

# 轻型多层异质复合装甲研究进展

高 华 熊 超 殷军辉 邓辉咏

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

**文 摘** 针对现代战争条件下轻型装甲车辆对机动性能和防护性能的要求,综述了装甲防护材料的应用现状及其不同应变率下力学性能测试手段,讨论了装甲防护性能评估的实验测试、数值模拟以及理论分析手段,介绍了材料种类、结构形式、分层厚度、约束效应以及层间界面对轻型多层复合装甲防护性能的影响,并提出了未来发展趋势。

**关键词** 轻量化,穿甲弹,复合装甲,侵彻,数值模拟

中图分类号:O385

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.06.001

## Research Progress on Lightweight Multi-Layered Heterogeneous Composite Armor

GAO Hua XIONG Chao YIN Junhui DENG Huiyong

(Army Engineering University, Shijiazhuang 050003)

**Abstract** In order to meet the requirements of maneuverability and protection performance of light armored vehicles under modern warfare conditions, the current status of application of armored protective materials and the testing methods for mechanical properties under different strain rates were reviewed. Experimental tests, numerical simulations and theories of armored protective performance evaluation was discussed. The influence of materials, structural forms, layer thickness, restraint effects and the interface between layers on the protective performance of light multi-layer composite armor was introduced. The trends of future development was proposed.

**Key words** Lightweight, Armor piercing, Composite armor, Penetration, Numerical simulation

### 0 引言

装甲侵彻与防护问题具有广泛的工程背景,随着现代战争条件下反装甲武器毁伤效能提高,对战机的“灵活性”与“防护性”的要求越来越高<sup>[1]</sup>。信息化战争中,战争具有突发性以及战场环境的复杂多变性,急需提高战机的应急作战能力和快速部署能力,使得装备灵活机动性的地位不断提高,促进了战机和航空装备向轻型化发展。对于航空装备,不仅要有较强机动性,还应具备一定防护能力,随现代反装甲武器性能进一步提升,弹药破坏能力加强,提高装甲的防护能力显得更加重要。这也就要求航空装备在减小自重,提高机动能力的前提下,提升装甲防护能力。目前,航空装备主要考虑高速破片以及小

型穿甲弹的威胁,装甲厚度一般为20~30 mm,北约STAN4569标准的5级防护等级中,3、4级威胁为7.62~14.5 mm直径小型穿甲弹和155 mm直径炮弹60~125 m范围内爆炸形成的碎片,美国军方防护12.7 mm重机枪弹装甲的要求为面密度小于50 kg/m<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。现有航空装备防护性能较弱,还不能达到上述防护级别,而增加装甲厚度又将影响其机动性能,因此为实现装甲轻量化,必须要研制轻型复合装甲,减轻自重,在此基础上提升其防护水平。本文主要介绍轻型多层异质复合装甲研究进展。

### 1 防护材料及动态力学性能分析

#### 1.1 装甲防护材料

研制出新型装甲材料是提高防护性能的关键所

收稿日期:2018-06-27

基金项目:国家自然科学基金(11272355)

第一作者简介:高华,1994年出生,硕士研究生,主要从事装甲防护与轻量化技术的研究工作。E-mail:jxgaohua@163.com

通信作者:熊超,1978年出生,博士,副教授,主要从事轻量化材料应用技术的研究工作。E-mail:xiongchao@tsinghua.org.cn

在,随材料科学工艺水平的发展进步,研究工作者相继研发出各类优异力学性能的防护材料。20世纪40年代之前,防护所用材料大部分为金属,其中主要是装甲钢和铝合金;之后,陶瓷、纤维增强材料等多种新材料开始出现并得到应用。

装甲钢、合金、贫铀、玻璃钢、芳纶纤维、陶瓷是当前车辆防护中使用较多的几种材料,在装甲中进行了大量应用。金属材料韧性好、硬度高,但由于密度较大不利于实现轻量化;陶瓷硬度高、密度小,但易碎而且韧性差,抗多次打击能力不足<sup>[3]</sup>;芳纶、玻璃纤维这类材料强度较高、模量较小、质量轻<sup>[4]</sup>。不同材料抗侵略机理存在较大差异,需要充分利用其吸能特点,通过不同材料之间的复合,在减轻质量的前提下提高其抗弹性能。美军20世纪初设计出CIA(Composite Integral Armor)复合结构装甲<sup>[5]</sup>,该结构是由六个不同层材料组合而成,包括:陶瓷拼接层、玻璃钢纤维层、橡胶层等。当前,众多科研人员开始将泡沫孔隙材料、柔韧性材料应用装甲结构中,并对其防护性能开展研究。

