

钨珠对铝、钢靶侵彻的数值研究与分析

曹菊珍 周淑荣 于志鲁 傅 樱

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 8009信箱 100088)

摘 要 本文应用 MEPH 程序^[1]数值模拟了击靶速度小于3km/s 的 $\phi 4\text{mm}$ 的钨珠对铝靶、钢靶的侵彻,并对计算所得的结果进行了理论分析,与有关实验比较,对弹丸的形状、靶材厚度对穿深的影响也给出了一部分结果。

关键词 弹丸 侵彻 数值模拟

一、引 言

在常规武器中,经常利用预制或半预制破片去损伤军事目标。这些破片的速度大约在400m/s到2000m/s之间,因此破片在撞击目标时反映的碰撞性能的无量纲参数($\rho v^2/\sigma_0$)处于 10^1 至 10^2 量级^[2],所产生的效应大都处于严重塑性变形状态。很多学者从实验上进行了弹丸对靶体侵彻问题的研究,但是也有少数学者进行了一维或二维理论方面的估计。例如:Goodier^[3]研究了预制刚性球对金属靶的侵彻;Tate^[4,5]等人提出了熟知的变形的Bernoulli方程来估算长杆弹对半无限靶侵彻时速度变化;Rewid和Bodner^[6]发表了一些刚性平头弹丸撞击中厚靶的模型;J. A. Zukas等对球打靶问题作了很多的研究^[7]。这些理论工作虽作了相当大的简化,但对穿甲力学的发展起到了很大的推动作用。目前国际上较先进的理论研究是编制二维弹塑性流体力学程序,从而对各类高速碰撞问题进行数值计算及其理论分析。熟知的HEMP及HELP程序就是这类程序。它们分别是2DL和2DE类型程序。国内的MEPH程序就是2DE类型程序。该程序考虑了介质的可压缩性、粘性、弹塑性、熔化、断裂等效应。本文作者使用MEPH程序开展了质量为0.61g的钨珠对铝靶及钢靶侵彻研究。在下面一节里,作者将给出0.61g钨珠侵彻铝靶、钢靶时各种物理量的变化,其中包括穿深随击靶速度变化曲线、开坑大小的规律、侵彻速度随时间的变化、不同厚度靶体对侵彻深度的影响等等。所得的这些数值计算结果在定性上与实验得到的结果一致,只是定量上有差异,但有些结果定量上与有关的实验也是相符的。至于差异的存在,不少是由于实验材料与理论计算材料的物理参数不同造成的。当然也和计算条件(空间步长、时间步长、粘性系数、编制程序方法等)有关,这一点,待模型计算足够多,取得一定经验后是完全可以克服的。

二、钨珠对靶板侵彻的数值模拟

本节将对0.6g的钨珠对铝靶、钢靶的侵彻;不同形状的弹丸对不同厚度的靶材侵彻的问题进行了数值模拟。所得的计算结果如下叙述。

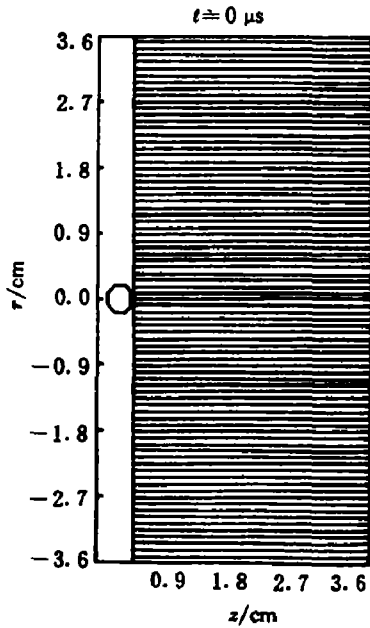


图1 $\phi 4\text{mm}$ 钨球侵彻铝靶时初始位置
 Fig. 1 Initial position for W ball with diameter 4mm penetrating Al target

