

大装填比弹侵彻钢筋混凝土实验研究

赵生伟, 古仁红, 初哲, 李明

(西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 设计了一种薄壁弹体, 采用 YOUNG 方程预估该弹体侵彻混凝土靶板的侵彻深度, 采用 SAMPLL 程序预估轴向过载。运用 LS - DYNA 软件分析弹体的侵彻过程, 对材料力学性能进行实验研究。通过在 $\phi 130$ mm 火炮上的一系列弹体侵彻钢筋混凝土靶实验, 考核了弹体的结构强度和侵彻深度。结果表明: 弹体在低速侵彻钢筋混凝土靶板时结构不会发生破坏, 300 m/s 速度下具备侵彻贯穿 600 mm 钢筋混凝土层的能力。

[关键词] 薄壁弹体; 钢筋混凝土; 侵彻深度

[中图分类号] E932 [文献标识码] A [文章编号] 1009 - 1742(2009)08 - 0044 - 04

1 前言

关于弹体侵彻混凝土介质的理论和实验研究的报道很多^[1-5], 弹体侵彻混凝土是一个高过载、高应变率的强冲击过程, 这对弹体结构强度提出很高要求。一般情况下弹壁设计得较厚, 而且弹体材料需具备高强高韧的性能。但是在某些情况下, 需要将弹体设计为薄壁结构, 这就对弹体的结构强度和侵彻能力带来较大问题。文章以实验为主, 结合理论分析和数值计算, 对一种薄壁结构的弹体侵彻钢筋混凝土靶板进行了系统的研究。

2 弹体设计

弹体为卵形结构(见图 1), 材料采用 35CrMnSiA, 头形系数为 3。弹尖采用底部直径 30 mm、锥角 60°的锥形结构。弹体壁厚与外径比约 1:20, 属于薄壁结构。弹体主要参数见表 1。



图 1 弹体结构示意图

Fig. 1 Schematic of projectile structure

表 1 弹体参数

Table 1 Parameter of projectile structure

	弹长/mm	圆柱段 外径/mm	壁厚/mm	弹体总 重量/kg
薄壁弹体	~900	~150	~8	20

3 弹体侵彻能力和结构强度分析

3.1 侵彻过程理论分析

采用 YOUNG 方程^[6], 预估弹体在 200 ~ 400 m/s 着速下, 对 35 MPa(配筋率 1.5%) 钢筋混凝土靶的侵彻能力。计算表明, 在保持结构完整的前提下, 薄壁弹体以 300 m/s 的着速贯穿典型钢筋混凝土靶板(35 MPa)的深度约为 0.6 m。

采用 SAMPLL 程序预估弹体的侵彻过载, 在 300 m/s 的着速下, 弹体侵彻 35 MPa 钢筋混凝土的过载峰值约为 20 000 g。

结合理论分析的数据, 初步确定所设计的薄壁弹体的侵彻能力为 0.6 m 厚钢筋混凝土层。

3.2 弹体侵彻过程的数值计算

运用 LS - DYNA 软件分析弹体的侵彻过程。考虑到弹体为薄壁结构, 贯穿厚靶时弹体结构强度可能受到较大影响, 对该弹体贯穿薄靶(0.3 m 厚、

[收稿日期] 2008 - 12 - 12; 修回日期 2009 - 01 - 11

[作者简介] 赵生伟(1978 -), 男, 陕西长武县人, 西北核技术研究所助理研究员, 主要研究方向为爆炸与冲击动力学; E - mail: nintzhao@163.com

35 MPa 钢筋混凝土靶板)进行了计算。弹体着速为 300 m/s, 落角分别为 60° 和 90°。图 2 所示为弹体以 300 m/s 速度、60° 落角穿靶后弹体结构变形情况, 图 3 所示为弹体以 300 m/s 速度垂直贯穿混凝土靶板过程中的弹体速度。

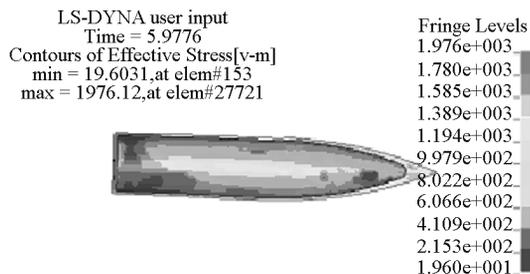


图 2 弹体以 300 m/s 速度、60° 落角穿靶后弹体结构变形情况

Fig. 2 Schematic of projectile on penetrating concrete target. Impacting velocity is 300m/s, obliquity is 60°

