

文章编号: 1001-1455(2003)03-0267-08

# 混凝土靶板冲击响应的经验公式\*

文鹤鸣

(中国科学技术大学材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要: 对预测混凝土靶板在弹丸撞击下的响应和破坏的经验公式进行了综述, 包括预测侵彻深度、剥落破坏和穿透的经验方程, 并对国外现有的有关钢筋混凝土靶板抗弹设计和评估的规范进行了评论。结果表明, 现有经验模型的不完备性和现有设计和评估准则的自身缺陷, 清楚地说明有必要在混凝土撞击、侵彻和穿透这一活跃研究领域, 做进一步的实验、理论和数值模拟工作, 以便对余留问题找到令人满意的答案。

关键词: 爆炸力学; 冲击响应; 综述; 混凝土靶板; 弹丸; 侵彻; 剥落破坏; 穿透

中图分类号: O385 国标学科代码: 130°3530 文献标志码: A

## 1 概述

弹丸对混凝土结构的侵彻长期以来为军事和土木工程师所关注<sup>[1-2]</sup>。在过去的 40 年, 核工业部门参与了钢筋混凝土防护墙在弹丸低速(撞击速度小于 200m/s)作用下的响应和破坏问题<sup>[1-7]</sup>。潜在的威胁(弹丸)包括因气象原因(如旋风)产生的空载弹丸(如钢筋、钢管、电线竿和小汽车), 偶发事故产生的飞片和自由落体, 空难飞机以及由于压力容器断裂、管道破裂、透平机叶片和其他转动设备所产生的弹丸。撞击弹丸一般可根据弹丸相对于靶体的可变形性的大小分类为“软”弹和“硬”弹。“软”弹如失事飞机因撞击面较大影响整个结构, 因而一般与结构的总体生存性相结合研究。尽管在这类问题的研究中也遇到一些困难, 但现有的商业软件已能够研究结构的瞬态动力响应以及在结构中所引起的各种效应。而对于“硬”弹对混凝土的撞击问题, 虽在开发和验证数值模拟技术方面有了较大的投入, 但因缺乏材料数据和适当的混凝土材料模型, 对问题的解决是有限的。这些材料模型不仅要求在比例或非比例加载情况下保持完全可靠, 而且应该能够描述混凝土的三轴响应行为, 以及拉伸和低、高围压情况下的极限破坏条件。国防工业部门感兴趣的弹丸撞击速度范围大致可分为 0~200 m/s 和 200~1500 m/s。

如图 1 所示, “硬”弹丸撞击混凝土靶板将导致靶板的总体响应和局部破坏, 根据冲击的强度大小、靶体材料性能和弹靶几何构形<sup>[3-4]</sup>, 靶体所受的损伤的类型也不同。局部损伤包括初始弹坑(其中也包括弹丸的侵彻和靶体冲击面所产生的崩落)。随着初始撞击速度的增加, 弹丸的侵深将大于弹坑的深度, 在靶体里产生一个直径略大于弹径的洞(隧道)。进一步增加弹丸的初始撞击速度, 将导致混凝土靶板厚度方向的开裂, 然后是靶背面混凝土的剥落破坏。剥落破坏一旦开始, 侵深将随着撞击速度的增加而迅速增加, 当侵孔扩展到剥落坑区后最终导致靶板的穿透。

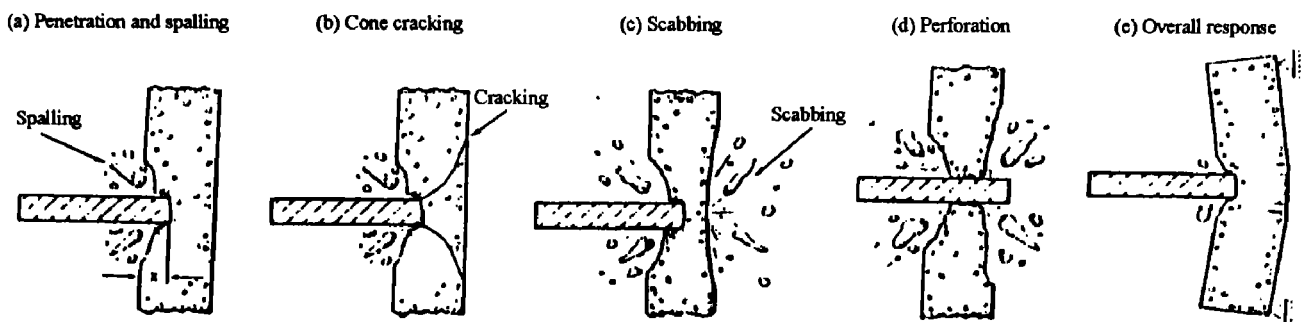


图 1 混凝土靶板在“硬”弹丸撞击下的侵彻与破坏

Fig. 1 Penetration and failure of concrete slabs by “hard” missiles

\* 收稿日期: 2002-09-14; 修回日期: 2002-11-05

作者简介: 文鹤鸣(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

## 2 经验公式

钢筋混凝土结构在弹丸撞击下的响应和破坏的分析十分困难,这是因为各组元的能量吸收机制和破坏模式不同以及他们之间的相互作用。因此,混凝土侵彻和穿透的大多数研究是实验性质的<sup>[1~5]</sup>。混凝土侵彻和穿透的研究受国防工业部门的影响极深,在过去的几十年,核工业部门已投入了大量的人力和物力,研究大质量物体对混凝土结构的低速撞击问题。正如文献[1~3,5]指出的那样,绝大多数已发表的工作只考虑如何推导混凝土靶板受到弹丸正撞时的经验公式,因为人们认为这种组合对给定质量和速度(动能)的弹丸来说最具有破坏力。在大多数情况下,采用半无限靶体的经验侵深 $x$ ,预测在给定质量和速度(动能)的弹丸撞击下混凝土靶板发生痂斑破坏的临界厚度 $h_s$ 和穿透的临界厚度 $h_p$ 。最常用的经验公式介绍如下。

