

文章编号: 1673-3193(2024)02-0185-09

## 弹丸侵彻混凝土目标的热固耦合数值分析

常慧珠<sup>1</sup>, 张冬梅<sup>1</sup>, 麻旭东<sup>2</sup>, 李世中<sup>1</sup>, 贾保峰<sup>3</sup>, 赵紫良<sup>1</sup>, 何 隆<sup>1</sup>

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中国人民解放军61769部队, 山西 032100;  
3. 内蒙古第一机械集团股份有限公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 针对侵彻过程中侵彻深度计算不精准的问题, 以弹靶模型为研究对象, 基于ANSYS/LS-DYNA软件建立弹靶模型, 对35CrMnSi弹丸侵彻C30混凝土靶的侵彻深度进行了计算。以侵彻速度和角度为初始变量设置了33组不同工况, 进行了侵彻过程的热固耦合数值分析。提取了弹丸温度场、侵彻深度、侵彻速度衰减等数据进行了深入分析, 得出了弹丸侵彻过程中温度升高与侵彻深度之间的关系。结果表明: 1) 垂直侵彻时, 随着侵彻速度的增大, 弹头侵蚀加剧, 温度变化更显著; 2) 非垂直侵彻时, 温度升高极值点由弹头中心转移至弹丸侧身, 弹丸着角增大, 温度升高加快, 侵彻深度减小; 3) 侵彻结束时, 弹丸温度与侵彻深度成相关比例, 相同侵彻角度工况中比例相同。对弹丸侵彻过程中温度场进行分析可提高侵彻深度预测模型的准确性, 研究结果可为侵彻引信测试提供参考。

**关键词:** ANSYS; 弹丸温度场; 侵彻深度; 热固耦合

**中图分类号:** O385

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.02.008

**引用格式:** 常慧珠, 张冬梅, 麻旭东, 等. 弹丸侵彻混凝土目标的热固耦合数值分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 185-193.

CHANG Huizhu, ZHANG Dongmei, MA Xudong, et al. Thermal-solid coupling numerical analysis of projectile penetrating concrete target[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 185-193.

## Thermal-Solid Coupling Numerical Analysis of Projectile Penetrating Concrete Target

CHANG Huizhu<sup>1</sup>, ZHANG Dongmei<sup>1</sup>, MA Xudong<sup>2</sup>, LI Shizhong<sup>1</sup>, JIA Baofeng<sup>3</sup>,  
ZHAO Ziliang<sup>1</sup>, HE Long<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Unit 61769 of PLA, Shanxi 032100, China;  
3. Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014010, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of inaccurate calculation of penetration depth in the process of penetration, taking the projectile-target model as the research object, the projectile-target model was established based on ANSYS/LS-DYNA software to calculate the penetration depth of 35CrMnSi projectile penetrating C30 concrete target. With the penetration velocity and angle as the initial variables, 33 groups of different working conditions were set up, and the thermo-solid coupling numerical analysis of the penetration process was carried out. The data of projectile temperature field, penetration depth and penetration velocity attenuation were extracted and analyzed in depth. The relationship between tempera-

**收稿日期:** 2023-08-15

**基金项目:** 山西省青年基金资助项目(201901D211229)

**作者简介:** 常慧珠(1998—), 女, 硕士生, 主要从事兵器科学与技术的研究。

**通信作者:** 张冬梅(1984—), 女, 副教授, 博士, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: dongmei\_zhang@163.com。

ture rise and penetration depth in the process of projectile penetration was obtained. The results show that: 1) in the case of vertical penetration, the warhead erosion increases and the temperature changes more significantly with the increase of penetration velocity; 2) in non-vertical penetration, the extreme point of temperature rise shifts from the center of the warhead to the side of the projectile, and the impact angle of the projectile increases, and the temperature rise accelerates and the depth of penetration decreases; 3) after the end of penetration, the temperature of the projectile is proportional to the depth of penetration, and the proportion is the same in the same penetration angle. The analysis of temperature field in the process of projectile penetration can improve the accuracy of the prediction model of penetration depth, and the research results can provide reference for the test of penetration fuze.

**Key words:** ANSYS; projectile temperature field; penetration depth; thermal-solid coupling

## 0 引言

硬目标侵彻武器是一种利用弹头末端极高速度所产生的强大动能撞开地表面,钻入地下的精确制导武器,用于攻击地下指挥控制中心、机场跑道等坚固目标。而完成侵彻武器自适应起爆控制硬目标灵巧引信的作用也变得越来越重要。硬目标侵彻引信通过感应和处理侵彻深度、侵彻过载和侵彻层数等信息来决定起爆时刻。目前,国内外在处理侵彻深度预测过程中,对过载数据的规律研究较多,对侵彻过程中其他环境数据的变化规律研究较少,而对侵彻过程中侵彻深度对弹头温度场变化的研究更少。

