

超高速武器对地打击效应数值仿真

邓国强, 杨秀敏

总参工程兵科研四所, 北京 100850

摘要 以流体弹塑性模型为基础, 采用 SPH 无网格方法, 对超高速武器打击花岗岩靶体进行数值仿真分析。结果表明: 随着靶速度提高, 将依次呈现固体侵彻、半流体侵彻、流体侵彻 3 种现象; 出现流体侵彻后, 直接侵彻深度大幅减小并趋向固定值, 总弹坑深度增幅缓慢, 弹体前端形成静高压区, 并伴随以塑性冲击波为主的动应力区; 亚音速流体侵彻应力波形为双波结构, 而超音速流体侵彻应力波形与空气冲击波类似为强冲击波, 但衰减指数 > 2.5 , 且着靶速度越高, 衰减越快。

关键词 侵彻; 超高速武器; 岩石类靶体; 武器效应; 数值仿真

中图分类号 O313.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.16.010

Numerical simulation of damage effect of hyper velocity weapon on ground target

DENG Guoqiang, YANG Xiumin

The Forth Engineer Research Institute of the Headquarters of General Staff, Beijing 100850, China

Abstract The material is described by a fluid-elasto-plastic theory model, and the impact effects of HVIW are analyzed by SPH meshless method. The numerical simulation results are as follows. With impact velocity increasing, solid penetration, semi fluid penetration and fluid penetration are successively present. In the fluid penetration step, the direct penetration depth will substantially decrease and trend to constant, and the total crater depth will increase very little. Around the projectile front face a static high pressure field will form, accompanied by a dynamic stress wave filed mainly by plastic shock wave. A double wave shape will appear in subsonic fluid penetration, but a strong shock wave, similar to air blast, will appear in hypersonic fluid penetration. However, it attenuates rapidly, with an attenuation index up to 2.5, and the higher impact velocity, the larger attenuation index.

Keywords penetration; hyper velocity weapon; rock; weapon effect; numerical simulation

超高速武器是当今军事强国致力发展的下一代武器系统, 具有飞行速度快、作战空间大、突防能力强、难以防御等显著优点; 利用自身携带的巨大动能, 就可摧毁地下坚固目标, 能量利用率高而附带破坏作用小, 特别适宜快速攻击敏感地区的重要目标, 与传统弹药相比拥有先天优势。美、俄等军事强国在航天、航空、导弹等方面实施了多项超高速武器研制计划, 并已取得不少技术成果^[1], 如美军提出了以超高速武器实现“快速全球打击”, 推出了高超高速武器为“敲门砖”的发展战略, 先后试制了 X-43、X-51A、X-37B 等多种超高速飞行器。

因超高速武器尚在研制中, 没有实战数据可供参考, 其

对地打击的破坏机理尚缺乏清晰认识, 其作用难以评估, 既有认为可媲美核武器, 也有认为只是传统钻地武器的延续, 不足为虑。当前可供借鉴的是超高速碰撞^[2-4], 但这些研究多集中在空间防护或超高速穿甲方面, 而超高速武器对地打击对象多为半无限的岩石类靶体, 与空间防护的薄金属靶差异较大。沈俊等^[5]通过高速侵彻试验发现, 随靶速度的增加, 侵彻机制逐渐由非变形体侵彻向半流体动力学侵彻转变, 随着速度进一步提升, 弹体的力学行为可按流体处理; 林俊德^[6]也在侵彻试验中发现, 紫铜弹体以 781 m/s 的速度入侵花岗岩靶, 出现了“流体侵彻”现象, 并指出超高速撞击同高速撞击的区分主要是撞击体和靶体表现为流体特性; Antoun 等^[7]采

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-06-18

基金项目: 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室开放课题(DPMEIKF201304)

作者简介: 邓国强, 高级工程师, 研究方向为武器破坏效应与工程防护, 电子信箱: hnjia@sina.com

引用格式: 邓国强, 杨秀敏. 超高速武器对地打击效应数值仿真[J]. 科技导报, 2015, 33(16): 65-71.