### (1) 修正 Petry 公式

1910年研发的修正 Petry 公式可以写成

$$x = 0.06237K_p \frac{W}{A} \log \left[ 1 + \frac{v_i^2}{19974} \right] \quad (1a)$$

式中: $x$ 为侵彻深度,m; $v_i$ 为撞击速度,m/s; $W/A$ 是弹丸单位投影面的质量, $\text{kg}/\text{m}^2$ 。对应侵彻系数 $K_p$ 的选取有两种修正 Petry 公式。在修正 Petry I型公式中:对厚重混凝土, $K_p = 0.00799$ ;对常规钢筋混凝土, $K_p = 0.00426$ ;对特别增强混凝土, $K_p = 0.00284$ 。注意, $K_p$ 与混凝土的强度无关。在修正 Petry II型公式中, $K_p$ 是混凝土强度 $f_c$ 的函数<sup>[8]</sup>,如图2所示。

A. Amirikian<sup>[8]</sup>建议穿透厚度(即正好击败特定弹丸的混凝土靶板厚度)为

$$h_p = 2x \quad (1b)$$

上式称为修正 Petry 穿透公式。在使用修正 Petry 公式时,常把痂斑厚度定义为<sup>[3]</sup>

$$h_s = 2.2x \quad (1c)$$

### (2) 美国陆军工程兵公式(ACE)

美国陆军工程兵<sup>[9]</sup>在1946年开发了下面的侵彻深度公式

$$\frac{x}{d} = \frac{1.8628Dd}{f_c^{0.5}} \left[ \frac{0.215v_i}{304.8} \right]^{1.5} + 0.5 \quad (2a)$$

式中: $D$ 为弹丸的口径密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $d$ 为弹丸直径,m; $f_c$ 为混凝土无围压时的压缩强度,Pa。穿透和痂斑厚度分别为

$$\frac{h_p}{d} = 1.32 + 1.24 \frac{x}{d} \quad 1.35 \leq \frac{x}{d} \leq 13.45 \quad (2b)$$

$$\frac{h_s}{d} = 2.12 + 1.36 \frac{x}{d} \quad 0.65 \leq \frac{x}{d} \leq 11.6765 \quad (2c)$$

方程(2a)只是实验数据的统计拟合。对直径12.7、37、75、76.2和155mm的弹丸进行了穿透和痂斑破坏实验,混凝土靶板厚度 $h$ 与弹径 $d$ 的比为 $3 \leq h/d \leq 18$ 。这些关系式只适用于所指的比值范围。超过所陈述的试验参量范围,方程(2a)可能导致错误的结果。对比值小于3而言,方程(2b)和(2c)结果将更趋保守。

### (3) 修正国防研究委员会公式(NDRC)

1946年,美国国防研究委员会<sup>[10]</sup>提出了非变形弹丸侵彻厚混凝土靶板的侵彻理论,该理论对实验数据提供了一个较好的近似。基于该理论 NDRC 建议 $x/d$ 由下面的方程求得

$$G(x, d) = 2.5515 \times 10^{-9} K N D d \frac{0.215v_i^{2.8}}{f_c^{0.5}} \quad (3a)$$

其中

$$G(x, d) = \left[ \frac{x}{2d} \right]^2 \quad \frac{x}{d} \leq 2.0 \quad (3b)$$

$$G(x, d) = \frac{x}{d} - 1 \quad \frac{x}{d} > 2.0 \quad (3c)$$

式中: $N$ 是弹头形状因子:对平头弹, $N = 0.72$ ;对球形弹, $N = 0.84$ ;对钝头弹, $N = 1.00$ ;对尖头弹, $N = 1.14$ 。 $K$ 为混凝土穿透性因子,是混凝土强度的函数。

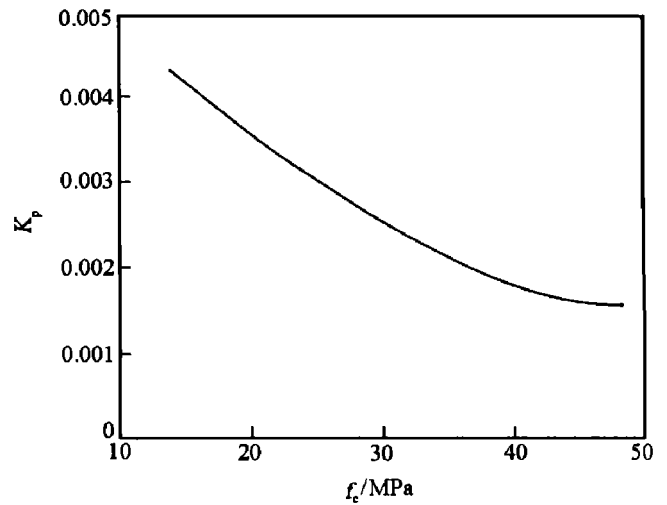


图2 特许增强混凝土侵彻系数随混凝土强度的变化

Fig.2 Variation of penetration coefficient with concrete strength for specially reinforced concrete