目前,已经有一些学者对战斗部侵彻半无限混凝土问题进行了一定的研究。赵旭瑞<sup>[1]</sup>对弹丸以不同入射角半无限侵彻厚混凝土靶体进行了仿真,得出当采用垂直入侵或者较小的入射角时,弹丸的温度较低,可在较小范围内影响弹道,从而影响过载数据对侵彻深度的预测。任保祥等<sup>[2]</sup>对试验中收集的弹丸侵彻混凝土的弹道轨迹数据进行了研究,得出弹丸侵彻自然混凝土时,会迅速失去姿态稳定,降低弹丸速度,从而影响弹丸的侵彻深度。张冬梅等<sup>[3]</sup>从分析侵彻过程中的瞬时速度入手,提出了一种基于实测加速度值及模糊模型的实时侵深预测模型。然而,对于弹头温度场与弹丸侵彻深度的关系尚未有相关研究。鉴于此,本文研究了弹丸侵彻半无限混凝土过程中温度随侵彻深度变化的规律。

## 1 热固耦合数值模拟仿真建立

直接测量侵彻过程中弹体的温度较为困难,仅有张磊<sup>[4]</sup>通过一种弹体瞬态温度测试装置对弹

体侵彻温升测量进行了尝试,但未获得有效实验数据。弹体侵彻过程中温度上升的研究主要见于数值模拟探讨与理论分析。

### 1.1 侵彻过程中温度场变化理论

在弹丸侵彻混凝土过程中,战斗部升温的原因主要有两个<sup>[5-7]</sup>:

1) 在战斗部进入混凝土直至停止的过程中,弹头表面的滑动摩擦力做功转化为热能;

2) 在短暂的侵彻过程中,弹头表面发生剧烈的材料塑性形变,所产生的热量无法通过弹体表面进行传输,故弹体升温。

在战斗部半无限侵彻过程中,混凝土的温度变化忽略不计,只分析弹丸表面的温度变化,可作如下假设:弹头外表面半锥角为 $\theta$ ,弹体直径为 $D$ ,弹头可分解为多个高为 $d$ 的等腰三角形。设导热率为 $k$ ,边长为 $d$ 的半无限长三棱柱,垂直接触到密度为 $\rho$ ,比热容为 $C_v$ ,导热系数为 $\lambda$ 的半无限固体表面上,并继续往下做匀速直线运动。在计算中可认为半无限固体是由无限多个半无限细长杆组成,且互相绝热<sup>[5,8-10]</sup>。

设战斗部的起始温度 $T_0$ 为 $20^\circ\text{C}$ ,供给细长杆的热流强度为 $Q_k$ ,平均供热时间为 $t$ ,则可导出一维热传导方程

$$\begin{cases} d = \frac{\sqrt{3} D}{3 \sin \theta}, & T = T_0, t = 0, x = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, & Q_k = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \\ \theta = \frac{\partial T}{\partial x}, & x = \frac{\sqrt{3} D}{3 \sin \theta}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q_k = F_f \sin \theta$ ,  $F_f$ 为摩擦力; $v$ 为侵彻速度。根据方程可得出弹丸表面单元的最高温度为

$$\Delta T = \frac{2Q_k}{\left(\frac{\sqrt{3} D^2}{12 \sin^2 \theta}\right) k \sqrt{\pi}} \sqrt{at} = \frac{2F_f \sin \theta v}{\left(\frac{\sqrt{3} D^2}{12 \sin^2 \theta}\right) k \sqrt{\pi}} \sqrt{at} \quad (2)$$

故由热传导方程可以看出,在整个战斗部侵彻半无限混凝土的过程中,影响弹体温度变化的主要因素如下:

1) 侵彻速度。郭磊等<sup>[11]</sup>研究了弹丸侵彻初速度与温度转换之间的关系。其中,侵彻初速度越大,其塑性应变率越大,则其变形程度越大,塑性变形和摩擦做功使弹丸温度急剧升高,同时其可转化为热能的能量就越多。

2) 弹头形状。Yao 等<sup>[9]</sup>通过几种典型弹头的侵彻阻力参数的对比分析及实验,验证了弹头形状对侵彻深度的影响效果,进而影响侵彻过程中的温度范围。

3) 滑动摩擦系数<sup>[12]</sup>。该系数在侵彻过程中并非是常量,摩擦系数越大,通过摩擦力做功转化的热量越大,温度变化范围越大<sup>[13]</sup>。其大小与侵彻速度、弹体材料中的力学参数如杨氏模量 $E$ 、剪切模量 $G$ 、屈服强度 $Y$ 以及泊松比 $\mu$ 有关。当速度到达一定高速后,摩擦系数可以认为是常数<sup>[14-17]</sup>。

4) 弹体材料的导热系数。导热系数数值越高,热量在金属内传递的速度越快,达到同样温度所需要的时间越短。其大小与比热容 $C_v$ 、密度 $\rho$ 和导热系数 $\lambda$ 有关<sup>[18-21]</sup>。

### 1.2 侵彻试验

侵彻试验采用的弹丸尺寸为最大弹径 $d_{max}=142\text{ mm}$ ,弹丸长度 $l=1\ 690\text{ mm}$ (如图 1 所示),靶体厚度为 $15\text{ m}$ ,外壳材料选用 35CrMnSi 钢材料,靶体选用混凝土,侵彻初速度为 $1\ 000\text{ m/s}$ 。