用数值仿真方法模拟了超高速侵彻石灰岩的情况。

当前超高速武器对地打击效应的研究成果,尚不能准确判断出超高速武器的对地打击效果,只能大致推测出其打击特点呈“流体侵彻”;也不能简单套用空腔膨胀等固体侵彻理论^[9]或A-T等流体模型^[10-12]来分析;开展类比试验仅可获得超高速打击现象,而不能作为定量分析依据^[13],开展现场试验条件苛刻且难获得详细信息^[14];数值仿真已成为解决高压、高温、高能等强非线性动力学问题的有力工具^[15],但超高速对地打击效应也存在材料模型复杂、参数准确获得不易以及因物质大变形、破碎而导致拉氏网格畸变或欧氏材料边界不清等特有难题。本文应用不需背景网格的SPH方法,针对有大畸变处理能力而无界面不清的问题^[16],采用经历过核爆炸效应考证的流体弹塑性模型和相关参数^[17],模拟超高速武器对地打击效应。

1 超高速打击下材料性能描述

超高速打击时弹体与靶体均有可能进入流体状态,而寻找能同时描述固态、液态和气态下的物态方程及其材料参数将是研究难点。纵观现有物态方程^[18],大部分注重单质材料描述,特别是金属类材料描述,而少有岩石类材料在超高压、高温下的描述。超高速对地打击时介质中压力区间与核爆炸类似,因而在没有更详细的数据前,借用地下核爆炸^[17]材料数据。对地打击主要破坏因素是地冲击效应,忽略电磁辐射等次要影响。

岩石变形分解为剪切变形和体积变形两部分,分别采用Drucker-Prager方程和Tillotson方程来描述。剪切变形的屈服面方程为

$$J_2 = \max(f(p), Y_{\max}) \quad (1)$$

式中, J_2 为偏应力的第2不变量, Y_{\max} 为最大屈服应力, $f(p)$ 为压力 p 的分段线性函数。

岩石体积变形采用Tillotson状态方程,在中低压固体阶段与Hugoniot资料相匹配;在低密度和高内能的条件下,与理想气体方程类似;而在高能密度、高度压实时由Thomas-Termin-Dirac理论确定,这样就能描述物质三态。

当处于压缩区域 ($\eta \geq 1$) 或能量密度小于初始汽化能 E_v 时:

$$P = P_s(E, \rho) = \left(a + \frac{b}{1 + E/E_0\eta^2} \right) \rho E + A\mu + B\mu^2 \quad (2)$$

式中, $\eta = \rho/\rho_0$, $\mu = \eta - 1$, a, b, A, B, E_0 为方程参数。在高压高温时,式(2)趋近于理想气体方程形式 ($a\rho E$)。

当内能超过完全汽化能 E_v 处于膨胀状态 ($\eta < 1$) 时:

$$P = P_c(E, \rho) = (\gamma - 1)\rho E + \left\{ \frac{b\rho E}{1 + E/(E_0\eta^2)} + A\mu e^{-\alpha\left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1\right)} \right\} e^{-\beta\left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1\right)^2} \quad (3)$$

式中, α, β 为控制方程收敛到理想气体的参数。

为实现两个区域间的平稳过渡,对于部分汽化区域

($\eta < 1, E_{iv} < E < E_{cv}$) 采用插值形式:

$$P = \frac{(E - E_{iv}) \cdot P_c + (E_{cv} - E) \cdot P_s}{E_{cv} - E_{iv}} \quad (4)$$

弹体为钢,采用Steinberg-Guinan强度模型和Mie-Gruneisen状态方程描述。

2 超高速武器打击基本现象

超高速武器的具体参数现在尚不明晰,本研究仅进行数值仿真的初步探索,将弹头简化为钢质圆柱体,取长度2 m,半径0.25 m,分别以850、1700、3400、5100和6800 m/s 5种速度垂直侵入半无限花岗岩靶体。因弹体强度远高于岩石靶体,故侵彻阶段划分主要依据弹体的破坏情况,随着靶速度的提高,将依次呈现固体侵彻、半流体侵彻、流体侵彻3种现象,其中流体侵彻阶段又可根据地冲击应力波特征细分为亚音速流体侵彻和超音速流体侵彻两种。

2.1 固体侵彻

当着靶速度较低(如850 m/s)时,材料强度效应占主导地位。弹体在侵彻过程中除头部被轻微摩擦外,总体保持完整状态,没有明显的侵蚀效应,侵彻孔径与弹径相当,靶体中高压区仅分布在弹体前端附近,该阶段称为“固体侵彻”,是传统钻地武器侵彻效应的重点研究对象。撞击结束后,弹体保持基本完好,靶体表面层裂形成弹坑,有完整的侵彻孔洞(图1(a))。