后来, R. P. Kennedy<sup>[3]</sup> 给出

$$K = \frac{14946.5}{f_c^{0.5}} \quad (3d)$$

方程(3a)~(3d)称为修正 NDRC 侵彻公式。

当靶板厚度与弹径比大于 3, 即  $h/d \geq 3$ , 方程(3a)与方程(2b)、(2c)结合可以用来预测防止穿透和痂斑破坏的靶板厚度。当  $h/d < 3$ , 防止穿透和痂斑破坏的靶板厚度可由下面的方程确定<sup>[3]</sup>

$$\frac{h_p}{d} = 3.19 \frac{x}{d} - 0.7183 \left[ \frac{x}{d} \right]^2 \quad x/d \leq 1.35 \quad (3e)$$

$$\frac{h_s}{d} = 7.91 \frac{x}{d} - 5.060 \left[ \frac{x}{d} \right]^2 \quad x/d \leq 0.65 \quad (3f)$$

$x/d$  由方程(3a)~(3d)获得。方程(3e)与(2b)、方程(3f)与(2c)以及方程(3a)~(3d)称为修正 NDRC 穿透和痂斑破坏公式。相对于 ACE 公式而言, NDRC 公式的主要优点是它们能够推广到靶板厚度与弹径比小于 3 的情形, 而不会导致不合理的结果。

#### (4) Ammann-Whitney 公式

Ammann-Whitney 公式<sup>[11-12]</sup> 主要用来预测因爆炸产生的碎片对混凝土靶板的侵彻

$$\frac{x}{d} = \frac{5.9746 \times 10^{-5} N D d \frac{0.2}{v_i^{1.8}}}{f_c^{0.5}} \quad (4)$$

方程(4)和方程(2b)、(2c)可以用来预估  $h_p$  和  $h_s$ 。  $v_i$  应该大于 304.2m/s, 因此, 该公式并不适用核工业部门感兴趣的低速弹丸撞击问题。

#### (5) 弹道研究实验室公式(BRL)

弹道研究实验室公式直接预测穿透厚度。对于压缩强度  $f_c = 20.685 \text{MPa}$  的混凝土, 有 BRL 穿透公式<sup>[13]</sup>

$$\frac{h_p}{d} = 2.9163 \times 10^{-7} D d \frac{0.2}{v_i^{1.33}} \quad (5a)$$

和修正 BRL 穿透公式

$$\frac{h_p}{d} = \frac{1.3257 \times 10^{-3} D d^{0.2} v_i^{1.33}}{f_c^{0.5}} \quad (5b)$$

痂斑破坏厚度可由下式估算<sup>[14]</sup>

$$h_s = 2h_p \quad (5c)$$

方程(1)~(5)中的所有公式在下列参量范围内适用(除非另有说明):  $h/d \geq 3$ ,  $5541.0 \text{ kg/m}^3 \leq D \leq 22163.8 \text{ kg/m}^3$ ,  $152 \text{ m/s} \leq v_i \leq 914 \text{ m/s}$ ,  $d \leq 0.41 \text{ m}$ 。在非军事应用中最可能违背的两个限制条件是靶板厚度弹径比  $h/d$  和弹丸的初始撞击速度  $v_i$ , 在民用工程中弹丸的初始速度较低。

R. P. Kennedy<sup>[3]</sup> 和 G. E. Sliter<sup>[5]</sup> 都建议使用 NDRC 公式, 因为其理论基础, 并可推广到大范围冲击参量。G. E. Sliter<sup>[5]</sup> 把方程的预测和从不同渠道获得的实验数据进行了比较后, 发现对于大的  $d/h$ , 侵彻深度和痂斑厚度的预测值和实验结果吻合较差。这是因为在相对大面积的平面撞击中(所有的实验都涉及平头圆柱弹), 压缩应力波从靶板背面反射变成拉伸冲击波, 从而产生痂斑破坏而同时产生的侵彻很小。结论是 NDRC 公式在涉及高  $d/h$  或低  $x/d$  ( $x/d < 0.6$ ) 的冲击问题时预测的痂斑厚度不是很可靠。从感兴趣的弹径厚度比的实验, 有两个适合这种情形的替代的经验公式, 这就是下面的 Bechtel 公式<sup>[15-16]</sup> 和 Stone-Webster 公式<sup>[17]</sup>。

#### (6) Bechtel 痂斑公式

$$h_s = \frac{38.9556 W \frac{0.2}{v_i^{0.5}}}{f_c^{0.5} d^{0.2}} \quad (6)$$

#### (7) Stone-Webster 痂斑公式

$$h_s = 2.8698 \left[ \frac{W v_i^2}{C} \right]^{1/3} \quad (7)$$

式中:  $C$  是依赖于靶厚弹径比  $h/d$  的一个系数。这两个方程适用的参量范围:  $20.7 < f_c < 31.0 \text{MPa}$ ,  $1.5 < h/d < 3$ 。这些公式与实验数据吻合得较好。

