

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0016

大质量钨合金动能块高速侵彻 超高强度钢靶作用特性*

冯晓伟¹, 李俊承¹, 卢永刚¹, 王守乾¹, 卢正操¹, 刘 闯², 傅 丹³

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

3. 火箭军装备部装备项目管理中心, 北京 100085)

摘要: 为研究超高强度钢靶抗大质量钨合金动能块的侵彻性能及破坏特性, 基于弹道炮开展了 215 g 圆柱形钨合金动能块高速侵彻半无限超高强度 G50 钢靶和低强度 45 钢靶试验, 获得了不同速度侵彻下两种钢靶的侵彻深度和成坑体积。试验表明, 不同于低强度钢靶的近似圆柱体成坑特性, 钨合金动能块侵彻超高强度钢靶时, 在靶板内形成了类锥形弹坑, 成坑侧面和坑底均有拉伸崩落裂纹; 分析了超高强度钢靶的侵彻破坏特性, 指出侵彻过程中钨合金动能块局部破碎引起靶板内的卸载拉伸剥落和动能块的侵彻锐化行为联合导致了类锥体弹坑的形成。通过数值模拟验证了超高强度钢靶的高速侵彻破坏机制。

关键词: 超高强度钢; 大质量钨合金动能块; 高速侵彻; 侵彻特性

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Characteristics of high-mass tungsten alloy kinetic projectile penetrating ultra-high strength steel targets at high velocity

FENG XiaoWei¹, LI Juncheng¹, LU Yonggang¹, WANG Shouqian¹, LU Zhengcao¹, LIU Chuang², FU Dan³

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

3. Project Management Center of PLA Rocket Force Equipment Department, Beijing 100085, China)

Abstract: To study the penetration performance and failure characteristics of ultra-high strength steel targets against high-mass tungsten alloy kinetic projectiles with different impact velocities, a ballistic gun was used to carry out 215 g tungsten alloy kinetic projectiles to impact the ultra-high strength G50 steel and 45 steel targets at velocities in the range of 689–1489 m/s. According to the experimental results, a conic-like crater was observed in the ultra-high strength steel target against a tungsten alloy kinetic projectile, which was different from the column-like crater mode observed in the experiments of 45 steel targets. It was also observed that there were several unique tensile spall cracks on the crater surface and bottom for the ultra-high strength steel. The depth of penetration (DOP) and the crater volume of these two steel targets were further obtained, which showed that the DOP of G50 steel targets is shorter than that of 45 steel at similar penetration velocity, while the corresponding crater volume is greater than that of 45 steel. Based on the interaction mechanism between the projectile and target, the high-mass tungsten alloy kinetic projectiles are considered to undergo local fragmentation under high radial stress during penetration into the G50 steel target, resulting in unloading tensile waves within the target. It is believed the unloading

* 收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(12202424, 12141202)

第一作者: 冯晓伟(1984—), 男, 博士, 副研究员, xiaowei_feng@126.com

通信作者: 李俊承(1984—), 男, 博士, 副研究员, uniquejlc@163.com

waves within the target lead to the spalling damage of the crater wall, resulting in the fish-scale-like rough walls and spallation cracks. This also explains why the crater volume of G50 steel is greater than that of 45 steel. In addition, the sharpening effect was caused by the local fragmentation of the kinetic projectile head. Therefore, it is considered that this failure mode was mainly caused by both the tensile fracture of the target induced by the local fragmentation of the projectile and the sharpening behavior of the projectile. Numerical simulations of the penetration of high-mass tungsten alloy projectiles into ultra-high strength steel targets were further performed to demonstrate the entire process of deformation, damage, and failure of the target plate and projectile, which further validated the failure mechanism of the targets.

Keywords: ultra-high strength steel; high-mass tungsten alloy projectile; high velocity penetration; penetration characteristic

大质量钨合金动能块是先进反导系统动能杀伤装置 (kinetic kill vehicle, KKV) 的主要毁伤元之一, 主要通过动能碰撞拦截来袭战术弹道导弹 (tactical ballistic missile, TBM) 目标。从本质上看, 对 TBM 的拦截毁伤过程是动能块对导弹目标结构的侵彻破坏, 考虑到导弹关键结构部件多采用超高强度钢, 因此研究大质量钨合金动能块高速撞击作用下超高强度钢的破坏特性, 对 KKV 动能块的设计具有重要意义。

对钨合金弹丸侵彻钢靶的研究由来已久, 并产生了一系列规律性的认识。Hohler 等^[1]对钨合金杆弹侵彻半无限装甲钢靶进行了系列试验, 其试验数据已成为理论分析和数值模拟研究的标准参考数据。Schaer 等^[2]对不同形状钨弹高速侵彻半无限钢板的成坑机理及特性进行了研究, 比较分析了弹体形状对成坑特性的影响, 得到了考虑形状影响的球状弹丸侵彻深度半经验公式。Duan 等^[3]用钨合金杆式弹侵彻 45 钢靶板和 30CrMnMo 钢靶板, 研究了弹靶作用过程中的失效特性, 指出在低强度的 45 钢中未出现绝热剪切带, 而在高强度的 30CrMnMo 钢中出现了绝热剪切带。Martineau 等^[4]通过实验研究了直径 6.4 mm、钨含量 94% 的钨合金球体对高强度 HSLA-100 合金钢的侵彻, 在速度为 0.8~2.5 km/s 时, 发现随着冲击速度的增加, 侵彻深度并不是线性增加的, 同时分析了靶体内的残余应力。近年来, 国内学者持续开展了钨合金破片对典型钢靶的侵彻特性研究。谭多望等^[5]通过实验研究了球形钨合金破片对半无限 Q235A 钢靶的侵彻以及对薄钢靶的贯穿性能。徐豫新等^[6-7]系统研究了钨合金球形破片对低碳钢的侵彻特性, 获得了相应的穿甲极限和极限贯穿厚度等规律认识。赵晓旭等^[8]通过试验和数值模拟建立了钨合金球形破片高速侵彻低碳钢板成坑直径的计算模型。赵小峰^[9]研究了质量对立立方体钨合金破片侵彻 Q235A 钢板侵彻能力的影响规律, 并通过试验结果对理论公式进行了修正。王雪等^[10]研究了钨合金球形破片对 Q235 钢多层板的侵彻特性, 获得了不同层数钢板的弹道极限, 并通过量纲分析方法建立了靶板分层数与破片弹道极限的关系。刘铁磊等^[11]构建了适用于 300~1 800 m/s 速度范围的钨合金球形破片侵彻低碳钢板弹道极限速度计算模型, 并通过试验评估了理论模型的精度。张健等^[12]研究了高硬度钢板抗不同着角钨合金球形破片的侵彻性能, 探讨了高硬度钢板的主要侵彻失效模式, 并对已有的极限贯穿速度计算公式进行了修正。王猛等^[13]研究了高强度装甲钢在钨合金长杆弹侵彻下的破坏特性, 探讨了冠状裂纹在靶板中的演化特性。

