

文章编号: 1001-1455(2005)06-0493-06

SiC 增强颗粒分布规律对梯度装甲板 抗侵彻过程的影响*

蒋宝权, 李玉龙, 刘元镛, 虞青俊

(西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 利用 LS-DYNA 软件, 对 SiC 颗粒增强铝合金复合材料的增强相体积百分含量沿厚度连续分布的梯度装甲板进行了抗侵彻过程的数值分析。给出了四种 SiC 体积含量连续分布的梯度板模型抗侵彻过程的数值计算结果, 并与钢板材料进行比较。结果表明: 改变梯度装甲板增强颗粒的体积含量沿装甲板厚度方向的分布, 能极大地提高梯度装甲板的抗弹击性能, 大大地降低防护装甲的自身重量。当 SiC 颗粒平均体积含量一定时, SiC 增强颗粒在表面的体积含量越高, 抗侵彻性能越好, 也就是 $f_0 = 0.80$, 参数 $b = 4$ 时, 具有最佳的抗侵彻能力, 比同厚度的钢板要好得多。

关键词: 固体力学; 抗侵彻; LS-DYNA; 梯度装甲板; SiC 增强颗粒

中图分类号: O347

国标学科代码: 130 · 15

文献标志码: A

1 引言

为了提高坦克、装甲车或直升机的生存能力和机动性, 必须有效地提高装甲的防弹击能力和降低自身的重量。现代防护装甲设计中一般用陶瓷装甲板作为前板, 用铝合金、纤维增强复合材料作为背板, 这种复合装甲的缺点是陶瓷前板与铝合金背板的波阻抗失配严重, 使陶瓷板承受侵彻弹时很快崩裂。在承受第二次打击时不能起到防护作用。鉴于陶瓷颗粒增强的金属基复合材料有优越的抗侵彻性能^[1~2], 如果陶瓷颗粒体积含量沿厚度连续变化, 也就是在装甲板的正面有很高陶瓷含量, 具有类似于陶瓷的性质, 在装甲板的背面陶瓷颗粒含量很低, 具有金属的性质。这样, 就可以将陶瓷装甲板与铝合金背板有机的连接, 构成新一代功能梯度装甲板。

由于功能梯度装甲板材料的波阻抗、弹性模量及热膨胀系数沿板厚连续变化, 使一般复合装甲材料界面处的应力集中得到很大缓和。功能梯度装甲板抗侵彻性能不仅与金属基复合材料本身在高变形速率下的力学性能有关, 而且与陶瓷颗粒的形状及体积含量沿厚度的分布规律有关。近几年来, 金属基复合材料在高变形速率下的力学行为的研究, 以及弹塑性应力波在功能梯度材料中的传播特性的研究已取得一定的成果^[3~8]; 功能梯度材料中组分成份沿厚度方向优化设计在提高隔热效率、降低在制备过程中的残余应力方面的研究也取得了很大进展^[9~10]。文献[11]研究了 SiC 组成成分分布规律对功能梯度防护装甲板动态响应的影响, 动态响应主要是研究装甲板在动力冲击下的应力、应变及能量的响应, 其目的是寻求装甲板达到破坏的临界状态, 用应力波传播理论解释破坏过程中不同组分的装甲板其塑性应变和能量变化的力学机理, 它不涉及弹击侵彻过程的研究。本文中, 则主要是研究侵彻后即穿透过程的研究。关于陶瓷颗粒的分布规律对侵彻过程影响的研究至今还未见有报导。

在本文中, 利用 LS-DYNA 对于由 SiC 陶瓷颗粒增强的铝合金金属基复合材料制成的功能梯度装甲板的侵彻过程进行数值模拟, 假设陶瓷颗粒平均体积含量一定, 但沿厚度的分布按双幂函数分布, 幂指数分别取 1、2、3、4 四种情况, 探讨陶瓷体积含量沿厚度分布规律对抗侵彻性能的影响。