#### (8) Kar 公式

侵彻深度由下面方程求得<sup>[18]</sup>

$$G(x, d) = \left[ \frac{E}{E_m} \right]^{1.25} \frac{3.8 \times 10^{-5} N D d \frac{0.2}{v_i^{1.8}}}{f_c^{0.5}} \quad (8a)$$

其中

$$G(x, d) = \left[ \frac{x}{2d} \right]^2 \quad \frac{x}{d} \leq 2.0 \quad (8b)$$

$$G(x, d) = \frac{x}{d} - 1 \quad \frac{x}{d} > 2.0 \quad (8c)$$

当  $h/d \leq 3$ , 靶板穿透和痂斑破坏的最小厚度可用以下方程预估

$$\frac{h_p - a}{d} = 3.19 \frac{x}{d} - 0.718 \left[ \frac{x}{d} \right]^2 \quad \frac{x}{d} \leq 1.35 \quad (8d)$$

$$\beta_k \frac{h_s - a}{d} = 7.91 \frac{x}{d} - 5.060 \left[ \frac{x}{d} \right]^2 \quad \frac{x}{d} \leq 0.65 \quad (8e)$$

当  $3 < h/d \leq 18$ , 靶板穿透和痂斑破坏的最小厚度可用以下方程预估

$$\frac{h_p - a}{d} = 1.32 + 1.24 \frac{x}{d} \quad 1.35 \leq \frac{x}{d} \leq 13.45 \quad (8f)$$

$$\beta_k \frac{h_s - a}{d} = 2.12 + 1.36 \frac{x}{d} \quad 0.65 \leq \frac{x}{d} \leq 11.6765 \quad (8g)$$

式中:  $\beta_k = (E_m/E)^{0.2}$ ,  $E$ 、 $E_m$  分别是弹丸和软钢的弹性模量。 $a$  是混凝土中骨料尺寸的一半。

### (9) Degen 穿透公式

基于文献[19~22]给出的实验数据的统计分析, P. O. Degen 建议穿透公式

$$\frac{h_p}{d} = 0.69 + 1.29 \frac{x}{d} \quad 1.52 < \frac{x}{d} \leq 13.42 \quad (9a)$$

$$\frac{h_p}{d} = 2.20 \frac{x}{d} - 0.30 \left[ \frac{x}{d} \right]^2 \quad \frac{x}{d} \leq 1.52 \quad (9b)$$

式中:  $x$  由方程(3a)~(3d)确定。Degen 穿透公式适用的参量范围:  $159.85 \text{ kg/m}^3 < D_{st} < 349.52 \text{ kg/m}^3$ ,  $25 \text{ m/s} \leq v_i \leq 312 \text{ m/s}$ ,  $15 \text{ kg} \leq W \leq 343 \text{ kg}$ ,  $28.4 \text{ MPa} \leq f_c \leq 43.1 \text{ MPa}$ ,  $0.15 \text{ m} \leq h \leq 0.61 \text{ m}$ ,  $0.10 \leq d \leq 0.30 \text{ m}$ 。

### (10) Chang 公式

W. S. Chang 利用 Bayesian 统计和经典力学原理推导出两个表达式, 用来预估混凝土靶板在旋风产生的钢弹或透平机叶片飞弹撞击下痂斑破坏和穿透的最小厚度

$$h_s = 2.7290 \left( \frac{u}{v_i} \right)^{0.13} \frac{(Mv_i^2)^{0.4}}{d f_c^{20.4}} \quad (10a)$$

$$h_p = 1.6367 \left( \frac{u}{v_i} \right)^{0.25} \left[ \frac{Mv_i^2}{d f_c} \right]^{0.5} \quad (10b)$$

式中:  $u = 6.096 \text{ m/s}$ 。Chang 方程所覆盖的参量范围:  $17 \text{ m/s} \leq v_i \leq 312 \text{ m/s}$ ,  $0.109 \text{ kg} \leq W \leq 343.2 \text{ kg}$ ,  $0.05 \text{ m} \leq h \leq 0.61 \text{ m}$ ,  $0.02 \text{ m} \leq d \leq 0.30 \text{ m}$ ,  $22.8 \text{ MPa} \leq f_c \leq 45.5 \text{ MPa}$ 。

### (11) Haldar-Hamieh 公式

A. Haldar 等<sup>[25]</sup>通过引入一个量纲一的冲击参量——冲击因子  $I$ , 推导出几个经验关系式。侵彻深度可以表达为

$$\frac{x}{d} = -0.0308 + 0.2251I \quad 0.3 \leq I \leq 4 \quad (11a)$$

$$\frac{x}{d} = 0.6740 + 0.0567I \quad 4 < I \leq 21 \quad (11b)$$

$$\frac{x}{d} = 1.1875 + 0.0299I \quad 21 < I \leq 455 \quad (11c)$$

式中:  $I = 2.6789 W N v_i^2 / (g d f_c)$ ,  $g$  是重力加速度。当  $I \leq 21$ , 痂斑破坏的最小靶板厚度

$$\frac{h_s}{d} = 3.3437 + 0.0342I \quad 21 \leq I \leq 385 \quad (11d)$$

方程(2c)、(3f)和方程(11a)、(11b)可以用来计算最小痂斑破坏厚度。最小穿透厚度可用方程(2b)、(3e)和方程(11a)~(11c)来预估。

### (12) Hughes 公式

G. Hughes<sup>[26]</sup>基于修正的 NDRC 侵彻理论, 在假定混凝土的行为是脆性的而不是延性的基础上, 提出了一个量纲一致的方程。侵彻深度可以写成

$$\frac{x}{d} = \frac{0.19 N_H I_H}{1 + 12.3 \ln(1 + 0.03 I_H)} \quad (12a)$$

式中:  $I_H = 2.6789 M v_i^2 / (f_t d^3)$ ,  $N_H$  是弹头形状因子, 对应平头、钝头、球形和尖头弹丸分别取 1.0、1.12、1.26 和 1.39。这里必须指出: 如果把静态拉伸强度  $f_t$  看成是  $f_c$  的线性函数, 那么该方法所产生的结果与 NDRC 的结果非常类似。

