

文章编号: 1001-4888(2020)01-0082-09

高速侵彻混凝土弹体侵蚀效应试验研究^{*}

郭磊¹, 何勇¹, 潘绪超¹, 何珣¹, 涂建², 乔良², 庞春旭³

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏南京 210094; 2. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076;

3. 西安现代控制技术研究所, 陕西西安 710065)

摘要: 为了探究高速侵彻条件下弹体侵蚀效应及其影响因素, 本文利用滑膛炮发射平台, 采用次口径发射技术, 在 800~1800m/s 速度范围内, 开展了卵形头部弹体高速侵彻混凝土终点效应试验, 重点研究了弹体口径、材料、CRH(曲径比)、长径比、屈服强度等因素对侵蚀效应的影响。通过试验获得了高速侵彻条件下弹体侵蚀变形情况, 分析了侵彻深度和弹体质量损失率的影响规律, 对弹体侵蚀机理进行了探讨。结果发现: 通过合理设计弹体结构, 提高极限速度大小, 增大弹体截面比动能, 可以有效增加弹体最大侵彻深度; 提高弹体材料动态屈服强度能在一定程度上减小弹体侵蚀效应, 提高侵彻深度。

关键词: 爆炸力学; 高速侵彻; 弹体质量损失; 侵蚀效应

中图分类号: O385

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-182

0 引言

随着钻地弹撞击速度由常规低速(撞击速度低于 1000m/s)向高速(撞击速度为 1000~1500m/s)转移, 弹体将出现侵蚀现象^[1], 导致弹体质量损失、侵彻弹道偏斜, 甚至弹体结构破坏与失效, 传统刚性弹侵彻理论已经不再适用。同时, 混凝土材料的非均匀复杂特征会加剧弹体表面应力分布非对称性, 造成钻地弹偏航、早炸、失效, 甚至解体等事故, 极大地影响了侵彻类战斗部的终点毁伤效能。因而, 开展高速侵彻条件下弹体侵蚀效应典型宏观现象及其影响因素研究, 对于深入理解高速侵彻弹体动态响应过程具有重要意义。

美国桑迪亚国家实验室^[1-3]于 20 世纪末开始系统地开展了不同材料、形状和硬度的合金钢尖卵形弹体撞击砂浆靶或混凝土靶侵彻试验, 撞击速度区间为 300~1400m/s, 获得了弹体侵彻深度与质量侵蚀结果, 给出了着靶速度与回收弹体轮廓变化情况, 同时分析了骨料对弹体侵蚀效应的影响, 为之后的侵蚀效应研究提供了数据支撑。武海军等^[4]开展了卵形弹体正侵彻混凝土试验研究, 发现弹体头部侵蚀主要是由混凝土骨料的切削作用引起的。杨建超等^[5]开展了 60Si2Mn 材料弹体在 800~1500m/s 速度范围内侵彻混凝土的试验, 计算了不同强度混凝土(C30~C80)所对应的侵蚀系数大小, 确定了弹体理想侵彻速度区间。针对不同头部形状弹体, 徐翔云等^[6]开展了高速正侵彻混凝土试验, 获得了侵彻深度与侵彻速度之间的关系, 并分析了头部形状对弹体极限速度和弹体质量损失率的影响。Mu 等^[7]开展了 38CrSi 弹体垂直侵彻混凝土试验, 假设弹体最终回退为球形头部, 计算得到了考虑弹体质量损失的刚性侵彻速度上限。汪斌等^[8]利用 320mm 口径平衡炮通过次口径技术将直径为 136mm 的侵彻弹

^{*} 收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2018-10-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11702145), 国家自然科学基金青年基金(51301093), 航天一院创新联合基金项目资助

通讯作者: 何勇(1964—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 新概念战斗部。Email: yhe1964@njjust.edu.cn

郭磊(1988—), 男, 博士, 讲师。主要研究领域: 高速深侵彻战斗部。Email: guolei@njjust.edu.cn

体加速到 1300m/s,开展了大质量动能弹侵彻混凝土靶体研究,由于弹体尺寸较大,试验回收的弹体无明显变形和破坏,头部侵蚀现象不明显。何翔等^[9]系统地开展了高速侵彻混凝土弹体侵蚀效应试验研究,探讨了高速撞击条件下弹体侵彻能力、变形破坏情况和弹道稳定性等问题,描述了弹体半流体侵彻阶段的典型特征。目前,现有基于试验数据拟合的钻地弹侵深计算公式,大部分只适用于低速条件,由于发射平台和需求的限制,高速条件下弹体侵彻混凝土的试验数据仍然较少,对于高速侵彻条件下的侵彻破坏模式,尤其是对高速条件下弹体侵蚀机理的认识仍不够深入,极大地制约了高速钻地武器的发展。