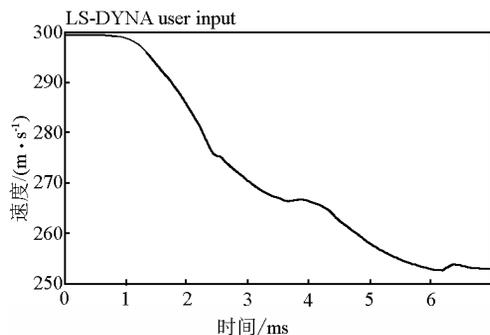


图 3 弹体以 300 m/s 撞击速度垂直贯穿混凝土靶板过程中的弹体速度

Fig. 3 Velocity of projectile on penetrating concrete target. Impacting velocity is 300 m/s, obliquity is 90°

计算结果表明, 不同条件下弹体均贯穿了 0.3 m 厚的钢筋混凝土靶板。300 m/s 着速下, 弹体垂直贯穿靶板后剩余速度约为 250 m/s, 动能为着靶前的 69%, 证明弹体还具有继续侵彻的能力。弹体结构基本完好, 斜侵彻时侧壁及弹头弧线部发生少许塑性变形。

4 弹体材料力学性能研究

选用弹体材料的重要参考指标是材料的强度和韧性。此外, 薄壁弹体比厚壁弹体在强冲击载荷下更容易发生变形和断裂, 对材料韧性的要求更高。在 150 ~ 600 °C 范围内进行了一系列

35CrMnSiA 热处理实验, 比较不同条件下材料力学性能参数, 最终得到该材料的最佳力学性能, 如表 2 所示为弹体材料力学性能参数。

表 2 弹体材料力学性能参数

Table 2 Mechanical parameters of projectile material

材料名称	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断面收缩率/%	延伸率/%	冲击功/J
35CrMnSiA	1 700	1 300	49	11	40

5 弹体侵彻钢筋混凝土实验研究

5.1 实验装置

采用 $\phi 130$ mm 气炮, 侵彻过程中, 通过激光测速装置测量弹体着靶速度, 利用高速摄像系统拍摄弹体着靶姿态。实验中弹体速度由气室内气压决定, 弹体在发射管内姿态由弹托决定。调整混凝土靶板的倾斜度, 可进行不同倾角的实验。实验原理如图 4 所示。

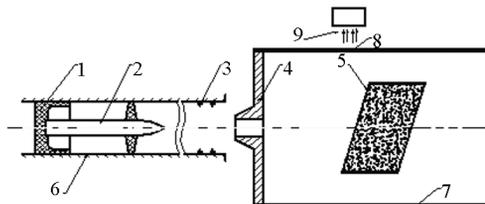


图 4 弹体斜侵彻混凝土靶板示意图

Fig. 4 Schematic of projectile on oblique penetrating into concrete target

注: 1—弹托; 2—弹体; 3—激光测速系统; 4—脱壳装置; 5—混凝土靶板; 6—炮管; 7—靶箱; 8—光测窗口; 9—高速摄像系统。

5.2 钢筋混凝土靶板

实验用钢筋混凝土靶板强度为 35 MPa, 外用厚度为 5 mm 的薄钢板箍紧。直靶厚度 300 mm, 斜靶倾角 30°, 中心厚度 500 mm, 配筋率 0.6%, 钢筋直径 6.5 mm, 钢筋网格 100 mm × 100 mm, 层间距 100 mm。考虑到气炮实验时靶室的尺寸限制, 选取钢筋混凝土靶板的尺寸为 $\phi 1 200$ mm。实验时在目标靶板背面约 400 mm 距离处放置 $\phi 1 200$ mm × 300 mm 钢筋混凝土挡靶一块, 用于弹体回收和防护。

5.3 弹体侵彻钢筋混凝土实验

5.3.1 斜侵彻实验

研究在斜侵彻过程中薄壁弹体的结构强度。实验条件为: 速度约 300 m/s, 30° 倾角。实验结果: 弹体结构基本完整, 尾部有少量塑性变形; 弹体贯

穿斜靶后嵌入挡靶之中,侵彻深度约 600 mm,如图 5 所示为实验前后弹体及实验后靶板破碎图片。



(a) 实验前弹体图片



(b) 实验后弹体图片



(c) 实验后混凝土靶板图片

图 5 弹体及混凝土靶板图片

Fig. 5 Photographs of projectile and concrete target

5.3.2 攻角侵彻实验

实验条件:速度 300 m/s,0°倾角。攻角 5°,考核弹体在攻角侵彻环境下的结构强度。实验结果:弹体结构完整,300 mm 厚钢筋混凝土靶板被穿透,侵彻深度约 600 mm,如图 6 所示为实验前后弹体图片。

5.3.3 垂直侵彻实验

垂直侵彻系列实验的条件为:速度约 300 m/s,0°倾角,0°攻角,考核薄壁弹体垂直贯穿钢筋混凝土靶板时弹体的结构强度和侵彻深度。实验结果:弹体穿透目标靶板和第一块挡靶,并嵌入第二块挡靶中,有效侵深约 700 mm,如图 7 所示为实验前后弹体图片。