综上所述, 目前的研究成果多集中于钨合金破片/长杆弹对中低强度钢靶的侵彻特性研究, 对超高强度钢靶在大质量钨合金动能块侵彻作用下毁伤特性的研究尚不充分, 仍需进一步开展高速撞击下钨合金动能块侵彻超高强度钢的毁伤特性研究。

1 试验方法

试验用钨合金动能块选用典型的 93W 钨合金材料, 参考爱国者-3 反导系统 KKV 动能块质量范围^[14], 动能块质量 215 g、长 62 mm、直径 16 mm。超高强度钢靶选用侵彻类战斗部壳体常用的 G50 钢, 其主要材料性能参数见表 1^[15]。

为保证动能块的着靶姿态, 设计了尾翼式加速装置。加速装置主要包括弹体、弹托、尾翼、底推和闭气环 5 个部分, 弹体尾部设计有尾翼, 以保证弹体在外弹道的飞行稳定性, 进而保证弹体对靶体的正撞击。弹托采用卡瓣结构, 成三瓣对称布局, 卡瓣结构在炮膛内起支撑约束弹体作用, 弹体尾部设计有

闭气环,可以密封炮膛内的火药气体。在高温、高压的火药气体作用下,弹体被加速至指定速度。弹体在飞出炮口后的外弹道飞行过程中,弹托在空气阻力作用下与弹体分离。动能块和加速装置结构如图 1 所示。

表 1 G50 钢的主要材料性能参数^[15]
Table 1 Mechanical properties of G50 steel^[15]

密度/(kg·m ⁻³)	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	洛氏硬度
7850	≥1330	≥1660	10	45

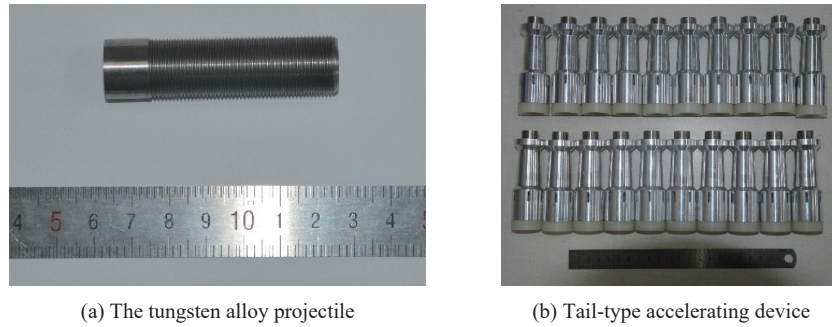


图 1 钨合金动能块及尾翼式加速装置

Fig. 1 The tungsten alloy projectile and tail-type accelerating device

钨合金动能块通过 $\varnothing 30\text{ mm}$ 弹道炮发射,通过放置在靶板前的测速靶测定破片飞行速度,并使用高速录像判读结果校准速度,试验中通过改变装药量来控制钨合金破片的发射速度。实验布局如图 2 所示。

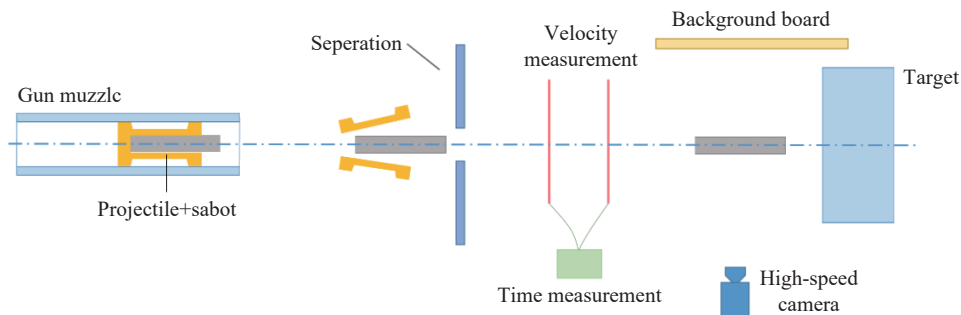


图 2 高速侵彻实验布局示意图

Fig. 2 Sketch of the experiment setup for penetration at high velocity

G50 钢靶直径 400 mm、厚 150 mm,安放在钢制基座上,两边通过塞入楔块保持其位置的稳定,并通过水平仪测量其角度以保持竖直,放置方式见图 3。



图 3 G50 靶板固定图

Fig. 3 The fixation of G50 steel target

试验采用 LNG202G-2 型六路电子测时仪, 如图 4 所示。忽略破片速度降低, 通过捕捉破片穿透测速靶时发出的电信号驱动测时仪的启动与停止, 由此可以得到破片在两个测速靶间的飞行时间, 再由测得的测速靶间的距离除以飞行时间则能求得破片的飞行速度。测时仪精度最高可达 $0.1 \mu\text{s}$ 。试验采用高速录像对破片的飞行弹道进行观测。高速录像垂直于靶道布置, 正对靶板的预着弹点。同时, 调整高速录像拍摄画幅尺寸, 记录破片的着靶过程, 如图 5 所示。



图 4 LNG202G-2 型六路电子测时仪与测速靶

Fig. 4 The electronic time measurement instrument of LNG202G-2 and velocity measurement