本文基于火炮发射平台,采用次口径发射技术,针对不同直径、不同材料弹体开展垂直侵彻混凝土试验;基于试验结果,分析弹体侵蚀效应对侵彻深度的影响,拟合得到弹体极限速度,提出减少弹体质量损失量、提高侵彻深度的途径,拟合弹体质量损失率与初始动能的线性关系,分析弹体质量侵蚀系数与弹体强度的关系;最后,探讨高速侵彻条件下弹体侵蚀机理,以确定弹体侵蚀效应涉及的关键因素。

1 侵彻试验方案设计

1.1 总体布置

现场总体布置示意如图 1 所示,火炮药室内发射药快速燃烧产生高压气体对弹丸做功,弹丸以一定的初速飞离炮口,依次穿过卡瓣收集器、测速靶和姿态靶,最终侵入并停留在靶体内部。为了实现不同口径弹体高速发射,分别利用 $\Phi 25\text{mm}$ 滑膛炮和 $\Phi 105\text{mm}$ 滑膛炮(见图 2),采用次口径脱壳技术,通过调整发射装药量来控制发射速度,从而满足本试验对速度的要求。为保证弹体垂直着靶,通过水平仪测量保证火炮身管轴向和混凝土靶体轴向重合,并利用瞄准装置使弹丸飞行轨迹分别通过卡瓣收集器、测速靶纸和靶体的中心,用高速摄影获取弹丸飞行姿态。

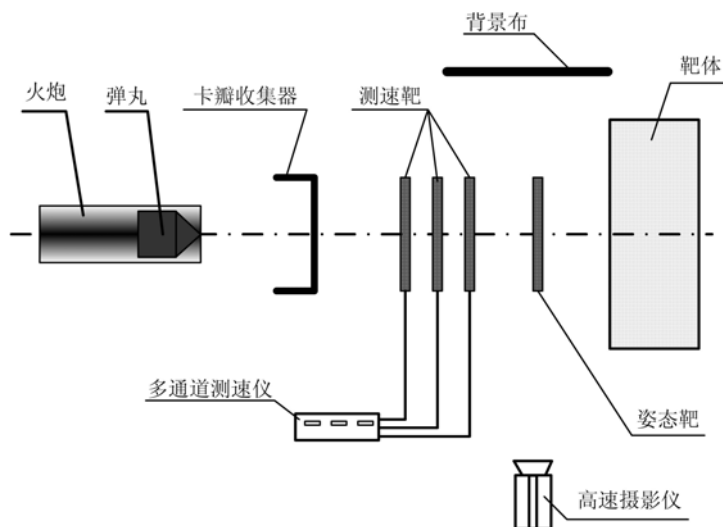


图 1 试验现场布置示意图

Fig. 1 Experimental arrangement

1.2 弹体相关

为对比分析影响弹体侵蚀效应的主导因素,本试验以卵形动能弹体垂直侵彻混凝土为基本条件,主要从弹体长径比、头部形状、弹体材料类型、屈服强度和撞击速度等方面来考虑。试验中弹体直径 d 共设置 12mm、30mm 和 60mm 三种,长径比 L_p/d 分别为 3、5 和 8,卵形头部曲径比 CRH 分别为 3 和 4。弹体材料为常用超高强度钢,包括 30CrMnSiNi2A、35CrMnSiA 和 DT300 三种常用高强度合金钢,试验前通过不同的热处理,使弹体具有不同的屈服强度。本试验中弹体类型共有 7 种, $\Phi 25\text{mm}$ 滑膛炮发射 P12 类型弹体, $\Phi 105\text{mm}$ 滑膛炮发射 P30 类型和 P60 类型弹体(图 3),弹体初始参数及编号见表 1。



图 2 试验用火炮发射平台

Fig. 2 The smooth bore used in experiment

表 1 不同弹体初始参数

Tab. 1 The parameters for the projectiles

类型编号	直径 d/mm	材料	曲径比 CRH	长径比 L_p/d	屈服强度 σ_s/MPa
P12-1	12	35CrMnSiA	3	8	1450
P12-2	12	30CrMnSiNi2A	3	8	1450
P12-3	12	35CrMnSiA	4	8	1450
P12-4	12	DT300	3	8	1054
P30-1	30	30CrMnSiNi2A	3	3	856
P30-2	30	30CrMnSiNi2A	3	3	1650
P60-1	60	30CrMnSiNi2A	3	5	1650