1. 我们使用了 MEPH 程序数值计算了质量为 0.61g, $\phi 4\text{mm}$ 的钨球对铝靶及钢靶的侵彻。图 1 给出了初始时刻的位置。表 1 给出了随着击靶速度不同所得不同的穿深值。图 2、图 3 分别给出了 0.61g 钨球分别侵彻铝靶、钢靶时,穿深随时间变化曲线。图 4 给出了击靶速度为 1km/s 时,侵彻过程中钨球速度随着穿深而衰减曲线。这个衰减曲线要从实验获得是相当困难的,而通过数值模拟来获得较为容易。

文献[8]中给出了射流侵彻钢靶时侵彻速度随穿深变化曲线,并与实验值符合得很好。图 5 是 0.61g 钨球侵彻铝靶和钢靶时,开坑的最大直径随击靶速度变化的曲线。可见,击靶速度小于 1.2km/s 时,开坑最大直径基本是相同的。图 6 是无量纲穿深与无量纲击靶速度的关系图。击靶速度被 2.5km/s 除,穿深被钨球直径 0.4cm 除。

2. 靶材的厚度不同对穿深的影响

靶材的厚度不同,弹丸击靶时速度即便一样,穿深也是不一样的。弹丸穿薄靶与穿厚

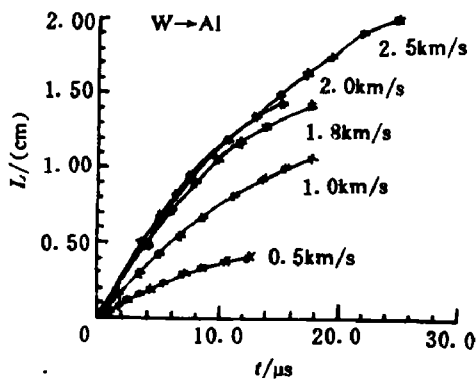


图2 $\phi 4\text{mm}$ 钨球侵彻铝靶穿深随时间变化曲线
 Fig. 2 Penetration depth versus time for $\phi 4\text{mm}$ W ball penetrating Al target

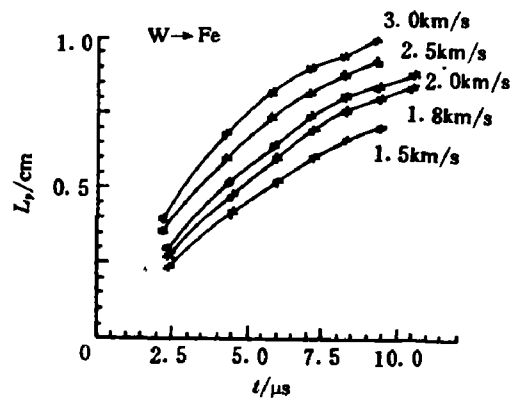


图3 $\phi 4\text{mm}$ 钨球侵彻钢靶穿深随时间变化曲线
 Fig. 3 Penetration depth versus time for $\phi 4\text{mm}$ W ball penetrating Fe target

靶时不仅穿深不同,物理图象也有很大的差别。穿薄靶时,靶的背后将会出现靶材的层裂及碎片飞溅等现象。有关这方面工作,作者将有专门文章论述。在此仅列出厚靶及薄靶的

计算结果来进行比较。

表2给出了细长比为1的0.41g钢柱,着靶速度为1km/s时,不同厚度的靶材其穿深有明显的差别。厚度为1.6cm时穿深比厚度为3.5cm的穿深大40%左右。表3列出了直

表1 0.6g钨珠穿深随击靶速度变化的结果

Table 1 Penetration depth for 0.6g W ball with different impact velocities

击靶速度/ (km/s)	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.0	2.5	3.0
铝靶穿深/cm	0.42	0.92	1.1	1.32	1.92	1.42	1.44	—	—
钢靶穿深/cm	0.22	0.36	0.48	0.58	0.70	0.84	0.84	0.88	0.94