2.2 半流体侵彻

着靶速度提高(如1700 m/s),在侵彻前期,接触面附近作用力远高于材料强度,状态方程控制作用加大,弹体前端被逐渐侵蚀,形成小颗粒遗留于孔洞壁上;在侵彻后期,随着深度增加,弹体侵彻速度减小,接触面作用力亦随之减小,强度效应渐显,最终将不再形成侵蚀,侵彻结束后弹体后段仍有部分残存。该阶段前期材料呈拟流体特性而后期呈固体特性,故称之为“半流体侵彻”,是由固体侵彻到流体侵彻的过渡阶段。靶体表面层裂破坏区域和侵彻孔洞均大于固体侵彻阶段(图1(b))。弹靶接触面附近产生幅值更高、范围更广的静高压区,并伴随有明显向下传播的应力波,侵彻结束时静高压区逐渐消退。

2.3 亚音速流体侵彻

着靶速度提高到一定程度(如3400 m/s),但小于靶体材料音速(如5000 m/s),接触面附近作用力远远高于材料强度,状态方程起主导作用,材料可看作流体。侵彻过程中,弹体边破碎边前进,破碎颗粒附着于弹坑壁,侵彻结束后弹体被完全侵蚀,没有大块残留物,弹坑直径进一步扩大,靶体表面破碎更加严重,但深度增加并不明显(图1(c))。此时靶体可明显分为静高压区和动态应力波区两部分(图2(a)),其应力波波呈典型双波结构,由弹性前驱波和塑性冲击波两部分组成(图2(b)),其中冲击波衰减很快,迅速蜕变为普通应力波,因着靶速度接近但小于靶体音速,该阶段称为“亚音速流体侵彻”。

