复 合 材 料 学 报 第24卷 第5期 10月 2007年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 24 No. 5 October 2007

文章编号: 1000-3851(2007)05-0006-07

SiC_p/Al 功能梯度装甲板抗侵彻性能的试验与数值模拟

虞青俊, 李玉龙*, 邓 琼, 汤忠斌, 徐 绯
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘 要: 采用粉末冶金方法制备碳化硅陶瓷颗粒(SiC_P)增强金属铝基复合材料板(MMCs), 并采用热压扩散法制备功能梯度装甲板(FGM)。利用高速冲击空气炮系统, 对纯铝靶板和两种不同铺层结构的功能梯度装甲靶板进行侵彻试验, 并利用LS-DYNA软件对侵彻试验过程进行数值模拟分析, 同时考察等厚、等面密度下SiC颗粒分布对抗侵彻性能的影响。研究结果表明, 功能梯度板的抗侵彻性能比纯铝板好, 而两种不同铺层结构功能梯度板的抗侵彻性能相差不大。数值计算结果与现有试验结果取得了较好的一致, 说明了数值模拟的有效性。从数值计算结果可以看出, 层状功能梯度板比等厚、等面密度均质复合材料靶板的抗侵彻能力好, 并可近似地认为等厚、等面密度下多层功能梯度板的抗侵彻性能对颗粒分布不敏感。

关键词: 侵彻; LS-DYNA; 功能梯度装甲板; 碳化硅颗粒; 数值模拟
中图分类号: TB331; TB330.1 **文献标识码**: A

Penetration of SiC_P/Al functionally graded plates ——Experiment and numerical simulation

YU Qingjun, LI Yulong*, DENG Qiong, TANG Zhongbin, XU Fei
(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The penetration tests of two kinds of functionally graded plates (FGM) were performed by using a high speed air-gun system. The plates consist of layered structures with two stack sequences prepared by the vacuum hot-pressure diffusion processing. Each layer is made from aluminum matrix composites reinforced by different volume fraction SiC particles (MMCs) by the vacuum hot-pressure sintering method. The numerical simulations of penetration process were carried out by LS-DYNA code. The numerical simulations were also performed to explore the optimal distribution of certain average SiC_P fraction. The test results show that the anti-penetration ability of the functionally graded plate is much better than that of the pure aluminum plate. The difference of anti-penetration ability between the two tested functionally graded plates is not apparent. The numerical simulation results are in good agreement with experimental results. From the simulation results, the layered plates have superior anti-penetration ability to the that of homogeneity plate of MMCs. And the anti-penetration of layered plates with the same thickness and the same areal density can be approximately regarded as not sensitive to the particle distribution.

Keywords: penetration; LS-DYNA; functionally graded plate; SiC particle; numerical simulation

陶瓷颗粒增强的金属基复合材料不仅具有很高的比刚度、比强度及耐磨性, 而且具有良好的抗冲击性能。Bless 等[1] 的试验结果表明, 20%SiC 陶瓷颗粒增强的铝合金复合材料防弹效率提高3 倍。Vaziri 等[2] 的试验结果表明, 侵彻20%～30%SiC 增强的6061 铝合金, 穿甲深度只有其基体材料的一半。金属基复合材料优越的抗侵彻性能和可设计性为轻型装甲的设计提供了空间。

现代轻型装甲由具有很高硬度的正板和具有较高韧性的背板组成。正板材料一般由陶瓷材料或硬合金金属组成, 用来钝化弹芯或在弹芯上产生破坏冲击波; 背板材料由铝合金或纤维增强复合材料组成, 以捕获残余的碎片。如果把金属基复合材料板中陶瓷颗粒的体积含量沿其厚度变化, 制备功能梯度装甲板, 即在板的正面具有类似于陶瓷的性质, 与陶瓷装甲板相接, 在板的背面, 具有铝合金的性

收稿日期: 2006-11-13; 收修改稿日期: 2007-03-02
基金项目: 国防基础科研基金项目(A2720060277)
通讯作者: 李玉龙, 教授, 博士生导师, 长江学者, 研究方向: 冲击动力学, 复合材料力学 E-mail: liyulong@nwpu.edu.cn

质，与铝合金连接，就可以很大程度地降低由于陶瓷装甲板与铝合金材料波阻抗失配和弹性模量失配所造成的应力集中等问题，并可能使复合装甲板经受二次以上的打击。另一方面，可将金属基复合材料制备成层状功能梯度板，即将增强相颗粒体积含量不同的金属基复合材料板组成层状板，在每一层内，陶瓷颗粒的体积含量相同。Li 和 Ramesh[3]，李玉龙等[4] 曾研究了这种层状板在冲击载荷作用下的动态响应，指出铺层结构的优化对抗侵彻性能有很大影响，应力波的传播规律受到组分成分的影响。从研究现状看，Bruck[5]，Berezovski 等[6]，Chakraborty 等[7] 研究了应力波在功能梯度板中的传播规律。蒋宝权等[8] 对SiC 增强颗粒分布规律对梯度装甲板抗侵彻过程的影响进行了研究。但对由金属基复合材料制成的层状功能梯度板的侵彻过程的研究，迄今为止尚未见报道。