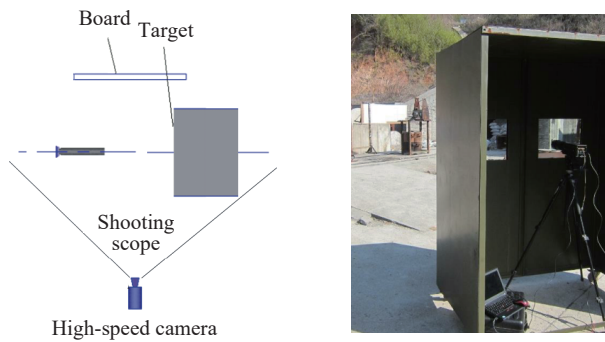


图 5 高速录像布置

Fig. 5 The layout of high-speed camera system

2 试验结果与分析

为了探究高速撞靶条件下大质量钨合金动能块对 G50 钢靶的侵彻毁伤特性, 开展了 5 发速度为 $845 \sim 1455 \text{ m/s}$ 的侵彻试验。作为对比, 同步开展了 4 发相近速度下钨合金动能块对 45 钢的侵彻试验。动能块飞行过程典型姿态见图 6。由图 6 可知, 钨合金动能块在飞行过程中近乎平行于弹轴, 可认为其以垂直姿态着靶, 表明所采用的加速装置能够有效保证动能块的飞行稳定性。

表 2~3 分别给出了 G50 钢靶和 45 钢靶在不同速度钨合金动能块撞击下的近似开孔直径、侵彻深度和开坑体积。图 7~8 分别给出了两种靶标的侵彻深度及开坑体积随速度的变化关系。结果显示, 钨合金动能块侵彻 45 钢靶时, 随着撞击速度的提高, 侵彻深度与侵彻开坑体积均逐步增大, 两者近似呈线性关系。而 G50 钢靶的侵彻深度和开坑体积则在高速段呈现不规

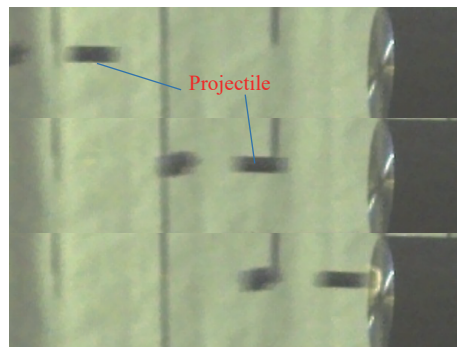


图 6 动能块飞行姿态高速录像图

Fig. 6 High-speed video photography of the kinetic projectile flight posture

律变化特征, 原因与靶标破坏模式相关。总体来看, G50 钢靶的侵彻深度低于 45 钢靶的, 主要原因是其强度较高; 而开坑体积和开孔直径大于 45 钢靶的, 原因则与其破坏机理和破坏模式相关, 有待于进一步探讨。

表 2 G50 钢靶的侵彻毁伤特性

Table 2 The penetration failure characteristics of the G50 steel targets at different impact velocities

撞击速度/(m·s ⁻¹)	开孔直径/mm	穿深/mm	侵彻弹道容积/cm ³
848	60	22	33
1075	70	32	54
1329	43	52	86
1425	47	50	97
1455	65	53	87

表 3 45 钢靶的侵彻毁伤特性

Table 3 The penetration failure characteristics of the 45 steel targets at different impact velocities

撞击速度/(m·s ⁻¹)	开孔直径/mm	穿深/mm	侵彻弹道容积/cm ³
689	29	34	17
1023	31	52	28
1189	34	66	39
1357	37	72	47

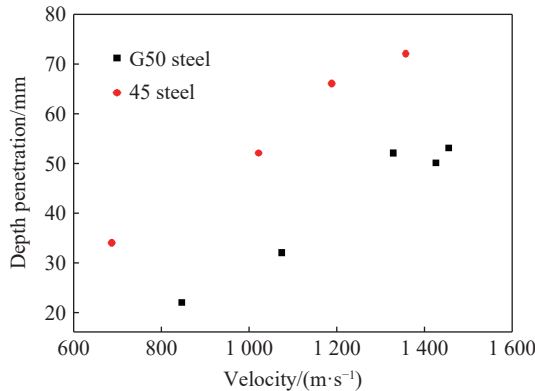


图 7 不同撞击速度下典型靶标的侵彻深度

Fig. 7 Depths of penetrations of the targets at different impact velocities

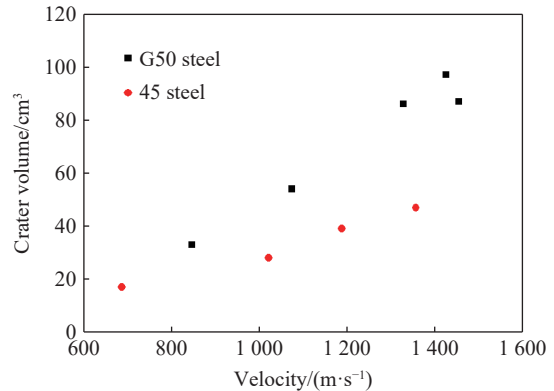


图 8 不同撞击速度下典型靶标的开坑体积

Fig. 8 Crater volumes of the targets at different impact velocities

图 9~10 分别给出了不同速度下 G50 钢靶和 45 钢靶的侵彻毁伤形貌。结果显示, G50 钢靶坑底没有明显的钨合金破片材料堆积, 表明在侵彻过程中, 动能块发生侵蚀、碎裂并被抛出弹坑; 而 45 钢靶坑底则残留了动能块剩余部分, 即动能块并未完全破碎。原因在于 G50 钢靶的强度远高于 45 钢的, 在高速撞击下产生了较高的冲击压力, 导致动能块更易发生破碎。此外, 在高速撞击下, G50 钢靶和 45 钢靶的成坑形貌特征有着明显的不同。45 钢靶成坑表面出现均匀的翻边, 成坑整体近似呈圆柱形, 由于动能块头部侵蚀而形成卵形坑底。而 G50 钢靶成坑表面出现明显的崩裂翻边现象, 靶板表面出现了不同程度的崩碎, 且成坑口部直径较大, 随着侵彻深度的增加, 开坑直径逐渐减小, 近似呈锥形。另外, 开坑的内表面更粗糙, 侧壁上生成了明显的拉伸裂纹。

目前, 对于圆柱形钨合金弹丸侵彻 45 钢等低碳钢的破坏特性已开展了较多的研究, 研究认为, 45 钢强度较低、塑性较好, 在弹丸的挤压下向正向及径向产生塑性流动形成靶坑, 主要以塑性流动破坏为主; 钨合金弹丸在侵彻过程中, 弹头发生剧烈塑性变形, 形成“蘑菇头”状, 并随着侵彻过程的进行发生破碎, 碎片通过长杆弹与弹坑内壁之间的缝隙排出。靶坑在弹体材料及惯性作用下, 不断扩大、加深, 进而形成较为均匀的圆柱形靶坑。45 钢的侵彻过程如图 11 所示。