图 1 战斗部模型  
Fig. 1 Warhead model

由弹丸中的单通道加速度测试系统可以获得如图 2 所示的全弹道的加速度曲线。

对试验所得过载数据进行积分,得到如图 3 所示的试验实时侵深数据。

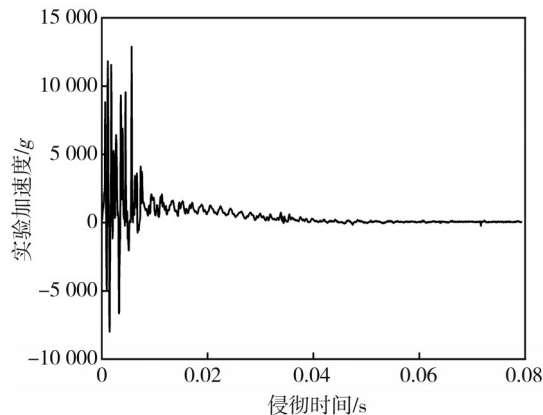


图 2 实验中全弹道加速度曲线

Fig. 2 Full ballistic acceleration curve in experiment

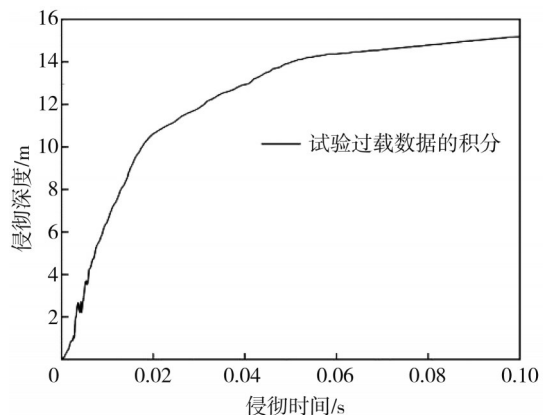


图 3 试验实时侵深数据

Fig. 3 Real-time penetration data in the test

### 1.3 弹靶模型的建立

对照图 1 的试验数据,建立同尺寸、同实验条件的弹丸和混凝土全模型。

混凝土尺寸、含水率及密实度的不同都会导致混凝土的力学特性的差异。由于直接测定材料的本构和大量材料参数需要开展大规模重复性试验,周期长且工作量大,同时还受试验设备和实验条件的限制。故本模型以侵彻试验数据为依据,在一定本构模型下,结合实际情况通过多次热固耦合数值仿真,将试验数据与仿真数据进行对比(见图 4),最终优选出最符合试验数据的有关材料参数。

本弹靶模型采用 Lagrange 算法,以映射网格划分单元,建立全模型。

对弹靶接触及附近区域加密划分。弹靶单元类型采用 Solid164,在靶体边界处施加非反射边界,以模拟半无限侵彻状态。为了在描述温度的前提下,考虑应变率的影响,并提高计算效率,弹丸选用 MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 本构模型,混凝土选用 Holmquist-Johnson-Cook(HJC)本构模型。此

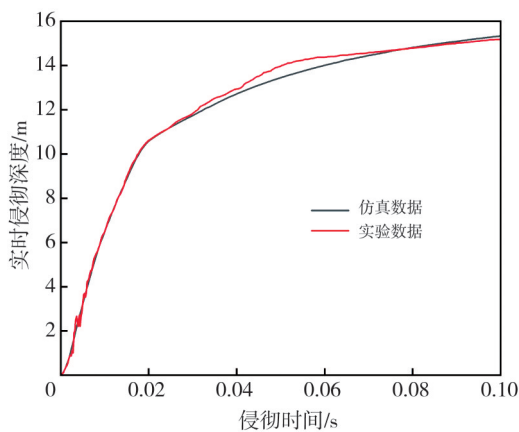
外,接触算法采用ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_THERMAL,温度设置为INITIAL\_TEMPER-ATURE\_SET,模块中添加MAT\_THERMAL\_ISOTROPIC温度相关材料,初始温度设置为0℃。

角70°,80°,90°三个角度,侵彻初速度从800~1300 m/s,以50 m/s的梯度递增,设计33个不同的工况,如表2所示。

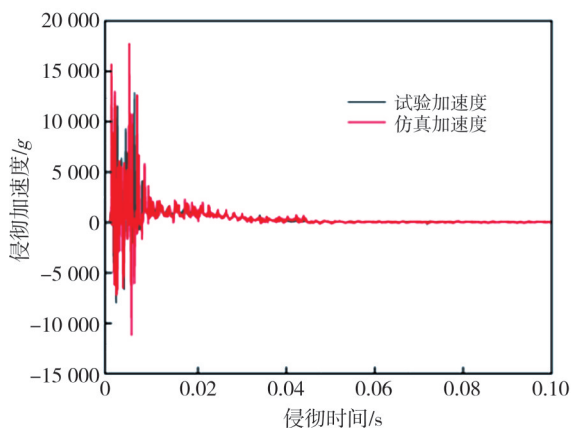
表2 工况设计表

Tab.2 Operating condition design table

标号	角度/(°)	侵彻方向初速度/(m·s <sup>-1</sup> )	x轴侵彻初速度/(m·s <sup>-1</sup> )	y轴侵彻初速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1	90	800	0	800
2	90	850	0	850
3	90	900	0	900
4	90	950	0	950
5	90	1000	0	1000
6	90	1050	0	1050
7	90	1100	0	1100
8	90	1150	0	1150
9	90	1200	0	1200
10	90	1250	0	1250
11	90	1300	0	1300
12	80	800	138.92	787.85
13	80	850	147.60	835.09
14	80	900	156.28	886.33
15	80	950	164.97	935.57
16	80	1000	173.65	984.81
17	80	1050	182.33	1034.05
18	80	1100	191.01	1083.29
19	80	1150	199.70	1132.53
20	80	1200	208.38	1181.77
21	80	1250	217.06	1231.01
22	80	1300	225.75	1280.25
23	70	800	273.62	751.75
24	70	850	290.72	798.74
25	70	900	307.82	845.72
26	70	950	324.92	892.71
27	70	1000	342.02	939.69
28	70	1050	359.12	986.68
29	70	1100	376.22	1033.67
30	70	1150	393.32	1080.65
31	70	1200	410.42	1127.63
32	70	1250	427.52	1174.62
33	70	1300	444.63	1221.60