本文中采用粉末冶金方法制备SiC 陶瓷颗粒增强的金属铝基复合材料板，采用热压扩散法制备功能梯度靶板。通过对纯铝靶板及2 种不同铺层结构的功能梯度装甲板的抗侵彻性能试验，研究了铺层结构对功能梯度板抗侵彻性能的影响。利用 LS-DYNA 软件，模拟了层状功能梯度靶板及纯铝靶板的侵彻过程，考察了铺层结构及SiC 颗粒含量分布对抗侵彻性能的影响，并将计算结果与现有试验结果进行了比较。

1 侵彻试验

1.1 材料及靶板的制备

利用西北工业大学凝固技术国家重点实验室研制的真空无压浸渗设备，制备出增强相体积分数可达57 %的SiC 陶瓷颗粒增强铝基复合材料板。又用真空热压扩散法，有效解决了层状功能梯度板层间的黏接问题，制备了2 种不同铺层结构的功能梯度装甲靶板。将制备的靶板分为3 组，即按SiC 颗粒体积分数沿厚度变化及不同铺层顺序制成的功能梯度板2 组，纯铝板1 组(靶板具体铺层结构见表1)，表1 中的铺层顺序表示各层中所含SiC 颗粒的体积分数。靶板为直径110 mm、厚度25.4 mm 的圆柱形板。

1.2 侵彻试验及其结果

侵彻试验所选的子弹材料为45# 钢，长度51 mm，直径12.7 mm，质量48.5 g，半球形弹头。图1 给出了3 组靶板材料侵彻试验后侵彻深度与入射速度之间的关系。由于铝板具有很好的塑性变形能力，背部突出部分很高，子弹侵入靶板的深度远远大于靶板的厚度，理论上视为已穿透，所以8 号和10 号靶板在图1 中的侵彻深度标为靶厚25.4 mm。在相同的入射速度下，侵彻纯铝的深度要明显大于2 组功能梯度材料靶板的侵彻深度。从图1 中可以看出，虽然2 组功能梯度靶板的平均颗粒体积含量(或面密度)有稍许差异，但是两者的侵彻深度与入射速度的关系曲线基本上为一直线，可以近似地认为这2 组靶板抗侵彻能力的差异不大。(另外，从入射速度为300 m/s 时的数值计算结果看，

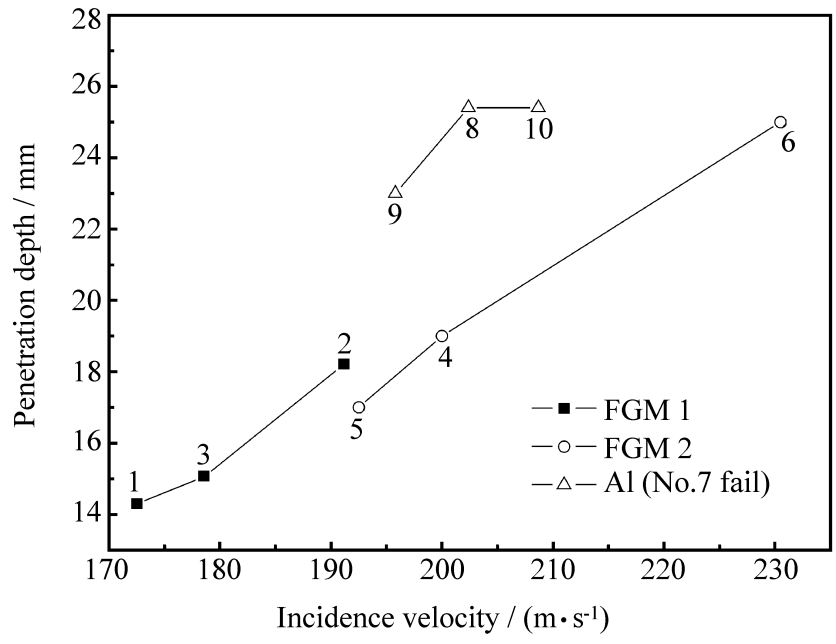

图1 功能梯度靶板和纯铝靶板的侵彻深度与入射速度关系曲线

Fig.1 Measured penetration depth as a function of the incidence velocity for FGM and pure aluminum targets

表1 功能梯度靶板和纯铝靶板编号及铺层结构

Table 1 FGM and pure aluminum targets No. and stack structure

Targets	Target No.	Volume fraction (Incidence direction)/ %	Thickness/ mm	Average volume fraction/ %
FGM 1	1,2,3	0/57/0/26/0/12/0	0.5/6.56/0.5/6.56/4.22/6.56/0.5	24.5
FGM 2	4,5,6	0/57/0/18/0/12/0	0.5/6.50/3.2/5.80/1.00/5.40/3.0	21.2
Aluminum	7,8,9,10	0	25.4	0