## 1.2 力学性能测试

材料静动态力学性能测试对于研究防护材料的本构关系、评估材料的力学特性具有十分重要的价值。测试的手段根据应变率由高到低可以进行如下分类:蠕变(应变率范围 $10^{-8} \sim 10^{-9}$  /s)、准静态( $10^{-6} \sim 10^0$  /s)、高应变率( $10^0 \sim 10^4$  /s)和超高应变率( $10^4 \sim 10^8$  /s)四类。不同加载速率下,材料动力学性能不同,冲击条件下,发生高应变率下的变形,高应变率实验同准静态实验不同之处在于随应变率增加,惯性效应增强,因此研究材料的应变率相关性具有重要意义<sup>[6]</sup>。研究工作者利用多种测试方法对不同应变率下材料性能开展研究。如表1所示,列出了多种常用测试方法对应应变率测试范围,对其中常用的落锤实验、Taylor实验、平板撞击实验、膨胀环实验以及SHPB实验(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)进行了介绍。

表1 不同应变率下测试手段

Tab. 1 Test methods at different rates

应变率/s <sup>-1</sup>	测试方法
$10^{-9} \sim 10^{-5}$	传统试验机、蠕变试验机
$10^{-5} \sim 10^0$	液压试验机
$10^0 \sim 10^3$	气锤、落锤等
$10^3 \sim 10^5$	Taylor实验、膨胀环实验、霍普金森杆
$10^5 \sim 10^7$	平板撞击、爆炸测试等

### 1.2.1 落锤实验

落锤实验通过改变加载物的高度,利用重物下

降动能对试样产生冲击,以获取所需速度或相应撞击能量<sup>[7]</sup>。落锤的撞击速度范围一般在1~10 m/s,应变率分布在 $10^0 \sim 10^7$  /s,利用安装在设备头部的力学传感器得到卸载过程中参数信息,得到待测试样所承受的冲击速率以及撞击强度。由于落锤冲击试验中冲击强度不断减弱,因此难以实现在恒定应变率条件下的冲击。

### 1.2.2 Taylor实验

Taylor实验是加速装置发射长杆状弹体冲击刚性目标靶(目标靶所对应的屈服强度远远超过弹体)。材料动态力学性能利用杆与目标靶接触端变形特点以及加载速率进行分析。结合一维弹塑性波知识,通过试验后弹体变形参数可获得材料动态屈服应力:

$$\sigma_y = \frac{\rho v_0^2 (l - x)}{2(l - l_1) \ln\left(\frac{l}{x}\right)} \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为对应材料密度, $v_0$ 为对应弹体加载速率, $l$ 为对应变形前的弹体长度, $x$ 为对应加载后弹体未变形长度, $l_1$ 为对应加载后弹体全部长度。

### 1.2.3 平板撞击实验

超高应变率下,固体材料力学行为接近流体,这种情况下,要结合材料所对应状态方程研究塑性流动特性。平板撞击实验是通过加速平板进行加速,在高速率下冲击加载试样,实验装置结构如图1所示。利用磁质点速度仪、测速探针和激光干涉探测装置测量冲击波波速、弹速以及波后粒子速度等状态量所对应的联系。基于测量参数,根据物理守恒定律,得到所测材料各个参数之间对应的关系,确定状态方程。

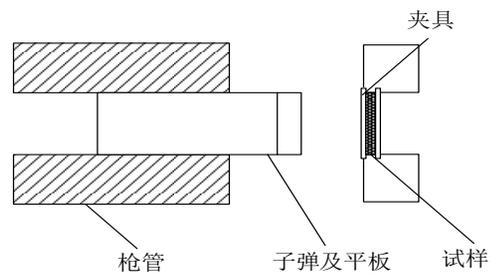


图1 平面撞击实验示意图

Fig. 1 Schematic of planar impact test

### 1.2.4 膨胀环实验

JOHNSON和WARENS等<sup>[8]</sup>分别提出和改进了高应变率加载的膨胀环试验,通过激光速度干涉装置获得该环的膨胀速度,使其成为研究高应变率下力学行为的重要手段。膨胀环实验简图如图2所示,主要由驱动器、试样薄环、爆炸装药、端部泡沫塑料、

