

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0338

长杆弹撞击装甲陶瓷界面击溃/侵彻特性*

谈梦婷, 张先锋, 包 阔, 魏海洋, 韩国庆
(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 界面击溃/驻留效应可以有效提高装甲陶瓷的抗侵彻能力。为研究长杆弹撞击装甲陶瓷界面击溃及侵彻特性,开展了长杆弹撞击装甲陶瓷实验研究。同时,基于裂纹扩展理论建立了考虑界面击溃/驻留效应的长杆弹侵彻装甲陶瓷计算模型,以定量描述界面击溃/驻留效应对装甲陶瓷抗侵彻性能的影响。不同弹靶条件下的界面击溃/侵彻转变速度、界面驻留时间、侵彻速度与侵彻深度的理论计算值与实验结果具有较好的一致性,表明计算模型可靠。在此基础上,分析了弹体及陶瓷材料对界面击溃/驻留及侵彻过程的影响规律。研究结果表明:随着弹体撞击速度的提高,陶瓷表面由界面击溃向侵彻转变。考虑界面击溃/驻留效应的长杆弹侵彻装甲陶瓷理论模型,可以较好地反映不同弹体撞击速度对应的弹靶作用模式。弹体材料的屈服强度和密度越高,界面驻留时间越短,弹体侵彻靶体的能力越强;陶瓷的屈服强度越高,界面击溃/驻留效应越显著,靶体的抗侵彻能力越强。考虑界面击溃/驻留效应的长杆弹侵彻装甲陶瓷理论模型揭示了部分界面击溃作用机理,可为陶瓷复合靶的设计提供参考。

关键词: 长杆弹;陶瓷;界面击溃;驻留效应;侵彻;撞击

中图分类号: O385 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Characteristics of interface defeat and penetration during the impact between a ceramic armor and a long-rod projectile

TAN Mengting, ZHANG Xianfeng, BAO Kuo, WEI Haiyang, HAN Guoqing

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: Interface defeat/dwell can effectively improve the anti-penetration performance of a ceramic armor at certain degree, which attracts the attention from researchers all over the world in recent years. Experiments on a ceramic armor subjected to the impact of a long-rod projectile (LRP) were carried out to investigate the characteristics of interface defeat and penetration during the impact in this paper. A theoretical model for the penetration process of a LRP into a ceramic target with semi-finite thickness at different impact velocities was established by considering interface defeat/dwell to study quantitatively the effect of interface defeat/dwell on the penetration. The theoretically calculated results on dwell/penetration transition velocity, dwell time, penetration velocity and depth of penetration agree well with the experimental data, which proves that the established theoretical model is accurate. The influences of the projectile and ceramic materials on the interface defeat/dwell and penetration were analyzed. Both the experimental results and the calculated results by the theoretical model show that the interaction between LRPs and ceramics transfers from interface defeat to penetration when the impact velocity increases. It also indicates that the established theoretical model can depict the interaction modes of ceramics and LRPs under different impact velocities. The yield stress and density of the projectile materials play a coupling role in the interaction between LRPs and ceramics when the interface defeat/dwell occurs. The higher the yield strength and density of the projectile materials, the shorter the dwell time and the higher the penetrating ability of the projectile. The higher the dynamical yield strength of the

* 收稿日期: 2020-09-22; 修回日期: 2020-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(11772159); 中央高校基本科研业务费专项资金(30920021108)

第一作者: 谈梦婷(1991—), 女, 博士, mengting.tan@njust.edu.cn

通信作者: 张先锋(1978—), 男, 博士, 教授, lynx@njust.edu.cn

ceramics, the more markedly the interface defeat/dwell and the higher the anti-penetration ability of the ceramic armors. The established theoretical model in consideration of interface defeat/dwell can partially reveal the mechanism of the interface defeat, and it can provide a reference for the design of ceramic composite targets.

Keywords: long-rod projectile; ceramic; interface defeat; dwell; penetration; impact

与传统装甲钢相比,陶瓷密度低、硬度高、抗压性能好,在防护装甲设计中有较好的应用前景。高强度陶瓷可以使来袭的高速弹体产生明显的塑性变形,有效防御威胁。射弹撞击陶瓷材料时,弹体材料在弹靶接触面径向流动,靶体无明显的变形行为,这种现象被称为驻留(dwell)。弹体在驻留过程中完全侵蚀的现象被称为界面击溃(interface defeat)^[1]。

近年来,学者们针对装甲陶瓷界面击溃/驻留效应开展了大量研究工作。Hauver 等^[2]率先报道了长杆弹撞击陶瓷复合靶的界面击溃现象。Anderson 等^[3-7]、Holmquist 等^[8]和 Lundberg 等^[9-15]对不同速度射弹撞击陶瓷复合靶进行了实验研究。这些实验研究结果表明:在特定的弹靶撞击条件下,陶瓷表面产生驻留或界面击溃现象,后效背板中侵彻深度显著减小;同时,随着撞击速度的提高,弹体在陶瓷表面由界面击溃向侵彻转变。Anderson 等^[16]、李继承等^[17-18]和 Li 等^[19-21]在修正流体动力学一维模型(Alekseevskii-Tate (A-T)模型)的基础上,建立了界面击溃条件下弹体变形、动能变化的理论模型。Lundberg 等^[9-10, 14-15]通过建立运动学方程,获得了界面击溃过程中弹靶表面接触压力,并求得界面击溃/侵彻转变速度表达式,再结合锥裂纹形成与扩展规律,探讨了弹体尺寸效应对界面击溃产生的影响。La Salvia^[22-24]分别对陶瓷内微观翼型裂纹扩展与塑性破坏区的产生进行理论描述,分析了界面击溃/侵彻转变过程。Zhang 等^[25]和谈梦婷等^[26]建立了界面击溃条件下基于翼型裂纹和锥裂纹扩展的陶瓷材料损伤演化模型。学者们对半无限厚的单质陶瓷、有限厚的陶瓷复合靶及陶瓷作为面板的半无限靶的侵彻过程进行了研究。陶瓷与半无限厚金属组成的复合靶(以下简称装甲陶瓷)侵彻理论中较典型的是 Fellows 等^[27]建立的集中质量模型,采用该模型能较合理地对比杆形弹高速侵彻半无限陶瓷复合靶过程进行计算,但是模型中弹靶作用耦合机制复杂,参数确定困难,不利于侵彻深度的计算。综上所述,现阶段研究成果局限于分析界面击溃产生的原因及预测界面击溃向侵彻转变的过程,缺乏考虑陶瓷界面击溃/驻留效应的侵彻动力学模型研究工作。通过定量分析界面击溃/驻留效应对长杆弹侵彻陶瓷的影响,可以为陶瓷复合靶结构设计提供有力指导。