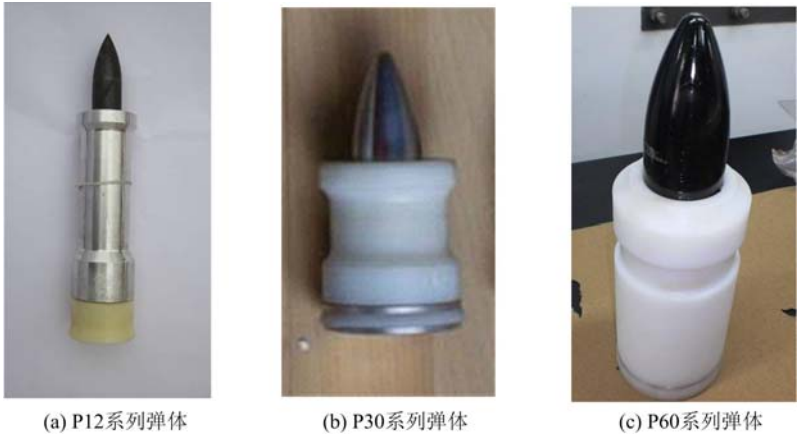


图 3 试验前弹体图

Fig. 3 The projectiles used in experiment

表 2 混凝土靶体参数

Tab. 2 The parameters for the concrete

类型编号	靶体尺寸	混凝土抗压强度/ MPa	骨料最大尺寸/ mm	对应弹体类型
T12	$\Phi 0.4\text{m} \times 0.6\text{m}$	42.8	5	P12
T30	$\Phi 0.9\text{m} \times 1.5\text{m}$	42.8	10	P30
T60	$\Phi 1.8\text{m} \times 2\text{mm}$	42.8	15	P60

1.3 靶体相关

试验所用靶标为圆柱形素混凝土,为消除侵彻中边界效应的影响,混凝土靶标直径不小于弹体直径的 20 倍^[3]。靶体外用厚钢板箍紧,确保靶标在试验中不解体、震塌。根据弹体尺寸对骨料尺寸作出相应调整,不同类型靶体的详细参数见表 2。水泥选用普通硅酸盐水泥 P·O42.5,骨料类型为常用石灰

石骨料,其重量配比为水泥 : 砂石 : 骨料 : 水 = 1 : 1.52 : 3.02 : 0.44,在标准条件下养护 28 天后测得其平均密度约为 2400kg/m³,抗压强度为 42.8MPa。

2 试验结果

针对 7 种不同类型弹体,共获得 27 组有效垂直侵彻数据,如表 3 所示,试验后利用砂纸去除弹体表面粘结混凝土,然后用酒精清洗弹体表面残余物,采用 I-2000 型号电子秤(量程为 500g,精度为 0.01g)测量弹丸质量。定义质量损失量为试验后弹体质量相对于试验前减小百分比,长度缩短率为试验后弹体长度相对于试验前减小百分比,侵彻深度为弹体停止位置弹头顶端距离着靶面的最大垂直距离。表 3 中第 11 号和第 18 号射击由于侵彻轨道偏斜,弹体从靶体侧面偏出,穿透钢箍,未能回收到弹体。图 4 为试验中高速摄影拍摄的弹丸飞行状态,可见弹托分离后弹体飞行姿态稳定并垂直着靶。

表 3 弹体侵彻混凝土试验结果

Tab. 3 The experimental results of the tests

射击 编号	弹体 类型	着靶 速度 /(m/s)	初始弹体		回收弹体		质量 损失 率/%	长度 缩短 率/%	侵彻 深度 /mm
			质量 /g	长度 /mm	质量 /g	长度 /mm			
1	P12-1	839	68.5	96	66.9	91.2	2.3	5.0	360
2	P12-1	901	68.5	96	65.1	90.7	5.0	5.5	407
3	P12-1	967	69.0	96	65.8	87.1	4.6	9.3	394
4	P12-1	1046	68.8	96	65.6	87.4	4.7	9.0	448
5	P12-1	1149	68.4	96	64.2	85.9	6.1	10.5	462
6	P12-1	1213	68.8	96	52.2	75.0	24.1	21.9	350
7	P12-1	1353	69.2	96	52.4	66.0	24.3	31.3	328
8	P12-2	699	69.9	96	67.9	93.2	2.9	2.9	215
9	P12-2	940	71.0	96.4	68.1	92.1	4	4.5	345
10	P12-2	1165	70.8	96.2	65.9	89.7	6.9	6.7	535
11	P12-2	1294	70.9	96.2	—	—	—	—	290
12	P12-3	873	67.0	96	63.4	87.6	5.4	8.8	377
13	P12-3	994	67.0	96	64.0	87.7	4.5	8.6	422
14	P12-3	1152	67.0	96	60.0	81.0	10.4	15.6	411
15	P12-4	897	70.4	95.8	67.6	92.3	4.0	3.6	335
16	P12-4	1010	70.3	95.9	66.5	90.1	5.4	6.1	359
17	P12-4	1136	71.4	95.9	60.8	77.7	14.8	19.0	340
18	P12-4	1165	70.4	95.8	—	—	—	—	500
19	P30-1	924	285.8	89.8	272.6	77.8	4.6	13.3	248
20	P30-1	1088	287.1	90.1	277.8	84.2	3.2	6.5	321
21	P30-2	885	322.6	90.2	316.9	89.0	1.4	1.8	310
22	P30-2	1286	323.4	90.1	313.3	88.4	1.9	3.1	630
23	P30-2	1385	322.0	90.0	310.0	87	3.4	2.8	775
24	P30-2	1596	322.8	90.0	300.2	76.7	14.7	7.0	780
25	P30-2	1852	322.2	90.0	279.1	69.5	22.8	13.4	640
26	P60-1	853	3813.0	300	3738.0	298.8	2.0	0.6	1670
27	P60-1	1401	3883.0	300	3611.0	288.8	7.0	3.75	3200