激光速度干涉装置、雷管等组成。炸药发生爆炸产生的应力波沿圆环半径方向传播,因试件与驱动器材料阻抗不匹配导致薄圆环与驱动器分离,产生沿半径方向的膨胀变形,从而通过相关激光干涉装置得到膨胀环沿半径方向变形速率的时间历程关系,进一步得到试样在高速冲击下的本构关系。

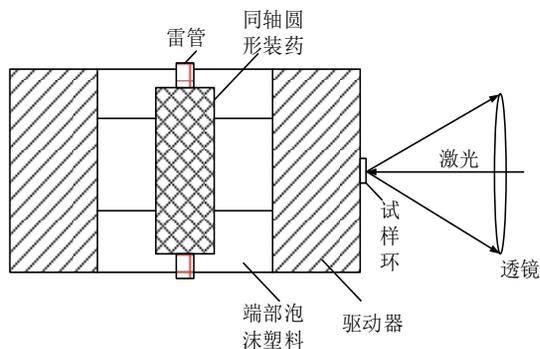


图2 膨胀环实验装置截面图

Fig. 2 Sectional view of expanding ring test

### 1.2.5 SHPB实验

SHPB是目前应用最广泛地分析材料在高应变率下动力学行为与本构模型的实验技术。自H. Kolsky改进J. Hopkinson与B. Hopkinson设计试验装置并将其应用到材料动态性能测试后,SHPB得到广泛应用与发展。在国外,在20世纪70年代前后,围绕这项技术进行了多方面的论证和研究,总结了加载试件的尺寸要求以及数据分析的相关方法,20世纪20世纪90年代以来,专家学者不断扩大SHPB技术的应用领域,特别是将其应用到软材料及脆性材料的冲击压缩性能研究<sup>[9]</sup>。国内研究工作主要集中在:(1)发展了反射式冲击拉伸试验、拉扭复合加载、小尺寸分离式霍普金森实验装置等;(2)进行了技术改进与拓展,有高温加载技术、入射波整形技术、被动围压实验等;(3)材料测试应用覆盖金属、岩石、混凝土、陶瓷材料、泡沫塑料等。

## 2 装甲结构防护机理及防护能力研究

为得到设定状态下多层抗弹结构的最优方案,需要对相关复合结构的防护机理及其防护能力进行分析。当前,抗弹结构防护能力的评定方法主要分为三类:(1)实验方法,通过根据多次试验结果对结构的防护能力进行研究,即基于实验得到不同试样的等效质量防护系数等评价结果;(2)数值分析,利用有限差分等数值分析方法模拟试验工况,并计算结果;(3)理论解析法,将现实模型转化为基本的物理简化模型,从而计算得到相关结果。

### 2.1 实验测试方法

通常研究装甲复合结构防护性能的试验手段分为弹道极限实验、穿深实验(DOP)以及反弹道冲击

试验三种。

弹道极限实验主要根据“两弹法”或试验靶背面破坏状况分析装甲结构的防护性能,需要进行大量实验且只对实验的弹靶系统有效;DOP实验是在相同弹丸速度下,通过测量弹丸在参照金属中的参照穿深和前置复合装甲的金属块中剩余侵彻穿深来确定装甲的抗弹性能,这种实验简单易行,但每次实验仅能测得一个数据;反弹道冲击实验是利用适当气炮加速靶板撞击静止长杆弹体,这种实验方法能同时采用多种技术观察弹体侵彻过程,但仅能进行小尺寸实验,靶板径向尺寸受到弹托尺寸以及气炮口径的限制。

### 2.2 数值分析方法

装甲抗弹丸侵彻过程是高应变率下复杂的受力过程,数值仿真利用计算机,求解弹丸侵彻装甲过程中所涉及的连续介质力学方程组,并得到侵彻中弹靶损伤形态以及各物理参量的时程变化关系,形象展现弹丸侵彻装甲的变形过程,可对理论实验分析存在缺陷进行补充<sup>[10]</sup>。通过数值分析手段得到研究装甲防护所需的各类参数,有利于进行不同边界条件、弹靶组合以及初始条件的计算,节省大量实验经费,因而得到了广泛应用。