长杆弹撞击装甲陶瓷的侵彻深度(depth of penetration, DOP)实验是研究陶瓷界面击溃/侵彻特性的有效手段^[28]。本文中围绕长杆弹撞击装甲陶瓷的 DOP 实验展开研究,分析弹靶撞击过程中的界面击溃与侵彻现象。建立考虑界面击溃/驻留效应的长杆弹侵彻装甲陶瓷计算模型,将模型计算结果与实验获得的不同弹靶条件下的界面击溃/驻留和侵彻特性进行对比,验证理论模型的可靠性。结合理论模型和实验研究对不同撞击速度下弹靶界面击溃/驻留特性和侵彻特性进行规律性分析并研究弹靶材料特性对界面击溃及侵彻特性的影响。

1 考虑界面击溃/驻留效应的长杆弹侵彻装甲陶瓷理论模型

长杆弹以不同速度撞击装甲陶瓷时,随着弹体撞击速度的提高,将出现界面击溃、驻留/侵彻转变过程和侵彻过程。撞击速度较低时,弹体在陶瓷表面径向流动,弹体质量侵蚀、速度下降,陶瓷表面没有明显的侵彻现象,因此后效靶侵彻深度为零,表现为弹体在陶瓷表面界面击溃。随着撞击速度的提高,弹体先在陶瓷表面界面驻留,随后侵彻陶瓷,该过程称之为界面驻留/侵彻转变过程。撞击速度较高时,弹体直接侵彻装甲陶瓷。界面击溃/侵彻转变速度是一定的速度区间,当弹体撞击速度在此区间内时,陶瓷表面将产生界面驻留/侵彻转变过程。界面击溃/侵彻转变速度区间的最小值对应陶瓷出现界面击溃的最高弹体撞击速度,最大值为弹体侵彻陶瓷的最小弹体撞击速度^[9]。

考虑界面击溃/驻留的长杆弹侵彻装甲陶瓷模型如图 1 所示,图 1 中虚线部分为弹体界面驻留过程。利用该模型可得界面驻留过程中弹靶参数变化规律以及半无限钢靶中的剩余侵彻深度,以分析界

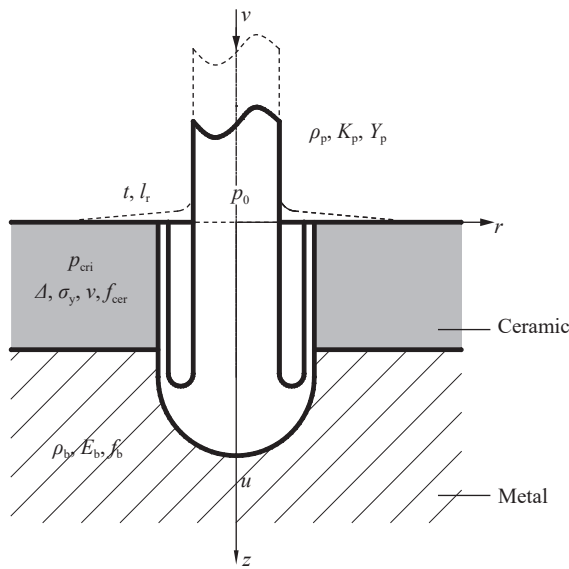


图 1 考虑界面击溃/驻留的长杆弹侵彻装甲陶瓷模型

Fig. 1 A theoretical model of penetration process of ceramic subjected to projectile impact by considering interface defeat/dwell

Lundberg 等^[10] 根据弹靶轴线方向的运动方程和 von Mises 屈服准则获得界面击溃过程中弹靶接触应力为:

$$p_0 \approx q_p \left(1 + \frac{1}{2\alpha} + 3.27\beta \right), \quad q_p = \frac{1}{2}\rho_p v^2, \quad \alpha = \frac{K_p}{q_p}, \quad \beta = \frac{Y_p}{q_p} \quad (1)$$

式中: ρ_p 为弹体密度, v 为弹体撞击速度, K_p 为弹体体积模量, Y_p 为弹体压缩屈服强度。

李继成等^[18] 根据界面击溃中弹靶特性, 结合长杆弹高速侵彻金属及陶瓷靶体的修正 Bernoulli 方程, 求得弹体撞击速度 v 、长度 l_r 变化与时间 t 的关系为:

$$t = \frac{Mv_0}{\pi R^2 Y_p} \exp \left[\int_v^{v_0} \frac{\rho_p}{2Y_p} (v^2 - v_0^2) dv \right] \quad (2)$$

$$l_r = \frac{M}{\rho_p \pi R^2} \exp \left[\frac{\rho_p}{2Y_p} (v^2 - v_0^2) \right] \quad (3)$$

$$E_{kr} = \frac{1}{2}mv^2, \quad E_{k0} = \frac{1}{2}Mv_0^2 \quad (4)$$

式中: M 为弹体初始质量, R 为弹体半径, v_0 为弹体初始撞击速度, E_{kr} 为 t 时刻弹体剩余动能, E_{k0} 为弹体初始撞击动能, m 为 t 时刻弹体质量。

La Salvia^[22] 认为陶瓷表面由界面击溃向侵彻转变的过程与翼型裂纹扩展形成的粉碎区密切相关。因此, 假设陶瓷界面驻留/侵彻转变过程由翼型裂纹扩展机制决定, 临界压力 p_{cer} 表示为^[22, 26]:

$$p_{cer} = \frac{\sqrt{2}\pi\Delta\tau_y}{2(1-2\mu)(1-1.154\Delta)\sqrt{1-R^*}}, \quad \tau_y = \frac{\sigma_y}{2}, \quad R^* = 1 - \frac{1}{8} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{9}{8}(1-2\mu)^2} \right] \quad (5)$$

式中: Δ 为陶瓷在压缩作用下脆性失效强度与韧性失效强度的比值, σ_y 为含损伤陶瓷的压缩屈服强度, τ_y 为陶瓷剪切屈服强度, μ 为陶瓷的泊松比, R^* 为弹靶接触表面压缩损伤不受约束的位置。

Zaera 等^[29] 给出含损伤陶瓷的压缩屈服强度 (σ_y) 和陶瓷的初始压缩屈服强度 (σ_{y0}) 关系为:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left(\frac{u-w}{u_0} \right)^2 \quad (6)$$

面击溃/驻留对陶瓷弹道性能的影响。该模型中主要假设有:

(1) 弹体撞击装甲陶瓷为正侵彻过程;

(2) 在界面击溃/驻留和侵彻过程中, 弹体头部被视为流体, 弹体剩余部分被视为弹塑性材料;

(3) 后效钢靶为半无限靶, 陶瓷四周没有约束应力;

(4) 忽略弹靶间摩擦力。

不同弹体撞击速度下, 3 种弹靶作用状态对应的计算过程如下:

(1) 状态 1: 界面击溃

根据初始撞击速度, 模型在每个时间步都将判断弹靶表面接触压力 (p_0) 小于侵彻陶瓷材料所需压力的临界值 (p_{cer}) 是否成立。在此基础上计算陶瓷破坏, 当弹体完全侵蚀而未能侵彻陶瓷时, 弹体在陶瓷表面界面击溃, 陶瓷内剩余侵彻深度为零, 弹靶作用时间即为界面击溃时间。

式中: u 为 t 时刻弹体的侵彻速度, u_0 为弹体的初始侵彻速度, w 为靶体的运动速度。

Li 等^[20] 分别对弹体侵彻速度衰减 u/u_0 和弹体撞击速度衰减 v/v_0 的一阶近似表达式进行了 Taylor 展开, 获得了两者比值 λ 的近似值:

$$\lambda = \frac{u/u_0}{v/v_0} \quad (7)$$

式中: 弹体撞击速度衰减 v/v_0 主要由弹体参数决定, 而弹体侵彻速度衰减 u/u_0 由弹靶材料参数共同确定, 本文中根据实验结果确定 λ 取值为 0.82, 与文献 [20] 中 λ 取值为 [0.81, 0.97] 相符。

假设界面击溃/驻留过程中陶瓷靶体阻力 (f_{cer}) 与陶瓷屈服强度 (σ_y) 相等, 此外, 界面击溃过程中弹体侵彻速度为零且陶瓷不运动 ($w=0$), 将式(7)代入式(6), 可得界面击溃/驻留过程中陶瓷靶体阻力与撞击速度 v 的关系为:

$$f_{\text{cer}} = \sigma_{y0} \left(\lambda \frac{v}{v_0} \right)^2 \quad (8)$$

联立式(5)~(8)可得:

$$P_{\text{cri}} = \frac{\sqrt{2}\pi\Delta\sigma_{y0} \left(\lambda \frac{v}{v_0} \right)^2}{4(1-2\mu)(1-1.154\Delta)\sqrt{1-R^*}} \quad (9)$$

当 $p_0 > p_{\text{cri}}$ 时, 靶体由翼形裂纹扩展导致的部分破坏区域延伸至靶体表面, 靶体由界面驻留向侵彻转变。

(2) 状态 2: 驻留/侵彻转变过程

在一定弹体撞击速度下, $p_0 < p_{\text{cri}}$ 。但是, 陶瓷内部产生的破坏导致 p_{cri} 逐渐降低。当 $p_0 > p_{\text{cri}}$ 时, 弹体将侵彻陶瓷, 界面驻留过程结束。在该过程中陶瓷靶体阻力不断下降, 弹体侵彻陶瓷后仍可能存在剩余速度。当弹体剩余速度高于弹体侵彻金属靶的临界速度时, 金属靶中将产生剩余侵彻深度。当陶瓷表面界面驻留向侵彻过程转变时, 陶瓷侵彻过程计算与金属靶侵彻过程类似。弹体能够侵彻靶体的最小撞击速度 (v_{cri}) 可表示为:

$$v_{\text{cri}} = \sqrt{\frac{2(f_i - Y_p)}{\rho_p}} \quad (10)$$

式中: f_i 为靶体阻力, 侵彻陶瓷时, f_i 为陶瓷靶体阻力 f_{cer} ; 侵彻金属靶时, f_i 为金属靶的靶体阻力 f_b 。

长杆弹高速侵彻半无限靶的 4 个阶段为初始瞬态阶段、准定常侵彻阶段、惯性侵彻阶段以及弹性恢复阶段。兰彬等^[30] 认为初始瞬态阶段和弹性恢复阶段对侵彻深度影响较小, 因此对陶瓷及钢的侵彻过程主要考虑准定常侵彻阶段和惯性侵彻阶段的侵彻深度。长杆弹剩余长度 l_r 和侵彻速度 u 的关系为^[30]:

$$l_r = l_0 e^{\int_{v_0}^v \frac{\rho_p}{Y_p} (v-u) dv} \quad (11)$$

式中: l_0 为弹体初始长度。

准定常侵彻阶段深度 P_{prim} 为:

$$P_{\text{prim}} = \int_0^t u dt = \frac{\rho_p}{Y_p} \int_{v_{\text{cri}}}^{v_0} u l_r dv \quad (12)$$

惯性阶段侵彻深度 P_{aft} 为^[30]:

$$P_{\text{aft}} = \frac{D_{\text{cav}}}{4} \left[\left(1 + \frac{3\rho_t u_0^2}{2f_{\text{spt}}} \right)^{1/3} - 1 \right], \quad \left(\frac{D_{\text{cav}}}{D_p} \right)^2 = 1 + \frac{2\rho_p (v_0 - u_0)^2}{Y_p \left(\frac{2}{3} + \ln \frac{2E_p}{3Y_p} \right)}, \quad f_{\text{spt}} = \frac{2Y_t}{3} \left[1 + \ln \left(\frac{2E_t}{3Y_t} \right) \right] \quad (13)$$

式中: D_{cav} 为开坑直径, ρ_t 为靶体密度, f_{spt} 为靶体材料常数, D_p 为弹体直径, E_p 为弹体材料弹性模量, E_t 为靶体材料弹性模量, Y_t 为靶体材料压缩屈服极限。

在金属后效靶中的剩余侵彻深度为:

$$P_r = P_{\text{prim}} + P_{\text{aft}} \quad (14)$$

当剩余速度小于侵彻金属靶临界速度时, 剩余侵彻深度为零; 反之, 剩余侵彻深度可由式 (14) 计算获得。

(3) 状态 3: 侵彻

在较高的撞击速度下, 弹靶作用初期即有 $p_0 > p_{\text{cri}}$ 。因此, 在弹靶作用初始阶段, 弹体侵彻陶瓷, 该过程可视为状态 2 的一种特殊过程, 其中界面驻留时间为零。计算过程类似, 不再赘述。

2 长杆弹撞击装甲陶瓷 DOP 实验

2.1 弹体与靶体

实验中采用 30 mm 次口径脱壳穿甲弹撞击碳化硅(SiC)装甲陶瓷, 获得了不同弹体撞击速度作用下金属后效靶中的侵彻深度。弹芯直径为 9 mm, 长度为 90 mm, 材料为钨合金, 如图 2(a) 所示。靶体为 SiC 陶瓷镶嵌于 45 钢靶中, 陶瓷尺寸为 100 mm×100 mm×20 mm, 内部采用环氧树脂粘接, 如图 2(b) 所示。

