钢筋混凝土靶体侵彻破坏响应及其原位测试技术研究

徐伟芳, 陈小伟*, 张荣, 何丽灵, 李会敏, 黄海莹

中国工程物理研究院总体工程研究所, 绵阳 621999

* E-mail: chenxiaoweitu@yahoo.com

收稿日期: 2015-12-21; 接受日期: 2016-02-24; 网络出版日期: 2016-03-25

国家自然科学基金(批准号: 11390362, 11572299)资助项目

摘要 为研究弹体在钢筋混凝土中的侵彻过程, 本文研制了格栅测试系统, 主要由格栅电缆、LED 灯、电源和高速相机等组成。依附靶体中的钢筋, 格栅电缆被制作成棋盘式格栅网, 按一定间距预埋于靶体之中, 并与电源和 LED 灯组成回路。运动中的弹体切断附近的格栅电缆, 对应的 LED 灯将熄灭, 进而表征了格栅电缆的破坏状态, 并由高速相机进行记录。结合格栅的分布, 实时原位测试弹体的侵彻轨迹、速度和侵彻深度。基于此, 本文测试了弹体的速度变化和最终的侵深, 并结合经验公式、直接测量进行了校验, 论证了格栅测试方法的有效性。

关键词 格栅测试方法, 原位测试方法, 侵彻响应, 钢筋混凝土

1 引言

军事战斗中, 通常应用侵爆弹对钢筋混凝土结构靶体进行攻击, 其基本过程是: 在弹体保护下, 侵爆弹以一定的交会条件侵入靶体, 将炸药完整地带入靶中的指定位置, 然后在引信及传爆系列的作用下引爆炸药, 从而对靶体造成毁伤。爆炸毁伤效果决定于侵爆弹前期的侵彻响应如, 弹的姿态、速度及弹靶的毁伤/破坏状态; 同时, 弹体在靶体中的侵彻过程及其动力学响应不仅体现了弹的侵彻破坏能力, 还表征了防护工程的抗冲击/破坏能力。因此, 弹体在钢筋混凝土靶体中侵彻响应的研究不仅有利于促

进弹靶破坏机理的研究, 而且还有利于促进武器的研制和防护工程的设计和建。

弹体对混凝土和钢筋混凝土的侵彻破坏效应, 国内外研究人员从理论模型、经验预估、数值仿真以及试验等几个方面已进行了大量的研究工作^[1-10], 取得了丰富的研究成果。现有混凝土靶体侵彻响应的研究主要集中在弹体的响应(弹的变形/破坏和过载等)和靶的最终破坏状态。综合分析弹、靶的响应, 可以获得特定弹靶系统的侵深(penetration depth)、穿甲极限(perforation limit)、破甲极限(scabbing limit)和弹道极限(ballistic limit)等参数^[1-10], 从而研究弹、靶的侵彻破坏机理, 为提高弹的破坏能力或靶的防护能力

引用格式: 徐伟芳, 陈小伟, 张荣, 等. 钢筋混凝土靶体侵彻破坏响应及其原位测试技术研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 407-414
Xu W F, Chen X W, Zhang R, et al. The *in-situ* measurement of the penetration trajectory in reinforced concrete target by grid measurement method (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 407-414, doi: 10.1360/N092015-00365

提供技术支持. 随着研究的深入, 工程实际的需求不仅仅局限于上述几个参数, 还需要获得弹靶侵彻响应历程, 提高了对弹靶侵彻响应的过程和机理的认识的全面性和准确性.

钢筋混凝土不是透明的, 弹体的侵彻过程无法利用可见光等手段进行直接观测, 但可以采用基于电磁波等电磁信号进行探测. 常用的探测方法有: 探地雷达、超声波探测和 X 光探测等, 其原理均是利用电磁信号等在不同介质中具有不同传播特征的特性. 对于钢筋混凝土来说, 致密的钢筋网将严重影响电磁信号的传播和反射, 进而制约了此类探测方法在钢筋混凝土中的应用.