装甲防护数值模拟中,根据质点与坐标的对应关系,主要有ALE算法、Lagrange法等。其中Lagrange应用最为广泛,对于分析材料的各阶段受力过程更为精确。数值模拟是设定在一定初始状态、约束状况下,通过模拟算法对相关物理状态方程等计算求解,目前,数值求解手段有:有限元法、离散法以及有限差分法等,其中,有限元法得到了更为广泛的使用。目前,对装甲防护进行分析的常用大型工程软件有:ABAQUS/Explicit、ANSYS/ls-dyna及ANSYS/Autodyn等。

### 2.3 理论解析方法

结合弹丸侵彻特征,参考其中重点影响参量,对现实模型进行简化,从而构建出物理模型,反映出弹丸侵彻中相关参量的对应关系。通常相关参量中不应引入需要经侵彻试验所获取的数据。利用理论解析方法,计算简单,实际使用方便,能较好分析装甲防护水平,满足现实工程应用的一般需求。但由于对弹靶作用过程进行了大量简化,所建模型仅适用于一定条件下的装甲防护分析,应用范围具有局限性。当前,对于装甲防护所构建的理论分析模型有:空腔膨胀理论、微分面力法、塑性动力学理论、局部相互作用理论以及侵蚀杆模型等。其中塑性动力学理论、侵蚀杆模型和空腔膨胀理论得到了大量使用。

### 2.3.1 空腔膨胀理论

最早介绍空腔膨胀理论的是 Bishop, 后续专家学者又对该理论进行了丰富和发展, 目前, 已经在分析装甲防护性能方面发挥着重要的作用。该方法假设在侵彻过程中, 垂直弹体的表面方向的受载可以通过空腔表面的切线方向受力代替。目前, 根据空腔形状可将空腔理论分为: 柱形空腔膨胀理论(弹形细长状况下)、球形空腔膨胀理论(弹形较钝状况下)。

空腔膨胀理论最初仅应用于均质金属, 目前该理论已逐步拓展到岩石等脆性材料。空腔不同区域主要根据其不同的受力状况进行划分, 相较于均质金属, 混凝土等脆性材料的拉压力学性能具有显著差异, 因而对其受载状况区分更加复杂。在质量和能量守恒的前提下, 根据不同区域受载状况, 考虑约束状况和材料本构模型关系, 构建空腔膨胀理论的方程, 得到弹靶侵彻过程的受力状况, 结合弹丸运动方程求解出弹丸对靶板的穿深。

### 2.3.2 侵蚀杆模型

Alekseevski 以及 Tate 在 20 世纪 60 年代最早提出 A-T 模型, 在 A-T 模型中, 高速弹丸在侵蚀装甲材料时, 弹靶接触部位由于受到较高压力, 呈现熔融状态, 因此将弹靶接触部位视为流体。弹丸的后方部分由于惯性作用继续以原始速度侵彻, 从而弹靶接触部位的熔融区随着弹丸向前运动开始向两侧扩展。在该模型中, 假设弹丸和靶板接触面均处于流体状态, 结合 Bernoulli 方程, 则弹丸的状态方程表达为:

$$\rho_p(v - V)^2/2 + Y_p = \rho_t V^2/2 + R_t \quad (2)$$

式中,  $v$ 、 $V$  分别代表弹丸和靶板的撞击速度及弹丸的冲击速度,  $\rho_p$ 、 $\rho_t$  分别代表弹丸、靶材的密度,  $Y_p$  代表弹丸的屈服强度,  $R_t$  代表靶材的强度参数。

当前, 众多专家学者不断对 A-T 模型进行补充和完善(比如将弹头形状因素引入), 从而对弹丸侵彻靶板建立相关模型进行研究。

### 2.3.3 塑性动力学理论

根据塑性动力学的原理, 结合能量、动量、质量守恒、经典质量守恒, 构建并求解弹丸侵彻靶板的状态方程, 从而获得复合靶板对应弹丸剩余速度、弹道极限等参数, 对于陶瓷/金属结构构建的 Forence 模型即是经典模型之一。

## 3 多层复合结构及防护性能研究

为研究多层复合结构防护能力, 确定防护材料后, 需要对多层复合结构各层优化, 再利用实验等测试方法选取出最优的复合结构方案。多层复合结构中, 陶瓷包括 SiC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等多种类型, 其余应用广泛的