(a) 侵深对比



(b) 加速度对比

图4 试验数据与仿真数据对比图

Fig.4 Comparison between test data and simulation data

战斗部弹头及混凝土靶体所用参数如表1所示<sup>[11]</sup>,其中, $\rho$ 为密度, $E$ 为杨氏模量, $\mu$ 为泊松比, $A$ 为屈服应力, $C$ 为材料应变硬化模量, $n$ 为硬化指数。

表1 材料参数

Tab.1 Material parameters

材料	$\rho/(g\cdot cm^{-3})$	$E/GPa$	$\mu$	$A/MPa$	$C$	$n$
35CrMnSi钢	7830	206	0.22	1400	0.008	0.232
混凝土	2000	30	0.25			

## 2 弹体侵混凝土目标热固耦合仿真计算

### 2.1 工况设计

以不同着靶角度、不同速度为基准,按着靶

按照表2对已建好的模型进行赋值,利用LS-DYNA软件对其进行热固耦合数值模拟分析。在每个工况中,取弹头温升幅度最大节点处的温升数据,将所得出的温度变化情况作为结果。收集每个工况中的仿真结果,对比分析不同速度不同着靶角度的侵彻过程中温度场的变化情况。

当着靶角度为90°时,工况可分成三个阶段来分析。

1) 初始阶段(0~0.015 s),此时弹丸刚入侵靶体,由于高速摩擦,温度和速度均剧烈变化;

2) 振荡阶段(0.015~0.04 s),此时弹丸内部

外部温度迅速转变, 体现为参数振荡;

3) 平稳阶段(0.04~0.1 s), 此时弹丸速度降低, 温度平稳增加。

当着靶角度为 80°时, 工况也可分成三个阶段来分析。

1) 初始阶段(0~0.02 s), 弹轴尚未发生偏移, 此时弹丸温度变化幅度最高点在弹头, 弹体侧身温度变化数值较小, 无参考意义;

2) 平稳阶段(0.02~0.06 s), 弹轴发生轻微偏移, 此时弹丸温度变化幅度最高点在侧弹头处, 在弹丸侧身处的点体现为温度数值缓慢上升;

3) 振荡阶段(0.06~0.1 s), 弹轴偏移较大, 此时温度变化幅度最高点在弹丸侧身, 温度数值急速上升。

### 2.2 仿真结果

#### 2.2.1 弹丸垂直侵彻的仿真结果

图 5 为着靶角度为 90°时, 800, 1 000 和 1 200 m/s 三个不同侵彻速度下弹丸表面温度的分布情况。由图 5 可以看出, 速度为 800 m/s 的弹丸表面温度分布范围为 49~203.7 °C; 速度为 1 000 m/s 的弹丸表面温度分布范围为 49~244 °C; 速度为 1 200 m/s 的弹丸表面温度分布范围为 49~284 °C。其中, 部分单元达到材料熔点, 单元失效。

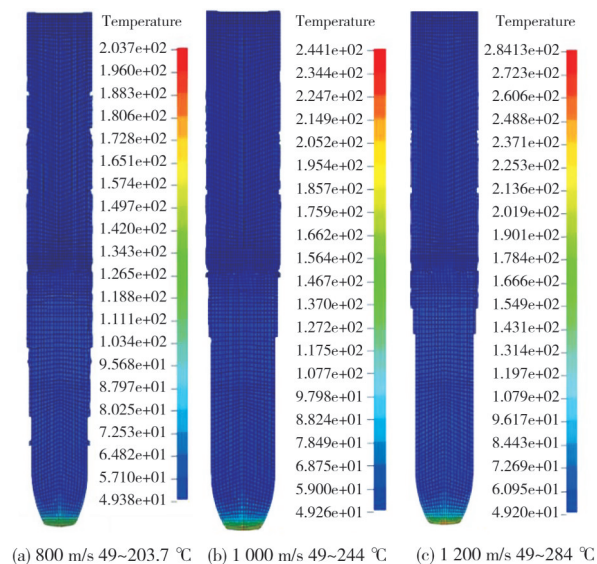


图 5 不同侵彻速度下的弹丸温度分布情况

Fig. 5 Temperature distribution of projectile under different penetration velocity

由图 5 可以看出, 着靶角度为 90°的前提下, 弹头中心点为温度最高点, 分析此点的温度变化

曲线, 可以得出弹头温度与侵深的关系。由于弹头比较尖锐, 弹尖发生翘曲变形, 有轻微的塑性变形。另外, 有研究表明, 当弹体撞击速度为  $100 \text{ m/s} < v_s < 3\,000 \text{ m/s}$  时, 除了弹头部位发生相应的局部变形, 弹体其余部分几乎不发生变形, 因为当侵彻时, 塑性功大部分转化为热, 弹头部分被软化, 软化后会进一步发生塑性变形, 导致弹头局部失稳<sup>[9]</sup>。