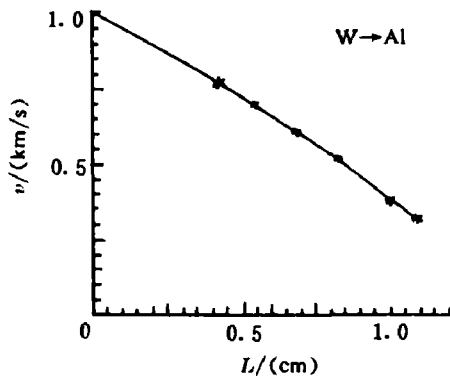


图4 钨珠速度随侵彻深度而衰减曲线
Fig. 4 The velocity curve of W ball with increasing penetration depth

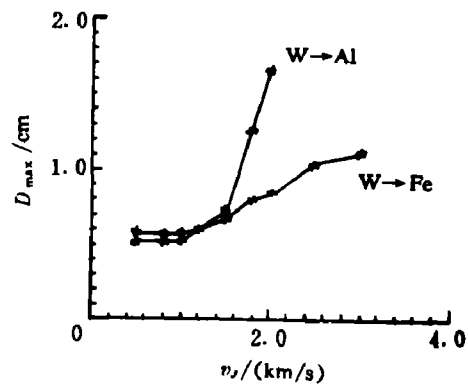


图5 $\phi 4\text{mm}$ 钨珠侵彻铝靶和钢靶时开坑最大直径随击靶速度变化曲线
Fig. 5 The relations of maximum crater diameter and impact velocities for $\phi 4\text{mm}$ W ball penetrating Al and Fe targets respectively

表2 细长比为1的钨柱侵彻铝靶结果

Table 2 Results of Al target penetrated by 0.41g W cylinder with $L/D=1$

铝靶厚度/ (cm)	1.0	1.2	1.6	3.5
穿深/(cm)	穿透	穿透	1.4	1.04
初始击靶速度/(km/s)	1.0	1.0	1.0	1.0

表3 直径为1.74cm长为0.32cm的钢柱侵彻钢靶结果

Table 3 Results of Fe target penetrated by Fe cylinder with diameter 1.74cm and length 0.32cm

钢靶厚度/ (cm)	0.84	1.0	半无限厚
穿深/(cm)	穿透	穿透	0.64
初始击靶速度/(km/s)	1.756	1.756	1.756

表4 碰靶面积不同对穿深的影响

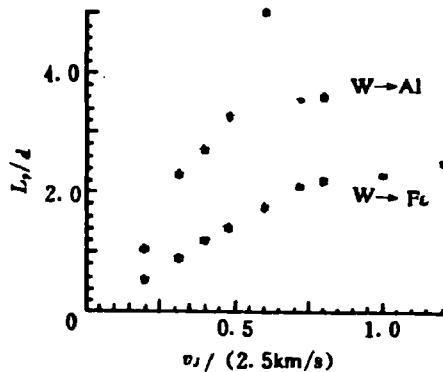
Table 4 Results of penetration depth for different impact area

钢弹丸质量 (g)	弹丸细长比 $\phi/L(L=0.32\text{cm})$	击靶速度/ (km/s)	穿深/ (cm)
1.973	1.0/0.32	1.553	0.52
3.034	1.24/0.32	1.58	0.72
3.978	1.42/0.32	1.603	0.76
5.051	1.6/0.32	1.68	0.84
5.973	1.74/0.32	1.756	0.64

表5 相同质量弹丸形状不同对穿深的影响

Table 5 Relations of penetration depth and projectiles with same mass and different shape