FGM1 的剩余速度为149.1 m/s，而FGM2 的剩余速度为151.5 m/s，表明两者的抗侵彻能力差异不大。)

2　数值模拟

2.1　材料特性

层状功能梯度板由金属基复合材料层及基体层构成，复合材料可视为弹-黏塑性材料。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分数来确定(增强相形状、尺寸的影响忽略)。复合材料的弹性特性由基体和增强相的弹性特性及体积含量按 Hashin-Shtrikman 方程确定。表2 给出了纯铝基体与SiC 陶瓷的力学特性。

表2　纯铝基体及增强陶瓷的力学特性

Table 2　Elastic properties of the pure aluminum metal matrix and ceramic reinforcement materials

Materials	Young's modulus/ GPa	Shear modulus/ GPa	Poisson ratio	Density /(kg·m^{-3})
Matrix	70	26.3	0.33	2700
SiC	420	179.5	0.17	3200

在数值计算中，子弹和靶板的材料模型均选取商用有限元程序LS-DYNA 材料库中的Plastic Kinematic Model。在准静态条件下，由颗粒增强引起的复合材料的屈服应力预估公式为[5]

$$\sigma(f) = (1 + 1.17f + 2.28f^2 + 21.0f^3)\,\sigma_{Al} \quad (1)$$

式中：σ 为复合材料屈服应力；f 为增强相体积分数；σ_{Al} 为纯铝基体屈服应力。图2 给出了纯铝基体在常温单轴压缩下不同应变率时的真实应力-应变曲线。从图2 可以看出，纯铝基体的屈服应力为70 MPa，由此可推出Plastic Kinematic Model 中Cowper-Symonds 参数，即参考应变率为1.0×10^5 s^{-1}，应变率硬化指数为5。计算中引入了单元失效算法，取纯铝基体的失效应变为2.0，复合材料的失效应变可采用下式取值：

$$\varepsilon_{failure}(f) = \varepsilon_{failure\ Al}/(1 + 1.17f + 2.28f^2 + 21.0f^3) \quad (2)$$

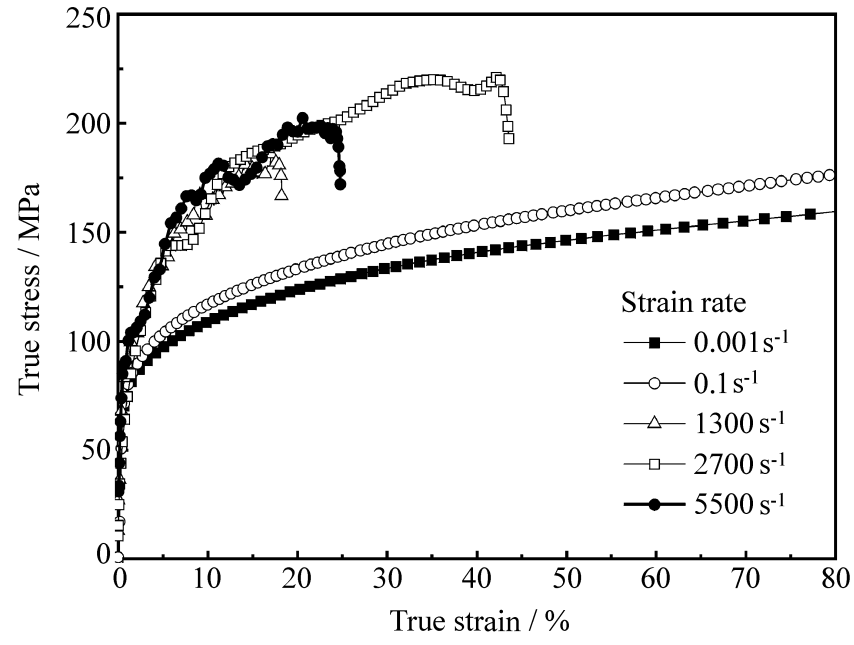

图2　纯铝基体在不同应变率下的压缩应力-应变曲线

Fig.2　Stress-strain data in compression for pure aluminum matrix at different strain rates

2.2　有限元模型

数值计算中基于模型的对称性，采用轴对称模型进行计算。不同靶板的几何模型如图3(a) 所示，假设界面黏结完好。有限元单元采用四节点2D 轴对称单元，采用单点积分及沙漏控制。为了保证子弹与靶板间复杂的相互作用，靶板中央1.5 倍子弹直径的区域网格划分细小，其尺寸为0.2 mm×0.2 mm[9]，然后向两边逐渐变大。子弹头部网格尺寸与靶板类似，以便接触算法运行良好。接触类型采用自动2D 单面罚函数算法。模型中单元总数在21000 左右，图3(b) 为局部有限元网格图。边界条件与试验条件一致，即靶板背部50 mm 直径外围轴向约束。