在着靶角度为 90°的工况 1~11 中, 取单位时间内弹头中温度变化幅度最大的点生成图 6。由图 6 可以看出, 在第一阶段 0~0.015 s 内, 弹丸由于高速摩擦产生闪温, 闪温阶段温度值远高于弹丸表面的实际温度, 需要去除奇异值来得出弹丸温度上升的曲线; 在第二阶段 0.015~0.04 s, 塑性功转化为热, 弹头温度大幅度上升, 此阶段闪温温度高于弹头的实际温度, 弹头表面温度以闪温为主; 在第三阶段 0.04~0.1 s 内有两种温度变化趋势: 随着弹丸速度的衰减, 弹靶摩擦减小, 闪温温度平缓增加; 随着弹丸的塑性形变, 闪温温度转为内部能量。两种变化趋势相结合后, 使第三阶段弹丸表面的温度平缓上升后又轻微回落, 直到侵彻结束为止。因弹丸初速的影响, 第三阶段温度回落时间点和回落程度有所不同。

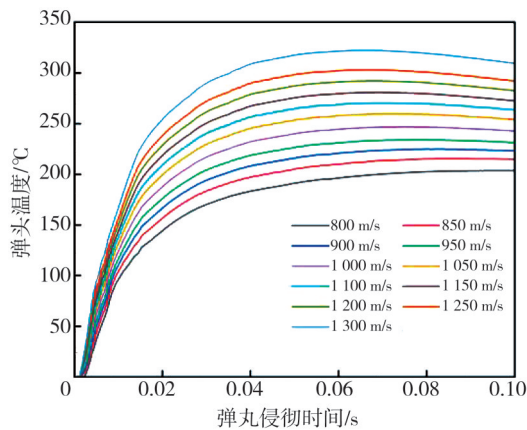


图 6 着靶角度为 90°时弹头温度的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of warhead temperature at the target angle of 90°

图 7 为着靶角度为 90°时, 弹丸侵彻深度随时间增长的变化曲线图。由图 7 中可看出, 在第一阶段 0~0.015 s 内, 弹丸初速大, 侵彻深度大幅度增加, 图中表现为斜率较大; 在第二阶段 0.015~0.04 s 内, 随着侵彻的进行, 弹丸速度不断减小, 侵彻深度缓慢增加, 侵彻深度增加速率由快渐渐变慢, 图中表现为斜率由大变小; 在第三阶段

0.04~0.1 s内, 弹丸速度趋于平稳, 侵彻深度缓慢增加, 图中表现为斜率逐渐平稳。

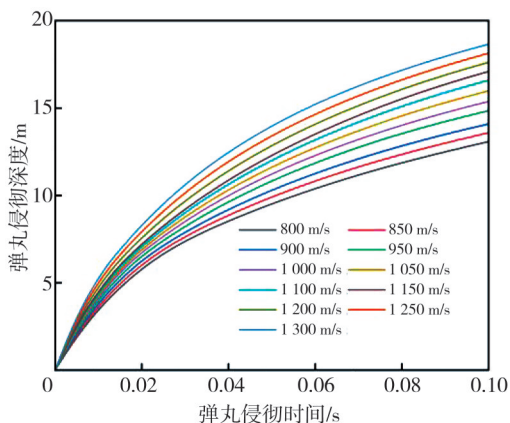


图7 着靶角度为90°时弹丸侵彻深度变化的曲线

Fig. 7 Variation curve of projectile penetration depth at the target angle of 90°

### 2.2.2 弹丸非垂直侵彻的仿真结果

图8为着靶角度80°时弹丸的侵彻弹道轨迹情况。由图8可以看出, 在非垂直侵彻的前提下, 随着弹丸侵彻阶段的递进, 弹丸与靶体的接触面也随之变化。在整个侵彻过程中温度最高点由弹头向弹丸侧身发生偏移, 在侵彻初始阶段, 弹头温度均为闪温, 高于正常值, 在剔除奇异值之后无参考作用, 故分析温度与侵深关系时取点应从弹头转为弹丸侧身。



图8 着靶角度为80°时弹丸的侵彻弹道轨迹

Fig. 8 The penetration trajectory of a projectile at the angle of 80°

在工况12~22中, 取弹丸侧身中温度幅度变化最大的点生成图9。不同于图6中变化速率由大变小, 图9中的温度升高速率由小变大。在0~0.02 s阶段内, 弹丸温度变化幅度最高点在弹头, 此时弹丸侧身温度变化小, 可忽略不计; 在0.02~0.06 s内, 弹丸温度变化幅度最高点在侧弹头处, 此时弹丸侧身温度缓慢上升; 在0.06~0.1 s内, 温度变化幅度最高点在弹丸侧身, 此时温度急速上升。

