

文章编号: 1000-324X(2005)01-0099-06

## Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BN 层状复合陶瓷抗穿甲破坏实验研究

李翠伟<sup>1</sup>, 汪长安<sup>2</sup>, 黄勇<sup>2</sup>, 赵世柯<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学材料科学与工程系新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 研究了 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BN 层状复合陶瓷的抗冲击破坏及抗穿甲破坏行为。研究发现: 在射钉枪的作用下, 处于自由状态的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BN 层状复合陶瓷比 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 块体陶瓷具有更好的抗冲击破坏能力。在 7.62mm 口径穿甲燃烧弹的作用下, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BN 层状复合陶瓷的抗穿透能力比 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 块体陶瓷略有下降, 但仍远远高于 45 号钢材, 而且在实弹冲击后不会像 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 块体陶瓷那样整体破坏。

**关键词:** 层状复合陶瓷; 抗穿甲破坏; 防护系数

**中图分类号:** TQ174 **文献标识码:** A

### 1 引言

纵观装甲材料的发展, 从传统的金属材料(钢、铝等), 到现在先进的陶瓷材料与复合材料(聚合物基、金属基、陶瓷基等), 装甲材料一直向着轻质、高效的方向发展, 装甲系统的轻质高效对提高军机与作战人员的机动性、攻击性及战场生命力来说至关重要<sup>[1~5]</sup>。金属是现代装甲中使用最广的材料之一, 但对于军机和人体的近身防护而言, 由于其重量较大而影响了其战术性能发挥。随后出现的防弹陶瓷以其较轻的质量及优异的性能价格比而逐渐取代了金属装甲, 其中氮化硅基陶瓷就是较好的装甲材料之一。

然而, 陶瓷材料固有的脆性既限制了其不能单独作为防弹材料使用, 又大大影响了陶瓷/复合材料装甲系统的抗弹伤能力<sup>[4~7]</sup>。因此提高陶瓷面板的韧性、延长陶瓷面板断裂锥体的断裂时间将有效地提高陶瓷/复合材料装甲系统的抗弹伤能力。此外, 陶瓷材料在拉伸载荷作用下, 断裂行为首先发生在非均质处, 陶瓷属于缺陷敏感材料。若要作为装甲材料使用, 应使陶瓷材料的微观应力集中减小到最小程度, 即生产的装甲陶瓷应当是孔隙率低和细晶结构的高质量陶瓷<sup>[7]</sup>, 这就给整个生产工艺及原料提出了很高的要求。因而开发“缺陷不敏感”陶瓷材料作为装甲将会简化工艺、降低成本。

层状复合陶瓷是近年来研究较广泛的一种新型复合陶瓷, 由于其特殊的层状结构而成为一种“缺陷不敏感”且具有高韧性的材料, 然而还没有研究工作者对其抗穿甲破坏行为进行研究。本文初步研究了 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BN 层状复合陶瓷的抗穿甲破坏行为, 为其作为装甲材料应用奠定基础。

收稿日期: 2003-12-11, 收到修改稿日期: 2004-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51072023)

作者简介: 李翠伟(1973-), 女, 博士, 讲师。E-mail: lcw@jdxj.bjtu.edu.cn

## 2 实验过程

### 2.1 试样制备

在  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷的制备过程中, 采用一定配比的  $\text{MgO}-\text{Y}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$  作为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  基层的烧结助剂. 制备工艺如文献 [8] 所示. 块体陶瓷采用与  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷中  $\text{Si}_3\text{N}_4$  基层配方相同的粉料配比, 采用干压成型、相同工艺热压烧结而成. 用上述工艺制得材料的物理性能如表 1 所示.

表 1 材料的物理性能

Table 1 Mechanical properties of samples

Samples	Bending strength /MPa	Fracture toughness /MPa·m <sup>1/2</sup>	Elastic module /GPa	Density /g·cm <sup>-3</sup>
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ laminated ceramics	770	28	240	3.07
$\text{Si}_3\text{N}_4$ monolithic ceramics	970	9	290	3.20

### 2.2 抗穿甲破坏实验原理

通常有两种方法来评定靶板及装甲系统的防护能力, 一种是弹道极限, 另一种是重量有效系数 (即防护系数)<sup>[9,10]</sup>. 防护系数的定义是指能有效地防住一种弹丸的基准钢质靶板的单位面积重量对需要防住同样弹丸的试验靶板的单位面积重量之比, 可分为总体效益系数 (TEF) 和局部效益系数 (DEF). 局部效益系数的定义如图 1 所示, 其中  $P_0$  是指弹丸在钢板中的标准侵彻深度 (图 1(b)),  $P_1$  是附加装甲 (即试验材料) 的厚度,  $P_x$  是弹丸在钢制基本装甲中的剩余侵彻深度 (图 1(a)).