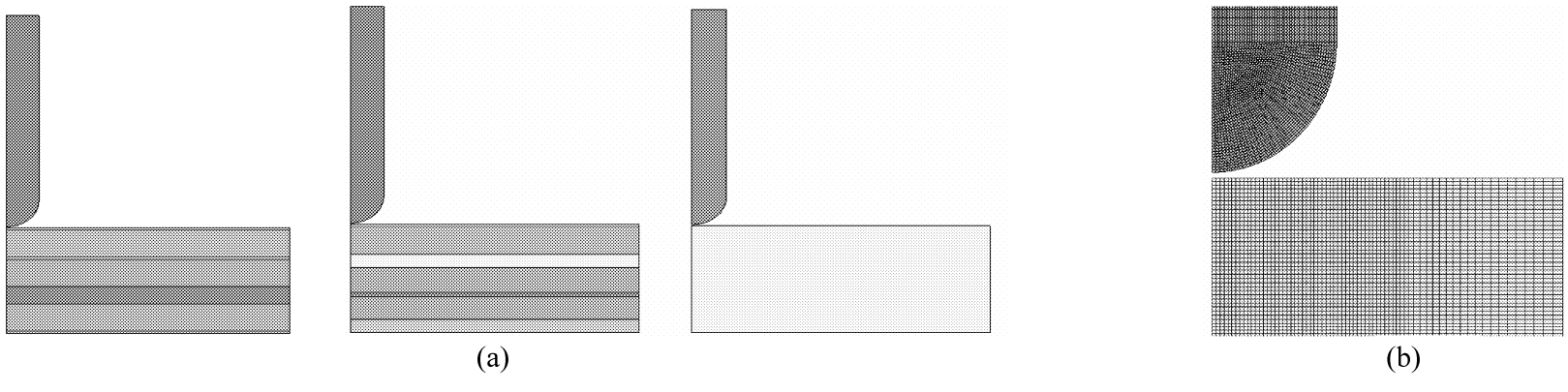

图3　功能梯度靶板及纯铝靶板的计算模型和有限元网格

Fig.3　Simulation model of FGM and pure aluminum targets and local FEM mesh

2.3 计算结果

数值分析可以使侵彻过程可视化，得到大量的时间变量。本文中主要关注的是侵彻深度，图4 给出了试验与计算得到的侵彻深度的比较。从图4 可以看出，两者有着较好的一致性，说明数值计算的有效性。

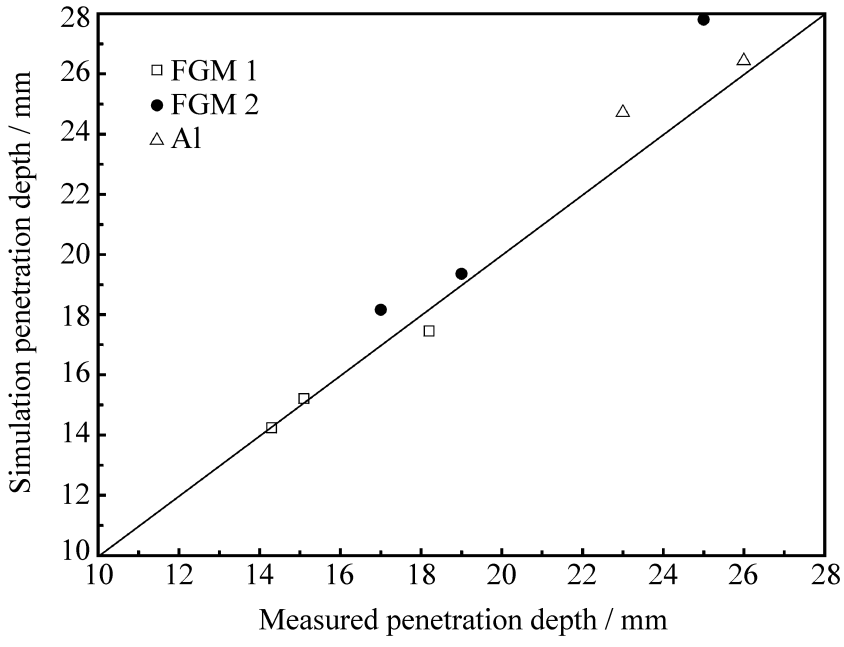

图4 功能梯度靶板及纯铝靶板的计算侵彻深度与试验侵彻深度比较

Fig.4 Comparisons between simulation and measured penetration depths of FGM and pure aluminum targets