* 收稿日期: 2004-11-23; 修回日期: 2005-03-15

基金项目: 国防基础科研基金项目(K1801060811)

作者简介: 蒋宝权(1974—), 男, 硕士研究生。

2 FGM(Functionally graded material)模型

2.1 模型的几何形状

本文中,所考虑计算模型的几何形状为一厚度 $H=25.4$ mm,直径为 $d=200$ mm,四边固支的圆板(靶板),圆板的直径 d 远大于其厚度 H ,如图1所示。在圆板中心位置有一直径为 $d_0=12.7$ mm,长度为 $l_0=51$ mm,头部为半圆球形状的子弹,以速度 v_0 沿板的中心轴线方向侵彻圆板,其中 $v_0=600$ m/s,坐标原点设在圆板中心,向下为正。圆板中材料的组份沿板的厚度方向变化以构成功能梯度板。板的材料设定为陶瓷颗粒增强的铝合金复合材料。组份的变化依赖于陶瓷颗粒的体积含量。

2.2 FGM模型

假设 FGM 模型是陶瓷颗粒增强的金属基复合材料组成,陶瓷颗粒的体积含量沿厚度变化,也就是陶瓷颗粒的体积含量 f 是厚度坐标 z 的函数。李玉龙等^[4]曾讨论了四种功能梯度板在冲击载荷作用下的响应,除匀质板外,其余三种板增强相的体积含量在加载面较高,而在靶板的背面较低,这种设计的目的是尽可能在靶板的背面避免层裂,但其缺点是板的刚度较低。实践表明:如果功能梯度板要兼备前板和背板材料的功能,板的刚度分布就很重要。因此,采用增强相的体积含量沿厚度方向的对称分布是一较好的选择,如图2所示。

本文中主要考虑这种功能梯度板在强冲击载荷作用下的侵彻过程。假设陶瓷颗粒平均体积含量一定的条件下,陶瓷颗粒沿厚度连续变化,并遵循指数函数的规律

$$f(z) = f_0 \left(\left(\frac{z}{H} \right)^b + \left(1 - \frac{z}{H} \right)^b \right) \quad (1)$$

式中: b 为参数,决定了增强相体积含量沿厚度的变化情况,直接影响板的弯曲刚度; f_0 为当 $z=0$ 或 $z=H$ 时的值。这些由幂函数控制的增强相沿厚度的变化中,在板的中间部位,增强相的体积含量最低,而在板的正面和反面两个表面处,增强相的体积含量最高。为了便于比较,取每一种情况下增强相平均体积含量相同,即

$$\bar{f} = \frac{1}{H} \int_0^H f(z) dz = 0.32 \quad (2)$$

在 b 分别取 1、2、3、4 时, f_0 分别取 0.32、0.48、0.64、0.80。其体积含量沿厚度的变化情况如图3所示。

2.3 材料特性的选取

四种功能梯度板的材料为陶瓷颗粒增强的增强相体积含量沿厚度方向变化的铝基复合材料,这些复合材料为弹-粘塑性材料。材料常数由增强相的材料常数、基体的材料常数和各自的体积百分比来确