材料有钛合金、铝合金及装甲钢等, 此外近几年纤维增强材料也在装甲中逐步得到应用。在设计装甲结构时, 需要选取合适的材料以及优化的结构形式。目前陶瓷复合装甲有间隙、夹芯等多种不同的排布方式。此外结构设计中, 装甲结构的约束条件也应进行重点考虑。

### 3.1 材料种类影响

在复合装甲中, 材料类型的选取对多层复合结构的防护性能影响很大。COMPTON 等<sup>[11]</sup>通过试验方法研究了面密度相等条件下 TC30 金属陶瓷、氧化铝陶瓷以及 DDG-X 三种陶瓷分别作面板时, 多层复合结构的防护效果。结果表明: 不同陶瓷做面板对结构的弹道极限速度影响很小, 但相同弹体在相同撞击速度下, DDG-X 的破坏形貌最小, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷破坏程度最大; REAUGH 等<sup>[12]</sup>研究了 5 种陶瓷对多层结构防护性能的影响, 结果表明: 弹丸侵彻速度低于 2 km/s, SiC、TiO<sub>2</sub>、B<sub>4</sub>C 陶瓷作面板其防护能力最优; 弹丸侵彻速度高于 2 km/s, AlN 陶瓷作面板其抗侵彻能力最优。

### 3.2 结构形式影响

在复合装甲中, 材料排布对装甲防护能力具有重要影响。将 45# 钢、有机玻璃以及铝排布成不同结构, 设计了顺阻抗梯度形式、逆阻抗梯度形式及硬软硬多层排布形式, 利用压阻传感器研究了多层结构中的波阻抗效应对防爆效果的影响, 得到了不同组合形式结构在冲击载荷作用下各层压力, 发现逆序阻抗排布形式的背部冲击强度最小, 防爆性能最佳; UBEYLI 等<sup>[13]</sup>分析了穿甲燃烧弹侵彻铝合金+陶瓷+铝合金、陶瓷+铝合金排布方式的防护性能。结果表明同等面密度下陶瓷放置在两层金属之间不利于提高其防护能力。

### 3.3 各分层厚度影响

在复合装甲中, 确定材料排布形式后, 各分层厚度的分配对复合结构防护能力也会产生影响。在复合结构限定总的面密度和厚度时, SHI 等<sup>[14]</sup>研究了穿甲燃烧弹侵彻陶瓷/金属的最优化设计, 发现总面密度、厚度同弹道极限变化的历程曲线相交点即为优化结果; FERNANDEZ-FDZ 等<sup>[15]</sup>通过神经网络确定了陶瓷/金属结构的最优方案, 得到了靶板厚度、弹丸剩余速度、靶板穿孔尺寸以及弹丸侵彻速度之间的关系。

### 3.4 约束效应影响

复合装甲结构中约束效应对其防护能力具有较大影响。CONG 等<sup>[16]</sup>研究了金属熔覆法实现金属约束陶瓷的封装方法, 发现无论非反应性还是反应性润湿, Si 的含量对 SiC 陶瓷和纯金属有较大影响, 其

中金属适宜选取纯铝或铝硅合金;WANG等<sup>[17]</sup>研究了无渗压铸法研究了陶瓷封装技术,利用无压浸渗法对碳化硼复相材料进行了制备,采用渗体为熔融硅,复合材料孔隙率0.29%~0.34%;在数值模拟基础上,TAN等<sup>[18]</sup>分析发现纤维丝预先设定剥离或脱落的尺寸、位置、形式等会对多层复合结构的防护能力具有显著影响。

### 3.5 层间界面的影响

层间界面对复合装甲结构的防护能力也会产生重要影响。SIGNETTI等<sup>[19]</sup>通过LS-DYNA分析了多层之间的连接强度对陶瓷复合结构防护性能的影响,得到了弹丸速度、弹丸形状以及结构形式一定条件下最优的界面连接强度;PRAKASH等<sup>[20]</sup>利用Autodyn有限元软件研究了界面粘结厚薄对陶瓷/铝合金复合结构防护性能的影响,发现复合结构抗侵彻变形随粘接层的厚度增大而变大,但穿深不随粘接层厚度单调改变,需要经过数值模拟确定最优方案。

## 4 结语

针对多层防护装甲主要以陶瓷+金属复合结构、陶瓷/非金属复合结构以及金属/非金属等两层复合结构为主,而对于三层及三层以上复合形式的防护能力受排布方式、分层厚度以及有无夹芯等影响情况尚未进行系统研究,研发新材料、研究多层复合结构的抗侵彻机理以及进行多层复合结构的优化设计将成为装甲防护领域未来发展方向。

### 参考文献

[1] 刘杰,郝巍,孟江燕.蜂窝夹层结构复合材料应用研究进展[J].宇航材料工艺,2013,43(3):25-29.