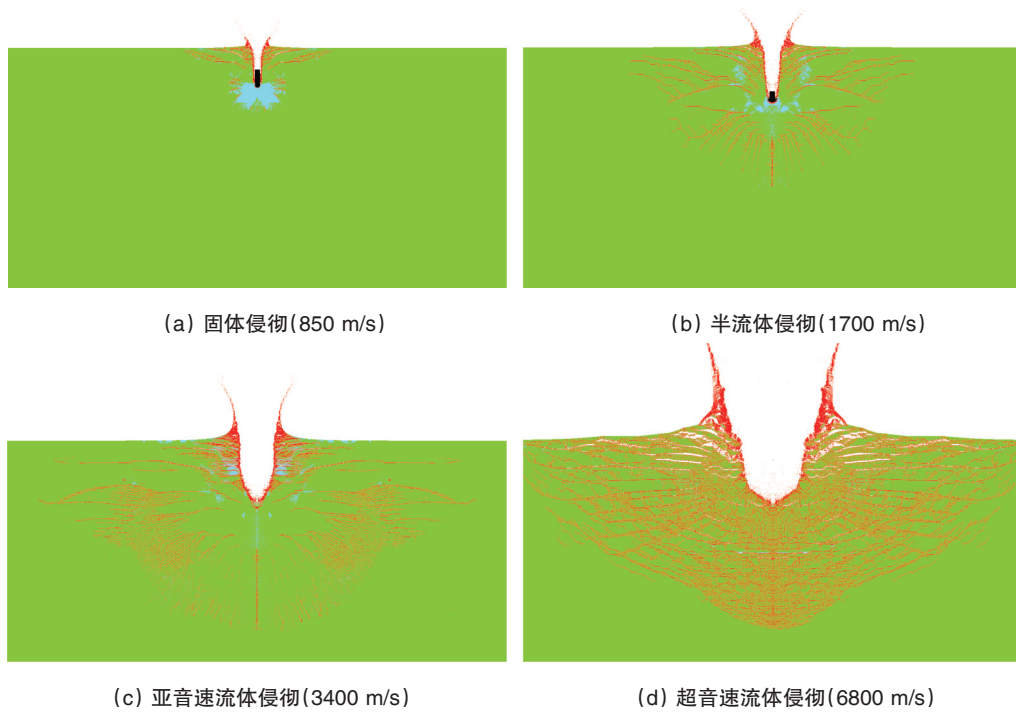


图1 不同侵彻阶段破坏现象

Fig. 1 Damage scene of different penetration step

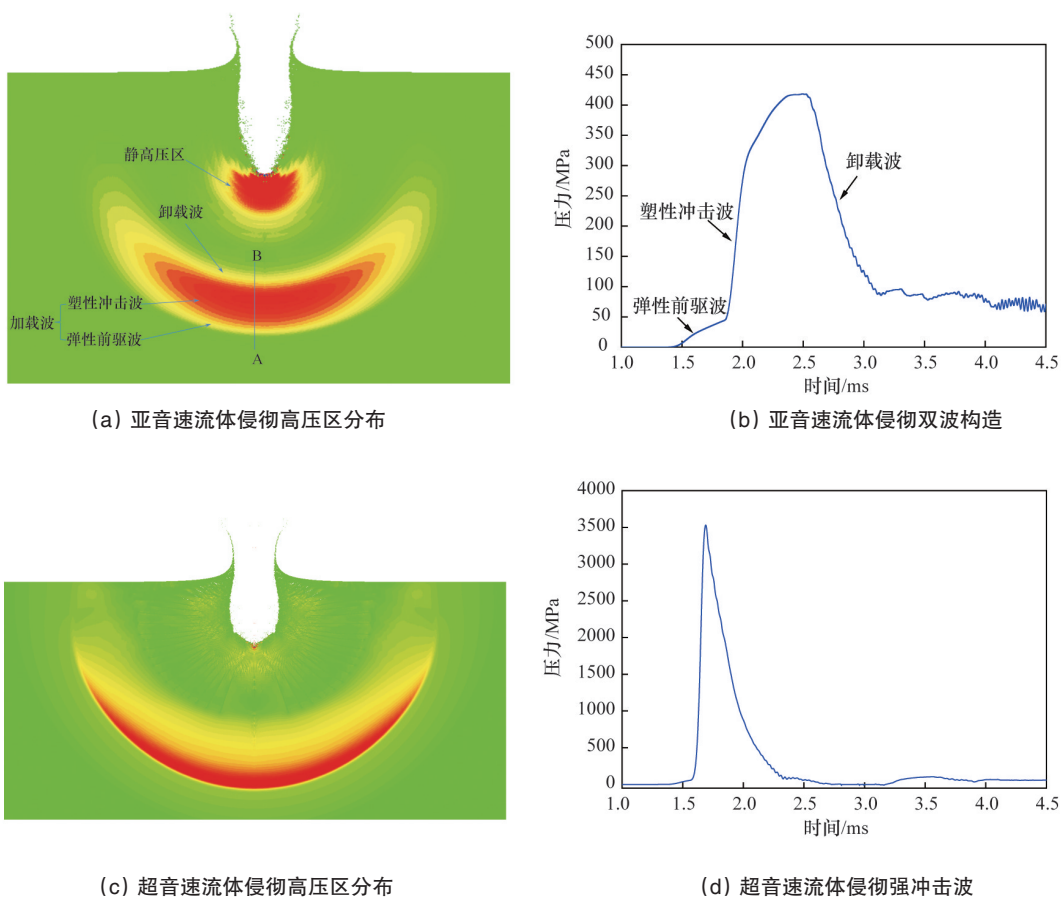


图2 流体侵彻典型高压区分布及冲击波波形

Fig. 2 Classic high pressure field and shock wave shape of fluid penetration

2.4 超音速流体侵入

当着靶速度超过靶体音速(如 5000 m/s)以上时,靶体表层破坏更严重,侵入深度增幅缓慢(图 1(d)),此时为“超音速流体侵入”。弹靶界面高速移动驱动高压区向下发展,使静高压区与动态应力波区合一,在稳定侵入结束时,弹体完全破碎,驱动界面消失,已形成的强烈的塑性冲击波脱离高压区,继续向靶体深处传播(图 2(c)),此时塑性冲击波波形与空中爆炸冲击波类似,升压极快、峰值极高、作用短(图 2(d)),因此又可称为“类爆炸流体侵入”。

以上 4 个阶段的描述是基于本研究的特定算例,而具体区分将与着靶速度、弹体几何参数、弹靶材料密度、强度等物理力学性能密切相关,取决于弹靶相互作用,因而是一相对问题,对岩石材料尤其复杂^[9],需要进一步研究。









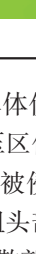
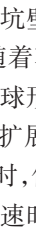



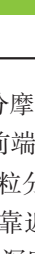
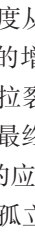
3 数值仿真结果分析

3.1 破坏现象对比

将不同着靶速度下弹、靶破坏情况以及典型的高压区分布列于表 1。

表 1 撞击结果对比

Table 1 Comparison of impact results

侵入形态	固体侵入	半流体侵入	流体侵入		
	着靶速度	着靶速度	着靶速度	着靶速度	着靶速度
	850 m/s	1700 m/s	3400 m/s	5100 m/s	6800 m/s
弹体情况					
靶体情况 (坑深)	 (4.25 m)	 (5.38 m)	 (6.33 m)	 (6.22 m)	 (6.65 m)
典型高压区 分布					