2.4 增强相分布对抗侵彻能力的影响

目前的防护结构大多为层状复合结构，评价这种复合结构的防护能力是一个十分复杂的问题。虽然数值方法已广泛地用来研究此问题[10,11]，然而到目前为止还没有一个统一的表征参量来评价与比较各种不同层状复合结构的抗侵彻性能。工程界一般使用复合装甲防护系数，但反映不出装甲结构配置、材料结构交互作用等因素对抗侵彻能力的影响[12]。所以在这种情况下，必须进行尽可能多的不同情况下的模拟，以期对某种复合结构的抗侵彻性能有一个系统的了解，以达到优化设计的目的。

由于本文中的模拟结果与试验结果具有良好的一致性，用数值方法对这种层状功能梯度结构的抗侵彻性能优化设计可以作一些探索性的计算。使用与FGM1 有相同颗粒体积分数(24.5%) 的靶板来考察铺层顺序与颗粒分布对抗侵彻性能的影响，靶板的具体情况如表3 所示。为比较铺层顺序的影响，FGM1.2、FGM1.3.3、FGM1.7 和FGM1 的反向铺层分别表示为FGM1.2 reverse、FGM1.3.3 reverse、FGM1.7 reverse 和 FGM1 reverse。选用入射速度为191 m/s 和300 m/s，考察侵彻深度及剩余速度。计算结果见图5～图7。

对以上计算结果进行分析讨论，可以得到如下结果：

(1) 从图5(a)、图5(b) 和图6 可以看出，当入射速度为191 m/s 和300 m/s 时，FGM1.1 的侵彻深度和剩余速度最大，说明匀质复合材料板的抗侵彻能力最低。而FGM1.3 的剩余速度最低，说明FGM1.3 这种类似夹心结构的抗侵彻性能最好。这是由于在层状情况下，各层间的波阻抗是不相同的，层间(波阻抗大的在前，小的在后) 的反射波与弹丸运动方向相反，将会对弹体的运动产生阻碍作用。崔琳等[13] 指出，相邻层的波阻抗相差越大，结构的抗侵彻性能越好。这个结论从图7 中也能看

表3 功能梯度靶板的铺层结构

Table 3 Stack structure of FGM targets

Targets	Volume fraction (Incidence direction) / %	Thickness/ mm
FGM1.1	24.5	25.4
FGM1.2	49/0	12.7/12.7
FGM1.2 reverse	0/49	12.7/12.7
FGM1.3	40.4/0/40.4	7.7/10.0/7.7
FGM1.3.2	0/40.4/0	5.0/15.4/5.0
FGM1.3.3	49/24.5/0	8.4/8.5/8.5
FGM1.3.3 reverse	0/24.5/49	8.5/8.5/8.4
FGM1.4	45/0/35.4/0	8.0/5.0/7.4/5.0
FGM1.7	49/40.8/32.6/24.5/16.3/8.2/0	3.6/3.6/3.7/3.6/3.7/3.6/3.6
FGM1.7 reverse	0/8.2/16.3/24.5/32.6/40.8/49	3.6/3.6/3.7/3.6/3.7/3.6/3.6
FGM1	0/57/0/26/0/12/0	0.5/6.56/0.5/6.56/4.22/6.56/0.5
FGM1 reverse	0/12/0/26/0/57/0	0.5/6.56/0.5/6.56/4.22/6.56/0.5