防止痂斑破坏和穿透的最小混凝土靶板厚度可由以下方程估算

$$\frac{h_s}{d} = \begin{cases} 5.0 \frac{x}{d} & \frac{x}{d} \leq 0.7 \\ 2.3 + 1.74 \frac{x}{d} & \frac{x}{d} > 0.7 \end{cases} \quad (12b)$$

$$\frac{h_p}{d} = \begin{cases} 3.6 \frac{x}{d} & \frac{x}{d} \leq 3.5 \\ 1.4 + 1.58 \frac{x}{d} & \frac{x}{d} > 3.5 \end{cases} \quad (12c)$$

### (13) Adeli-Amin 公式

基于文献[5]得到的试验数据,并利用量纲一的冲击因子  $I$  和最小二乘法, H. Adeli 等<sup>[27]</sup> 建议了预估混凝土侵彻深度的两个方程,即

$$\frac{x}{d} = 0.0416 + 0.1698I - 0.0045I^2 \quad (13a)$$

$$\frac{x}{d} = 0.0123 + 0.1960I - 0.0080I^2 + 0.0001I^3 \quad (13b)$$

防止痂斑破坏和穿透的最小厚度可由下面的方程来预估

$$\frac{h_s}{d} = 1.8685 + 0.4035I - 0.0114I^2 \quad (13c)$$

$$\frac{h_p}{d} = 0.9060 + 0.3214I - 0.0106I^2 \quad (13d)$$

这些公式适用的参量范围:  $27\text{m/s} \leq v_i \leq 312\text{m/s}$ ,  $0.7 \leq h/d \leq 18$ ,  $d \leq 12\text{m}$ ,  $0.24\text{kg} \leq W \leq 756\text{kg}$ ,  $0.3 \leq I \leq 21$ ,  $x/d \leq 2.0$ 。

### (14) CEA/EDF 穿透公式

C. Berriaud 等<sup>[19]</sup> 推导了预测钢筋混凝土靶板低速穿透的所谓 CEA/EDF (法国原子能委员会/法国电力公司) 公式。该公式的研发为法国钢弹撞击混凝土靶板实验计划的一部分。CEA/EDF 公式可以表达为

$$h_p = 0.3083 f_c^{-3/8} \left[ \frac{M}{d} \right]^{0.5} v_i^{3/4} \quad (14a)$$

在上述方程中,混凝土的密度取为  $2500\text{kg/m}^3$ , 单向钢筋量在  $0.8\% \sim 1.5\%$  之间。文献[4~5]注意到钢筋量可能对穿透厚度有很大的影响。因此,方程(14a)不适用于钢筋量在所陈述的范围之外的混凝土结构。另外两个 CEA/EDF 公式直接预测穿透速度,即

$$v_p^2 = 1.7 f_c \rho_t^{-1/3} \left[ \frac{dh^2}{M} \right]^{4/3} \quad (14b)$$

$$v_p^2 = 1.7 f_c \rho_t^{-1/3} \left[ \frac{dh^2}{M} \right]^{4/3} (r + 0.3) \quad (14c)$$

式中:  $\rho_t$  是混凝土密度,  $\text{kg/m}^3$ 。这两个方程的区别在于方程(14c)考虑了钢筋量对穿过程的影响。方程(14a)~(14c)适用范围:  $20\text{m/s} \leq v_i < 200\text{m/s}$ ,  $0.3 < h/d < 4$ ,  $30\text{MPa} < f_c < 45\text{MPa}$ , 弯曲钢筋量(each-way-each-face)  $r$  在  $0 \sim 4\%$  之间。

### (15) CEA/EDF/AEA 公式

P. Barr<sup>[28]</sup> 对 NDRC 公式进行了进一步的修正,其结果主要对低速撞击情况的预测有影响。 $x/d$  由下面的方程确定

$$G(x, d) = \frac{3.8 \times 10^{-5} N M v_i^{1.8}}{f_c d^{52.8}} \quad (15a)$$

其中

$$G(x, d) = 0.55 \frac{x}{d} - \left[ \frac{x}{d} \right]^2 \quad \frac{x}{d} \leq 0.22 \quad (15b)$$

$$G(x, d) = \left[ \frac{x}{2d} \right]^2 + 0.0605 \quad 0.22 < \frac{x}{d} \leq 2 \quad (15c)$$

$$G(x, d) = \frac{x}{d} - 0.9395 \quad \frac{x}{d} > 2 \quad (15d)$$

CEA/EDF/AEA 公式适用的参量范围:  $15\text{m/s} < v_i < 300\text{m/s}$ ,  $22\text{MPa} < f_c < 44\text{MPa}$ ,  $5000\text{kg/m}^3 < M/d^3 < 200000\text{kg/m}^3$ 。