由表 1 可知:固体侵入时,弹体仅前端被部分侵蚀,总体完整;弹孔直径与弹径相当;高压区仅分布于弹体前端,范围较小。半流体侵入时,弹体大部分被侵蚀,碎粒颗粒分布范围较窄;弹孔直径大于弹径,与敦粗头部直径相当,靠近地表面部分因向上飞散而形成弹坑,飞散部分深度约总深度的 1/3;高压区也仅分布于弹体前端,但范围更大。流体侵入时,弹体完全破碎,碎粒颗粒分布于弹坑壁上,分布密度从弹坑上部到下部逐渐增大;弹坑深度随着靶速度提高的增幅不明显,底部形状逐渐由漏斗状向半球形过渡,上部拉裂深度逐渐加深,着靶速度到 6800 m/s 已扩展到底部,其最终破坏形状接近碟形;在形成高压区的同时,伴随有强烈的应力波,其中亚音速时成双波结构,而超音速时是孤立波,孤立波形与空气冲击波极为类似。

3.2 弹坑深度变化规律

超高速对地打击弹坑深度主要由两部分组成(图 3),第一部分是由弹体直接侵入形成,从弹靶接触(图 4(a))开始到弹体运动停止或完全破碎为止(图 4(b)),在固体侵入阶段,与总侵入一致,进入半流体侵入后逐渐减小,进入流体侵入后基本保持为固定常数(图 3 线①);第二部分则是靶体因吸收从弹体中传递而来的动能,在弹体运动停止或破碎后因惯性继续运动而使弹坑深度增加(图 4(c)),在固体侵入阶段该部分可以忽略,进入半流体侵入后才逐渐增大,进入流体侵入后逐渐增大,但增幅缓慢(图 3 线②)。总的弹坑深度在进入半流体后增幅非常缓慢(图 3 线③),着靶速度由 1700 m/s 增至 6800 m/s,坑深仅增加了 1.27 m,增幅 23.61%,其中进入流体侵入阶段后尤其缓慢,着靶速度由 3400 m/s 增至 6800 m/s,

坑深仅增加了0.32 m,增幅仅5%。

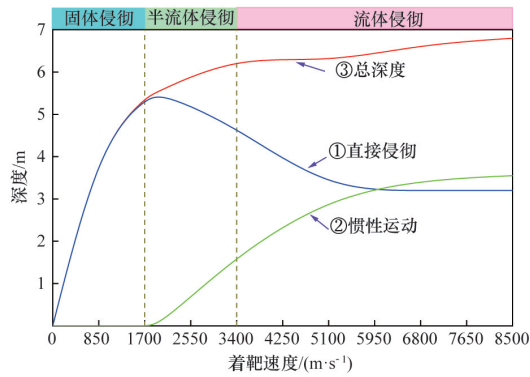


图3 弹坑深度随着靶速度变化规律

Fig. 3 Relationship between crater depth and impact velocity



(a) 开始接触 (b) 弹体完全破碎 (c) 最终弹坑

图4 着地速度 6800 m/s 时弹坑变化过程

Fig. 4 Crater shaping process of a 6800 m/s impact

3.3 靶体中压力波传播规律

在撞击点正下方布置测点, P3号测点距地表6 m, 其余P4~P10号测点依次递增2 m。

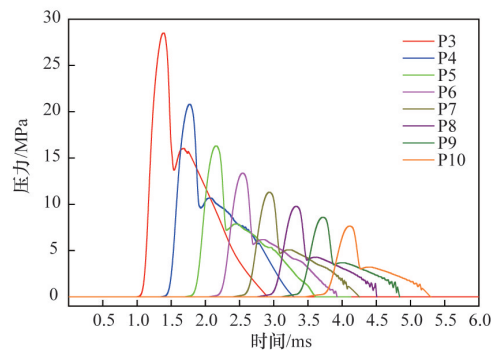
进入半流体侵彻前, 所有测点均为弹性波, 最大压力不到30 MPa, 其波形先快速上升, 达到峰值先下降, 然后稳定一段时间, 再缓慢下降, 此时应力波峰值衰减较慢, 衰减指数仅为1.08(表2), 作用时间较长, 大于3 ms(图5(a))。