弹丸特征	尺寸 $\phi/(\text{cm})L/(\text{cm})$		着靶速度/ (km/s)	靶材	穿深/ (cm)
钨珠(0.6g)	0.4	—	0.5	Al	0.42
钨柱(0.6g)	0.34	0.34	0.5	Al	0.40
钢柱(2g)	1.0	0.32	1.55	Fe	0.52
钢柱(2g)	0.4	2.0	1.70	Fe	1.52

图6 侵彻深度随击靶速度
变化曲线(无量纲)Fig. 6 The curve of impact velocity with
penetration depth(non-dimension)

的。但不一定动能越大,穿深也越大。当击靶速度在 $[2\sim 3\text{km/s}]$ 之间,存在一个最佳击靶速度值。在最佳击靶速度时,侵彻深度达最大。我们从图6可见,0.61g钨珠侵彻铝靶时,着靶速度为 1.5km/s 时,其穿深最大。当然这里指的击靶速度是小于 2km/s 的情况。类似地,0.6g钨珠侵彻钢靶时,击靶速度在 $[0.5\text{km/s}, 3\text{km/s}]$ 时,穿深曲线出现平台。从图6可

径为 1.74cm ,长为 0.32cm 的扁平钢柱,击靶速度为 1.75km/s 时的情况。当钢靶厚度是无限厚时,穿深为 0.64cm ,而穿薄靶时,却能穿透 1cm 厚的薄靶。

3. 弹丸形状对穿深的影响

表4给出了等厚度的钢柱,由于碰靶面积不同对穿深的影响。虽然着靶速度不完全相同,但差别不大。这点差别不至于造成穿深很大差别。表5给出了质量相同的弹丸,其形状不同对穿深的影响。

三、结果分析

弹丸侵彻靶体时,其穿深与弹丸的动能、尺寸大小、形状、靶体材料特性及靶厚等因素都有关系。弹丸动能大对穿深基本上是有利的。

见, 当击靶速度从 1.8km/s 增加到 2.5km/s 时其穿深基本上不变。“极值”与“平台”出现的主要原因有二个方面。首先从开坑耗能来看, 从图 5 可见, 对铝靶情况, 当击靶速度小于 1.5km/s 时, 开坑的最大直径基本上不变, 而大于 1.5km/s 时, 坑径明显变大, 而且随着碰靶速度增大而增大。击靶速度为 2.0km/s 时消耗在开坑上的能量比击靶速度 1.2km/s 时大好几倍。击靶速度从 1.2km/s 增加至 1.5km/s, 开坑虽然大了点, 但增加不多, 绝大部分增加的能量还是消耗在穿深上。这就造成了穿深在 1.5km/s 时达极值的理由之一。对于钢靶情况, 从图 5 看出, 碰靶速度小于 1.2km/s 时坑径基本不变, 而大于 1.2km/s 时, 坑径

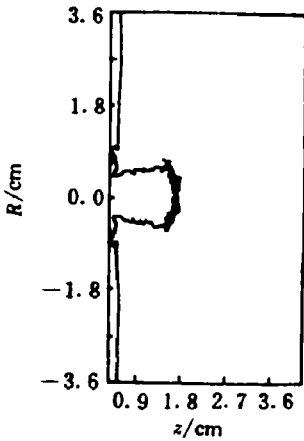
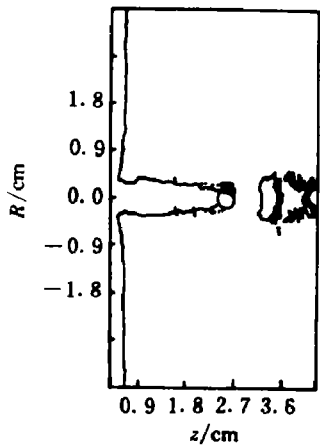
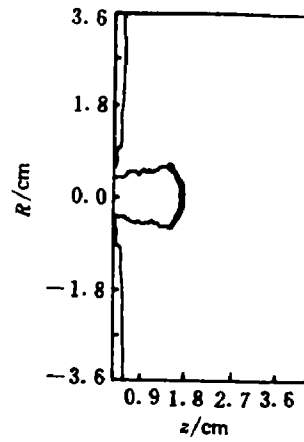
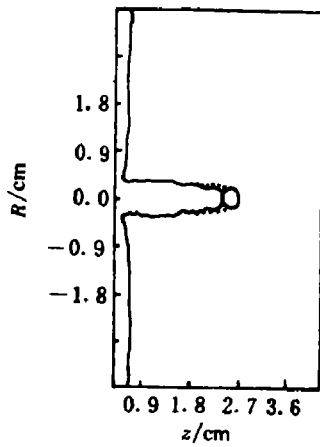