对固体弹丸撞击混凝土靶板而言,防止靶板背面痂斑破坏的最小厚度可由下面的方程预估<sup>[4,28]</sup>

$$\frac{h_s}{d} = 5.3 G^{1/3} \quad (15e)$$

式中:  $G$  由方程 (15a) 计算。该方程适用的参量范围:  $29\text{m/s} < v_i < 238\text{m/s}$ ,  $1500\text{m/s} < M / (d^2 h_s) < 40000\text{kg/m}^3$ ,  $26\text{MPa} < f_c < 44\text{MPa}$ ,  $2.0 < h_s / d < 5.56$ 。

穿透速度  $v_p$  可由下面的方程预估, 即

$$v_a = 1.3 \rho_i^{1/6} k_c^{1/2} \left[ \frac{ph^2}{\pi M} \right]^{2/3} (r + 0.3)^{0.5} \left[ 1.2 - 0.6 \frac{C_r}{h} \right] \quad (15f)$$

$$v_p = \begin{cases} v_a & v_a \leq 70\text{m/s} \\ v_a \left[ 1 + \left( \frac{v_a}{500} \right)^2 \right] & v_a > 70\text{m/s} \end{cases} \quad (15g)$$

式中:  $p$  和  $C_r$  分别是弹丸的周长和钢筋的间距。当  $f_c < 37\text{MPa}$ ,  $k_c = f_c$ ; 当  $f_c \geq 37\text{MPa}$ ,  $k_c = 37\text{MPa}$ 。方程 (15f)、(15g) 适用的参量范围:  $3\text{m/s} < v_p < 345\text{m/s}$ ,  $200\text{kg/m}^3 < M / (p^2 h) < 50000\text{kg/m}^3$ ,  $22\text{MPa} < f_c < 52\text{MPa}$ ,  $0.2 < p / (\pi h) < 2$ ,  $0.025 < M v_i^2 / (2 f_c d^3) < 30$ ,  $0.12\% < r < 0.6\%$ ; 若  $r > 0.6$ , 则取  $r = 0.6$ ;  $0.12 < C_r / h < 0.49$ , 若  $C_r$  未知或  $C_r / h > 0.49$ , 则取  $C_r / h = 0.49$ 。

### 3 规范指南及讨论

现有的众多的冲击防护设计指南<sup>[4, 28~32]</sup> 都建议使用经验方法来进行侵彻评估。美国陆军手册 M-5-855-1<sup>[29]</sup> 建议使用陆军工程兵公式 (ACE, 方程 (2a)) 来预测侵彻深度。而美国空军手册 ESL-TR-87-57<sup>[31]</sup> 则建议, 使用修正国防委员会公式 (NDRC, 方程 (3a) ~ (3d)) 来预测侵彻深度, 使用陆军工程兵公式 (方程 (2c)、(2b)) 来预测痂斑破坏和穿透。最新的英国军用手册<sup>[32]</sup> 使用 CEA/EDF/AEA 公式 (方程 (15a) ~ (15d) 和方程 (15e)) 来预测侵彻深度和痂斑破坏, 但用 CEA/EDF 公式 (方程 (14)) 来预测穿透。核工业部门也建议使用 CEA/EDF/AEA 公式 (方程 (15a) ~ (15d)、方程 (15e) 和方程 (15f) ~ (15g)) 来预测侵彻深度、痂斑破坏和穿透。

为了进一步检测上述经验方程的精度和有用性, 下面就英国原子能技术局 (UKAEA) 获得的实验数据<sup>[33]</sup> 和一些公认的经验公式如 NDRC、CEA/EDF 和 ACE 进行比较。

图 3(a) 给出了预测具有相同靶厚/弹径比 ( $h/d = 2.05$ ) 的钢筋混凝土靶板受平头弹丸撞击下穿透的 NDRC 公式、CEA/EDF 公式和 ACE 公式之间的比较。混凝土靶板有不同程度的弯曲钢筋,  $0 < r < 0.5\%$ 。图中也给出了英国原子能技术局获得的相应的实验数据<sup>[33]</sup>。从图可以看出, CEA/EDF 公式的预测与实验吻合得较好, 而 NDRC 公式对所有的钢筋混凝土靶板的穿透速度给出了近乎常数的值。从图也可以看出, NDRC 公式对具有较低的钢筋数量的混凝土靶板的穿透速度的预测远高于其实验值, 对具有较高的钢筋数量的混凝土靶板的穿透速度的预测远低于其实验值, 而 ACE 公式对所有不同钢筋数量的混凝土靶板穿透的预测都远远低于其相应的实验值。既然 NDRC 和 ACE 公式中没有考虑钢筋数量的影响, 得出这样的结果也就不足为奇了。