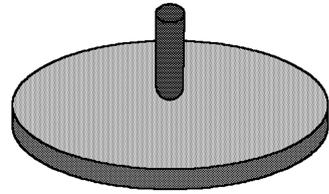


图1 计算模型的几何形状

Fig. 1 Geometry of computational model

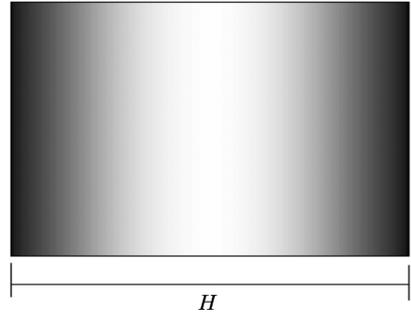


图2 增强相的体积含量沿厚度方向的对称分布

Fig. 2 Symmetry distribution of reinforcement volume fraction along thickness

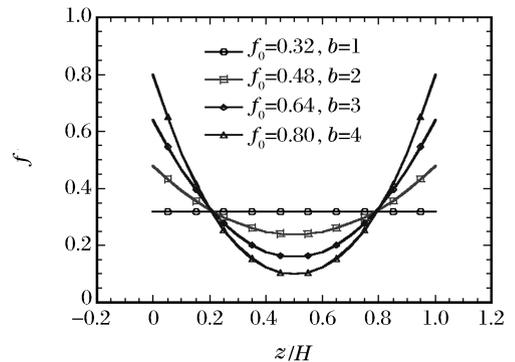


图3 四种连续功能梯度装甲板增强相体积含量沿厚度的分布

Fig. 3 Distribution of reinforcement volume fraction along thickness of four kinds of continuous functionally graded layered armour

定(忽略增强相的形状、尺寸的影响)。复合材料的弹性特性由基体及增强相的弹性特性及体积含量按 Hashin-Shtrikman 方程确定,粘塑性特性由 Li and Ramesh 建立的公式求得,由于篇幅所限,具体方法可参阅文献[5]。材料特性的估算结果见图 4 和表 1。

表 1 中 E 为弹性模量; E_r 为切线模量; σ_s 为屈服应力。为了便于比较,在本文中,模拟了匀质钢板在相同子弹及相同厚度时的侵彻过程,钢板的弹性模量 $E=200$ GPa, $\mu=0.33$, $\sigma_s=800$ MPa,切线模量 $E_r=700$ MPa。