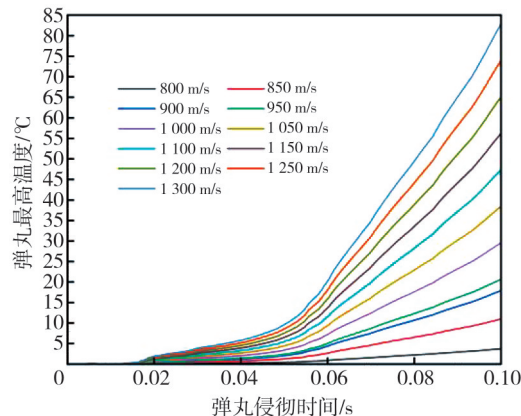


图9 着靶角度为80°时弹丸侧身温度的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of projectile side temperature at the target angle of 80°

将工况12~22中弹丸因偏移角而产生的x轴侵深变化生成图10。不同于图7中侵彻深度增长速率较为平缓, 图10中侵彻深度增长速率随侵彻阶段的变化而急剧变化。

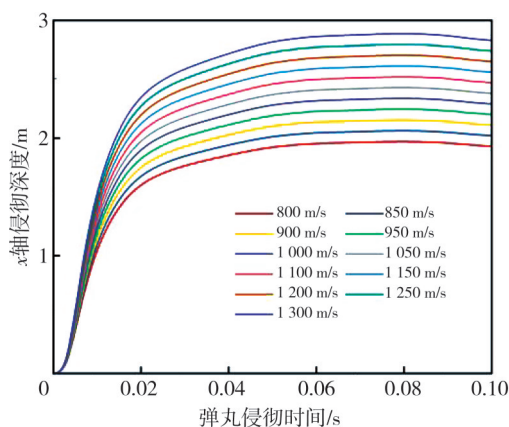


图10 着靶角度为80°时x轴上的侵彻深度变化曲线

Fig. 10 The penetration depth curve on the x-axis at the target angle of 80°

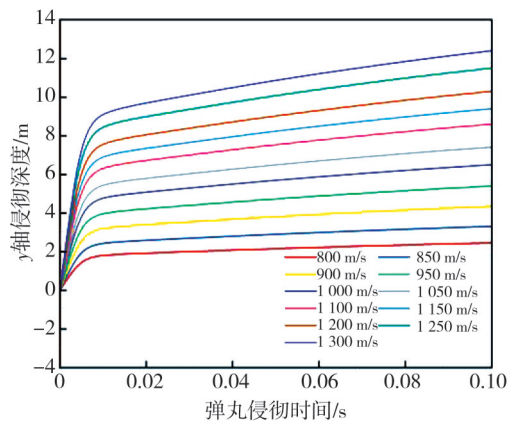


图11 着靶角度为80°时y轴上的侵彻深度变化曲线

Fig. 11 The penetration depth curve on the y-axis at the target angle of 80°

将工况 12~22 中弹丸因偏移角而产生的 y 轴侵深变化情况生成图 11。由图 11 可以看出,在 0~0.015 s 内,弹轴尚未发生偏移,且 y 轴初速度较大(见表 2),故 y 轴侵彻深度急剧增加;在 0.01~0.1 s 内,弹轴发生偏移, y 轴分速度急剧衰减剧烈并趋向 0,此阶段 y 轴侵彻深度增加缓慢。

### 2.3 仿真结果分析

#### 2.3.1 同角度不同速度的仿真结果分析

将工况 1~11 中弹头温度与弹丸实时侵彻深度之间的对应关系生成图 12。由图 12 可以看出,在第一阶段 0~0.015 s 内,弹头的温度随侵彻深度的增加而大幅度增加,此时图中斜率较高,根据能量守恒定律可得出,弹丸动能的大幅度减小导致弹丸内能的增加,进而体现为弹头温度的大幅度升高;在第二阶段 0.015~0.04 s 内,随侵彻深度的增加由快变慢,弹头温度的升高速率也由大到小;在第三阶段 0.04~0.1 s 内,据弹丸初速的不同,弹头形变程度的不同,转化为内能部分的闪温占比不同,体现为弹头温度回落程度不同。

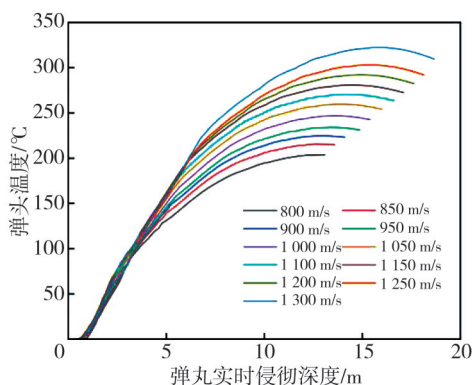


图 12 着靶角度为 90° 时弹头温度与弹丸侵彻深度的变化关系

Fig. 12 The relationship between warhead temperature and projectile penetration depth at the target angle of 90°

将工况 12~22 中弹头温度与 y 轴弹丸实时侵彻深度之间的对应关系生成图 13。由图 13 可以看出,在弹丸侵彻混凝土靶体的第一阶段内,弹轴尚未发生偏移,此时弹丸温度变化幅度的最高点在弹头,弹体侧身温度变化数值较小,与侵彻深度无直接相应关系;在弹丸侵彻混凝土靶体的第二阶段内,弹轴发生轻微偏移,此时弹丸温度变化幅度的最高点在侧弹头处,在弹丸侧身处的点体现为温度数值缓慢上升;在弹丸侵彻混凝土靶体的第三阶段内,弹轴偏移较大,此时温度变