图 4 P12 弹体飞行姿态高速摄影

Fig. 4 The photo of P12 projectiles taken by high-speed camera

高速侵彻混凝土过程中,弹体和靶体相互作用,弹体处于高温、高压、高应变率的“三高”状态,弹体表面瞬时应力峰值远远超过其材料的动态屈服强度,弹体表面产生侵蚀效应,图 5 为试验后回收各系列弹体外形,可以看出:其典型的宏观表现为弹体表层材料磨损,头部钝化,长度缩短,质量减小。随着侵彻的继续,侵蚀效应逐渐减弱,直至弹体运动停止。

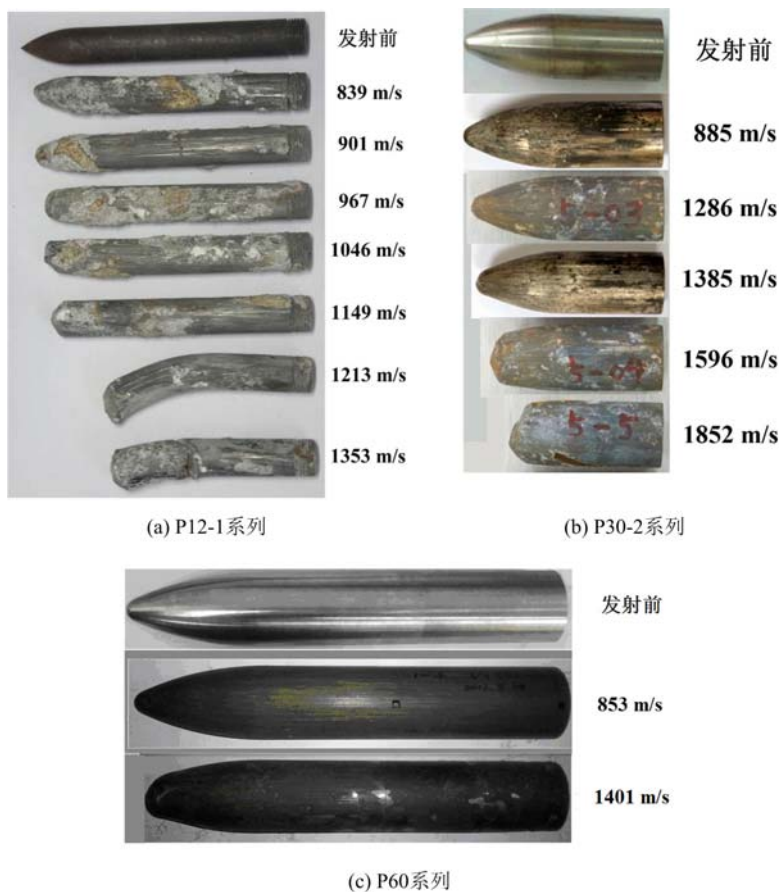


图 5 弹体回收对比图

Fig. 5 The comparisons between the residual projectiles and the original projectiles

(1) 不同直径弹体均产生弹体侵蚀现象,在弹体出现弯曲结构破坏前,弹体侵蚀效应随着弹体初始速度的增加而愈加显著,造成弹体外形轮廓改变。

(2) 侵蚀效应主要产生于弹体头部,主要表现为弹体头部钝化,而弹体杆部直径几乎不变,这是由于侵彻过程中弹体杆部表面受力相对与头部有所不同,对杆部的侵蚀效应甚微。

(3) 由于骨料散布具有随机非均匀性,造成弹体头部侵蚀非轴对称分布,这也是造成高速侵彻中弹道偏斜的主要原因,将会导致侵彻深度急剧减小,毁伤效能降低,甚至弹体结构弯曲破坏,如图 5(a)所示。