表2 应力峰值表

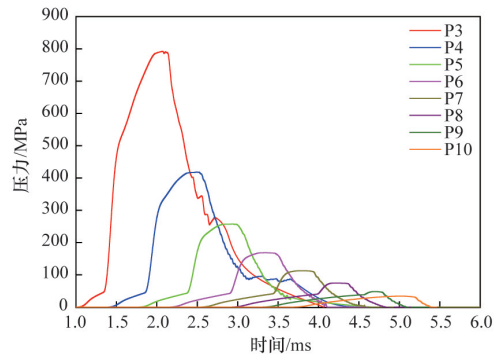
Table 2 Peak value of stress wave

测点编号	距地表距离 h/m	压力峰值/MPa			
		850 m/s	3400 m/s	5100 m/s	6800 m/s
P3	6	28.62	795.23	3350.57	7901.97
P4	8	20.88	419.35	1976.71	3567.49
P5	10	16.41	259.21	1221.90	1904.82
P6	12	13.42	169.41	743.37	1145.56
P7	14	11.43	114.24	486.07	749.60
P8	16	9.90	78.32	319.92	524.70
P9	18	8.71	49.25	222.12	388.23
P10	20	7.76	36.84	148.06	290.20
*系数 a/MPa		1.98E02	8.36E04	4.23E05	1.07E06
*衰减指数 b		1.08	2.54	2.60	2.75

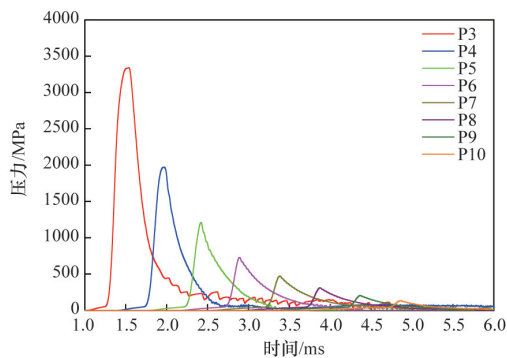
注: *应力波峰值指数衰减方程为 $P = a \cdot h^{-b}$ 。



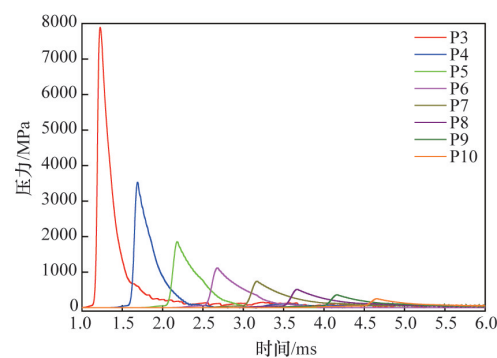
(a) 1700 m/s



(b) 3400 m/s



(c) 5100 m/s



(d) 6800 m/s

图5 不同撞击速度的应力波形

Fig. 5 Stress waves of different impact velocities

进入亚音速流体侵彻时(3400 m/s),呈典型的双波结构,弹性波先驱波先到达,然后是塑性冲击波,最大压力近800 MPa,塑性波持续一段时间(1.6 ms左右)后缓慢下降,塑性波随距离的增大峰值迅速降低,衰减指数已达2.54(表2),到达P10测点(距地表20 m)时已经衰减为纯弹性波(图5(b));进入超音速流体侵彻时(5100~6800 m/s),塑性冲击波占绝对主体,为典型冲击波形,且随着靶速度的提高,冲击波峰值增大,衰减指数也随之增大(表2),而作用时间则明显减小(图5(c)、(d))。

由此判断,对于超高速打击,应力波的衰减可分为两个部分:第一个部分是塑性冲击波作用区,该部分靠近撞击点,岩石变形较大,破坏严重,衰减指数均在2.5以上(表2),并且撞击速度越高,系数越大;第二部分是弹性波作用区,相对远离撞击接触面,衰减指数较小。

4 弹体形状影响

对于同样质量而不同形状的弹体,在相同着靶速度下,

靶体破坏景象基本相同(图1(d)、图6),在侵彻深度与应力波形方面则有差异(图7(a)、(b)),其中长径比影响较大而弹体头部形状影响很小。长径比较大的弹体,则冲击作用区域更集中,作用时间更长,弹坑更深,正下方冲击波应力更大,而侧下方应力波峰值则较小(表3),在更远区域,应力波趋于相同。