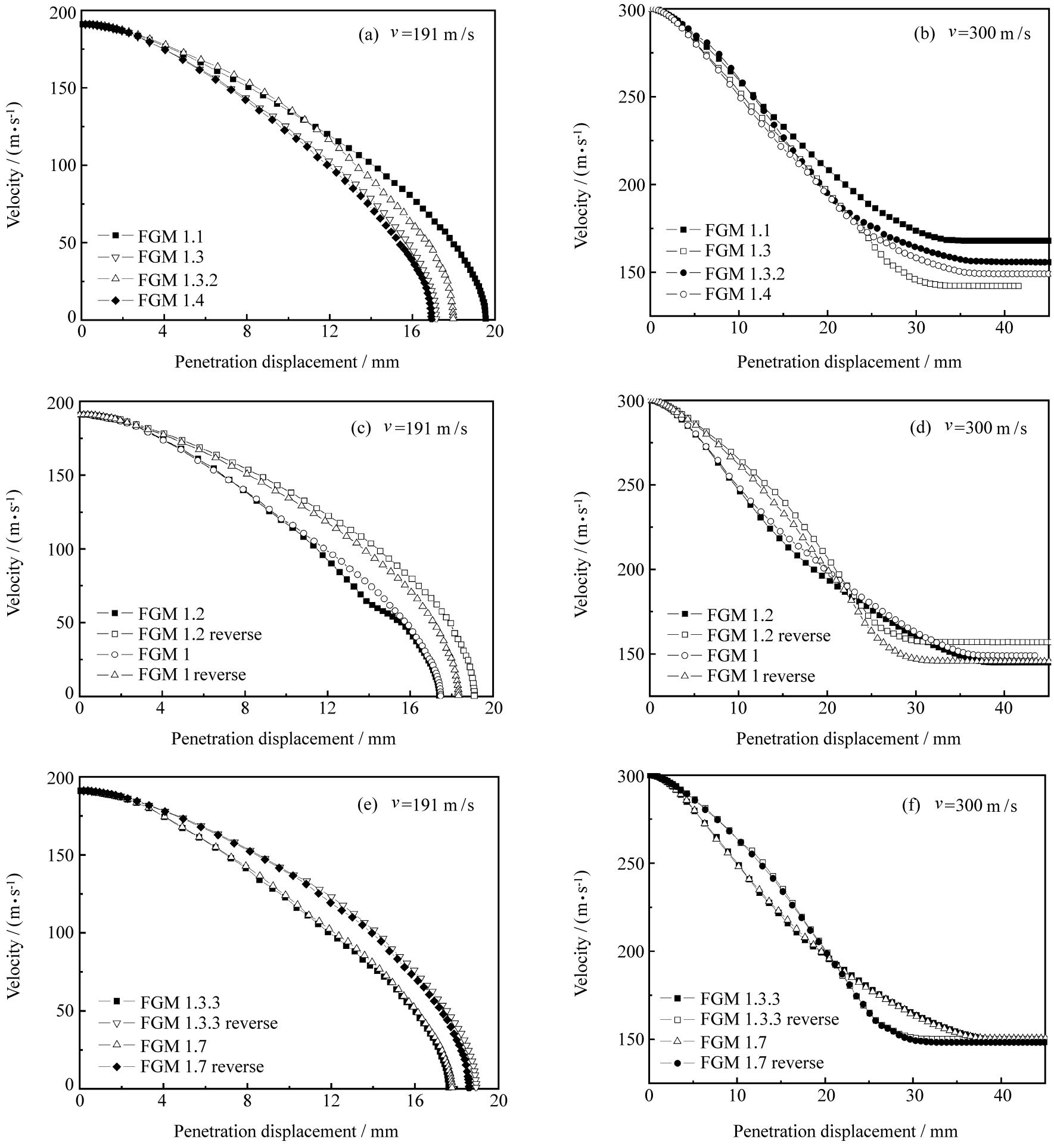

图5　功能梯度靶板的速度与侵彻位移曲线

Fig.5　Velocity-penetration displacement curves of FGM targets

到。在层状情况下，弹体内已存在因反射而产生的拉伸应力，而在匀质情况下无拉伸应力对弹体作用，因而表现出层状结构具有较好的抗侵彻能力。

(2) 从图5(c)中可知，FGM1.2和FGM1的侵彻深度相对于其反向铺层要小，这是由于面板的颗粒百分含量高而具有更高的强度，使侵彻阻力增加。从图5(e)中同样可对FGM1.3.3与FGM1.7及其反向铺层得出同样结论。

(3) 从图5(d)可以看出，FGM1和FGM1 reverse的剩余速度基本一致，表明铺层顺序对FGM1的抗侵彻性能影响不大。而FGM1.2及FGM1.2 reverse的剩余速度差别较明显，FGM1.2比FGM1.2 reverse的抗侵彻性能要好，分别考察其速度对侵彻深度的曲线，可以看到，两曲线都有一个交点，对FGM1.2来说，交点后面的材料为纯铝，而对FGM1.2 reverse来说，交点