然而, 目前对超高强度钢靶在钨合金弹丸高速侵彻下的毁伤特性及机理尚缺乏充分研究。王猛等^[13]研究了高强度装甲钢在钨合金长杆弹侵彻下的破坏特性, 指出装甲板弹孔底部存在冠状裂纹的破坏模式, 认为其是侵彻过程中弹靶接触区域局部瞬间不均匀卸载(弹体的破碎)产生拉伸应力导致的。因此,

可从侵彻过程中弹靶的受力状态及弹体失效特性出发,分析超高强度钢靶的侵彻破坏特性。认为钨合金动能块高速侵彻 G50 靶板时,在弹靶界面产生高压状态,并由于边界效应产生较强的稀疏波对靶板表面造成的拉伸作用,靶板出现了翻边和拉伸崩碎现象,导致开坑直径较大。随着冲击速度的增大,稀疏波强度增高,导致靶板表面的崩碎区域增大。这也表明了在高应变率拉伸作用下,G50 钢的破坏模式向脆性断裂发展。进入开坑阶段后,根据动态空腔膨胀理论可知,理想弹塑性材料的空穴表面径向应力为^[16]:

$$\sigma_r = \frac{2Y}{3} \left[\ln\left(\frac{2E}{3Y}\right) + 1 \right] + \frac{3}{2}\rho u^2 \quad (1)$$

式中: Y 为屈服极限, E 为弹性模量, ρ 为材料密度, u 为空穴表面膨胀速度。

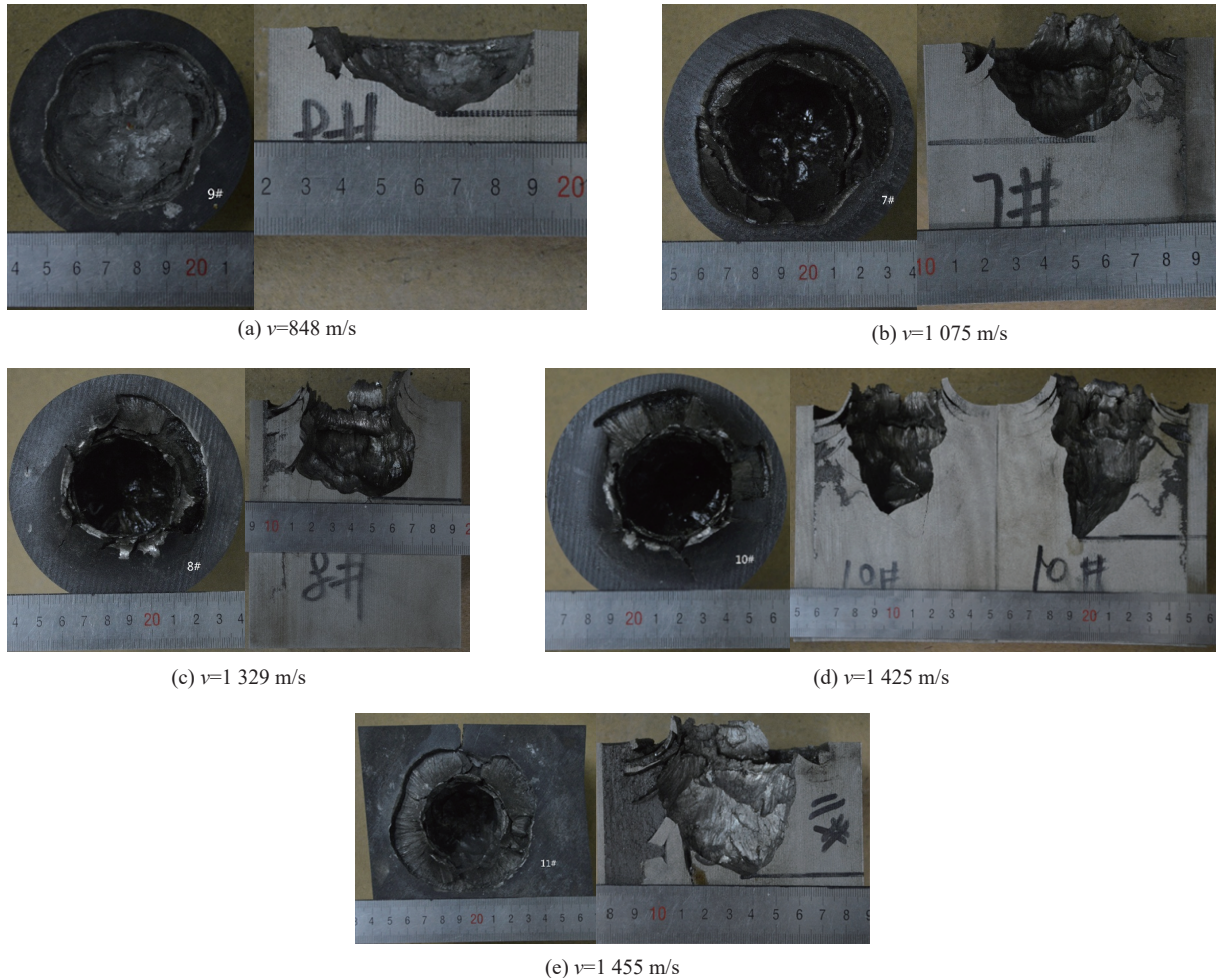


图 9 不同侵彻速度下 G50 钢靶的开坑形貌

Fig. 9 Photographs of cross sections of G50 steel target after impact by the tungsten alloy projectiles at different velocities

由式 (1) 可知,由于两种钢材材料密度相同,在相同速度下的动态阻力部分相同,静态阻力随靶板屈服强度的增大而增大。取 45 钢的静态屈服强度为 355 MPa, G50 钢的屈服强度为 1 330 MPa,则两者的静态阻力约为 1 651、5 015 MPa, G50 钢静态的空穴表面径向应力明显高于 45 钢的。较高的径向应力作用于钨合金动能块,将引起动能块内产生应力集中以及受力分布不均匀性,可导致动能块局部发生破碎,由此造成对弹坑的局部突然卸载,卸载波的相互作用可在对应区域产生一定强度的拉伸应力,导致靶板中产生冠状裂纹,在后续的侵彻过程中,靶板沿冠状裂纹发生剥落破坏。G50 靶侵彻后的鱼鳞状壁面以及崩裂裂纹也证明了该推断。随着侵彻过程的进行,钨合金动能块头部形成“蘑菇头”,其侧部在剪切力的作用下产生剪切破坏,造成动能块头部被削尖,侵彻阻力减小,即宏观上形成锐化效应,与靶板的接触