预埋法是研究弹体在靶体中侵彻过程的另一种方法. 预埋法是指在靶体中按一定规律预埋一定数量的传感器, 当弹体侵彻到一定深度时激发对应的传感器, 然后根据传感器的分布规律, 利用传感器信号反推弹体的侵彻位置. 如在靶体中先按一定的规律预埋探针^[11]、光纤^[12]以及可断应变片^[13]等器件, 当弹体到达指定位置后立即碰撞探针或拉断光纤和应变片从而触发测试系统, 记录触发时间, 再根据预埋的位置确定弹体的侵彻过程及侵深等参量. 这项技术首先是由 Eichelberger^[14]提出的, 并用于分层金属靶的测试, 然后 Allen 等人^[15]用于土中侵彻的测试. 当预埋加速度计、探针和可断应变片时, 需要精准控制弹靶的交会条件, 否则弹将无法激发传感器, 致使测试失败. 光纤较脆, 不仅安装和维护的技术难度较高, 而且成本较高, 无法大量采用.

为深入研究侵爆弹侵彻钢筋混凝土靶体的破坏机理, 本文基于预埋法, 采用通电线缆代替光纤, 开发钢筋混凝土侵彻破坏效应的原位测试系统——格栅测试系统, 对格栅测试系统原理、测试方法、测试结果及弹靶的侵彻响应等开展研究.

2 钢筋混凝土靶侵彻破坏效应试验系统

2.1 系统概述

钢筋混凝土靶体侵彻破坏效应的试验系统如图 1 所示, 主要由火炮、弹、测速装置、触发源、同步触发器、高速相机、格栅、格栅信号测试系统等组成, 其中格栅预埋在靶体中.

测速装置由一定间距的通电靶网组成, 当弹体穿过靶网时导致其电路产生强间断信号, 并由波形

1-火炮; 2-弹; 3-测速装置; 4-靶体; 5-靶体中预埋的格栅; 6-格栅测试信号测试仪; 7-高速相机; 8-同步触发器; 9-触发源; 10-同步触发器

图 1 钢筋混凝土靶侵彻破坏效应试验系统示意图

存储装置记录, 试验过程中通过测试弹体穿过两靶网的时间差以获得弹体的着靶速度. 触发源为漆包线制作的单层致密靶网, 紧贴于着靶面, 当弹体与其相互作用时截断靶网, 在其电路产生强间断信号. 在强间断信号的激发下, 同步触发器给各测试系统同时输入触发信号, 进而同步触发各测试系统, 使其处于采集状态, 并确保各测试信号具有相同的触发时刻. 为确保能完整地记录信号, 可以根据需要在测试系统中提前设置开始采集的时刻. 图 1 中高速相机分别测试弹的运动状态、靶体的变形和破坏过程, 以及格栅的通断信号.

2.2 弹与靶

试验火炮口径为 156 mm, 试验钢弹(图 2)为截卵形, 内有装填物, 全弹质量 32 kg, 弹长 520 mm, 弹径 153 mm, 尾端有紫铜弹带与火炮口径匹配.

试验靶体为配筋率约 0.6% 的 C30 钢筋混凝土, 其尺寸为 2500 mm×2500 mm×1800 mm. 靶内钢筋分布见图 3, 图中内部实线表示钢筋位置. 靶体共分布 9 层钢筋, 层间距离约为 200 mm, 仅用少许钢筋支撑层间钢筋网, 层内相邻钢筋形成 100 mm×100 mm 的网眼, 钢筋直径为 10 mm, 最外层有 100 mm 后的混凝土保护层. 靶体制作过程中, 首先根据设计制作每层钢筋网, 并在规定的钢筋层着弹区域铺设格栅并引出导线, 格栅测试系统详见第 3 节, 然后再根据层间距离对各层钢筋网进行安装, 最后浇筑混凝土, 并

按 28 天对钢筋混凝土靶体进行养护. 最终的试验靶体见图 4.