(4) 对于同一强度条件下不同类型高强度合金钢,其弹体侵蚀结果几乎相同,头部 CRH 值对弹体最终侵蚀情况影响较小,弹体材料的初始屈服强度对弹体侵蚀影响较大。

观察回收后的弹体发现,弹体失去了原有的金属光泽,表面有明显的刮擦痕迹。这是由于侵彻过程中弹体和混凝土介质间强烈的摩擦作用所致,刮擦现象随着撞击速度提高变得愈加明显。同时,回收后的弹体表面包裹着灰白色混凝土层,这可能是由于弹体表层材料在高速摩擦下热软化,混凝土颗粒嵌入熔融的弹体材料混合而形成。可见,热效应是高速侵彻问题研究中不容忽视的重要影响因素。

3 分析与讨论

3.1 侵彻深度

在高速侵彻过程中,弹体头部侵蚀效应将会改变弹体外形轮廓,由初始条件下的尖卵形头部逐渐变为近似球形头部,造成弹体侵彻阻力增大,对侵彻深度的减小也是显而易见的。令 Z 为弹体最终侵彻深度, d 为弹丸直径, v_0 为弹体初始撞击速度,图 6 是 P12 和 P30 系列弹体无量纲侵彻深度随着初始撞击速度的变化,P60 系列弹体由于试验数据较少而不作对比。可以发现以下规律:

(1) 在本文研究的速度范围和弹靶材料条件下,考虑弹体侵蚀效应后,发现弹体无量纲侵彻深度 Z/d 与初始速度 v_0 呈近似抛物线关系,与文献[9]中的试验结果相似。即存在一个极限速度 v_m 使得无量纲侵彻深度 Z/d 达到极大值,该结论也印证了文献[10]中提出的刚体侵彻阶段向半流体侵彻阶段的临界转变情况。图 6 中,P12 系列各类型弹体极限速度 v_m 值几乎相等,约为 1060m/s,而 P30 系列弹体的极限速度 v_m 值为 1537m/s。进一步分析表 1 可知,在本文特定的弹靶条件下,极限速度 v_m 值与弹体结构尺寸关系密切,弹体材料类型、强度的差异对其影响较小。因而通过合理设计弹体结构,提高极限速度 v_m 大小,可以有效增加弹体最大侵彻深度。

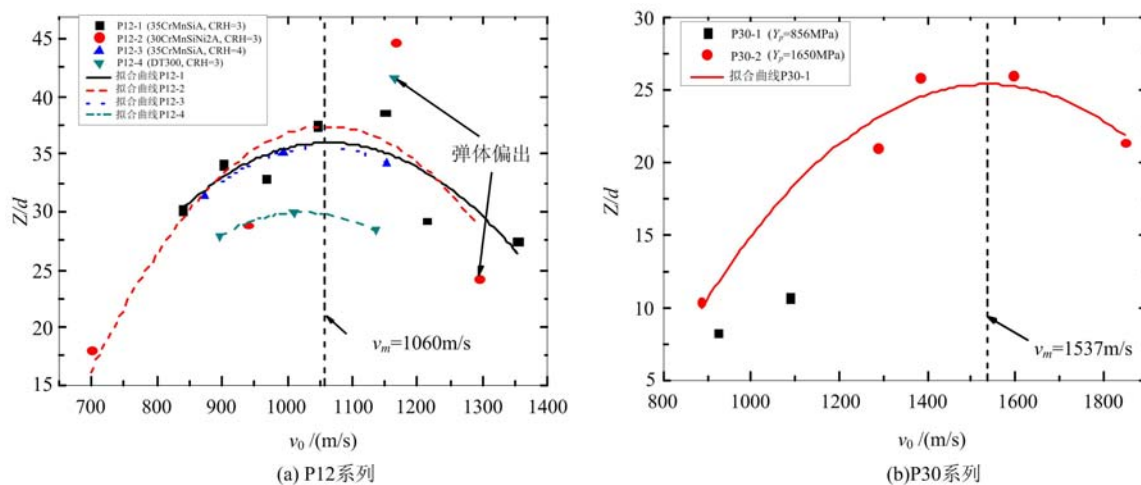


图 6 弹体无量纲侵彻深度的比较

Fig. 6 The comparisons of the dimensionless depth of penetration

(2) P12 系列弹体的极限速度 v_m 所对应的最大无量纲侵彻深度 $(Z/d)_{\max}$ 约为 37,而 P30 系列弹体的最大无量纲侵彻深度 $(Z/d)_{\max}$ 约为 25。这是由于大长径比弹体具有较大的截面比动能,能够在一定程度上提高弹体的侵彻深度。然而长径比过大,弹体结构强度变低,在高速侵彻中,更容易出现弹体弯曲破坏等现象。对于考虑弹体侵蚀效应的侵彻过程,应合理设计弹体壳体壁厚和长径比,增大弹体截面比动能,保证弹体在高速侵彻中结构完整是提高侵彻深度的关键。