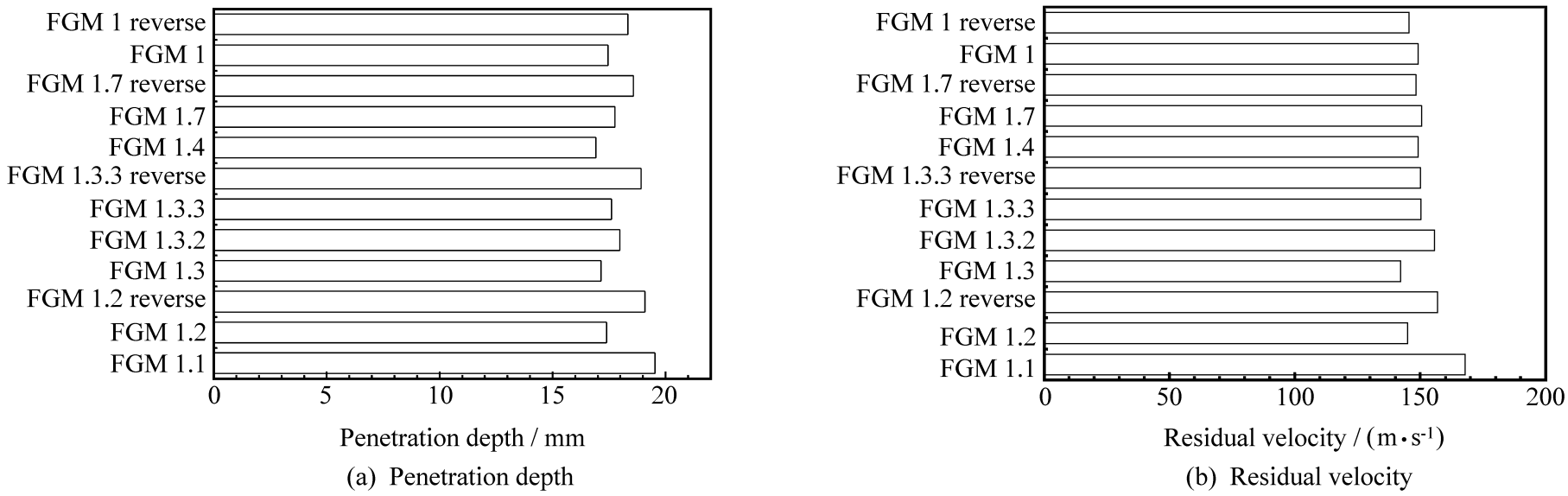

图6 功能梯度靶板的侵彻深度与剩余速度

Fig.6 Penetration depth and residual velocity of FGM targets

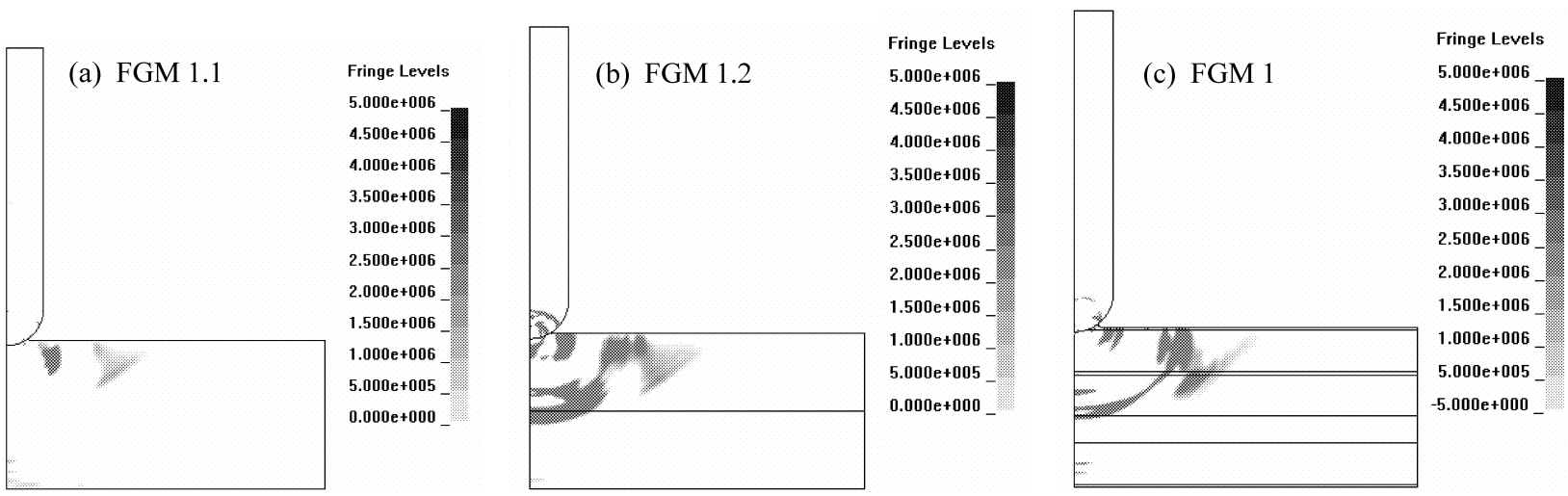

图7 FGM1.1、FGM1.2 和FGM1 的Y 应力云图

Fig.7 Y-stress contours of FGM1.1, FGM1.2 and FGM1

后面的材料为复合材料。根据有限元计算动画, FGM1.2 reverse 在此交点之后很快出现挤凿破坏, 使靶板失去抗侵彻能力。这表明当作为背板材料时, 纯铝的良好塑性变形比复合材料的高强度(低韧性, 易发生剪切破坏) 在抗侵彻能力上更有优势。这一点与传统的面板为高强度材料而背板为韧性材料的观点是一致的。

(4) 从图5(e)、图5(f) 可以看出, 如果3 层FGM1.3.3 与7 层FGM1.7 的颗粒含量沿侵彻方向线性递减, 则按此方法分布后, 颗粒分布层数(3 层与7 层) 对抗侵彻性能影响很小, 同时铺层顺序对抗侵彻性能影响也很小, 即这4 种情况的抗侵彻性能差异很小。一般来说, 波速大的面板层有利于冲击能量的扩展, 可以提高靶板的抗侵彻能力[14]。从计算结果动画中可以看出, FGM1.3.3 reverse 和FGM1.7 reverse 的背板都出现了挤凿破坏, 尤其是FGM1.7 reverse, 第7 层SiC 高含量层基本上都被挤凿。出现挤凿破坏应该使靶板的抗侵彻能力降低, 然而计算结果却表明铺层顺序的改变对其剩余速度几乎没有影响。这说明后面强度高的层可以对前面强度低的层有较好的约束支持作用, 即有较高的整体刚度, 从而提高靶板的抗侵彻能力。对夹心板来说, 因为具备这几种可以提高靶板抗侵彻能力的特点, 因而有最好的抗侵彻能力。