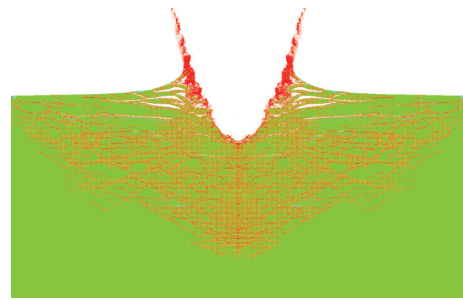
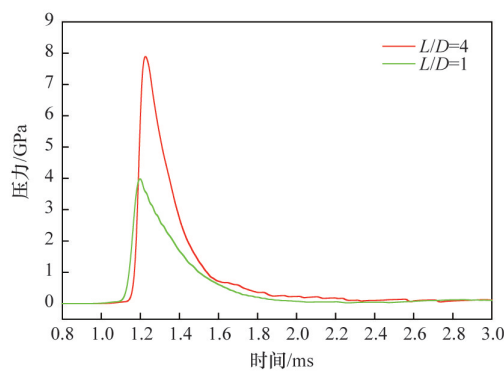
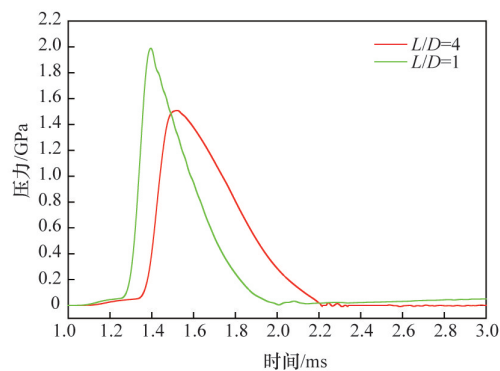


图6 等长径比弹体打击下的破坏景象(6800 m/s)
Fig. 6 Damage scene of $H=D$ projectile(6800 m/s)



(a) 正下方



(b) 侧下方

图7 不同长径比的应力波形

Fig. 7 Stress wave shapes of different ratios of length to diameter

表3 弹体长径比影响对比表(6800 m/s)
Table 3 Effect of L/D of projectile (6800 m/s)

长径比	弹坑深度/m	正下方应力/GPa ($H=6$ m, $x=0$ m)	侧下方应力/GPa ($H=6$ m, $x=5$ m)
$L/D=4$	6.65	7.94	1.51
$L/D=1$	5.11	4.01	2.00

5 与装药浅埋爆炸效应的异同

超高速武器对地打击呈现出流体侵彻特征,与高能装药的浅埋爆炸效应有很多类似之处:两者本质均是能量源瞬间释放后形成冲击波向外传播,都属孤立短波,从波形到衰减规律均类似,且着靶速度越高,越类似;弹坑形状随着靶速度或比例当量的提高,由漏斗状,过渡到半球状、碟状;靶体破

坏呈现出体积压实、高压粉碎、剪切破碎、拉伸开裂、表面层裂等多种形式。

但两者又有明显的差别:超高速武器对地打击的流体侵彻,其效应定向,只在打击方向形成明显毁伤,是有选择毁伤,而爆炸效应是等向的,是无差别毁伤;流体侵彻时随着靶速度的提高,弹体破碎时间变短,尽管应力峰值增大,但作用时间并未随之加长(图5),而浅埋爆炸随比例当量的增加,作用时间加长,因而不难推断出流体侵彻形成的冲击波,其衰减速率要高于爆炸形成的等峰值冲击波。

6 结论

1) 随着着靶速度的提高,武器打击花岗岩靶体时,将依次呈现固体侵彻、半流体侵彻、流体侵彻3种现象,其中流体侵彻阶段又可细分为亚音速流体侵彻和超音速流体侵彻;超

高速武器对地打击属于流体侵彻阶段。

2) 出现流体侵彻后,弹坑深度主要由弹体直接侵彻和惯性运动两部分组成;其中直接侵彻部分将随着靶速度提高而逐渐减小,并快速趋于常数;而惯性运动部分则逐渐增大,但增幅非常缓慢;总的侵彻深度增幅缓慢,着靶速度由3400 m/s增大至6800 m/s,坑深仅增加了5%。