(3) 对比不同材料下的无量纲侵彻深度,35CrMnSiA 材料和 30CrMnSiNi2A 弹体所对应的侵彻深度几乎相同,而 DT300 材料弹体侵深略低。分析可知,由于较高的屈服强度能在一定程度上减小弹体侵蚀效应,保证弹体有利的侵彻外形,从而提高其侵彻深度。在图 6(b)中,对比 P30-1 和 P30-2 侵深结果同样可以得到相同的结论。由此可知,在高强度合金钢条件下,相同结构弹体的侵彻深度几乎相同,而弹体材料的屈服强度对高速条件侵彻下弹体侵彻深度具有重要影响。

3.2 弹体质量损失

为了描述不同条件下弹体侵蚀程度和变形情况,常用弹体整体质量损失率和长度缩短率来宏观地表征弹体侵蚀效应的严重程度。Silling 等^[11]根据大量的试验数据拟合发现弹体侵彻混凝土中质量损失率与初始动能成正比关系,即

$$\frac{\Delta M}{M_0} = \frac{C_v v_0^2}{2} \quad (1)$$

其中, M_0 为弹体的初始质量; ΔM 为试验前后弹体质量损失量; 侵蚀系数 C_v 为待定经验常数, 单位为 s^2/km^2 , 其大小与弹靶性质有关; v_0 为弹体初始速度, 单位为 km/s 。拟合得到 P12 系列弹体和 P30 系列弹体侵蚀系数 C_v 的值见表 4。可以发现对于 P12 系列弹体得到的侵蚀系数大小接近, 约为 $0.1 \text{ s}^2/\text{km}^2$, 说明在本试验所研究 CRH 范围内, 对于高强度合金材料弹体, 卵形头部 CRH 值对弹体侵蚀效应的影响有限。

表 4 拟合得到的侵蚀系数 C_v 值

Tab. 4 The fitting value of the abrasion coefficient C_v

弹体类型	P12-1	P12-2	P12-3	P12-4	P30-1	P30-2
侵蚀系数 $C_v/(\text{s}^2/\text{km}^2)$	0.093	0.10	0.11	0.103	0.07	0.03

为了清晰地表明侵蚀效应对高速侵彻过程的影响, 图 7 根据上文中得到的极限速度 v_m 对速度区间进行分区。对于 P12 系列试验结果, 见图 7(a), 在撞击速度小于 1060 m/s 时, 弹体质量损失率与初始动能成正比关系, 随着弹体撞击速度的增大而缓慢增加, 范围在 $2\% \sim 6\%$, 与 Silling 等^[11]提出的规律相同。但是当速度超过极限速度 v_m 时, 弹体质量损失率突然急剧增大, 达到 $20\% \sim 25\%$ 。对应观察回收弹体情况可知, 当撞击速度 v_0 大于极限速度 v_m 时, 出现弹体弯曲破坏、头部墩粗等现象, 弹体失去侵彻能力。说明弹体在侵彻过程中保证其结构完整性是发挥其最大侵彻能力的前提, 而弹体侵蚀现象改变弹体轮廓, 使弹体侵彻所受过载已经超过其允许范围, 发生动态结构失稳, 弹体失去侵彻能力, 造成侵彻深度急剧下降, 这也很好地解释了弹体在极限速度时侵彻深度达到最大值的原因。