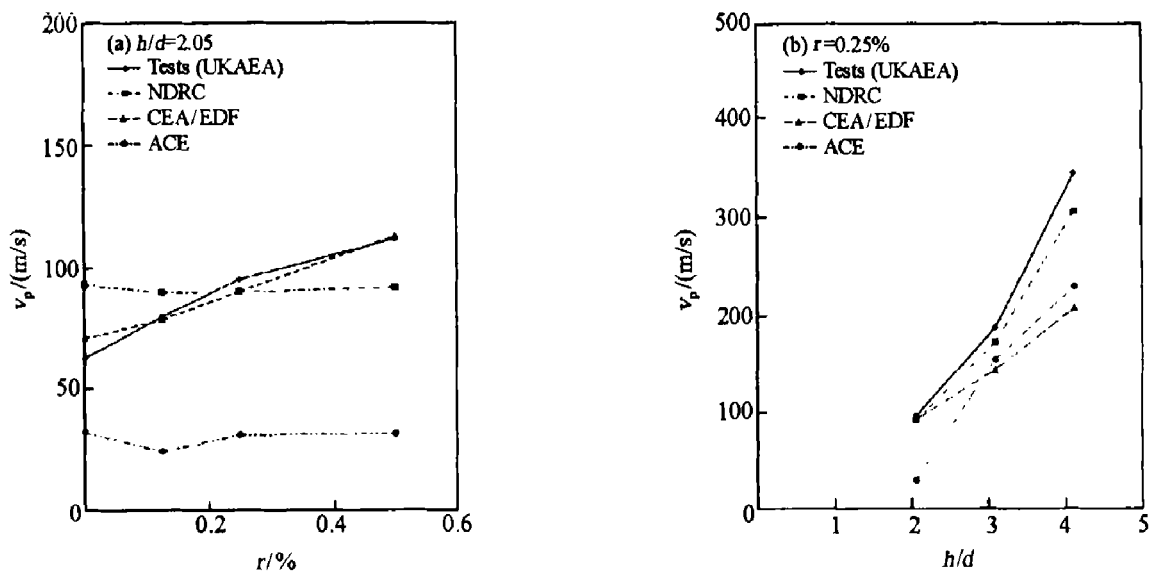


图 3 混凝土靶板在平头弹丸撞击下穿透的 NDRC、CEA/EDF 和 ACE 公式的比较

Fig.3 Comparison between NDRC, CEA/EDF and ACE for the perforation of concrete targetssubjected to impact by flat-faced projectiles

图3(b)给出了预测具有相同钢筋数量的混凝土靶板受平头弹丸撞击下穿透的 NDRC 公式、CEA/EDF 公式和 ACE 公式之间的比较。图中也给出了英国原子能技术局获得的相应的实验数据<sup>[33]</sup>。由图清楚地看出, NDRC 公式与实验吻合得较好, 而 CEA/EDF 穿透公式预测的精度随着靶板厚度的增加和冲击速度的增大而降低, ACE 公式的预测值远远小于相应的实验观测值。

图3 的比较清楚地表明, NDRC 和 CEA/EDF 公式未能给出一致的结果, 而 ACE 公式远远低估了钢筋混凝土靶板的抗穿透能力。这也说明了 NDRC、CEA/EDF 和 ACE 公式可能有严重的缺陷。

## 4 结束语

本文中对预测钢筋混凝土靶板在弹丸撞击下的响应和破坏的经验公式进行了综述, 包括预测侵入深度、痂斑破坏和穿透的经验方程, 并对国外现有的有关钢筋混凝土靶板抗弹设计和评估的准则和规范进行了评论。

结果表明: 虽然在混凝土撞击、侵入和穿透领域做了大量的工作, 发展了许多预测性经验方法, 但大多数的研究都倾向集中混凝土靶板响应行为某个特定方面, 所覆盖的冲击参量的范围是有限的。如 CEA/EDF/AEA 侵入公式(公式(15a)~(15d))的使用范围:  $15\text{m/s} < v_i < 300\text{m/s}$ ,  $22\text{MPa} < f_c < 44\text{MPa}$ ,  $5000\text{kg/m}^3 < M/d^3 < 200000\text{kg/m}^3$ 。痂斑破坏公式(公式(15e))的使用范围:  $29\text{m/s} < v_i < 238\text{m/s}$ ,  $1500\text{kg/m}^3 < M/(d^2 h_s) < 40000\text{kg/m}^3$ ,  $26\text{MPa} < f_c < 44\text{MPa}$ ,  $2 < h_s/d < 5.56$ 。穿透公式(公式(15f)~(15g))的使用范围: 当  $f_c < 37\text{MPa}$ ,  $k_c = f_c$ , 当  $f_c \geq 37\text{MPa}$ ,  $k_c = 37\text{MPa}$ ;  $3\text{m/s} < v_p < 345\text{m/s}$ ,  $200\text{kg/m}^3 < M/(p^2 h) < 50000\text{kg/m}^3$ ,  $22\text{MPa} < f_c < 52\text{MPa}$ ,  $0.2 < p/(\pi h) < 2$ ,  $0.025 < Mv_i^2/(2f_c d^3) < 30$ ,  $0.12\% < r < 0.6\%$ ; 若  $r > 0.6$ , 则取  $r = 0.6$ ;  $0.12 < C_r/h < 0.49$ , 若  $C_r$ 未知或  $C_r/h > 0.49$ , 则取  $C_r/h = 0.49$ 。

本文的结论是, 现有经验模型的不完备性和现有设计和评估准则的自身缺陷, 清楚地表明有必要在混凝土撞击、侵入和穿透这一活跃研究领域, 做进一步的实验、理论和数值模拟工作, 以便对余留问题找到令人满意的答案。