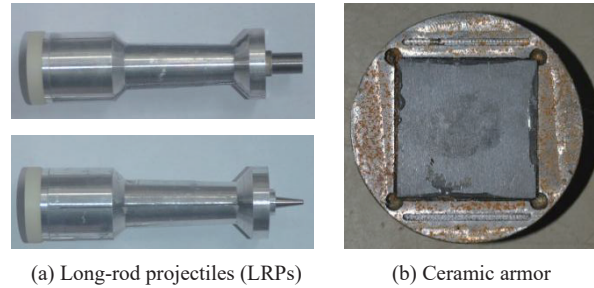


图 2 弹靶实物照片

Fig. 2 Photos of projectile and target

2.2 实验方案

实验系统主要由弹体加载发射装置(30 mm 口径滑膛炮)、测速系统、高速数字摄像机组成。利用 30 mm 口径滑膛炮加载次口径弹体, 开展不同尺寸的长杆弹撞击装甲陶瓷实验, 实验装置布局如图 3 所示。通过加载装置将 2 种弹体加速到 700~1 200 m/s 飞出, 弹体穿透测速靶将信号传递至多通道测速仪, 最终撞击装甲陶瓷获得界面击溃或侵彻现象。

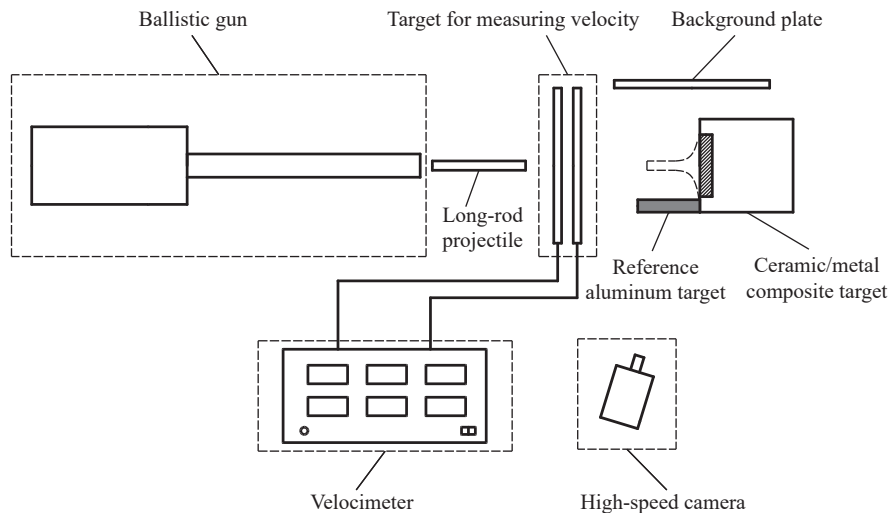


图 3 长杆弹撞击装甲陶瓷实验总体布局示意图

Fig. 3 Experimental layout for the impact of a long-rod projectile into a ceramic armor plate

2.3 实验结果

陶瓷表面的宏观破坏形式是分析装甲陶瓷界面击溃特性的重要参考。图 4 分别给出了弹体以不同速度撞击装甲陶瓷后陶瓷表面和参照铝靶表面破坏情况。从图 4 中可以观察到: 当弹体撞击速度较低

时, 陶瓷表面有明显的环向裂纹, 无明显轴向裂纹, 与 Evans 等^[31]观测的结果类似; 当弹体撞击速度较高时, 陶瓷表面轴向裂纹与环向裂纹共存, 且撞击处存在陶瓷粉碎区; 弹体撞击速度越高, 粉碎区越小, 径向裂纹越多, 环向裂纹没有明显的区别。由图 4(a)~4(b) 可知, 在界面击溃过程中, 从陶瓷表面观察到的主要破坏形式为环向裂纹、径向裂纹和塑性粉碎区。随着撞击速度的提高, 环向裂纹数量变化较小, 因此在高速界面击溃过程中, 可以首要考虑径向裂纹扩展及塑性粉碎区的形成。实验中在装甲陶瓷下方放置了垂直于靶表面的参照铝靶, 如图 3 所示。从图 4(a)~4(b) 可明显观察到有破碎材料侵彻铝靶的现象, 表明在界面击溃/驻留过程中, 弹体材料在陶瓷表面破碎并径向流动, 剩余一定速度撞击铝靶。实验中, 当弹体直接侵彻靶体时, 参照铝靶表面没有破坏现象, 表明参照铝靶的破坏可以为界面击溃/驻留现象提供证明。图 5 为弹体侵彻装甲陶瓷后回收靶体及剖靶情况, 从图 5 可以看出, 在高速撞击下, 陶瓷层破碎与后效钢靶分离并向外飞溅, 仅有小部分陶瓷附着于钢靶表面, 弹体在钢靶中留下凹坑。