图 7(a) 击靶速度为 1.5km/s 钨珠侵彻铝靶时穿深达最大值时等密度, 等压力线
 Fig. 7(a) Isostatics and isostath when maximum penetration depth reached for W ball with 1.5km/s velocity penetrating Al target

图 7(b) 击靶速度为 1.8km/s 钨珠侵彻铝靶穿深达最大值的 90% 时等密度, 等压力线
 Fig. 7(b) Isostatics and isostath when 90% maximum penetration depth reached for W ball with 1.8km/s velocity penetrating Al target

随击靶速度增加而单调增加。而击靶速度为 2.0km/s 时,开坑最大直径为击靶速度 1.2km/s 时的 1.7 倍,不像碰铝靶时那么大。当碰靶速度在[2km/s,3km/s]区间里,随着钨珠动能增加,消耗在开坑上能量也增加,二者基本上相抵销,这样就造成穿深基本不变,出现了“平台”。

“极值”与“平台”出现的原因之二是由于钨珠本身变形而造成。图 7 给出了 0.61g 钨球碰铝靶时,达到最大穿深时弹丸形状。可见,碰靶速度为 1.5km/s 时,钨珠基本上保持球状。而速度为 1.8km/s 穿深还没达最大值时,钨珠基本上变成扁平状。这说明 1.8km/s 时,弹丸明显产生严重的塑性变形,甚至碎裂。变形、破碎都得消耗能量,从而影响穿深。这就

造成了击靶速度 1.8km/s 时穿深反而比击靶速度为 1.5km/s 时穿深小的原因。

总之,穿深随击靶速度变化出现“极值”或“平台”的主要原因是由于开坑特性及弹丸本身变形和破裂等因素造成。

图 8 给出了 $\phi 6\text{mm}$ 和 $\phi 10\text{mm}$ 的钢球侵彻铝靶时穿深随击靶速度的实验曲线^[9]。可见,击靶速度为 1.6km/s 时,穿深为最大。作者从实验上发现,在相当大的一个撞击速度范围内,球体保持球形状。随着速度增加到 1.5km/s 后,球体发生破裂,且速度愈大,碎裂愈厉害。由此可见,我们的数值模拟的结果与文献[6]实验结果基本符合,但数值模

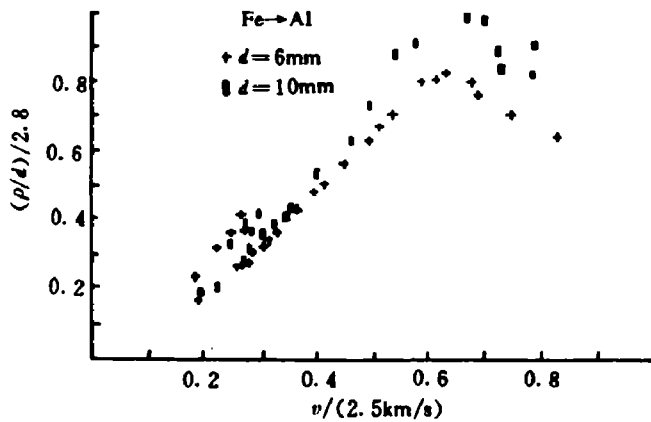


图 8 $\phi 6\text{mm}$ 和 $\phi 10\text{mm}$ 钢珠侵彻铝靶时穿深随击靶速度变化曲线

Fig. 8 Penetration depth versus impact velocity for $\phi 6\text{mm}$ and $\phi 10\text{mm}$ steelball penetrating Al target