面积变小, 则导致靶板形成较尖锐的底部。此外, 靶板在高速侵彻作用下的破坏机理也对其破坏模式有较大影响。45 钢为延性较好的软钢板, 其在高速冲击下通常表现为典型的塑性断裂, 破坏形式为延性穿孔; 又由于其强度、硬度较低, 变形较为均匀, 因此不易发生绝热剪切失稳^[17-18]。而已有的研究^[13,19]表明, 高强度钢在高速侵彻过程中, 弹、靶之间的高压、高温、高应变率过程可视为绝热过程。弹坑表层材料的热软化效应将超过应变硬化和应变率硬化效应, 在局部区域产生热塑失稳, 形成绝热剪切带。微裂纹易在侵彻作用力下在绝热剪切带中成核、长大, 最后扩展为宏观裂纹导致材料失效破坏。因此可以推断, 靶板绝热剪切带的产生及其在拉伸作用下的剥落破坏和动能块的锐化行为, 联合导致了 G50 靶板形成类锥体的靶坑。钨合金动能块高速侵彻 G50 靶板的毁伤特性示意图如图 12 所示。

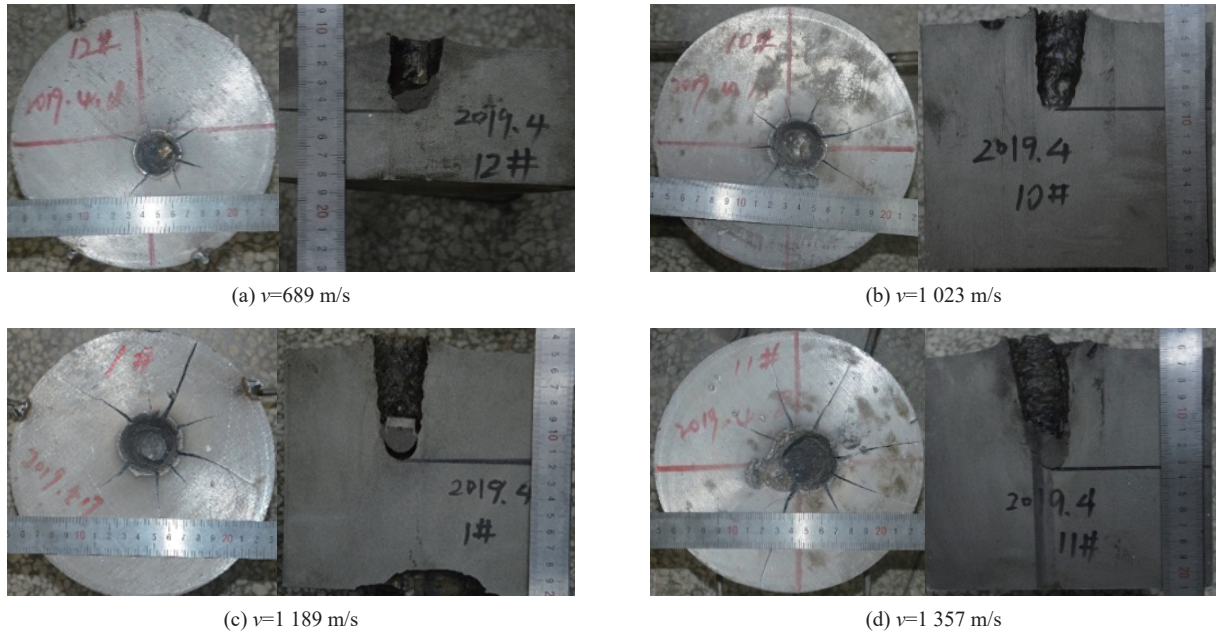


图 10 不同侵彻速度下 45 钢靶的开坑形貌

Fig. 10 Photographs of cross sections of 45 steel target after impact by the tungsten alloy projectiles at different velocities

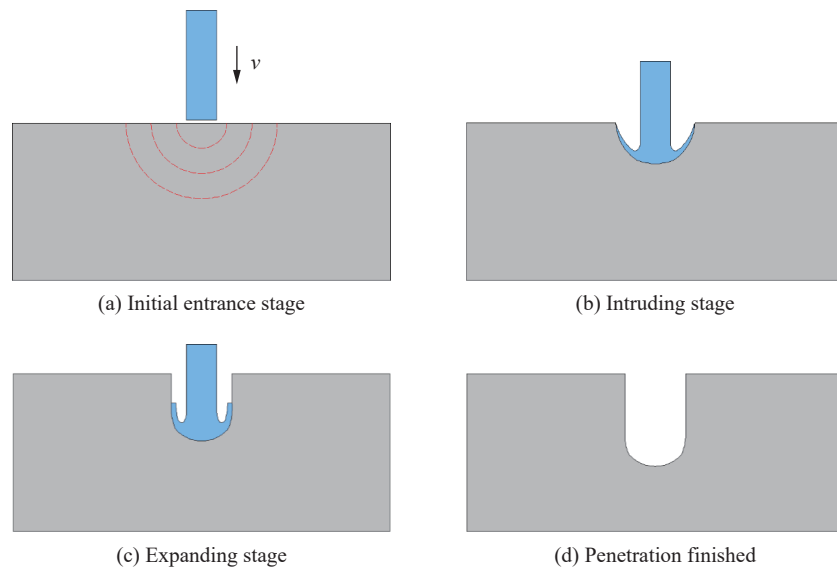


图 11 钨合金动能块高速撞击低碳钢靶的侵彻过程示意图

Fig. 11 Schematica diagrams of the penetration process of low carbon steel target struck by a tungsten alloy projectile