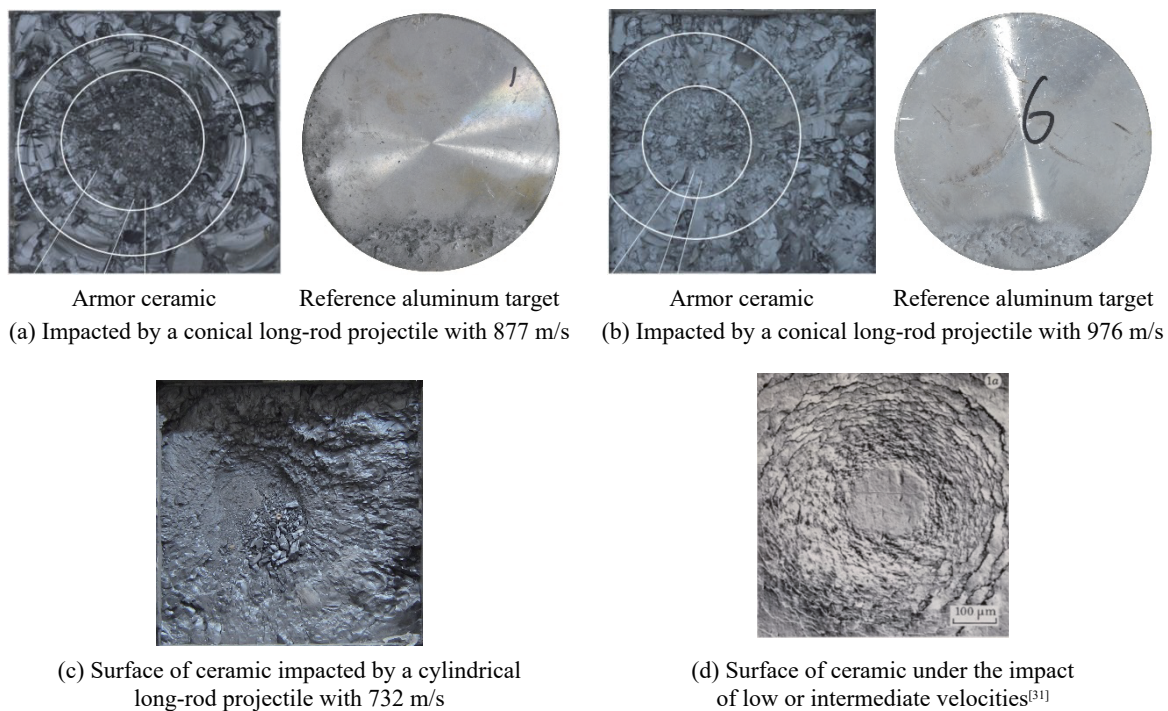


图 4 装甲陶瓷界面被击溃后回收靶体表面的破坏情况

Fig. 4 Surface damage of recovered armor ceramics after interface defeat

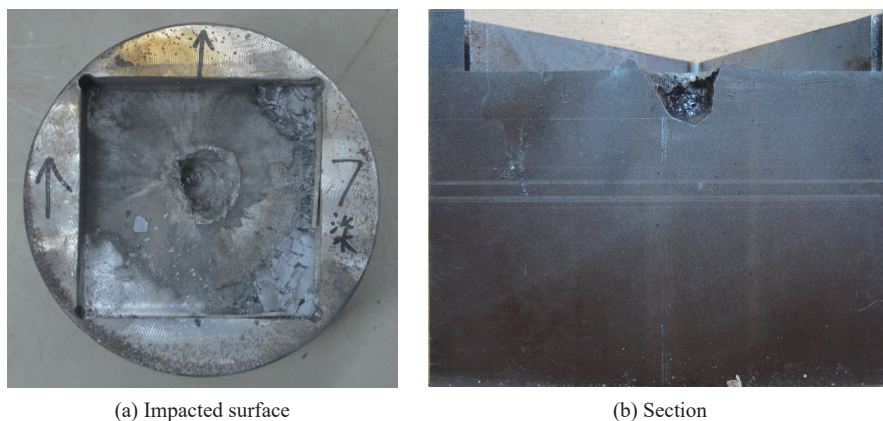


图 5 锥形头部长杆弹以 1 037 m/s 的速度侵彻装甲陶瓷后回收的靶体

Fig. 5 Recovered target after penetration of a cone-nosed long-rod projectile with the velocity of 1 037 m/s into ceramics

表 1 中展示了不同撞击速度下弹体侵彻装甲陶瓷后在金属后效靶中产生的剩余侵彻深度。根据界面击溃/侵彻转变速度定义可知, 锥形头部长杆弹的界面击溃/侵彻转变速度为 980~1 030 m/s, 柱形头部长杆弹界面击溃/侵彻转变速度为 730~840 m/s。

表 1 不同撞击速度弹体侵彻陶瓷后金属靶中剩余侵彻深度

Table 1 Residual depths of penetration in metal targets after penetration of long-rod projectiles with different velocities into ceramics

弹体类型	初始撞击速度/(m·s ⁻¹)	剩余侵彻深度/mm
柱形头部长杆弹	732	0
	843	2.4
	979	21.5
	1 084	34.5
锥形头部长杆弹	877	0
	976	0
	1 037	17.5

3 结果与讨论

3.1 界面击溃及侵彻特性

Behner 等^[32-33]开展了与本文类似的长杆弹撞击装甲陶瓷实验, 并获得了不同弹靶条件下的侵彻速度、剩余侵彻深度与界面驻留时间。结合弹体和靶体材料参数 (见表 2~4), 根据 Behner 等^[32]和本文实验采用的弹体和靶体配置, 开展对应实验的界面击溃/侵彻转变速度、侵彻速度、界面驻留时间的理论计算。根据模型计算获得的界面击溃/侵彻转变速度、驻留时间以及侵彻速度与实验结果的对比分别见表 5~7, 误差均在 15% 以内, 表明理论模型可以合理地预测不同弹靶条件下的界面击溃与侵彻特性。

表 2 长杆弹相关参数

Table 2 Material parameters of long-rod projectiles

材料	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	压缩屈服强度/GPa	来源
金	19 300	180		文献 ^[32]
铅	10 220	238	0.9	文献 ^[10]
钨合金	17 600	280	1.2	

表 3 陶瓷相关参数

Table 3 Material parameters of ceramics

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	压缩屈服强度/GPa	来源
SiC-N	3 200				文献 ^[32]
SiC-F	>3 150	430			文献 ^[33]
SiC-B	3 215	446	0.16	12.2	文献 ^[13-14]
SiC-I	3 220	446*	0.17	10.4	文献 ^[10, 13]
B ₄ C	2 500	432	0.17	15.8	文献 ^[10, 34]
SiC	3 150	440	0.16		

注: *为弹性模量估算值。

采用第 1 节中的理论模型对长杆弹侵彻 SiC 装甲陶瓷进行计算, 将获得的侵彻速度和剩余侵彻深度理论结果与本文的实验结果以及 Behner 等^[33]的实验结果进行对比, 如图 6 所示。图 6 展示了 2 次实

验中弹体撞击速度由低到高对应的界面击溃、界面驻留/侵彻转变过程及侵彻过程, 图中阴影部分为界面驻留/侵彻转变过程。对于 Behner 等^[33] 的实验, 当撞击速度低于 600 m/s 时, 陶瓷表面界面击溃, 后效钢板中基本无剩余侵彻深度; 当撞击速度为 600~900 m/s 时, 弹体在靶体表面驻留, 后效钢板中逐渐产生剩余侵彻深度; 当撞击速度高于 900 m/s 时, 弹体侵彻装甲陶瓷, 剩余侵彻深度与撞击速度呈线性增长的关系。由图 6 可知, 本文实验中侵彻深度随弹体撞击速度的提高而变化的规律与 Behner 实验中的相似, 均产生侵彻深度无明显变化、非线性变化及线性变化。上述结果表明, 本文理论模型计算结果与实验结果一致, 计算模型可靠, 可进行更深入的界面击溃与侵彻特性分析。

表 4 背板材料参数

Table 4 Material parameters of back plate

材料	厚度/mm	密度/(kg·m ⁻³)	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	来源
RHA	40	7 850	900		文献[33]
Mar 350	24				文献[13]
45钢	100	7 830	600	200	

表 5 界面击溃/侵彻转变速度的理论计算计算结果与实验结果

Table 5 Comparison between calculation and experimental results of transition velocity

弹体类型	界面击溃/侵彻转变速度/(m·s ⁻¹)		转变速度误差/%
	实验	理论	
柱形头部长杆弹	785±55	860±60	9.5
锥形头部长杆弹	1 005±25	920±70	-8.5

表 6 界面击溃驻留时间与侵彻深度与实验对比

Table 6 Comparison between calculation and experimental results of penetration depth and dwell time

撞击速度/(m·s ⁻¹)	侵彻深度/mm		侵彻深度误差/%	驻留时间/μs
	实验	理论		
732	0	0		61.0
843	2.4	2.3	-4.2	3.7
979	21.5	21.6	-0.5	0
1 084	34.5	30.7	-11.0	0

表 7 侵彻速度理论值与实验结果^[32] 对比

Table 7 Comparison between calculation and experimental results^[32] of penetration velocity