2.3 高速相机

在弹、靶的高速侵彻试验中, 结构的响应在毫秒量级. 要充分反映侵彻过程中弹靶的变形/破坏等细节, 在确保像素足够的前提下, 高速摄影的曝光速度应快于结构的响应速度. 试验中, 由于格栅系统的视场较小, 对应测试相机的像素为 640×432 , 幅频为 50000 fps, 即相邻照片的时间间隔为 $20 \mu\text{s}$. 为兼顾监控弹体的飞行过程及靶体的破坏过程, 根据高速摄影的原理和高速相机现场的布置特点, 另一高速相机的像素为 1024×304 , 幅频为 17000 fps, 即相邻照片的时间间隔为 $60 \mu\text{s}$. 为确保高速摄影具有同一触发时刻, 采用同步触发装置使其同步(图 1).

图 2 (网络版彩图)弹 32 kg, 弹径 153 mm, 弹长 520 mm

图 3 靶体及其钢筋分布

图 4 (网络版彩图)试验前的靶体状态

3 格栅测试系统

3.1 测试原理

格栅测试的基本思路是: 以靶体中致密的钢筋为支撑, 在靶体内布置多层导电线缆形成的格栅; 弹体的侵彻将导致靶体及邻近区域的导电线缆破坏, 其破坏状态借助 LED 灯的熄灭状态来进行表征; LED 灯熄灭状态及其变化过程由图 1 的高速相机记录; 结合格栅的分布特征, 实时原位测试弹体的侵彻轨迹、速度和侵彻深度, 以及混凝土靶的破坏响应行为.

格栅测试的具体工作原理(图 5)是: 导电线缆沿靶中钢筋经纬分布, 每一线路分别是 LED 灯的通电回路的一部分. 由于钢筋网眼尺寸小于弹体直径, 弹体侵入将切断钢筋及铺设其上的栅格导电线缆, 导致对应的 LED 灯熄灭. 例如, 某层格栅方向上切断的导电线缆(如 A1, B2), 对应的 LED 灯(A1, B2)熄灭, 表明弹体已经到达该层格栅. 随着侵彻深入导致弹道附近钢筋混凝土破坏, 邻近的导电线缆也先后切断, 对应的 LED 灯逐渐熄灭, 其变化过程可反应弹体侵彻作用下混凝土的破坏行为, 如破碎区特征尺寸、混凝土裂纹扩展速度等. 借助对 LED 灯熄灭的高速摄影, 通过对每层栅格网靶 LED 灯的熄灭状态及其在靶体中位置的分析, 可确定弹在靶体内的侵彻速度、轨迹和侵彻深度; 甚至在偏转情形时可确定其横向速度分量. 试验中, 单层格栅分布在靶体中心(图 6).

需指出的是, 钢筋混凝土破坏为结构响应. 侵彻初期, 弹道附近混凝土裂纹扩展速度应小于弹体速度; 但在侵彻后期, 随着弹体速度显著下降, 混凝土裂纹扩展速度可能大于瞬时侵彻速度. 侵彻过程中混凝土破坏表现为弹道邻近的拉压联合作用下的破

图 5 格栅网靶示意图

图 6 试验中的格栅

碎区及稍远的拉伸破裂区. 在侵彻方向上混凝土破坏受到抑制, 不影响对侵彻深度的判断.

3.2 格栅信号传输与处理系统

格栅信号传输与处理系统如图 7. 格栅线一端应用 Q9 头接入直流电压信号, 另一端通过网线传输各路通断信号到测试电路板上, 并与电路板上阵列的 LED 灯一一对应. 试验过程中, 应用高速相机记录 LED 灯的熄灭状态. 若格栅线未被切断, 则对应的 LED 灯处于点亮状态, 反之当格栅线被切断时, LED 灯熄灭. 因此可根据高速摄影捕捉的 LED 灯动态熄灭位置、时间等信息, 判别弹的终点弹道性能, 如侵深、轨迹等.