化幅度的最高点在弹丸侧身,温度急速上升。

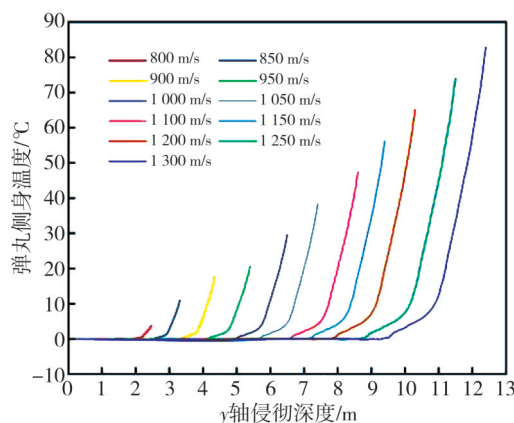


图 13 着靶角度为 80° 时弹丸侧身最高温度与弹丸侵彻深度的变化关系

Fig. 13 The relationship between the maximum temperature on the side of the projectile and the penetration depth of the projectile at the angle of 80°

将工况 23~33 中弹头温度与 y 轴弹丸实时侵彻深度之间的对应关系生成图 14。由图 14 可以看出,非垂直侵彻中弹丸侧身温度变化规律相似,温度最高点均由弹头转移到弹丸侧身,但相比于着靶角度为 80° 的工况,70° 工况中温度升高更快,数值更大。以 1300 m/s 的工况为例,70° 工况最高温度达到 121 °C,比 80° 工况高 36 °C。

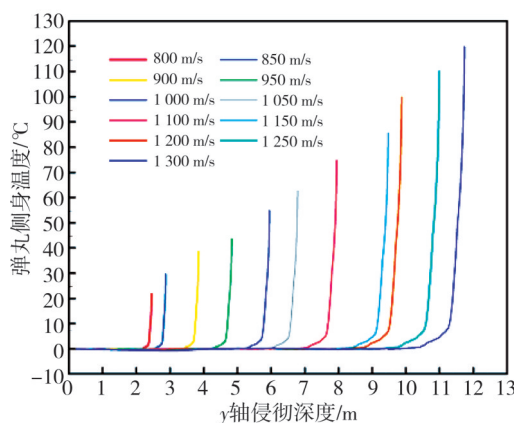


图 14 着靶角度为 70° 时弹丸侧身最高温度与弹丸侵彻深度的变化关系

Fig. 14 The relationship between the maximum temperature on the side of the projectile and the penetration depth of the projectile at the angle of 70°

#### 2.3.2 同速度不同角度的仿真结果分析

以 1300 m/s 速度为例,取不同侵彻角度工况中温度变化最高的三个点的平均值(当弹丸垂直侵彻时,选取弹头;当弹丸非垂直侵彻时,选取弹丸侧身温度最高点)生成图 15。由图 15 可以看出,当弹丸垂直侵彻时,因闪温的影响,弹丸温度

随侵彻深度的增加而剧烈升高,当速度衰减到一定程度时,摩擦生热减小,闪温中转化为内部热量的占比增加,故体现为温度回落;当弹丸非垂直侵彻时,前期弹轴尚未偏转,最高温度在弹头处,故侧身温度体现为趋于常温平稳,后期弹轴发生偏转,且弹轴大幅度偏转的时间与初始侵彻角度有关,体现为弹丸在 $70^\circ$ 侵彻靶体时弹丸弹轴偏转得比 $80^\circ$ 侵彻靶体时快,进而 $70^\circ$ 的弹丸侵彻深度比 $80^\circ$ 的侵彻深度小, $70^\circ$ 侵彻过程中弹丸侧身最高温度比 $80^\circ$ 的高。

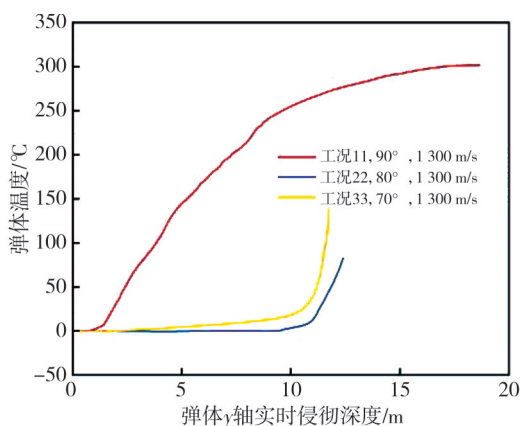


图 15 速度为 1 300 m/s 时不同侵彻角度的温度与侵彻深度关系

Fig. 15 The relationship between temperature and penetration depth at different penetration angles at the velocity of 1 300 m/s

### 3 结论

利用已有的弹丸侵彻半无限混凝土实验数据,改进了弹丸所对应材料与混凝土材料的弹塑性模型参数。多次数值模拟侵彻实验的结果验证了改进后弹塑性模型参数的正确性,提取并分析数值模拟过程中的温度参数,得出结论:

1) 垂直侵彻时,随着侵彻速度的增大,弹头侵蚀加剧,温度变化更显著;

2) 非垂直侵彻时,温度升高极值点由弹头中心转移至弹丸侧身,弹丸着角增大,温度升高加快,侵彻深度减小;

3) 侵彻结束时,弹丸温度与侵彻深度成相关比例,相同侵彻角度工况中比例相同。分析弹丸侵彻过程中的温度场有助于提高侵彻深度预测模型的准确性,研究结果可为侵彻引信测试提供参考。

#### 参考文献:

[1] 赵旭瑞. 弹丸侵彻过程温度场仿真分析[D]. 太原:

中北大学, 2020.