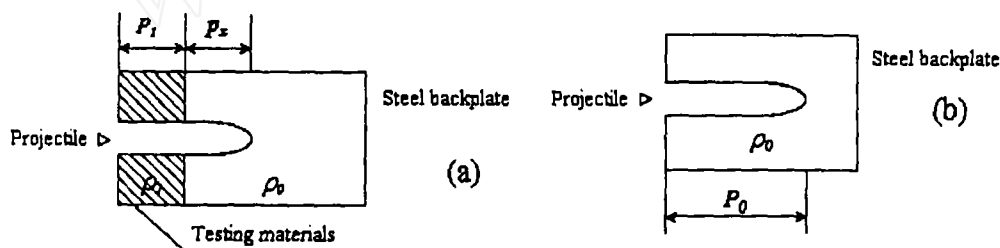


图 1 弹丸侵入: (a) 带有附加单元的主装甲; (b) 基准靶板<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Pierce of projectile: (a) main armour with adjunctive armour; (b) fiducial armour

局部效益系数的定义如公式 1 所示.

$$DEF = \frac{W_0 - W_x}{W_1} \quad (1)$$

其中,  $W_0 = \rho_0 P_0$ ,  $W_1 = \rho_1 P_1$ ,  $W_x = \rho_0 P_x$ . 因此 DEF 也可以用另一种形式来表示, 即用标准侵彻深度和剩余侵彻深度的形式来表示, 如公式 2 所示.

$$DEF = \frac{\rho_0(P_0 - P_x)}{\rho_1 P_1} \quad (2)$$

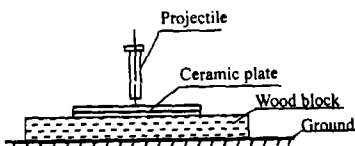


图 2 射钉枪射击过程示意图

Fig. 2 Sketch map of nail impact on the target

本文采用防护系数之局部效益系数来表征材料的抗穿透能力.

## 2.3 抗穿甲破坏实验过程

### 2.3.1 抗射钉枪冲击破坏实验

为了更好地研究  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷的抗穿甲破坏行为, 在进行实弹试验前先定性研究了其抗冲击能力. 为保证与实弹实验条件接近, 而采用射钉枪进行模拟实验. 该射钉枪的射钉速度为: 一枪可穿透 6mm 厚的钢板和 30mm 厚的铝合金板. 实验所采用的  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷均为 3mm 厚, 在实验过程中  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷及  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷均处于自由状态. 图 2 为射钉枪射击过程示意图.

### 2.3.2 抗穿甲燃烧弹破坏实验

分别对  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷进行了实弹侵彻实验. 实验是在中科院力学所爆炸力学实验室进行的. 采用的是 53 式 7.62mm 口径穿甲燃烧弹, 其穿甲钢芯的重量为 10.18~10.72g, 直径为 7.68~7.92mm. 本实验的着靶速度为 820m/s 左右, 垂直入射, 进行侵彻. 图 3 为实弹侵彻实验装置的示意图.

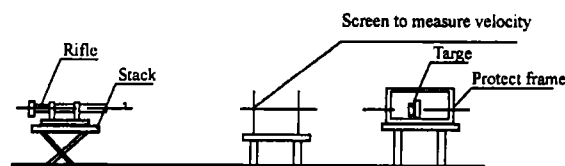


图 3 实弹侵彻实验装置示意图

Fig. 3 Sketch map of bullet impact on the target

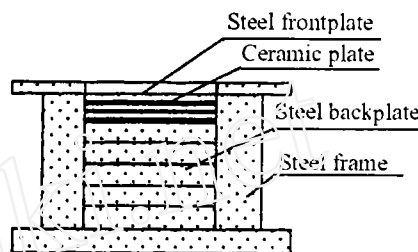


图 4 靶板构造示意图

Fig. 4 Sketch map of armour configuration

在实验过程中  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷及  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷均处于约束状态. 约束方法为采用内径为 50mm 的 45 号钢制外套紧紧箍在陶瓷靶板外, 在陶瓷靶板着弹侧以厚约 1mm 的钢板覆盖. 靶板构造如图 4 所示.