试验中, 格栅通断信号采用规律分布的 LED 灯数组(图 8)进行表征, 每根导电线缆都对应一颗 LED 灯, 其中 A, B 两区与图 6 中沿 A 方向和 B 方向分布的导电线缆对应, 纵向编号“1~6”分别对应图 3 中格栅层的编号“1~6”, 横向编号“1~8”分别对应每层格栅两个方向上对应的 LED 灯编号, 即上述的 A1, A2, ..., A8 和 B1, B2, ..., B8.

图 7 (网络版彩图)格栅信号传输与处理系统示意图

图 8 格栅信号的标识灯及其分布

4 试验概况

为验证格栅测试方法的有效性, 设计了两发侵彻试验. 为使得弹体侵彻后嵌埋于靶中, 以测试其侵彻轨迹和侵深, 根据靶体尺寸, 设计弹速为 660 m/s. 试验状态是: 碰靶速度为 664.5 m/s, 着靶姿态见图 9.

如图 10, 高速摄影记录了侵彻过程中靶体的变形及破坏过程: 弹体进入靶体中, 由于弹体与钢筋碰撞作用, 向后喷溅的粉尘中有较强的火光产生; 随着弹体深入, 靶体迎弹面隆起, 由于弹靶碰撞产生的压缩应力波在靶表面反射而形成拉伸波, 导致靶体拉伸断裂并产生辐射状裂纹, 随后又产生环状裂纹, 这致使靶体表面破碎成块, 并向弹尾方向飞溅.

图 9 (网络版彩图)着靶状态(图中的白色为触发靶网)

图 10 (网络版彩图)靶体的初期变形及破坏过程

尽管靶径与弹径之比仅为 16:1, 由于钢筋的加强作用, 有限靶体未出现粉碎性的破坏. 由于钢筋网层间没有钢筋的连接, 靶体在侵彻方向上表现为分层断裂破坏, 其中最后的分层正是弹体所嵌埋的位置(图 11). 试验后通过解剖发现弹体已经发生偏转(图 12), 对应的弹体侵彻深度分别约为 1200 mm.

试验后的剩余弹体基本保持刚性不变形, 仅在其头部有一定质量侵蚀(图 13). 本文试验中钢筋混凝土配筋率仅为 0.6%, 为低配筋, 钢筋对弹体变形/损伤的影响尚不明显, 但在针对较高配筋率的防御军事目标的防护研究中, 必须计及钢筋的影响和作用.

5 格栅测试分析

5.1 弹靶侵彻响应终态的格栅测试

图 14 给出了试验前 LED 灯的初始状态和侵彻结

图 11 (网络版彩图)靶体的最终破坏状态

图 12 (网络版彩图)弹体的最终状态

图 13 (网络版彩图)试验后弹体的侵蚀状态

图 14 (网络版彩图)格栅灯的初始状态(a)及最终状态(b)

束后 LED 灯的最终状态. 侵彻结束后: 前 3 层 A, B 区的 LED 灯绝大部分熄灭; 第 4 层中 A 区的 LED 灯全部熄灭, B 区部分熄灭, A, B 区熄灭状态的不对称性说明弹体发生了偏转, 与实测结果(图 12)相同; 第 5 层中 A 区的 LED 灯熄灭了两盏, B 区熄灭了一盏, 也说明了弹体偏转.

图 14 显示试验中第 6 层只有 A 区熄灭了一盏, 这说明试验中弹体头部已经穿过第 5 层, 未到第 6 层, 这是因为弹体的直径大于格栅网孔的直径, 如果弹体穿过该层格栅, 则两个方向的格栅都会被切断. 根据格栅的位置(图 3)可以确定弹的头部在距离着靶面 1160 和 1360 mm 之间, 可以取其平均值即 1260 mm 为弹体头部的最终位置.