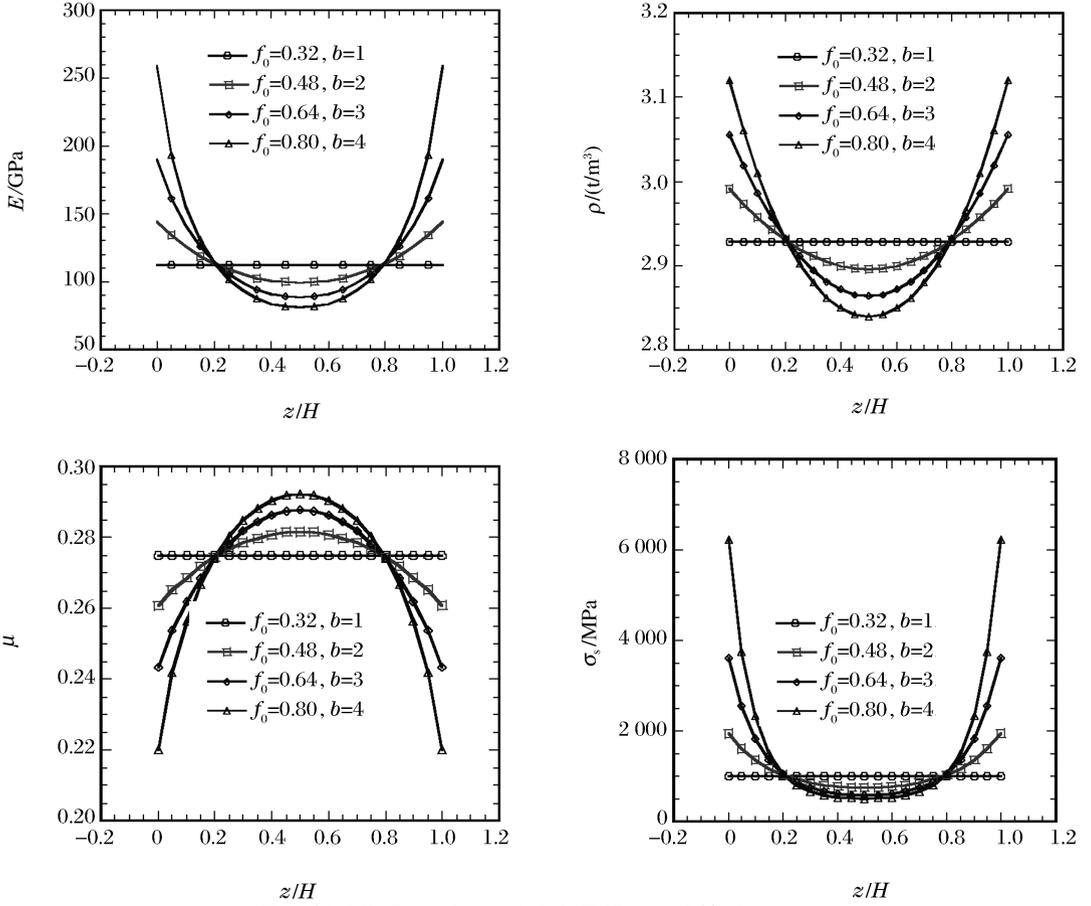


图 4 杨氏模量、密度、泊松比和屈服应力沿轴线的分布

Fig. 4 Distribution of Young's modulus, density, Poisson's ratio and yield stress along the axial direction

表 1 试样模型的 f_0 和 b 值与力学性能参数

Table 1 The value of f_0 , b and mechanical properties of the models

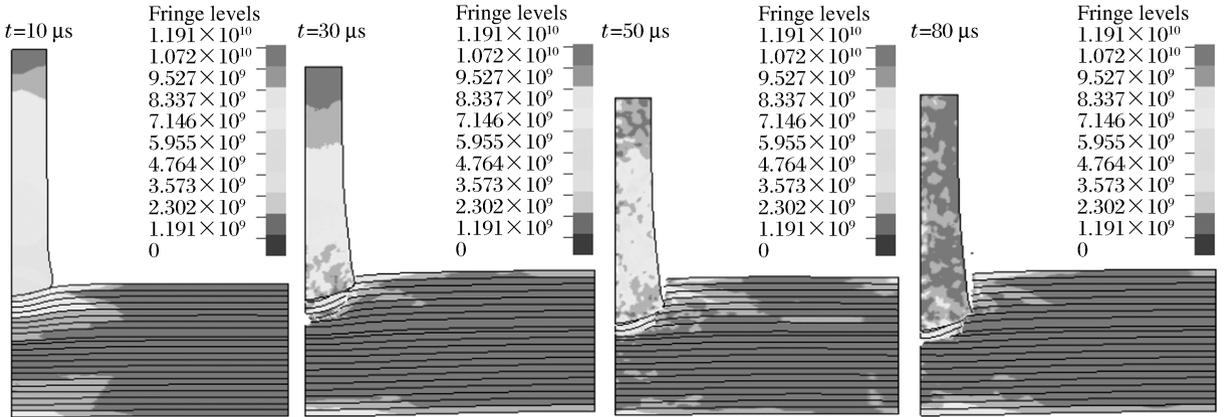
b	f_0	E/GPa	E_r/MPa	μ	σ_s/MPa	厚度 t/mm
1	0.32	112.38	313.89	0.275	1010.2	25.4
2	0.48	144.47	313.89	0.261	1940.1	
3	0.64	189.80	313.89	0.243	3602.6	
4	0.80	258.76	313.89	0.220	6224.8	

2.4 有限元模型

在本文中,使用了 LS-DYNA 有限元分析软件,模拟这些功能梯度板在子弹速度为 v_0 时的侵彻过程。模型单元采取用 LS-DYNA 单元库中的 Plane162 单元,沿厚度方向划分了 210 个单元。由于体积含量沿厚度连续变化,将材料特性沿厚度的变化分成 21 层。每层内确定 10 个单元有相同的材料特性。详细元素划分的方法可参见文献[7]中的介绍。