其中验证靶为经过调质处理的 45 号钢板, 其直径约为 50mm, 厚度约为 5mm.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 抗射钉结果及分析

射击完毕后发现,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷完全破碎飞出约方圆十米的范围, 射钉穿透木板并深深钉在地上. 图 5(a) 为找回的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷碎片拼成的照片. 而  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷仍保持了完好的外形. 虽然射钉也击穿了  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷, 但并未完全穿过其中, 只是部分穿透  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷进入背后的木板中, 而另外的部分却停留在  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷表面不能前进. 图 5(b)~(d) 是  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷经过射钉枪射击后的形貌图.

图 6 为射钉在射击  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷前后的对比照片. 对比图 6 中射钉在射击前后的形貌可以发现, 冲击  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷后射钉前端被钝化. 这是由于高的碰击压力使得射钉的径向和周向的拉伸力超过了流动应力极限而发生的.

分析射钉的侵蚀过程可以发现, 射钉尖端的钝化使得射钉与陶瓷作用的接触面增加, 从而分散了作用在陶瓷靶材的载荷. 在高速碰击区陶瓷表面产生张应力场, 使其表面  $\text{Si}_3\text{N}_4$  基层产生微细裂纹, 从碰击区向外延伸. 在张应力波的作用下,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷粉末从射钉碰击区向周围飞散出去. 这一过程对于块体  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷及  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷而言应该是一

致的. 随着射钉的深入, 在冲击背面的裂纹发展很快, 一开始裂纹主要是径向的, 因为张力场的周向应力分量大于其它方向的分量. 当射钉侵入  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷时, 径向的张力超过材料本身所能承受的张力极限时,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷就会迅速断裂, 又由于四周没有约束, 因此在径向张力的作用下,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷会形成多个碎片向四周飞溅出去; 而当射钉侵入  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷时, 其中由于弱的 BN 中间层存在而使得径向的裂纹有了扩展的空间, 而此过程会消耗大量的能量, 使得张力减弱至材料所能承载的张力极限之下, 因而  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷能够保持完好的形貌, 而不会整体破坏.

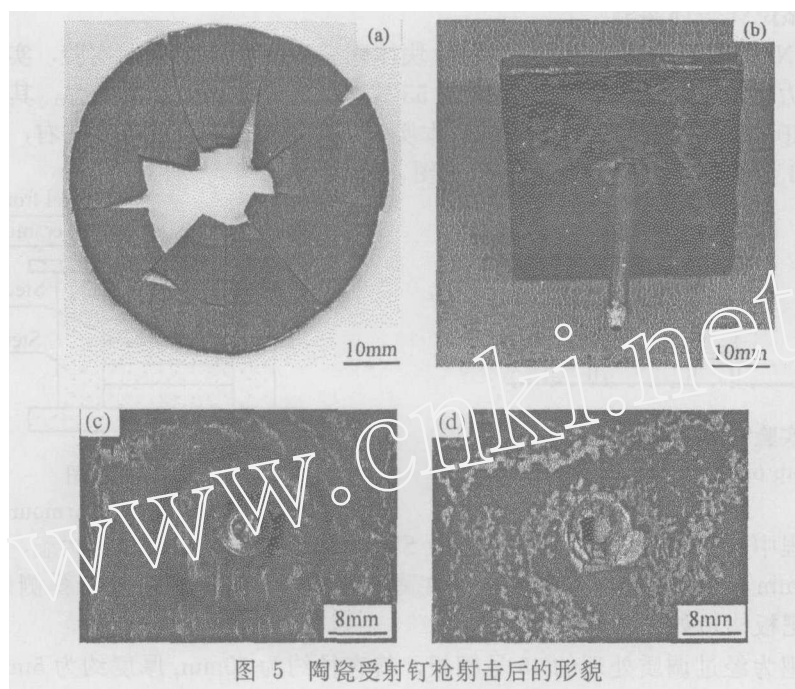


图 5 陶瓷受射钉枪射击后的形貌

Fig. 5 Ceramic armors after impact by steel nail

(a)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  monolithic ceramics; (b) The side face of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics; (c) The face of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics; (d) The back face of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics

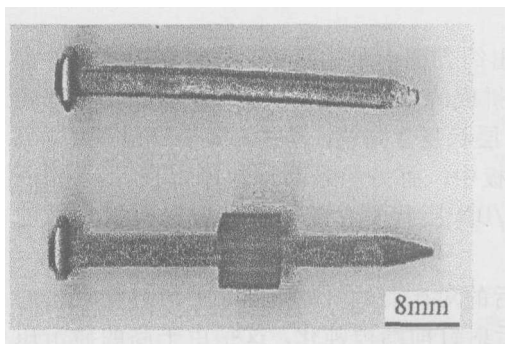


图 6 射钉枪的射钉在射击  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷前后的对比照片

Fig. 6 Contrastive picture of steel nail before and after impact on the  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics

综合以上研究可以看出, 在射钉枪的射钉作用下, 与处于自由状态的块体  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷相比, 同样处于自由状态的  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷具有更好的抗冲击破坏性能.

### 3.2 抗穿甲破坏结果及分析

表 2 为  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷及  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷抗实弹侵彻的数据, 以及根据防护系数定义计算而来的防护系数结果, 其中标准穿深为 21.99mm.

由表 2 可以看出, 与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷相比,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷的抗穿透能力稍差, 但与验证靶 (45 号钢) 相比,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷具有更好的抗穿透能力.

表 2 抗穿甲破坏实验结果

Table 2 Data of armour pierce-resistance experiment

Materials	$\text{Si}_3\text{N}_4$ monolithic ceramics	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ laminated ceramics	Validatory target
Velocity of projectile/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	820	824	823
Thickness of samples/mm	4.16	6.21	—
Residual depth /mm	0.49	1.76	—
Ballistic efficiency factor	12.8	8.7	1

观察穿甲实验结束后材料的状态可以发现,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷整体粉碎, 仅有少量碎片残余; 而  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷则保持相对完整的外形. 图 7 显示的是  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷在侵彻实验结束后的形貌图.

由图可以看出,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷在经历了一次穿甲燃烧弹的高速冲击后仍能保持较完整的形态, 具有一定的抗二次冲击能力.

由以上结果可以发现, 虽然与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷相比,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷的抗穿透能力稍差, 但其完整性明显增强. 这种现象可以通过分析陶瓷材料在穿甲冲击中的吸能过程及子弹在撞击与侵彻过程中的能量变化得到解释.

研究表明<sup>[7,9,10]</sup>, 陶瓷材料之所以能起到抗弹伤的效果, 是因为其具有非常高的硬度及高的弹性模量, 能吸收穿甲弹或破甲弹的大部分动能, 其吸能机制非常复杂, 但大体可以分为: 初始撞击阶段、侵蚀阶段及变形、裂缝和断裂阶段. 在初始撞击阶段, 由于陶瓷材料具有高的硬度和高的抗压强度, 当子弹高速入射到陶瓷面板上时就会在撞击面上产生很强的压缩波, 使得子弹和陶瓷面板内部的压应力均迅速增长. 子弹由于其中的压应力超过其屈服应力而发生塑性变形而钝化, 甚至压应力超过其破坏极限而破碎, 在陶瓷表面形成细小而坚硬的碎块. 同时, 陶瓷面板上形成了环向和径向的初始裂纹. 进入侵蚀阶段后, 变钝或破碎的子弹继续向陶瓷材料中侵彻, 子弹由于陶瓷材料的磨蚀而加剧破碎; 陶瓷材料上的初始裂纹开始扩展, 形成连续的陶瓷碎片层, 进一步吸收子弹的动能. 由于弹丸质量大量损失, 使得弹丸能量损失速度很高. 此后陶瓷吸能进入最后一个阶段, 即变形、裂缝和断裂阶段, 随着子弹的深入, 陶瓷材料中的裂纹进一步扩展, 子弹碎片与陶瓷碎片一起向后飞出, 最后由于张应力作用而形成以弹头为顶点的陶瓷破碎圆锥体, 弹丸侵蚀过程停止, 陶瓷材料吸收子弹的动能过程结束.