5.2 弹靶侵彻过程的格栅测试

5.2.1 侵深的测试

侵彻过程中, 假设弹体已穿过某一格栅并停止, 即弹体到达此层格栅时的速度为零. 同时, 弹体的着靶速度 V_0 和此层格栅与着靶面的距离 L 均为已知, 根据运动方程可以初步预估弹体到达此格栅预估时刻 t_p , 即 $t_p = 2L/V_0$, 不过此时蕴含着一个假设, 即减加速度为恒值, 而实际情况下, 减加速度随着侵彻深度的增加而发生变化, 因此由此得到的预估时刻 t_p 与实际到达时刻 t_e 会存在一定的偏差. 如果两时刻的偏差最小, 便可确认弹体在此时刻停止, 进而结合格栅的位置可以确定弹体在靶中的位置即侵深. 实际到达时刻 t_e 可以通过 LED 的熄灭状态测得.

弹体侵入后, 每层格栅 A, B 区第一盏灯熄灭的时刻分别见图 15(图中 T 表示触发, 数字表示距离触

图 15 (网络版彩图)试验中经纬方向首盏等熄灭时刻
虚线左侧为 A 区, 右侧为 B 区, 以下同

发时刻的时间, 以下同)和表 1, 表 1 同时给出了弹体到达每层格栅所需时间的试验值 t_e 和预估值 t_p . 分析表 1, 可以得到: 第 1 层至第 4 层的误差偏大, 其原因是因为弹不可能停留在这几层中, 即速度不可能降为 0 m/s; 第 5 层中预估值 t_p 和试验值 t_e 之间的偏差

最小, 约为 11.42%; 第 6 层中的偏差最大, 约为 88.05%, 则可以判断弹头部已经穿过第五层, 还未到第六层. 图 15(f)表明第 6 层 LED 灯的熄灭状态自距着靶时刻 34.220 ms 起一直保持到最终状态, 说明弹体没有使格栅发生进一步的破坏, 即弹体在 34.220

表1 测试结果

格栅 序号	距离靶面 (mm)	t_e (ms)	t_p (ms)	$\Delta = \left \frac{t_e - t_p}{t_e} \right \times 100$ (%)
1	400	0.68	1.2	76.47
2	580	1.06	1.75	65.09
3	800	2.00	2.41	20.50
4	980	2.50	2.95	18.00
5	1160	3.94	3.49	11.42
6	1360	34.22	4.09	88.05

ms 时已经停止, 即弹体停留在第 5 和 6 层格栅之间. 由此可得, 弹的头部在距离着靶面 1160 和 1360 mm 之间, 可取其平均值即 1260 mm 为弹体头部的侵深.

5.2.2 弹体的速度-时间曲线

根据表 1 中的测试结果, 可以获得试验中弹体经过每层格栅时的速度, 进而获得弹体在侵彻靶体过程中速度变化曲线(图 16). 弹体的速度-时间曲线表明, 弹体速度并不是线性降低的, 即弹体的减加速度并不是恒值, 而且后期的减加速度比初期的低.

假设加速度满足下式:

$$a(t) = a_0 - \beta \cdot t^n, \quad (1)$$

式中, $a(t)$ 为加速度; a_0 为初始加速度; β, n 为参数.

则速度的变化为

$$V(t) = V_0 - a(t)t, \quad (2)$$

式中, $V(t)$ 为速度; V_0 为初始速度.

根据试验数据, 加速度的表达式为(3)式(注意, 长度和时间的单位分别为 mm 和 ms). (2)和(3)式拟合得到的速度时间曲线见图 16. 图 16 中, 试验曲线和

图 16 (网络版彩图)弹体速度-时间曲线

拟合曲线在前期吻合得较好, 而后期的偏差较大, 其主要原因是后期的数据点偏少.