5.4 实验小结

实验结果汇总见表 3。



(a) 实验前弹体图片



(b) 实验后弹体图片

图 6 5°攻角时弹体图片

Fig. 6 Photographs of projectile at 5° yawed angle



(a) 实验前弹体图片



(b) 实验后弹体图片

图 7 弹体图片

Fig. 7 Photographs of projectile

表 3 φ130 mm 气炮实验结果

Table 3 Experimental result on φ130 mm gas - gun

序号	着靶状态	靶板尺寸/mm	着靶速度/(m s ⁻¹)	实验结果
1	斜侵彻	φ1 200 × 500, 倾角 30°	308	弹体完整
2	斜侵彻	φ1 200 × 500, 倾角 30°	306	基本完整
3	斜侵彻	φ1 200 × 500, 倾角 30°	318	尾部出现变形
4	攻角	φ1 200 × 300, 3°攻角	273	弹体完整
5	侵彻	φ1 200 × 300, 5°攻角	291	弹体完整
6	垂直	φ1 200 × 300	314	弹体完整
7	侵彻	φ1200 × 300	301	弹体完整

理论分析认为,弹体在结构不发生破坏的前提下,有效侵深为0.6 m。数值计算的结果表明,薄壁弹体在300 m/s着速下可成功贯穿0.3 m厚钢筋混凝土层,且具有继续侵彻的能力。 $\phi 130$ mm气炮实验的结果表明,弹体以250~320 m/s速度垂直侵彻钢筋混凝土靶板时,弹体结构完整,无明显塑性变形,弹体的侵彻深度0.6~0.7 m。从侵彻深度来讲,实验结果与理论分析和数值计算的结果吻合。

数值计算中,弹体斜侵彻时侧壁及弹头弧线部发生少许塑性变形,该现象与文献[7]分析结果一致,认为距弹尖三分之一弹长处,弹体承受着最大弯矩,因此该处弹壁最有可能发生塑性变形。而在 $\phi 130$ mm气炮实验中,弹体头部未出现塑性变形,可能是靶板配筋率偏低所造成。实验中靶板配筋率为0.6%,而理论分析时采用配筋率为1.5%,两者有一定差异。钢筋的疏密对弹体强度有一定影响,因此实验中薄壁弹体的弹头部分未见到塑性变形。

6 结语

设计了大装填比的薄壁弹体,从理论上研究该弹体低速侵彻混凝土靶板过程中,弹体的侵彻深度、轴向过载等参数,并给出了数值分析结果。进行了弹体材料的力学性能实验研究,得到了

35CrMnSiA材料的最佳力学性能。通过气炮实验,考核了弹体的结构强度和侵彻深度。理论分析和侵彻实验的结果相吻合,进一步证实了薄壁弹体研究工作的合理性。研究表明:所设计的薄壁弹体在低速侵彻钢筋混凝土靶板时,弹体结构不会发生破坏,300 m/s速度下具备侵彻贯穿600 mm钢筋混凝土层的能力。

参考文献

- [1] Lurk V K, Forrestal M J. Penetration into semi-infinite reinforced concrete targets with ogive nose projectiles [J]. Int J Impact Eng, 1987, 6 (4): 291-301
- [2] Forrestal M J, Altman B S. An empirical equation for penetration depth of ogive nose projectiles into concrete targets [J]. Int J Impact Eng, 1994, 15: 395-405
- [3] Frew D J. Penetration of concrete targets with ogive nose steel rods [J]. Int J Impact Eng, 1998, 21 (6): 489-497
- [4] Young C W. The development of empirical equation for predicting depth of an earth penetrating projectile [R]. SCDR267260, Sandia National Laboratories, 1967
- [5] Bernard R S. Depth and motion prediction for earth penetrators [R]. US Army Waterways Experiment Station, 1979
- [6] Young C W. Penetration equations [R]. DE 98001508, Sandia National Laboratories, 1998
- [7] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计(I): 侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 499-505

Experimental investigation of large-loading projectile penetrating

Zhao Shengwei, Gu Renhong, Chu Zhe, Li Ming

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

[Abstract] A thin-walls projectile has been designed, and penetration depth of projectiles was evaluated by YOUNG Equation. Axial acceleration was evaluated by SAPLL. penetration process of projectile on penetrating concrete target was analysed by LS-DYNA. Mechanical Parameters of projectile material were studied by experiment. Penetration depth and structure intensity of projectile were examined by a series of experiments on penetrating concrete target on $\phi 130$ mm gas-gun. A conclusion is obtained, projectile isn't destroyed during penetrating concrete target, and reinforced concrete that is 300 mm in thickness was penetrated through.

[Key words] thin-walls projectile; concrete; penetration depth