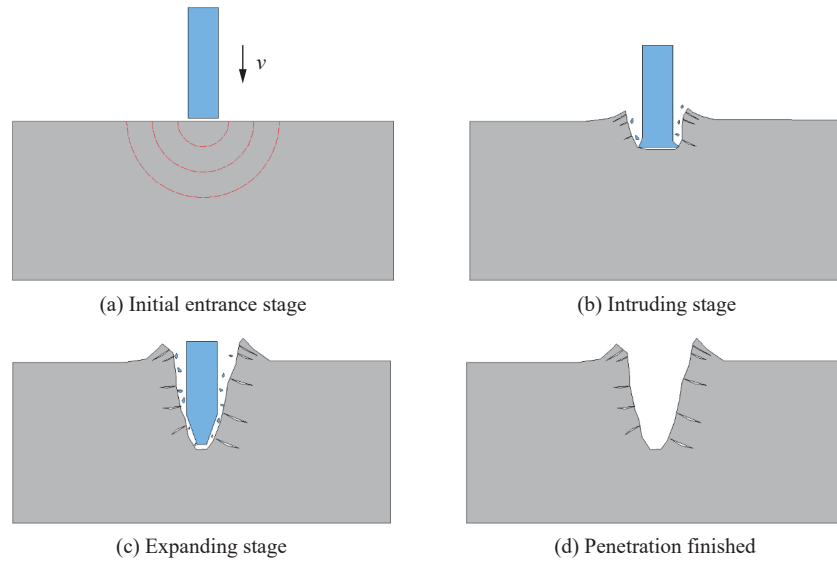


图 12 钨合金动能块高速撞击 G50 钢的侵彻过程示意图

Fig. 12 Schematic diagrams of the penetration process of G50 steel target struck by a tungsten alloy projectile

3 数值模拟分析

为进一步探讨和验证钨合金动能块对不同类型钢靶的侵彻特性,采用有限元软件对钨合金动能块高速侵彻 45 钢和 G50 钢靶进行数值模拟研究。数值模拟算法采用 Lagrange 算法,钨合金动能块和钢靶作用过程中伴随着高温、高压和应变率效应,选用 Johnson-Cook 本构模型结合 Grüneisen 状态方程来描述其侵彻力学行为,弹、靶材料的 Johnson-Cook 本构模型参数^[20-22]见表 4, Grüneisen 状态方程参数如表 5 所示。

表 4 弹靶材料的 Johnson-Cook 参数

Table 4 Johnson-Cook model parameters of projectile and targets

材料	A/MPa	B/MPa	n	c	m	T_{melt}/K
G50 钢	1445	1326	0.356	0.005	1.12	1793
45 钢	496	434	0.307	0.008	0.80	1793
93W	1197	580	0.050	0.025	1.90	1730

表 5 弹靶材料的 Grüneisen 状态方程参数

Table 5 Grüneisen state equation parameters of projectile and targets

材料	$c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0	A
G50 钢	4280.0	1.990	0	0	2.170	0.46
45 钢	4280.0	1.990	0	0	2.170	0.46
93W	4066.2	1.368	0	0	1.736	0.46

通过数值模拟获得了典型速度下 45 钢和 G50 钢的侵彻深度,并与试验结果进行了对比,见表 6~7。结果表明,数值模拟结果与试验结果吻合较好,在一定程度上能够反映靶板的侵彻破坏特性。45 钢选取典型速度为 1189 m/s 的试验为计算工况,侵彻过程不同时刻的计算结果如图 13 所示。由图 13 可知,在侵彻的开坑阶段,动能块头部发生墩粗形成“蘑菇头”,使弹坑逐渐扩大,坑口发生挤压翻边;随着侵彻过程的进行,动能块头部发生明显的侵蚀破碎,长度逐渐变短;鉴于 45 钢良好的延展性,弹坑处材料在动能块超高冲击压力下被挤向两侧和前方,并在失效准则下发生单元删除,最终形成类圆柱形的弹坑,与试验现象吻合。

钨合金动能块高速侵彻 G50 钢的情况以典型速度 1425 m/s 的试验工况为例,计算结果如图 14 所示。在侵彻初始阶段,在稀疏波作用下,靶板产生了拉伸层裂破坏,形成了较大口径的坑口,与试验结果吻合,对比图见图 15;随着侵彻的发展,在强径向应力作用下动能块头部未能形成墩粗“蘑菇头”,而是在头部发生剪切失效逐渐变尖,产生锐化效应,进而在靶板中形成尖锐底部形貌。此外,高速侵彻过程中,弹、靶接触区域始终处于高压状态,接触面上的弹、靶材料不断发生侵蚀破坏,产生连续的“加载-卸

载”行为, 进而导致靶板内出现拉压应力交替产生的现象; 靶板的坑洞壁面在冲击压力和拉伸应力联合作用下形成类锥形的破坏形貌, 与试验结果较为一致, 破坏形貌对比图见图 16。

表 6 45 钢的侵彻深度数值模拟结果
Table 6 Numerical simulation results of DOP of 45 steel

撞击速度/(m·s ⁻¹)	试验穿深/mm	模拟穿深/mm	侵深误差/%
689	34	25.3	25.6
1023	52	49.5	4.95
1189	66	68.9	4.41
1357	72	76.7	6.46

表 7 G50 钢的侵彻深度数值模拟结果
Table 7 Numerical simulation results of DOP of G50 steel

撞击速度/(m·s ⁻¹)	试验穿深/mm	模拟穿深/mm	侵深误差/%
848	22	24.6	11.7
1075	32	37.5	17.1
1329	52	45.9	11.7
1425	50	52.3	4.53
1455	53	53.5	0.94

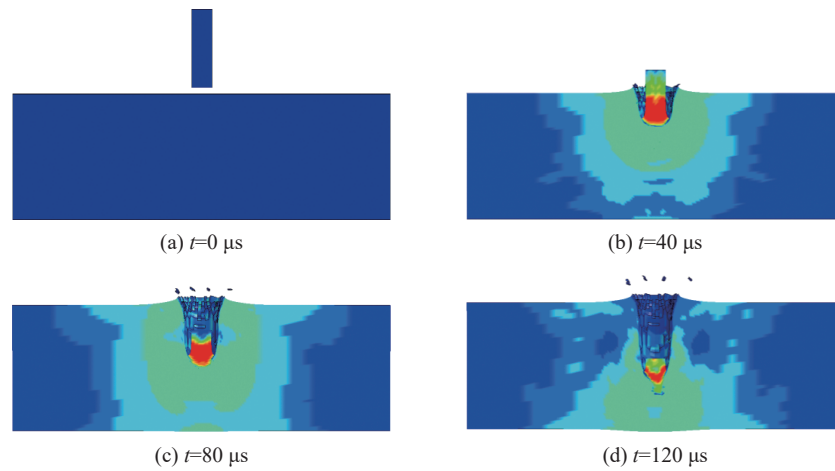


图 13 钨合金动能块高速(1 189 m/s)侵彻 45 钢靶时不同时刻的计算结果
Fig. 13 Schematic diagrams of the penetration of tungsten alloy projectile into 45 steel at the impact velocity of 1 189 m/s at different times