[2] GAMA B A,BOGETTI T A,FINK B K, et al.Aluminum foam integral armor a new dimension in armor design [J]. Composite Structures,2001,52(3/4):381-395.

[3] PRAKASH A,RAJASANKAR J,ANANDAVALI N, et al.Influence of adhesive thickness on high velocity impact performance of ceramic/metal composite targets[J].International Journal of Impact Engineering,2013,41:186-197.

[4] HUNG P,CHOI K,CHIANG V. Using interactive computer simulation for teaching the proper use of personal protective equipment [J].Computers Informatics Nursing,2015,33(2):49-57.

[5] HAHFUZ H,ZHU Y,HAQUE A, et al.Investigation of high velocity impaction integral armor using finite element method[J].International Journal of Impact Engineering,2000,24(3):203-217.

[6] KYLE M,BALINT K,PEDRO C, et al.Quasi-static and high strain rate response of aluminum matrix syntactic foams under compression[J].Composites:Part A,2015,79:82-91.

[7] ALTAYEB M,ABU B,AKIL H,ISMAIL H.Effect of

partial replacement of sand by fine crumb rubber on impact load behavior of concrete beam: experiment and nonlinear dynamic analysis[J].Materials and Structures,2013,46(8):1299-1307.

[8] WARNES R,KARPP R,FOLLANSBEE P.The freely expanding ring test—a test to determine material strength at high strain rates[J].Journal De Physique IV,1985,C5:583-590.

[9] DINANKAR G,AARON W,CONNER R D.Uniaxial quasistatic and dynamic compressive response of foams made from hollow glass microspheres [J]. Journal of the European Ceramic Society,2016,36:781-789.

[10] BAZLE A,JOHN W,GILSSPIE J.Finite element modeling of impact,damage evolution and penetration of thick-section composites [J]. International Journal of Impact Engineering,2011,38:181-197.

[11] COMPTON B,ZOK F.Impact resistance of tic-based cermets [J].International Journal of Impact Engineering,2013,62:75-87.

[12] ROSERNBERG Z,DEKEL E,HOHLER V, et al.Penetration of tungsten-alloy rods into composite ceramic targets: experiments and 2D simulations[J].AIP Conference Proceedings,1998,429:917-920.

[13] SHI J,GROW D.Effect of double constraints on the optimization of two-component armor systems [J]. Composite Structures,2007,79:445-453.

[14] FERNANDZ D,ZAERA R.A new tool based on artificial neural networks for the design of lightweight ceramic-metal armour against high-velocity impact of solids [J]. International Journal of Solids and Structures,2008,45:6369-6383.

[15] BEN G,DUBINSKY A,ELPERIN T.Improved Florence model and optimization of two-component armor against single impact or two impacts[J].Composite Structures,2009,88:158-165.

[16] CONG X,SHEN P,WANG Y, et al.Wetting of polycrystalline SiC by molten Al and Al-Si alloys [J]. Applied Surface Science,2014,317:140-146.

[17] WANG J,LIN W,JIANG Z, et al.The preparation and properties of SiC<sub>w</sub>/B<sub>4</sub>C composites infiltrated with molten silicon [J].Ceramics International,2014,40(5):6793-6798.

[18] TAN P.Numerical simulation of the ballistic protection performance of a laminated armor system with pre-existing debonding/delamination[J].Composites:Part B,2014,59:50-59.

[19] SIGNETTI S,PUGNO N.Evidence of optimal interfaces in bio-inspired ceramic-composite panels for superior ballistic protection[J].Journal of the European Ceramic Society,2014,31(11):2823-2831.

[20] PRAKASH A,RAJASANKAR J.Anandavalli, et al.Influence of adhesive thickness on high velocity impact performance of ceramic/metal composite targets[J].International Journal of Impact Engineering,2013,41:186-197.