撞击速度/(m·s ⁻¹)	侵彻速度/(m·s ⁻¹)		侵彻速度误差/%
	实验	理论	
776±2	0	0	
958±4	232±22	207	-10.3±8.4
1 212±6	482±40	444	-7.6±8.0
1 381±7	598±43	596	0.2±7.2

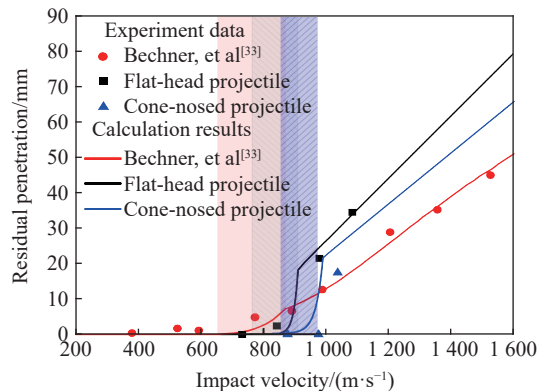


图 6 剩余侵彻深度随撞击速度的变化

Fig. 6 Residual penetration depth varied with impact velocity

3.2 弹体材料对界面击溃/驻留侵彻过程的影响

钨、钼、金材料密度较高, 在长杆弹材料中具有较好的应用前景。本文中主要选取钨合金、金和钨长杆弹为研究对象, 开展长杆弹侵彻 SiC-B 装甲陶瓷的理论计算, 背板材料采用 45 钢。相关弹体材料参数和靶体材料参数分别见表 2~4。弹体为直径 6 mm、质量 4.5 g 的圆柱。靶体为陶瓷/钢复合靶, 陶瓷置于表面, 厚度为 25 mm。理论结果计算如图 7 所示。

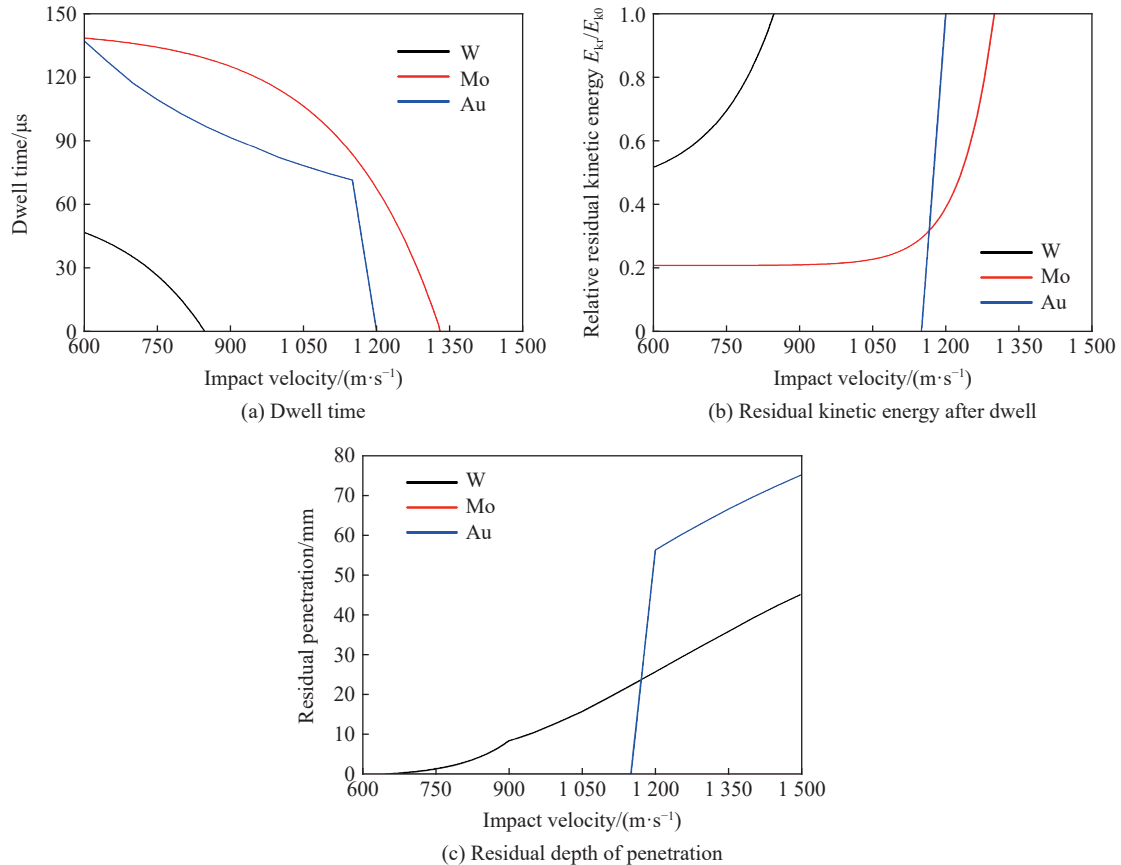


图 7 不同材料弹体界面击溃/侵彻过程结果对比

Fig. 7 Comparison of interface defeat/penetration among projectiles with different materials

由图 7 可以看出:

(1) 图 7(a)~7(b) 中钨合金与钨长杆弹在界面击溃过程中界面驻留时间与相对动能随撞击速度的变化规律相似, 与金长杆弹有显著差异。在较高的撞击速度下, 金长杆弹仍出现界面击溃现象。在相同撞击速度下, 钨长杆弹产生界面击溃的时间最长, 钨合金长杆弹最短, 而金长杆弹的动能损失最大。产生这种现象的原因可能是金的压缩屈服强度远小于钨合金和钨, 因此在界面击溃过程中, 金的质量侵蚀与速度下降快, 动能损失较大。

(2) 图 7(c) 中钨合金在较低的速度下在后效靶中产生剩余侵彻深度。钨合金长杆弹在装甲陶瓷中的剩余侵彻深度随撞击速度的变化近似线性; 金长杆弹在低速阶段无侵彻深度, 当撞击速度高于 1200 m/s 时, 在靶体中产生较大的剩余侵彻深度; 钨长杆弹在 600~1500 m/s 的速度范围内, 对装甲陶瓷的剩余侵彻深度最小。撞击速度低于 1200 m/s 时, 钨合金长杆弹的侵彻性能最优; 撞击速度高于 1200 m/s 时, 金长杆弹的侵彻性能最优。钨合金与金杆弹在不同撞击速度阶段的侵彻性能差异表明, 在高速侵彻阶段钨合金的侵彻性能不如金, 密度在侵彻深度中起主导作用。