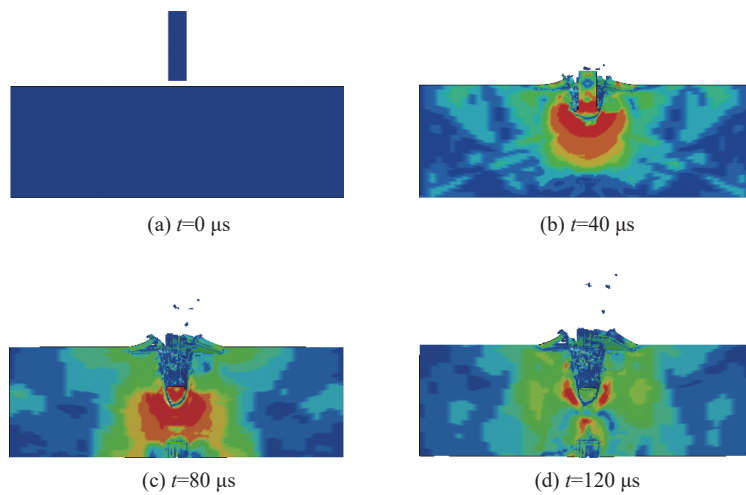


图 14 钨合金动能块高速(1 425 m/s)侵彻 G50 钢靶时不同时刻的计算结果
Fig. 14 Schematic diagrams of the penetration of tungsten alloy projectile into G50 steel at the impact velocity of 1 425 m/s at different times

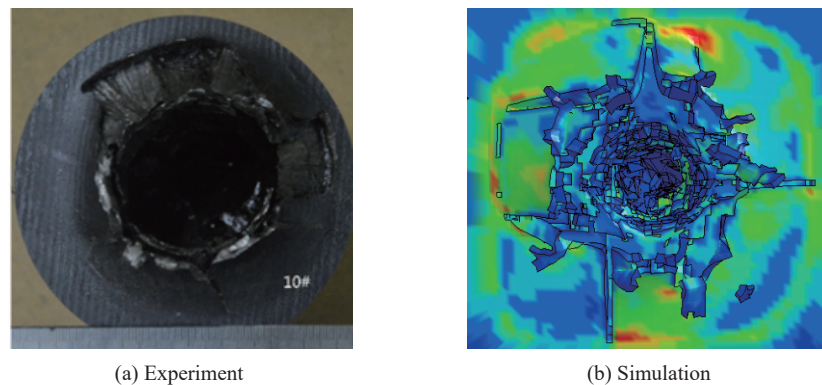


图 15 钨合金动能块高速侵彻 G50 钢靶时表面破坏形貌的对比图

Fig. 15 Comparison of surface failure modes of G50 targets between simulation and experiment

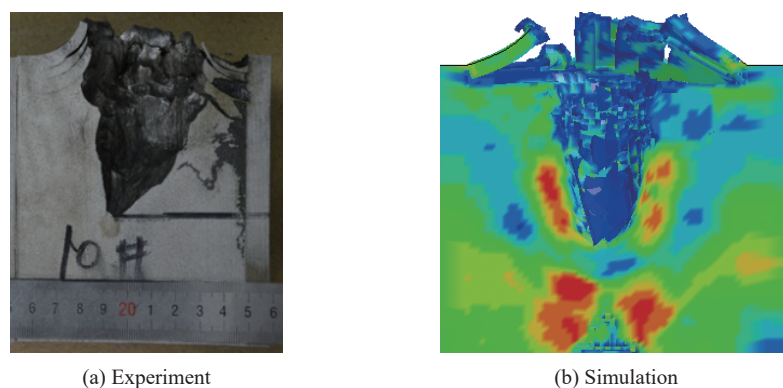


图 16 钨合金动能块高速侵彻 G50 钢靶时破坏形貌的对比图

Fig. 16 Comparison of crater failure modes of G50 targets between simulation and experiment

4 结 论

通过弹道炮加载平台开展了 215 g 钨合金动能块以 689~1489 m/s 的速度撞击 G50 超高强度钢靶和 45 钢靶的试验, 获得了两种靶标的典型破坏形貌, 测量了成坑体积和侵彻深度, 并对两种典型钢靶的破坏特性进行了分析, 得到以下主要结论。

(1) 在大质量钨合金动能块高速侵彻下, 超高强度 G50 钢靶和 45 钢靶呈现明显不同的破坏形貌。45 钢靶的破坏方式属于延性扩孔, 形成经典的类圆柱形弹坑形貌; 而 G50 超高强度钢靶则产生了类锥形弹坑, 且迎弹面翻边处有明显的层裂裂纹, 在坑道表面形成了鱼鳞状粗糙壁面以及崩裂裂纹。且 G50 钢靶的侵彻深度低于相近速度下的 45 钢的侵彻深度, 而成坑体积大于 45 钢的。

(2) 依据弹靶作用机制, 认为大质量钨合金动能块在侵彻 G50 钢靶的过程中, 在较高的径向应力作用下发生局部破碎, 造成靶板内产生卸载拉伸波。同时, 高强度钢靶在高速侵彻下易出现绝热剪切带, 靶板弹坑壁面拉伸剥落而形成鱼鳞状粗糙壁面及崩裂裂纹, 这也是 G50 钢靶侵彻成坑体积大于 45 钢靶成坑体积的主要原因; 另外, 由于动能块头部局部破碎产生锐化效应, 与拉伸剥落效应联合导致了 G50 钢靶内类锥体的弹坑破坏形貌。

(3) 大质量动能块对 G50 钢靶和 45 钢靶侵彻过程的数值模拟结果与试验结果较为吻合。数值模拟较为直观地显示了靶板及弹体的变形、损伤直至破坏失效的全过程, 进一步验证了两种钢靶的侵彻失效破坏机制。

参考文献:

- [1] HOHLER V, STILP A J. Penetration of steel and high density rods in semi-infinite steel targets [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Ballistics. Karlsruhe, 1977: 23–25.
- [2] SCHÄER F K, HERRWERTH M, HIERMAIER S J, et al. Shape effects in hypervelocity impact on semi-infinite metallic targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26(1): 699–711. DOI: 10.1016/s0734-743x(01)00115-4.
- [3] DUAN Z Q, LI S X, HUANG D W. Microstructures and adiabatic shear bands formed by ballistic impact in steels and tungsten alloy [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003, 26(12): 1119–1126. DOI: 10.1046/j.1460-2695.2003.00705.x.
- [4] MARTINEAU R L, PRIME M B, DUFFEY T. Penetration of HSLA-100 steel with tungsten carbide spheres at striking velocities between 0.8 and 2.5 km/s [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30(5): 505–520. DOI: 10.1016/S0734-743X(03)00080-0.
- [5] 谭多望, 李翔, 温殿英, 等. 球形钨合金破片终点弹道性能实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(5): 425–429.
TAN D W, LI X, WEN D Y, et al. Experimental investigation of terminal effects of spherical tungsten fragments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5): 425–429.
- [6] 徐豫新, 王树山, 伯雪飞, 等. 钨合金球形破片对低碳钢的穿甲极限 [J]. *振动与冲击*, 2011, 30(5): 192–195. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.05.040.
XU Y X, WANG S S, BO X F, et al. Armor-piercing ultimate of tungsten alloy spherical fragment against low-carbon steel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(5): 192–195. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2011.05.040.
- [7] 徐豫新, 任杰, 王树山. 钨球正撞击下低碳钢板的极限贯穿厚度研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2017, 37(6): 551–556. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.06.001.
XU Y X, REN J, WANG S S. Research on perforation limit thickness of low carbon steel plates impacted normally by tungsten spheres [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37(6): 551–556. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.06.001.
- [8] 赵晓旭, 王树山, 徐豫新, 等. 钨球高速侵彻低碳钢板成坑直径的计算模型 [J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(12): 1217–1221. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.12.002.
ZHAO X X, WANG S S, XU Y X, et al. Crater diameter calculation model of tungsten sphere impacting low carbon steel plate at high velocity [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(12): 1217–1221. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.12.002.
- [9] 赵小峰. 破片质量对钨合金破片侵彻威力的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(10): 3967–3971. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.10.025.
ZHAO X F. Impact of fragment mass on the penetration capacity of tungsten alloy fragment [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(10): 3967–3971. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.10.025.
- [10] 王雪, 智小琦, 徐锦波, 等. 球形破片侵彻多层板弹道极限的量纲分析 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(6): 065102. DOI: 10.11858/gywlxb.20190757.
WANG X, ZHI X Q, XU J B, et al. Dimensional analysis of ballistic limit of spherical fragments penetrating multi-layer plate [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(6): 065102. DOI: 10.11858/gywlxb.20190757.
- [11] 刘铁磊, 徐豫新, 王晓锋, 等. 钨合金球形破片侵彻低碳钢的弹道极限速度计算模型 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(4): 768–779. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0448.
LIU T L, XU Y X, WANG X F, et al. Ballistic limit calculation model of tungsten alloy spherical fragments penetrating into low carbon steel plate [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(4): 768–779. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0448.
- [12] 张健, 徐豫新, 刘铁磊, 等. 钨球对高硬度钢斜侵彻效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(2): 023302. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0427.
ZHANG J, XU Y X, LIU T L, et al. Oblique penetration effect of a tungsten ball on high hardness steel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(2): 023302. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0427.
- [13] 王猛, 黄德武, 荣光, 等. 装甲板弹坑底部冠状裂纹的观测与分析 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(12): 1579–1583. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.12.003.
WANG M, HUANG D W, RONG G, et al. Observation and analysis of coronary cracks beneath the crater in armor-plate [J].

- Acta Armamentarii*, 2009, 30(12): 1579–1583. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2009.12.003.
- [14] 北京跟踪与通信技术研究所. 美动能拦截弹的发展现状和趋势分析 [J]. *科技情报快讯*, 2010, 2: 1–25. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086X.2008.04.006.
Beijing Institute of Tracking and Communication Technology. Current technology and development trend of American kinetic missions [J]. *Science and Technology Intelligence News*, 2010, 2: 1–25. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086X.2008.04.006.
- [15] 中国人民解放军总装备部. 28CrMnSiNi4MoNb 钢棒规范: GJB 8545–2015 [S]. 2015.
People's Liberation Army General Armaments Department. Specification for 28CrMnSiNi4MoNb steel bars: GJB 8545–2015 [S]. 2015.
- [16] FORRESTAL M J, LUK V K. Dynamic spherical cavity-expansion in a compressible elastic-plastic solid [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1988, 55(2): 275–279. DOI: 10.1115/1.3173672.
- [17] 李金泉. 穿甲侵彻机理及绝热剪切带特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005. DOI: 10.7666/d.y1001823.
LI J Q. Study of armour-piercing mechanism and adiabatic shear banding characteristic [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. DOI: 10.7666/d.y1001823.
- [18] 段占强, 丛美华, 苏会和, 等. 45[#]钢高速冲击穿孔的显微组织 [J]. *材料研究学报*, 2001, 15(4): 403–408. DOI: 10.3321/j.issn:1005-3093.2001.04.005.
DUAN Z Q, CONG M H, SU H H, et al. Microstructure investigation of the penetration bore of 45[#] steel in high speed impacting [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2001, 15(4): 403–408. DOI: 10.3321/j.issn:1005-3093.2001.04.005.
- [19] 李金泉, 黄德武, 段占强, 等. 穿甲侵彻过程中靶板内绝热剪切带特性及形成原因分析 [J]. *兵工学报*, 2005, 26(1): 60–63. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2005.01.013.
LI J Q, HUANG D W, DUAN Z Q, et al. Analysis on adiabatic shear band characteristic and cause of formation in process of penetration in armor [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(1): 60–63. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2005.01.013.
- [20] ROHR I, NAHME H, THOMA K, et al. Material characterisation and constitutive modelling of a tungsten-sintered alloy for a wide range of strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(8): 811–819. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.12.006.
- [21] 王可慧, 张颖, 段建, 等. G50 钢的力学性能实验研究 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(S2): 247–250.
WANG K H, ZHANG Y, DUAN J, et al. Experimental research on the mechanical properties of G50 alloy steel [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(S2): 247–250.
- [22] 王猛, 黄德武, 曲家惠, 等. 钨合金杆式弹侵彻 45[#]钢变形失效行为的数值分析 [J]. *塑性工程学报*, 2012, 19(2): 102–106. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2012.02.021.
WANG M, HUANG D W, QU J H, et al. Simulation on the deformation and fracture of long-rod projectile of tungsten alloy penetrating into 45[#] steel [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2012, 19(2): 102–106. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2012.02.021.

(责任编辑 曾月蓉)