[2] 任保祥, 陶钢. 弹丸侵彻自然土弹道的试验研究与数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 28-33.

REN Baoxiang, TAO Gang. Experimental investigation and numerical simulation of ballistic when projectile penetrating natural soil [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(1): 28-33. (in Chinese)

[3] 张冬梅, 高世桥, 刘海鹏, 等. 基于加速度测试及模糊模型的弹丸侵彻混凝土深度实时预测方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(5): 176-181.

ZHANG Dongmei, GAO Shiqiao, LIU Haipeng, et al. Real-time predicting penetration depth of projectiles into concrete targets based on acceleration measurement and fuzzy model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(5): 176-181. (in Chinese)

[4] 张磊. 侵彻介质过程中瞬态温度测试技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.

[5] 张丁山, 王浩, 冯国增, 等. 钻地弹侵彻混凝土靶过程中弹体温度的变化[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(3): 314-319.

ZHANG Dingshan, WANG Hao, FENG Guozeng, et al. Temperature change of earth penetrators during penetration into concrete target [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(3): 314-319. (in Chinese)

[6] 陆亚兵. 动能钻地弹侵彻钢筋混凝土热效应数值仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

[7] FADLY M S, BAKRI B, ANWAR K, et al. Evaluation of projectile penetration position on perforated plate on ballistic resistance of composite sandwich panels [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1157(1): 1755-1815.

[8] LEE H M, KIM D Y, KIM T H, et al. Lethality evaluation of Japanese tanegashima and korean seungja-chongtong via projectile penetration and mass drop experiments [J]. Experimental Mechanics, 2022, 63(3): 415-427.

[9] YAO Y Z, FANG, Q, KONG X Z. Failure mode and stress wave propagation in concrete target subjected to a projectile penetration followed by charge explosion: Experimental and numerical investigation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 177: 104595.

[10] WANG Y N, WANG Z, LIANG S H, et al. Experimental and numerical study on the failure modes of ship stiffened plate structure under projectile perforation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 178: 104590.

[11] 郭磊, 何勇, 潘绪超, 等. 高速侵彻弹体表层侵蚀效

- 应理论计算[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15): 51-58.
- GUO Lei, HE Yong, PAN Xuchao, et al. Theoretical calculation for surface abrasion effect of projectiles penetrating in to concrete targets with a high speed [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 51-58. (in Chinese)
- [12] ROSENBERG Z, VAYIG Y. The effect of friction on the shanks of rigid projectiles penetrating concrete targets [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 156: 103926.1- 103926.3.
- [13] 赵奇, 齐明思, 丁爱国, 等. 弹丸侵彻装甲钢板温度场数值模拟研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(1): 94-97.
- ZHAO Qi, QI Mingsi, DING Aiguo, et al. Numerical simulation on temperature field of projectile penetrating armor steel plate [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(1): 94-97. (in Chinese)
- [14] 戴明辉. 塑料材料基于ANSYS Workbench有限元静力结构仿真时本构关系选取的研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(S1): 179-182.
- DAI Minghui. Study on the selection of constitutive relation of plastic basing on ANSYS Workbench static structure simulation [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(S1): 179-182. (in Chinese)
- [15] SAVIC B, CABRILO A. Effect of heat input on the ballistic performance of armor steel weldments [J]. Materials (Basel), 2021, 14(13): 3617.
- [16] KRAUS A E, KRAUS E I, SHABALIN I I. Impact resistance of ceramics in a numerical experiment [J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2020, 61(5): 847-854.
- [17] 徐世焯, 吴平, 周飞, 等. 活性粉末混凝土抗多次侵彻实验研究及数值预测[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(6): 68-83.
- XU Shiliang, WU Ping, ZHOU Fei, et al. Experimental investigation and numerical prediction on resistance of reactive powder concrete to multiple penetration [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(6): 68-83. (in Chinese)
- [18] PETRUDI A M, VAHEDI K, KAMYAB M H. Numerical and experimental study of oblique penetration of a blunt projectile into ceramic-aluminum target [J]. Modares Mechanical Engineering, 2019, 19(5): 1253-1263.
- [19] 侯俊超, 王春光, 邓德志, 等. 高速弹丸侵彻混凝土靶板等效厚度研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(2): 9-14.
- HOU Junchao, WANG Chunguang, DENG Dezhi, et al. Study on equivalent thickness of high-speed projectile penetrating into concrete target plate [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(2): 9-14. (in Chinese)
- [20] 何勇, 李干, 郭纬, 等. 高超声速钻地炸弹侵彻深度计算方法[J]. 防护工程, 2023, 45(2): 31-36.
- HE Yong, LI Gan, GUO Wei, et al. Calculation method of penetration depth of hypersonic earth-penetrating bomb [J]. Protective Engineering, 2023, 45(2): 31-36. (in Chinese)
- [21] 刘志林. 卵形头部动能弹高速侵彻钢筋混凝土机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.