s}$ 时, 在陶瓷相内部产生更多的离散分布的水平裂纹; 当 $t=8.0\sim 9.0 \mu\text{s}$ 时, 界面裂纹开始向陶瓷相内部扩展并与水平裂纹搭接, 扩展方向与轴向夹角呈 45° , 两界面处的裂纹开始桥连, 桥连方向为 45° 方向; 当 t 达到 $11.0 \mu\text{s}$ 时形成两条锥形主裂纹。

3 结论

1) 根据相关靶试试验进行了宏观结构尺寸下的 SiC/Al 双连通复合装甲材料抗 7.62 mm 穿燃弹侵彻有限元模拟, 并将数值模拟获得损伤云图与靶试后 SiC/Al 材料的 SEM 照片进行了对比, 损伤位置与靶板裂纹区域一致;

2) 利用 MicroCT 技术、相应图像处理和网格剖分技术获得了 SiC/Al 材料三维微观组织有限元模型,

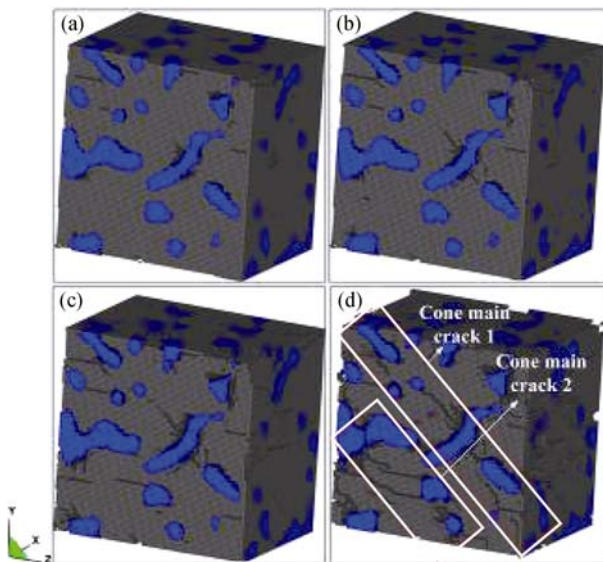


图 13 锥状裂纹的形成过程

Fig. 13 Formation process of the cone cracks

(a) $t=7.5 \mu\text{s}$; (b) $t=8.0 \mu\text{s}$; (c) $t=9.0 \mu\text{s}$; (d) $t=11.0 \mu\text{s}$

通过提取宏观结构尺寸下的 SiC/Al 靶板抗侵彻过程中典型微区的载荷信息并施加到材料三维微观组织有限元模型上, 从而实现跨尺度模拟 SiC/Al 抗侵彻过程中的失效行为;

3) 在弹着点正下方位置, 裂纹源首先在两相界面处靠近陶瓷相一侧萌生, 且会产生多处裂纹源。随后这些裂纹源沿与弹道平行的方向扩展并相互关联, 最终形成贯穿整个模型的轴向主裂纹; 在与弹体轴线呈 45° 位置, 除了形成分布在两相界面处的界面裂纹外, 陶瓷相内部也出现与弹道方向垂直的多条水平裂纹, 界面裂纹与水平裂纹进一步扩展并桥连成多个锥形主裂纹。

参考文献:

- [1] ZHANG X H, HONG C Q, HAN J, *et al.* Microstructure and mechanical properties of TiB 2/(Cu, Ni) interpenetrating phase composites. *Scripta Mater.*, 2006, **55**(6): 565–568.
- [2] SAN MARCHI C, KOUZELI M, RAO R, *et al.* Alumina–aluminum interpenetrating-phase composites with three-dimensional periodic architecture. *Scripta Mater.*, 2003, **49**(9): 861–866.
- [3] TILBROOK M T, MOON R J, HOFFMAN M. On the mechanical properties of alumina–epoxy composites with an interpenetrating network structure. *Mater. Sci. Eng., A*, 2005, **393**(1/2): 170–178.
- [4] CHANG H, BINNER J, HIGGINSON R, *et al.* High strain rate characteristics of 3-3 metal–ceramic interpenetrating composites. *Mater. Sci. Eng., A*, 2011, **528**(6): 2239–2245.
- [5] CHANG H, BINNER J, HIGGINSON R, *et al.* Preparation and characterisation of ceramic-faced metal–ceramic interpenetrating composites for impact applications. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2011, **46**(15): 5237–5244.
- [6] PONIZNIK Z, SALIT V, BASISTA M, *et al.* Effective elastic properties of interpenetrating phase composites. *Comput. Mater. Sci.*, 2008, **44**(2): 813–820.
- [7] WEGNER L D, GIBSON L J. The mechanical behaviour of interpenetrating phase composites—I: modelling. *Int. J. Mech. Sci.*, 2000, **42**(5): 925–942.
- [8] FENG X Q, MAI Y W, QIN Q H. A micromechanical model for interpenetrating multiphase composites. *Comput. Mater. Sci.*, 2003, **28**(3): 486–493.
- [9] JHAVER R, TIPPUR H. Processing, compression response and finite element modeling of syntactic foam based interpenetrating phase composite (IPC). *Mater. Sci. Eng., A*, 2009, **499**(1): 507–517.
- [10] YANG D S, ZHANG H W, ZHANG S, *et al.* A multiscale strategy for thermo-elastic plastic stress analysis of heterogeneous multiphase materials. *Acta Mech.*, 2015, **226**(5): 1549–1569.
- [11] CHEN G, CHEN X W, CHEN F Z, *et al.* Study on the damage parameters of J-C material model for 45# steel. *Explosion and Shock Waves*, 2007, **27**(2): 131–135.
- [12] CHEN G, CHEN X W, CHEN F Z, *et al.* Numerical study on the damage behavior of 45# steel plate subjected to impact by blunt projectile of A3 steel. *Explosion and Shock Waves*, 2007, **27**(5): 390–397.
- [13] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials. *AIP Conf. Proc.*, 2006, **55**(6): 565–568.
- [14] SHAFIQ M, SUBHASH G. Dynamic deformation characteristics of zirconium diboride-silicon carbide under multi-axial confinement. *Int. J. Impact Eng.*, 2016, **91**: 158–169.
- [15] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt- and hemispherical-nosed projectiles. *Int. J. Impact Eng.*, 2006, **32**(12): 1921–1944.