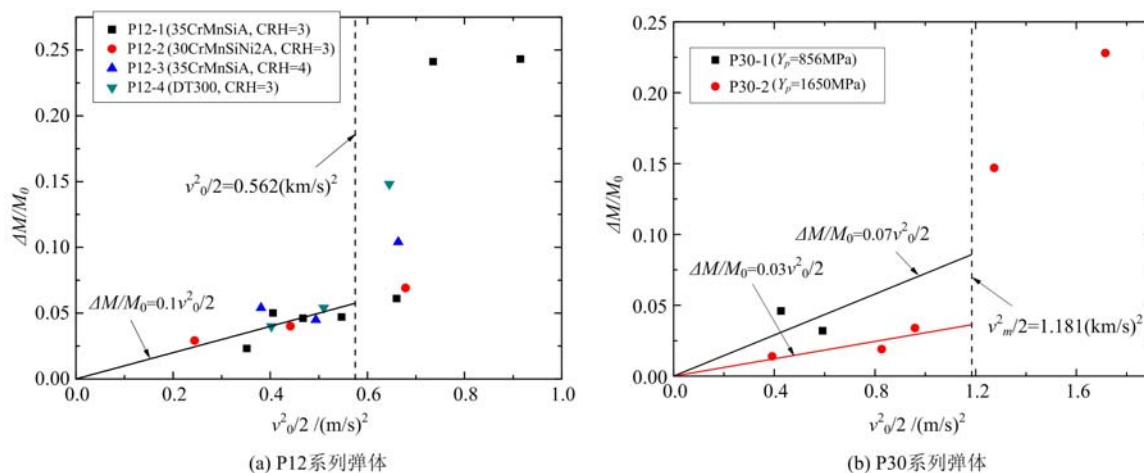


图 7 弹体质量损失率随速度的变化

Fig. 7 The relationship between the mass loss of projectile and the velocity

对于图 7(b)中 P30 试验弹体可以得到与 P12 类似的规律。分析 P30-1 和 P30-2 类型弹体材料的屈服强度, 发现弹体强度对于侵蚀系数的值影响较大, 即高强度弹体材料侵蚀量较小。比较两种类型弹体侵蚀系数的比值, $C_{vP30-1}/C_{vP30-2} = 0.07/0.03 = 2.3$, 而弹体屈服强度之比 $Y_{P30-2}/Y_{P30-1} = 1650/856 = 2$, 两者十分接近, 说明侵蚀系数的大小与弹体屈服强度成反比关系。可以推测, 在弹靶工况条件一定的情况, 提高弹体屈服强度可以在一定程度上减小弹体的质量损失。同时, 对比 P30 和 P12 的侵蚀系数大小, 可知侵蚀系数与弹体结构具有一定关系, 合理地设计弹体结构可以减小弹体质量损失, 从而提高弹体侵彻深度。

3.3 弹体侵蚀效应分析

正确认识弹体和靶体之间的局部接触过程是揭示弹体侵蚀机理的前提。在侵彻过程中,弹体与混凝土骨料或砂浆颗粒接触,产生摩擦效应,弹体表面局部接触应力远远超过弹体材料的屈服强度。观察回收后的弹体发现,弹体表面存在明显的刮擦痕迹,并粘附着大量混凝土粉末。因而,分析造成弹体表面侵蚀效应的原因主要有:

(1) “磨蚀”效应

混凝土材料是一种多组分材料,其中含有大量的砂浆颗粒和细小骨料颗粒,在弹体运动过程中,混凝土砂浆颗粒和骨料与弹体接触摩擦,类似于机械加工中的切削过程,对弹体表面材料产生机械微切削作用,随着侵彻的进行,新的混凝土颗粒不断地作用于弹体表面,从回收弹体表面刮擦痕迹可以推测,“磨蚀”效应发生在整个弹体表面,“磨蚀”后的弹体失去了原有的金属光泽,弹体质量减小。

(2) “烧蚀”效应

弹体和靶体相互作用过程中,由于高速摩擦作用,使得弹体表面温度急剧升高,弹体材料产生热软化甚至熔化。同时,弹靶间强应力波作用使弹体表面产生大量塑性变形热。在混凝土介质的作用下,弹体材料处于高温、高压、高应变环境下,表面材料发生热塑性失效,即“烧蚀”效应。

弹体侵蚀效应是一个复杂的热力耦合问题,实质是“磨蚀”效应和“烧蚀”效应共同作用的结果,并存在于整个侵彻历程中。在弹体撞击速度较低时,弹靶间作用力较小,“磨蚀”效应和“烧蚀”效应作用较弱,对弹体几乎无影响。然而在高速条件下,两种效应作用变得显著,由于侵彻历程和时间的增加,加剧了弹体侵蚀效应作用。“磨蚀”效应和“烧蚀”效应影响因素众多,弹体侵蚀效应不仅与弹体材料热力学性质、弹体结构、靶体材料中砂浆、骨料类型和配比等因素有关,还与撞击速度、侵彻姿态等初始条件有直接关系。实际情况中,还应该考虑到弹体材料缺陷,靶体介质的损伤、空化等效应,使得弹体侵蚀效应变得十分复杂。

4 结论

本文利用 $\Phi 25\text{mm}$ 滑膛炮和 $\Phi 105\text{mm}$ 滑膛炮发射平台,采用次口径发射技术,在 $800\sim 1800\text{m/s}$ 速度范围内,开展了卵形头部弹体高速侵彻混凝土终点效应试验,重点研究了弹体口径、材料、CRH、长径比、强度等因素对侵蚀效应的影响。通过试验获得了高速侵彻条件下弹体侵蚀变形情况,分析了弹体侵蚀效应对侵彻深度的影响,并拟合得到弹体质量损失率与弹体初始动能的线性关系,对弹体侵蚀机理进行了探讨。可以得出以下结论:

(1) 在本文特定的弹靶条件下,由于弹体侵蚀效应,弹体侵彻深度在撞击速度为极限速度 v_m 时达到极大值。当弹体撞击速度小于极限速度时,弹体质量损失率与弹体初始动能呈线性关系。极限速度 v_m 值与弹体结构尺寸关系密切,合理设计弹体结构,提高极限速度 v_m 大小,增大弹体截面比动能,可以有效提高侵蚀效应作用下弹体的最大侵彻深度。

(2) 在弹体侵蚀效应影响下,弹体头部外形变化导致侵彻阻力增加是造成侵彻能力下降的最主要原因。在其他条件不变的情况下,提高弹体材料动态屈服强度能在一定程度上减小弹体侵蚀效应,提高其侵彻深度。

(3) 弹体侵蚀效应实质是“磨蚀”效应和“烧蚀”效应共同作用的结果,两种效应相互作用并存在于整个侵彻过程中,其作用效果随着撞击速度提高而变得显著。

参考文献:

- [1] Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(5):465—476.
- [2] Frew D J, Hanchak S J, Green M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(6):489—497.
- [3] Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and

- penetration depth[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(10):1584–1594.
- [4] 武海军, 黄风雷, 王一楠, 等. 高速侵彻混凝土弹体头部侵蚀终点效应实验研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(1):48–55 (WU Haijun, HUANG Fenglei, WANG Yinan, et al. Experimental investigation on projectile nose eroding effect of high-velocity penetration into concrete[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(1):48–55 (in Chinese))
- [5] 杨建超, 左新建, 何翔, 等. 弹体高速侵彻混凝土质量侵蚀实验研究[J]. *实验力学*, 2012, 27(1):122–127 (YANG Jianchao, ZUO Xinjian, HE Xiang, et al. Experimental study of projectile mass loss in high velocity penetration of concrete target[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(1):122–127 (in Chinese))
- [6] 徐翔云, 冯顺山, 何翔, 等. 不同头部形状弹体高速侵彻混凝土试验研究[C]. 第 3 届全国工程安全与防护学术会议论文集, 武汉, 2012:521–525 (XU Xiangyun, FENG Shunshan, HE Xiang, et al. Experimental study of the effect of concrete targets high-velocity penetrated by different nose profile projectiles[C]. *Proceedings of the 3rd National Conference on Engineering Safety and Protection*, Wuhan, 2012:521–525 (in Chinese))
- [7] Mu Z C, Zhang W. An investigation on mass loss of ogival projectiles penetrating concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(8):770–778.
- [8] 汪斌, 曹仁义, 谭多望. 大质量高速动能弹侵彻钢筋混凝土的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2013(1):98–102 (WANG Bin, CAO Renyi, TAN Duowang. Experimental study on penetration of reinforced concrete by a high-speed penetrator with large mass[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013(1):98–102 (in Chinese))
- [9] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1):1–6 (HE Xiang, XU Xiangyun, SUN Guijuan, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1):1–6 (in Chinese))
- [10] Chen X W, Li Q M. Transition from nondeformable projectile penetration to semihydrodynamic penetration[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(1):123–127.
- [11] Silling S A, Forrestal M J. Mass loss from abrasion on ogive-nose steel projectiles that penetrate concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(11):1814–1820.

Experimental study on mass loss of projectile subjected to high-velocity penetration into concrete target

GUO Lei¹, HE Yong¹, PAN Xu-chao¹, HE Xun¹, TU Jian², QIAO Liang², PANG Chun-xu³

(1. School of Mechanical Engineering, NJUST, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China; 3. Xi'an Institute of Model Control Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to investigate the abrasion effect of projectile subjected to high-velocity penetration into concrete target, the caliber smoothbore gun is utilized to launch the ogival projectile to penetrate into concrete with a velocity in the range of 800~1800 m/s by the sub-caliber launching method. Six different types of projectiles are employed to explore the effects of the projectile diameter, materials, CRH, length-to-diameter ratio, yield strength on abrasion effect. The deformation of the projectiles subjected to high-velocity penetration into concrete target is obtained experimentally. The penetration depth and the mass loss of the projectile are analyzed in detail. The mechanisms of the mass loss of the projectile are discussed. The results show that the maximum penetration depth can be increased by increasing the limit velocity or the projectile kinetic energy from proper structure design. The abrasion effect can be suppressed with the enhancement of yield strength of the projectile, and the penetration depth can be increased.

Keywords: explosion mechanics; high-speed penetration, projectile; mass loss; abrasion effect