3.3 靶体材料对界面击溃/驻留侵彻过程的影响

选取压缩屈服强度不同的两种 SiC 陶瓷 (SiC-B, SiC-1) 和 B_4C 材料作为研究对象, 陶瓷材料参数见表 3。陶瓷面密度均为 80.375 kg/m^2 , 弹体为第 3.2 节中的钨合金弹体, 探讨靶体材料对界面击溃和侵彻性能产生的影响, 靶体材料对界面击溃、侵彻的影响结果如图 8 所示。

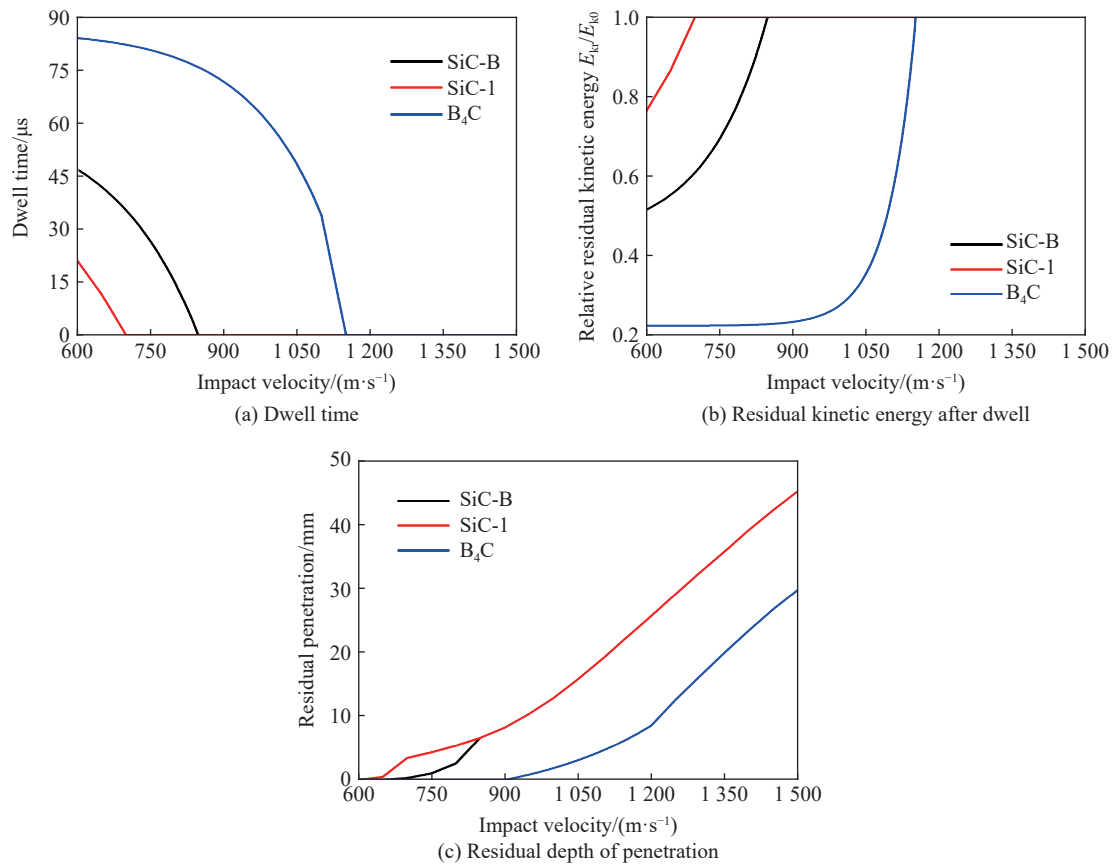


图 8 不同陶瓷材料对应的界面击溃、侵彻特性与撞击速度的关系

Fig. 8 Comparison of interface defeat/penetration between ceramics with different materials

从图 8 可以看出:

(1) 3 种陶瓷材料的的界面击溃特性和侵彻特性类似, 其中钨合金长杆弹撞击 B_4C 靶时产生界面击溃的时间最长, 损失的动能最多。

(2) 长杆弹撞击 B_4C 时, 可以在较高速度下产生界面击溃。2 种 SiC 陶瓷在高速阶段几乎无差异; 在低速阶段, SiC-B 表面更容易产生界面击溃, 性能较优。该现象表明陶瓷的界面击溃和侵彻特性与压缩屈服强度密切相关。材料的压缩屈服强度越高, 陶瓷材料表面越容易产生界面击溃/驻留效应, 弹体消耗的动能越多, 陶瓷材料抗侵彻性能越强。

4 结 论

采用 30 mm 口径滑膛炮, 开展了长杆弹撞击 SiC 陶瓷实验, 采用界面击溃裂纹扩展模型和长杆弹侵彻半无限靶一维模型相结合的方法, 建立了基于界面击溃效应的长杆弹侵彻装甲陶瓷的计算模型, 结合实验数据与理论计算结果, 探讨了陶瓷的界面击溃与侵彻特性, 得到的主要结论如下:

(1) 通过装甲陶瓷及参照铝靶表面的破坏情况可验证, 不同弹体撞击速度下, 弹体在陶瓷表面存在界面击溃/驻留过程。

(2) 不同弹靶作用条件下的理论计算结果与实验数据吻合, 可以较好地预测长杆弹界面驻留时间、

界面击溃/侵彻转变速度、侵彻陶瓷速度以及在后效靶中的剩余侵彻深度。

(3) 弹体材料性能中, 界面击溃效应受弹体压缩屈服强度和密度耦合作用的影响。在高速侵彻陶瓷时, 弹体密度越大, 其侵彻性能越强。

(4) 不同靶体材料的界面驻留特性相似, 陶瓷材料的压缩屈服强度越高, 越容易产生界面击溃/驻留效应, 抗侵彻性能越强。

参考文献:

- [1] 谈梦婷, 张先锋, 包阔, 等. 装甲陶瓷的界面击溃效应 [J]. *力学进展*, 2019, 49: 392–427. DOI: 10.6052/1000-0992-17-015. TAN M T, ZHANG X F, BAO K, et al. Interface defeat of ceramic armor [J]. *Advances in Mechanics*, 2019, 49: 392–427. DOI: 10.6052/1000-0992-17-015.
- [2] HAUVER G E, NETHERWOOD P H, BENCK R F, et al. Variation of target resistance during long-rod penetration into ceramics [C] // *Proceedings of the 13th International Symposium on Ballistics*. Stockholm: Stockholm International Fairs, 1992: 257–264.
- [3] ANDERSON Jr C E. Dwell and post-dwell penetration of long rods on borosilicate glass targets [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1195(1): 1447–1452. DOI: 10.1063/1.3295084.
- [4] ANDERSON Jr C E, BEHNER T, HOLMQUIST T J, et al. Dwell, interface defeat, and penetration of long rods impacting silicon carbide: 18.12544/008 [R]. Warren, MI: Southwest Research Institute, 2009: 1–55.
- [5] ANDERSON Jr C E, HOLMQUIST T J, ORPHAL D L, et al. Dwell and interface defeat on borosilicate glass [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2010, 7(6): 776–786. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02478.x.
- [6] ANDERSON Jr C E, BEHNER T, HOLMQUIST T J, et al. Interface defeat of long rods impacting oblique silicon carbide [C] // *Proceedings of the 26th International Symposium on Ballistics*. Miami, FL, 2011: 1–36.
- [7] ANDERSON Jr C E, BEHNER T, HOLMQUIST T J, et al. Interface defeat of long rods impacting borosilicate glass [C] // *Proceedings of the 23rd International Symposium on Ballistics*. Tarragona, 2007, 2: 1049–1056.
- [8] HOLMQUIST T J, ANDERSON C E, BEHNER T, et al. Mechanics of dwell and post-dwell penetration [J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2010, 109(8): 467–479. DOI: 10.1179/174367509X12535211569512.
- [9] LUNDBERG P. Interface defeat and penetration: two modes of interaction between metallic projectiles and ceramic targets [D]. Uppsala: Uppsala University, 2004: 13–36.
- [10] LUNDBERG P, RENSTRÖM R, LUNDBERG B. Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(3): 259–275. DOI: 10.1016/s0734-743x(99)00152-9.
- [11] LUNDBERG P, RENSTRÖM R, HOLMBERG L. An experimental investigation of interface defeat at extended interaction time [C] // *Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics*. Interlaken: RUAG Land Systems, 2001, 3: 1463–1469.
- [12] LUNDBERG P, LUNDBERG B. Transition between interface defeat and penetration for tungsten projectiles and four silicon carbide materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(7): 781–792. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.06.003.
- [13] LUNDBERG P, RENSTRÖM R, LUNDBERG B. Impact of conical tungsten projectiles on flat silicon carbide targets: transition from interface defeat to penetration [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(11): 1842–1856. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.04.004.
- [14] LUNDBERG P, RENSTRÖM R, ANDERSON O. Influence of length scale on the transition from interface defeat to penetration in unconfined ceramic targets [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2013, 80(3): 031804. DOI: 10.1115/1.4023345.
- [15] LUNDBERG P, RENSTRÖM R, ANDERSSON O. Influence of confining prestress on the transition from interface defeat to penetration in ceramic targets [J]. *Defence Technology*, 2016, 12(3): 263–271. DOI: 10.1016/j.dt.2016.02.002.
- [16] ANDERSON Jr C E, WALKER J D. An analytical model for dwell and interface defeat [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(9): 1119–1132. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.07.013.
- [17] 李继承, 陈小伟. 尖锥头长杆弹侵彻的界面击溃分析 [J]. *力学学报*, 2011, 43(1): 63–70. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-1-lxxb2009-782. LI J C, CHEN X W. Theoretical analysis on the interface defeat of a conical-nosed projectile penetration [J]. *Chinese Journal*

- of *Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(1): 63–70. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-1-lxxb2009-782.
- [18] 李继承, 陈小伟. 柱形长杆弹侵彻的界面击溃分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(2): 141–147. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)02-0141-07.
- LI J C, CHEN X W. Theoretical analysis on the interface defeat of a long rod penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(2): 141–147. DOI: 10.11883/1001-1455(2011)02-0141-07.
- [19] LI J C, CHEN X W, NING F. Comparative analysis on the interface defeat between the cylindrical and conical-nosed long rods [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2014, 5(1): 21–46. DOI: 10.1260/2041-4196.5.1.21.
- [20] LI J C, CHEN X W, NING F, et al. On the transition from interface defeat to penetration in the impact of long rod onto ceramic targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 83: 37–46. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.04.003.
- [21] LI J C, CHEN X W. Theoretical analysis of projectile-target interface defeat and transition to penetration by long rods due to oblique impacts of ceramic targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 106: 53–63. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.03.013.
- [22] LA SALVIA J C. A physically-based model for the effect of microstructure and mechanical properties on ballistic performance [C] // Proceedings of the 26th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: A: Ceramic Engineering and Science Proceedings. Chichester: The American Ceramic Society, 2002, 23(3): 213–220.
- [23] LA SALVIA J C. Recent progress on the influence of microstructure and mechanical properties on ballistic performance [J]. *Ceramic Transactions*, 2002, 134: 557–570.
- [24] LA SALVIA J C. A predictive model for the dwell/penetration transition phenomenon [C] // Proceeding of the 22nd International Symposium on Ballistics. Vancouver: National Defense Industrial Association, 2005: 717–725.
- [25] ZHANG X F, SERJOUEI A, SRIDHAR I. Criterion for interface defeat to penetration transition of long rod projectile impact on ceramic armor [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 126: 266–284. DOI: 10.1016/j.tws.2017.04.016.
- [26] 谈梦婷, 张先锋, 葛贤坤, 等. 长杆弹撞击装甲陶瓷界面击溃/侵彻转变速度理论模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 1093–1100. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1093-08.
- TAN M T, ZHANG X F, GE X K, et al. Theoretical model of interface defeat/penetration transition velocity of ceramic armor impacted by long-rod projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 1093–1100. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1093-08.
- [27] FELLOWS N A, BARTON P C. Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22(8): 793–811. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00017-2.
- [28] 焦文俊, 陈小伟. 长杆高速侵彻问题研究进展 [J]. *力学进展*, 2019, 49(1): 201904. DOI: 10.6052/1000-0992-17-021.
- JIAO W J, CHEN X W. Review on long-rod penetration at hypervelocity [J]. *Advances in Mechanics*, 2019, 49(1): 201904. DOI: 10.6052/1000-0992-17-021.
- [29] ZAERA R, SÁNCHEZ-GÁLVEZ V. Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, 21(3): 133–148. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00035-3.
- [30] 兰彬. 长杆弹侵彻半无限靶的数值模拟和理论研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008: 55–56.
- LAN B. A combined numerical and theoretical study of long rod penetration into semi-infinite targets [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008: 55–56.
- [31] EVANS A G, GULDEN M E, ROSENBLATT M. Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response régime [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1978, 361(1706): 343–365. DOI: 10.1098/rspa.1978.0106.
- [32] BEHNER T, ANDERSON Jr C E, HOLMQUIST T J, et al. Interface defeat for unconfined SiC ceramics [C] // Proceedings of the 24th International Symposium on Ballistics. New Orleans, 2008, 2: 35–42.
- [33] BEHNER T, HEINE A, WICKERT M. Dwell and penetration of tungsten heavy alloy long-rod penetrators impacting unconfined finite-thickness silicon carbide ceramic targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 95: 54–60. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.04.008.
- [34] HOLMQUIST T J, RAJENDRAN A M, TEMPLETON D W, et al. A ceramic armor material database: TARDECTR-13754 [R]. Warren, Michigan: US Army Tank Automotive Research, Development, and Engineering Center, 1999.

(责任编辑 张凌云)