$$a(t) = 193 - 111 \cdot t^{0.173}. \quad (3)$$

6 结论

本文以靶体中钢筋为支撑, 在钢筋混凝土靶体中预埋了网格分布的格栅系统, 借助 LED 灯的代表作用, 在高速摄影的辅助下, 测试了弹体在靶体中侵彻通道和弹体的最终侵深, 并通过经验公式和现场的靶体解剖论证了侵深的测试结果的有效性和准确性. 通过对格栅信号的深入分析, 分别获得了弹体的侵彻轨迹和速度变化曲线, 以及靶体破坏区域的形成和发展. 上述分析表明, 采用格栅方法可以有效地测试钢筋混凝土中弹靶的侵彻响应. 此方法还可以推广用于测试钢筋混凝土中的爆炸响应. 但是, 由于格栅分布区域太小, 无法全面反应靶体内部的侵彻响应, 还需进一步研究.

参考文献

- Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets. *Int J Impact Eng*, 1994, 15: 395-405
- Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review. *Int J Impact Eng*, 1996, 18: 141-230
- Forrestal M J, Frew D J, Hanchak S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles. *Int J Impact Eng*, 1996, 18: 465-476
- Frew D J, Hanchak S J, Green M L, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods. *Int J Impact Eng*, 1998, 21: 489-497
- Teland J A, Sjøel H. Penetration into concrete by truncated projectiles. *Int J Impact Eng*, 2004, 30: 447-464
- Dawson A, Bless S, Levinson S, et al. Hypervelocity penetration of concrete. *Int J Impact Eng*, 2008, 35: 1484-1489

- 7 Xiao Q Q, Huang Z X, Zu X D, et al. Penetration research of jacketed jet into concrete. *Int J Impact Eng*, 2013, 54: 246–253
- 8 Chen X W, Li Q M. Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics. *Int J Impact Eng*, 2002, 27: 619–637
- 9 Li Q M, Chen X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. *Int J Impact Eng*, 2003, 28: 93–116
- 10 Chen X W, Li X L, Huang F L, et al. Damping function in the penetration/perforation struck by rigid projectiles. *Int J Impact Eng*, 2008, 35: 1314–1325
- 11 Lawrence W. Measurements of penetration using instrumented target. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publisher B. V., 1988
- 12 Peters J, Anderson W F, Watson A J. Development of instrumentation techniques to investigate high velocity projectile penetration into construction materials. In: *Proceedings of the Sixth International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures*, Panama City Beach, Florida, 1993. 23–28
- 13 Gold V M, Vradis G C, Pearson J C. Concrete penetration by eroding projectiles: Experiments and analysis. *J Eng Mech-ASCE*, 1996, 122: 145–152
- 14 Eichelberger R I. Experimental test of the theory of penetration by metallic jets. *J Appl Phys*, 1956, 27: 63–68
- 15 Allen W A, Mayfield E B, Morrison H. Dynamics of a projectile penetrating sand. *J Appl Phys*, 1957, 11: 1331–1335

The *in-situ* measurement of the penetration trajectory in reinforced concrete target by grid measurement method

XU WeiFang, CHEN XiaoWei, ZHANG Rong, HE LiLing, LI HuiMin & HUANG HaiYing

Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China

In order to study the terminal ballistics of a high-speed penetrator striking in the steel reinforced concrete target, a grid measurement method was developed in the present paper, which was composed of the grid cables, LED lamps, power and high-speed photography, etc. The grid cables were pre-embedded as multilayer with given space and arranged like the chess-board distribution along the steel rebars. When the projectile penetrated into concrete target, it might cut off the grid cable, which would truncate the corresponding circuit and turn off the corresponding LED lamps. The winking of LED lamps in each layer were recorded simultaneously by the high-speed photography. Given the distribution of the grid cables, the ballistic trace, velocity and DOP could be determined according to the winking of LED lamps. Based on the method, the variation of the projectile velocity and DOP were studied by experiments, which was validated by the empirical formula and direct measurement. It confirmed the effectiveness of the grid method.

grid measurement method, *in-situ* measurement, penetration trajectory, steel reinforced concrete

doi: 10.1360/N092015-00365