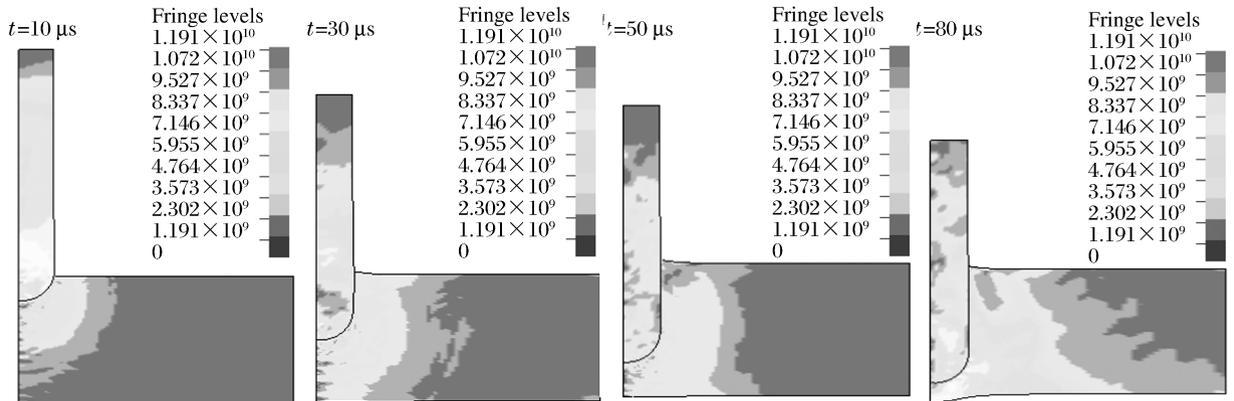
3 结果与讨论

功能梯度材料是防护装甲的首选材料之一,最重要的问题就是其功能梯度板沿厚度的组分成份对其侵彻性能的影响。只有完全理解了这样的问题,才能对功能梯度板沿厚度的组分成份沿厚度的变化进行优化设计,这是一个很有价值的工程问题,但也是很困难的问题。尽管如此,功能梯度装甲板侵彻过程的数值模拟的结果可以给我们一些沿厚度组分成份的变化对侵彻过程影响的直观的理解。为了节省篇幅,图 5 中仅给出了 $b=4$ 时功能梯度装甲板和匀质钢板在相同子弹相同速度下的 4 个典型时刻的侵彻过程,对应的时间分别为 10、30、50 和 80 μs 。值得指出的是所有功能梯度板中 SiC 陶瓷颗粒的平均体积含量相同,均为 0.32,只是沿厚度分布不同。由于子弹的一维应力波速度为 $c_p=5.19 \text{ m/s}$,而子弹的长度为 51 mm,在 $t=10 \mu\text{s}$ 时,子弹与功能梯度板发生撞击后,在子弹上产生的压缩应力波已从弹尾自由表面反射,与压缩应力有一部分相互抵消,从而导致了弹尾一部分低应力区。在 $t=30 \mu\text{s}$ 时,应力波前沿所走的路程为弹长的 3.05 倍,也就是压缩应力波再一次从弹尾的自由表面反射后,在弹尾形成了低应力区。这与数值模拟结果相当一致,可以从图中 $t=10 \mu\text{s}$ 和 $t=30 \mu\text{s}$ 时的结果中容易观察到。在 $t=50 \mu\text{s}$ 和 $t=80 \mu\text{s}$ 时,由于塑性应力波的传播,已较难由一维应力波理论分析应力波在子弹中的传播。



(a) 在 $b=4$ 时功能梯度材料板的抗侵彻过程

(a) Against penetration process of functionally graded armour plate in $b=4$



(b) 钢板的抗侵彻过程

(b) Against penetration process of steel plate

图 5 靶板的抗侵彻过程

Fig. 5 Against penetration process of target plate

从计算中还可以看出,在 $b=1$ 时,功能梯度板实际上是一匀质的金属基复合材料板,与匀质钢板相比,弹性模量较小,但屈服应力很高,导致了靶板中应力水平不同,穿甲深度不同。由此可见,靶板的屈