经过分析陶瓷装甲的吸能机制可以发现, 陶瓷之所以具有高的抗穿透能力是因为其具有高的硬度、弹性模量及抗压强度, 而之所以完全破碎是由于其脆性所导致的. 就本实验而言,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷与  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷相比具有更高的表观硬度、弹性模量及抗弯强度, 因此在弹丸撞击与侵蚀过程中  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷可以消耗更多弹丸的能量, 显示出更

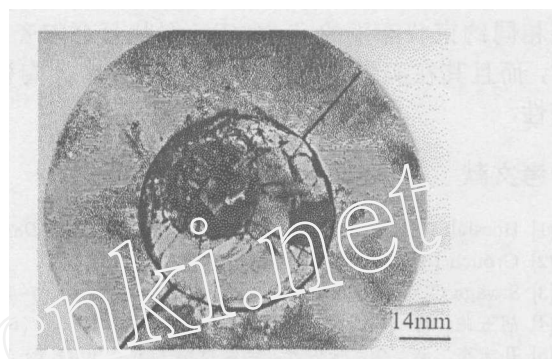


图 7  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷在实弹侵彻实验结束后的形貌图

Fig. 7  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics after impact by projectile

好的抗穿透能力;  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷则由于 BN 中间层的引入而具有较高的韧性, 在侵蚀过程中由于韧性的提高而使得侵蚀时间延长, 且在此过程中由于弱的 BN 中间层的存在而使得径向裂纹有了扩展的空间, 从而材料只发生局部破碎而不会整体破坏仍保持较完整的形态.

#### 4 结论

1. 在射钉枪的射钉的作用下, 处于自由状态的  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷保持了完整的形态, 但相同自由状态的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷却完全破碎, 实验证明  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷具有比  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷更好的抗冲击破坏能力.

2. 在 7.62mm 口径的穿甲燃烧弹的作用下, 与处于约束状态的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷相比, 在相同约束状态下的  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  层状复合陶瓷的防护系数略有下降, 但仍远远高于 45 号钢材, 而且其在实弹冲击后不会像  $\text{Si}_3\text{N}_4$  块体陶瓷那样发生整体破坏, 而是仍保持有一定的完整性.

#### 参考文献

- [1] Horsfall I, Austin S J, Bishop W. *Materials and Design*, 2000, **21**: 19-25.
- [2] Crouch I G. *Materials Forum*, 1988, **12**: 31-37.
- [3] Savage G. *Metals and materials*, 1990, **6** (8): 487-492.
- [4] 胡玉龙, 蒋 凡. 兵器材料科学与工程, 1996, **19** (5): 37-42.
- [5] 孔志杰, 吴 燕, 张佐光. 宇航材料工艺, 2000, **5**: 10-14.
- [6] 仲伟虹, 张佐光, 梁志勇. 兵器材料科学与工程, 1998, **21** (3): 19-22.
- [7] 依公焯. 兵器材料科学与工程, 1991, **4**: 58-64.
- [8] 李翠伟, 黄 勇, 汪长安, 等 (LI Cui-Wei, et al). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2002, **17** (6): 1220-1226.
- [9] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应. 第一版, 北京: 北京理工大学出版社, 1993. 194-198.
- [10] 黄良钊. 兵器材料科学与工程, 2001, **24**: 3-6.
- [11] 曹贺全. 兵器材料科学与工程, 1991, **4**: 68-72.

#### Armour Pierced-Resistance Behavior of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ Laminated Ceramics

LI Cui-Wei<sup>1</sup>, WANG Chang-An<sup>2</sup>, HUANG Yong<sup>2</sup>, ZHAO Shi-Ke<sup>2</sup>

(1. The School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Lab of New Ceramics and Fine Processing, Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The behaviors of impact resistance and armour pierced-resistance of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics were studied. The study on the impact resistance indicated that the impact resistance ability of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics was more predominate than that of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  monolithic ceramics. The ballistic efficiency factor of the  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics was slightly smaller than that of the monolithic  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics, but it was much higher than that of steel. Compared to the smashing behavior of the monolithic  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics could keep the integrality to some extent after impacted by bullet. The destructive mechanism of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  laminated ceramics impacted by bullet was discussed, which provides theoretical analysis basis for its' bullet-proof structure designing.

**Key words** laminated ceramics; armour pierced-resistance; ballistic efficiency factor