## 参考文献:

- [1] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles; a review [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(2): 141-230.
- [2] Brown S J. Energy release protection for pressurized systems; Part II Review of studies into impact/terminal ballistics [J]. Appl Mech Rev, 1986, 39(2): 177-201.
- [3] Kennedy R P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects [J]. Nucl Eng Des, 1976, 37: 183-203.
- [4] Wicks S J, Fullard K. R3 impact assessment procedures volume 3: Concrete target response[R]. TD/SEB/REP/4026/92, 1992.
- [5] Sliter G E. Assessment of empirical concrete impact formulas[J]. ASCE J Structural Division, 1980, 106: 1023-1045.
- [6] Broadhouse B J, Slater I J. R3 validation and development; Review of the cheddar and winfrith concrete impact tests [R]. AEA Technology, SPD/D(96)526, 1996.
- [7] Sinclair A C E. Tests on a reinforced concrete floor at Rogerstone power station [R]. TD/SEB/REP/4155/93, 1993.
- [8] Amirikian A. Design of protective structures [R]. Department of the Navy, Bureau of Yards and Docks, Report NT-3726, 1950.
- [9] ACE. Fundamentals of protective design [R]. Office of the Chief of Engineers, Army Corps of Engineers, Report AT1207821, 1946.
- [10] NDRC. Effects of impact and explosion [R]. Washington D C, National Defence Research Committee, Vol. 1, Summary Technical Report of Division 2, 1946.
- [11] Industrial engineering study to establish safety design criteria for use in engineering of explosive facilities and operations wall response [R]. New Jersey, Dover, Picatinny Arsenal, APMED, Report Submitted to Process Engineering Branch, 1963.
- [12] TM 5-1300. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions [Z]. Washington D C; Department of the Army, 1965.
- [13] Gwaltney R C. Missile generation and protection in light-water-cooled power reaction plants [R]. USA, Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL-USTC-22, 1968.
- [14] Linderman R B. Design of structures for missile impact [R]. San Francisco, Bechtel Power Corporation, BC-TOP-9, Rev. 1, 1973.
- [15] Rotz J V. Evaluation of tornado missile impact effects on structures [A]. Proceedings of a Symposium on Tornadoes, Assessment of Knowledge and Implications for Man[C]. Texas, Lubbock: Texas Tech University, 1976.
- [16] Rotz J V. Results of missile impact tests on reinforced concrete panels [A]. Second ASCE Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities[C]. New Orleans, La, 1975.
- [17] Jankov Z D, Shanahan J A, White M P. Missile tests of quarter-scale reinforced concrete barriers [A]. Proceedings of a Symposium on Tornadoes, Assessment of Knowledge and Implications for Man[C]. Texas, Lubbock: Texas Tech University, 1976.
- [18] Kar A K. Local effects of tornado generated missiles [J]. ASCE J Structural Division, 1978, 104(ST5): 809-816.

- [19] Berriaud C, Sokolovsky A, Gueraud R, et al. Local behaviour of reinforced concrete walls under missile impact [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1978, 45: 457—469.
- [20] Kavyrchine M, Astruc M. Study on the perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles-experimental study, Part I [J]. *Nucl Eng & Des*, 1977, 41: 91—102.
- [21] Fiquet G, Dacquet S. Study on the perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles-experimental study, Part II [J]. *Nucl Eng & Des*, 1977, 41: 103—120.
- [22] Goldstein S, Berriaud C, Labrot R. Study on the perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles-experimental study, Part III [J]. *Nucl Eng & Des*, 1977, 41: 121—128.
- [23] Degen P O. Perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles [J]. *ASCE J Struct Div*, 1980, 106 (ST7): 1623—1642.
- [24] Chang W S. Impact of solid missiles on concrete barriers [J]. *ACSE J Structural Division*, 1981, 107 (ST2): 257—271.
- [25] Haldar A, Hamieh H A. Local effect of solid missiles on concrete structures [J]. *ASCE J Structural Division*, 1984, 110(5): 948—960.
- [26] Hughes G. Hard missile impact on reinforced concrete [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 77(1): 23—25.
- [27] Adeli H, Amin A M. Local effects of impactors on concrete structures [J]. *Nucl Eng & Des*, 1985, 88: 301—317.
- [28] Barr P. Guidelines for the design and assessment of concrete structures subjected to impact [R]. UKAEA SRD R 439, 1990.
- [29] TM-5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons [Z]. Washington D C: US Department of the Army, 1986.
- [30] TM-5-1300, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions [Z]. Washington D C: US Department of the Army, 1990.
- [31] ESL-TR-57, Protective Construction Design Manual [Z]. Florida: US Air Force Engineering Services Laboratory, 1987.
- [32] Mays G C, Williams M S. Assessment, strengthening, hardening, repair and demolition of structures [Z]. London: Ministry of Defence, Military Engineering Volume IX, 1992.
- [33] Bainbridge P. World impact data — S R D impact data base version pre 3i [R]. CCSD/CIWP(88)107(P), 1988.

## Empirical equations for the impact response of concrete targets

WEN He-ming

*(Laboratory for Mechanical Behaviour and Design of Materials,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)*

**Abstract:** The development of empirical equations for the responses of reinforced concrete structures struck by missiles is reviewed. The existing codes for impact assessment and design of reinforced concrete targets are discussed. It is concluded that the existing empirical models are not sufficient and further work for improving the computational codes should be supported.

**Key words:** mechanics of explosion; impact response; review; reinforced concrete targets; missiles; penetration; scabbing; perforation