服应力与其侵彻深度存在着密切的联系。这与理论分析方法所得的结论完全相同。随着 b 值的增加, 表面部分 SiC 陶瓷颗粒的体积含量增加, 由于表面部分陶瓷颗粒的体积含量比较高, 其弹性模量和硬度也较大, 同时沿厚度方向体积含量减小, 其弹性模量和硬度也较小, 对塑性波吸收的多, 子弹与靶板之间的相互作用力增加, 子弹变形导致其直径明显增加, 弹孔的直径也随之增加, 最终的结果是穿甲深度降低。不同 b 值时, 穿甲深度随时间的变化, 如图 6 所示。材料的抗侵彻性能是与弹性模量及屈服应力密切相关的, 由于分布越不均匀, 表面材料的弹性模量越高, 屈服应力越高, 抗弹性能越好。

由于材料的组份沿靶板的分布不同, 虽然侵彻初速度相同, 但侵彻过程中, 子弹的侵彻速度与侵彻深度是不同的, 图 7 给出了子弹侵彻速度与侵彻深度的关系。从图中可以看出, 当 $b=1$ 时的匀质靶板与等厚度的钢板其侵彻速度随侵彻深度的变化, 有类似的规律, 但钢板的侵彻深度最深。当 $b>1$ 时侵彻速度随侵彻深度的变化分为三个阶段, 在第一个阶段侵彻速度随侵彻深度的变化急剧下降。当达到第一侵彻深度时, 第二阶段开始, 侵彻速度又随侵彻深度的增加而增大, 并达到第一峰值, 这是由于功能梯度板的特殊性, 在子弹侵彻过程中紧靠弹头的材料还未失效, 其前方的一些材料可能就已失效, DYNA 就将这些失效材料的单元删除, 形成空洞; 另外, 撞击靶板时会在子弹上产生冲击压缩, 压缩波经弹尾自由表面反射后形成的拉伸应力波使子弹产生拉伸变形, 弹头向前伸延, 侵彻速度就会随侵彻深度增加而增加。在第三阶段侵彻速度又随侵彻深度的增加而减小直至趋近于零。在第一阶段随着 b 值的增加, 侵彻速度下降较快。在第二阶段, 随着 b 值的增加, 速度增加的幅值越小, 峰值也越小, 但在整个过程中, 速度随侵彻深度变化似乎不随 b 值的变化而变化。从侵彻深度来看, 第一阶段的穿甲深度随 b 值的变化稍有增加, 但在第二阶段变化不大; 在第三阶段侵彻深度随 b 值的增加大幅度的减小。这是由于 SiC 颗粒沿厚度分布不均匀, 中间部分体积含量小, 弹性模量及屈服应力也小所致。

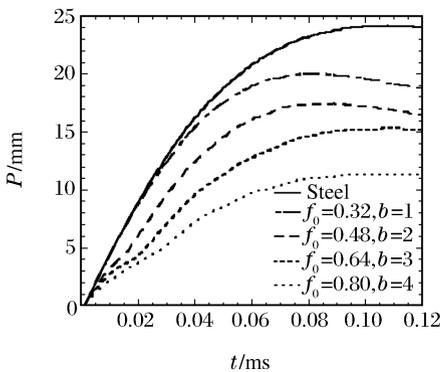


图 6 侵彻深度与时间的关系曲线

Fig. 6 Curve of depth vs time

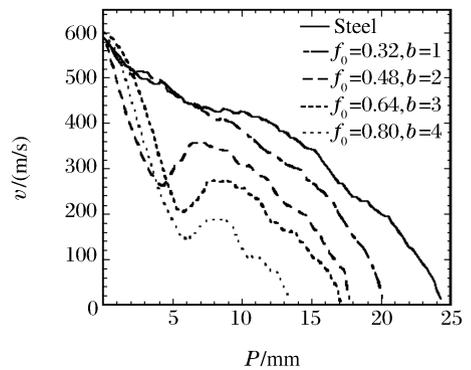


图 7 速度与侵彻深度关系曲线

Fig. 7 Curve of velocity vs depth

4 结 论

利用 LS-DYNA 对 SiC 颗粒增强铝合金复合材料的增强相体积百分含量沿厚度连续分布的梯度装甲板进行了抗侵彻过程的数值分析, 通过分析可以知道:

- (1) 当 SiC 颗粒体积含量一定时, 功能梯度装甲板表现出了优异的抗侵彻性能。
- (2) 表面 SiC 颗粒体积含量越高, 分布越不均匀, 表面的弹性模量就越高, 屈服应力就越高。
- (3) 功能梯度装甲板比匀质钢板表现出良好的抗侵彻性能。
- (4) 功能梯度装甲板为整个抗侵彻性的优化设计提供了重要的途径。

参考文献:

- [1] Bless S J, Satapathy S, Simha H. Ballistic impact behavior of SiC reinforced aluminum alloy matrix composites [A]. Meyers M A, Murr L E, Staudhammer K P. Shock Wave and High Strain Rate Phenomena in Material [C]. New York: Marcel Dekker Inc, 1992: 1051—1058.

- [2] Vaziri R, Delfosse D, Pageau G, et al. High-speed impact response of particulate metal matrix composite materials—An experimental and theoretical investigation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 13(2): 329—352.
- [3] El-Saeid Essa Y, Pérez-Castellanos J L. Effect of the strain rate and temperature on the mechanical behaviour of a Mg-5%Zn alloy reinforced with SiC particles[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, (143—144): 856—859.
- [4] LI Yu-long, Ramesh K T, Chin E S C. Comparison of the plastic deformation and failure of A359/SiC and 6061-T6/Al₂O₃ metal matrix composites under dynamic tension[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 371(1—2): 359—370.
- [5] Li Y, Ramesh K T, Chin E S C. The compressive viscoplastic response of an A359/SiCp metal-matrix composite and the A359 Aluminum alloy matrix[J]. *International Journal of Solid & Structures*, 2000, 37(51): 7 547—7 562.
- [6] Li Y, Ramesh K T, Chin E S C. Viscoplastic deformation and compressive damage in an A359/SiCp metal—matrix composite[J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(7): 1 536—1 573.
- [7] 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): 6 045—6 061.
- [8] Hugh A, Bruck A. One-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(44): 6 383—6 395.
- [9] Cho J R, Ha D Y. Volume fraction optimization for minimizing thermal stress in Ni-Al₂O₃ functionally graded materials[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 334(1—2): 147—155.
- [10] Cho J R, Ha D Y. Optimal tailoring of 2D volume-fraction distributions for heat-resisting functionally graded materials using FDM[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2002, 191(29—30): 3 195—3 211.
- [11] 李玉龙,周宏霞,徐绯,等. 组分成份分布规律对功能梯度防护装甲动态响应的影响[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(4): 58—67.
- LI Yu-long, ZHOU Hong-xia, XU Fei, et al. The effect of gradient distribution of the composition on dynamic response of functionally gradient composites plates under impact loading[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(4): 58—67.

Effects of SiC particle reinforcement distribution on the penetration of functionally graded armour

JIANG Bao-quan, LI Yu-long^{*}, LIU Yuan-yong, YU Qing-jun

(*School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China*)

Abstract: The numerical simulation of penetration of a functionally graded armour made from Aluminum alloy reinforced by SiC particle was performed. The SiC particle volume fraction varies continuously along the armour thickness followed a power law. The four different armours with the same SiC particle volume fraction, but different distribution were investigated and compared with steel armour. The results show: The change of the distribution of SiC particle volume fraction along the armour thickness can increase the ability to resist a penetrator. While the SiC particle volume fraction is constant, the higher the SiC particle volume fraction in the surface is, the better the ability of the functionally graded armour against penetration is. The armour with $f_0 = 0.8$, $b = 4$ show the best anti-penetrator ability among all the cases and it is even better than steel armour.

Key words: solid mechanics; against penetration; LS-DYNA; functionally graded armour; SiC reinforced particle

* Corresponding author: LI Yu-long

E-mail address: liyulong@nwpu.edu.cn

Telephone: 029-88494859