Ben-Dor 等[15] 通过简化理论模型计算的结果表明, 在多层目标中, 如果每层的参数 σ/ρ (σ为材料的屈服强度, ρ为材料密度) 按升高顺序排列, 则目标具有最好的抗侵彻性能。而本文中所得出的结论与此结论并不一致, 分析其原因, Ben-Dor 等在计算时采用锥形弹, 推导中假定没有目标介质沿侵彻方向的运动; 而本文中采用球形弹, 目标介质势必产生沿侵彻方向的运动, 前面层受到后面层的影响较大, 因而不能使用Ben-Dor 的推导结果。

3 结 论

本文作者通过数值模拟及试验验证研究了多种

功能梯度板的侵彻机理，得到如下结论：

(1) 功能梯度靶板的抗侵彻性能比纯铝靶板好，但试验中所用的两种功能梯度靶板之间的抗侵彻性能相差不大。数值计算得到的侵彻深度与试验结果吻合较好。

(2) 层状功能梯度靶板比等厚、等面密度均质复合材料靶板的抗侵彻能力好，但其侵彻性能对颗粒分布不敏感。

(3) 颗粒呈对称分布的三层夹心结构靶板具有较好的抗侵彻能力。

参考文献：

[1] Bless S J, Jurick D L, Timothy S P. Ballistic impact behaviour of SiC reinforced aluminum alloy matrix composites [C] // Meyers M A, Murr L E, Staudhammer K P. In Shock-Wave and High Strain Rate Phenomena in Materials. New York: Marcel Dekker Inc, 1992: 1051-1058.

[2] Vaziri R, Delfosse D, Pageau G. High-speed impact response of particulate metal matrix composite materials ——An experimental and theoretical investigation [J]. Int J Impact Engng, 1993, 13(2): 329-352.

[3] Li Y, Ramesh K T, Chin E S C. Dynamic characterization of layered and graded structures under impulsive loading [J]. Int J of Solids Struct, 2001, 38(34/35): 6045-6061.

[4] 李玉龙，周宏霞，徐　绯. 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 Yulong, Zhou Hongxia, Xu Fei. 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.

[5] Bruck H A. A one-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves [J]. Int J of Solids Struct, 2000, 37(44): 6383-6395.

[6] Berezovski A, Engelbrecht J, Maugin G A. Numerical simulation of two-dimensional wave propagation in functionally graded materials [J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2003, 22(2): 257-265.

[7] Chakraborty A, Gopalakrishnan S. A spectrally formulated finite element for wave propagation analysis in functionally graded beams [J]. Int J of Solids Struct, 2003, 40(10): 2421-2448.

[8] 蒋宝权，李玉龙，刘元镛. SiC 增强颗粒分布规律对梯度装甲板抗侵彻过程影响[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 493-498.
Jiang Baoquan, Li Yulong, Liu Yuanyong. Effects of SiC particle reinforcement distribution on the penetration of functionally graded armour [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 493-498.

[9] Børvik T, Hopperstad O S, Berstad T. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Part Ⅱ: Numerical simulations [J]. Int J Impact Eng, 2002, 27(1): 37-64.

[10] Ospinosa H D, Dwividi S, Zavatieri P D. A numerical investigation of penetration in multilayered material/structure systems [J]. Int J Solids Struct, 1998, 35(22): 2975-3002.

[11] Lotti S V, Sun C T. Prediction of impact induced penetration and delamination in thick composite laminates [J]. Int J Impact Engng, 1997, 19(1): 31-48.

[12] 张自强. 混合律在复合装甲研究中应用的扩展[J]. 兵器材料科学与工程, 1994, 17(4): 40-46.
Zhang Ziqiang. Extended applications of mixture rule in composite armor research [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1994, 17(4): 40-46.

[13] 崔　琳，肖佳嘉，宁俊生. 叠层装甲材料的声阻抗匹配与抗弹性能的关系研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(6): 22-23.
Cui Lin, Xiao Jiajia, Ning Junsheng. Effect of acoustic impedance matching of laminate armor material on its ballistic capability [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001, 24(6): 22-23.

[14] 梅志远，谭大力，朱　锡. 铝质舰体轻型复合装甲试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 150-155.
Mei Zhiyuan, Tan Dali, Zhu Xi. Experimental research on light composite armor of warship with aluminum alloy structure [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(2): 150-155.

[15] Ben-Dor G, Dubinsky A, Elperin T. On the order of plates providing the maximum ballistic limit velocity of a layered armor [J]. Int J Impact Engng, 1999, 22(8): 741-755.