拟中,弹丸变形很明显,碎裂却不太明显。

从表 2、3 可见,靶体厚度不同,穿深也不同。弹丸在穿半无限厚靶时的穿深最小。因此,实验和数值模拟中必须注意靶厚的选择。厚度达到一定值时,穿深值才能与半无限厚靶时情况一致。

从表 4、5 可见,弹丸的质量及形状对穿深影响很大,但形状因素更为重要。不同的细长比,不同头部形状对穿深都有影响,前者影响更大些,后者在斜侵彻时显出其重要影响。从表 4 可见,等厚度的钢柱,质量成倍增加后,由于碰靶面积也相应增大,因此穿深增加不多。而同样是 2g 钢柱,由于细长比不一样,穿深却相差很多。

四、讨 论

1. 我们使用 MEPH 程序数值模拟了钨珠对铝靶、钢靶侵彻时,使用的参数(密度、屈服强度、熔化能、杨氏模量等)均为理论值,因此与实验中所使用的真实材料有差别,因此所得结果与实验值在定量上不完全相同。但定性上是一致的。

2. 钨材料是脆性材料,但程序中并没有反映脆性的有关参数,这也是数值和实验差别的原因之一。

3. 程序中虽考虑了材料的断裂、熔化等效应,但判别的准则可以不同^[1]。在侵彻过程中,弹丸、靶体产生的断裂往往是剪切断裂,而我们计算中只给出了断裂现象,并不能反映出断裂机制。至于熔化条件,只给出能量的判别式,而目前很多学者是用温度、Kennedy 熔化常数表达式来表示^[10],因此程序本身也有待完善。

4. 靶体的直径大小对结果也是有影响的,文中给出的结果均在靶径为弹径 10 倍左右作的。总之,我们的工作虽取得了一些定性认识,工作中还存在很多不足,有待进一步改进。

作者向耿沪男、李桂霞、刘敏等同志对我们的工作给予大力帮助谨表深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] 于志鲁,李维新.多种介质弹塑性流体力学数值方法 MEPH. 全国第二届计算物理年会. 1987
- [2] Johnson W. Impact strength of Materials. Edward Arnold Limited, 1981
- [3] Goodier J W. Proc of the 7th Symp on Hypervelocity Impact II 1965;215
- [4] Tate A. J Mech phys Solids, 1967,15;387
- [5] Tate A. J Mech Phys solids, 1969,17;141
- [6] Ravid M, Bodner S R. Int J Engng-sci, 1983,21;577
- [7] Jonas A Zukas Impact Dynamics New York, John Wiley Sons Press, 1982
- [8] 曹菊珍,范中波.第四届爆炸力学会议论文集. EM-4-505, 1990
- [9] 张远法.高速球体对半无限固体介质的侵彻作用研究.[博士学位].南京,华东工学院,1991
- [10] Mader C L. 爆轰的数值模拟.北京九所,198

NUMERICAL STUDY AND ANALYSIS OF THE ALUMINIUM OR STEEL TARGET PENETRATED BY WOLFRAM BALL

Cao Juzheng Zhou Shurong Yu Zhilu Fe Ying

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

ABSTRACT This paper is concerned with the evolution of the aluminium or steel target which is penetrated by a wolfram ball, in which the ball's velocity is less than 3km/sec and its diameter 4mm. The significant results are obtained by means of the numerical modelling using MEPH code, and compared with the experiments also. The numerical and analytical studies indicate that the depth of penetration is in close relationship with the shape of pellets material and thickness of the target.

KEY WORDS projectile, penetration, numerical simulation