3) 超高速对地打击将形成塑性冲击波,但衰减很快,衰减指数在2.5以上,且着靶速度越高,衰减越快,指数越大。

4) 弹体形状仅对作用近区有较大影响,其中长径比为主要影响因素,长径比越大,则作用越集中,弹坑越深,正下方应力幅值越大。

5) 超高速武器对地打击是有选择的定向毁伤,毁伤区域较窄;而装药爆炸效应是无差别的等向毁伤,毁伤区域更宽。

6) 对于特定的弹体,进入流体侵彻后,其弹坑深度相对固体侵彻增幅较小,而形成的冲击波衰减迅速,最终破坏威力有限,可以预估。

参考文献 (References)

- [1] 张丽静,刘东升,于存贵,等. 高超声速飞行器[J]. 航空兵器, 2010(2): 13-16.
Zhang Lijing, Liu Dongsheng, Yu Cungi, et al. Hypersonic aircraft[J]. Aero Weaponry, 2010(2): 13-16.
- [2] Fair H. Hypervelocity then and now[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 5(1-4): 1-11.
- [3] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Zhang Qiming, Huang Fenglei. Introduction of hyper velocity impact dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [4] 邓国强, 杨秀敏. 超高速武器对地打击效应特点分析[C]. 第一届全国超高速碰撞会议, 四川绵阳, 2013-07-25.
Deng Guoqiang, Yang Xiumin. Analysis on the effect characteristics of HVIW impact to land surface[C]. 1st National Symposium on HVI, Mianyang Sichun, July 25-26, 2013.
- [5] 沈俊, 徐翔云, 何翔, 等. 弹体高速侵彻岩石效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 4207-4212.
Shen Jun, Xu Xiangyun, He Xiang, et al. Experimental study of effect of rock targets penetrated by high-velocity projectiles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Suppl 2): 4207-4212.
- [6] 林俊德. 侵地武器及其气炮实验[J]. 中国工程科学, 2003, 5(11): 25-29.
Lin Junde. Earth-penetrating weapons and their experiments upon gas gun[J]. Engineering Science, 2003, 5(11): 25-29.
- [7] Antoun T, Glenn L, Walton O, et al. Simulation of hypervelocity penetration in limestone[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 33(1): 45-52.
- [8] 马晓青, 韩峰. 高速碰撞动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
Ma Xiaqing, Han Feng. High velocity impact dynamics[M]. Beijing: National Defense Press, 1998.
- [9] Heuze F E. An overview of projectile penetration into geological materials, with emphasis on rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1990, 27(1): 1-14.
- [10] Alekseevskii V P. Penetration of a rod into a target at high velocity[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1966, 2(2): 63-66.
- [11] Tate A. A theory for the deceleration of long rods after impact[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1967, 15(6): 387-399.
- [12] Lan Bin, Wen Heming. Alekseevskii-Tate revisited: An extension to the modified hydrodynamic theory of long rod penetration[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(5): 1364-1373.
- [13] 马晓青, 周兰庭, 隋树元. 用橡皮泥模拟高速撞击的实验研究[J]. 兵工学报, 1989(2): 50-54.
Ma Xiaqing, Zhou Lanting, Sui Shuyuan. Simulating experimental research of high speed impact with plasticine[J]. ACTA Armamentaria, 1989(2): 50-54.
- [14] 孙庚辰, 谈庆明, 赵成修, 等. 金属厚靶的超高速碰撞开坑实验[J]. 兵工学报, 1994(1): 27-31.
Sun Genchen, Tan Qingming, Zhao Chengxiu, et al. Cratering experiments with hyper-velocity impact upon thick metallic targets[J]. ACTA Armamentaria, 1994(1): 27-31.
- [15] 杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
Yang Xiumin. Numerical simulation for explosion and impact phenomena [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.
- [16] 邓国强, 杨秀敏. SPH方法在爆炸冲击效应计算中的应用[J]. 防护工程, 2004, 26(6): 46-49.
Deng Guoqiang, Yang Xiumin. Application of SPH method for explosion and impact effect simulation[J]. Protective Engineering, 2004, 26(6): 46-49.
- [17] 乔登江. 地下核爆炸现象学概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
Qiao Dengjiang. Introduction of underground nuclear burst phenomena [M]. Beijing: National Defense Press, 2002.
- [18] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Jin Fuqian. Introduction of experimental equation of state[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [19] 李卧东, 王明洋, 施存程, 等. 地质类材料超高速撞击相似关系与实验研究综述[J]. 防护工程, 2015, 37(2): 55-62.
Li Wodong, Wang Mingyang, Shi Cuncheng, et al. Review of similarity laws and scaling experiments research of hypervelocity impact on geological material targets[J]. Protective Engineering, 2015, 37(2): 55-62.

(编辑 陈华斌)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。