

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0068

混凝土骨料对高速侵彻弹体质量侵蚀的影响分析*

欧阳昊¹, 陈小伟^{2,3}

(1. 中国工程物理研究院计算机应用研究所, 四川绵阳 621999;

2. 北京理工大学前沿交叉科学研究院, 北京 100081;

3. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 高速侵彻时, 弹靶之间发生强烈的局部作用, 引起弹体头部发生质量侵蚀, 从而影响弹体的侵彻性能。在弹体侵彻过程中, 混凝土中的骨料对弹体的质量侵蚀有显著影响。本文通过对高速侵彻混凝土弹体的质量侵蚀实验数据进行分析, 进一步分析讨论了混凝土骨料对弹体质量侵蚀的影响。将混凝土靶体视为骨料和砂浆基质混合的二相复合材料, 引入混凝土骨料的体积分数 χ 和骨料的剪切强度 τ_1 代替骨料的莫氏硬度 H , 给出无量纲骨料修正因子 β , 建立了修正的弹体质量损失工程模型。模型预测结果与现有的实验数据符合得很好, 更准确地表征了混凝土骨料对弹体质量损失的影响。

关键词: 高速侵彻; 质量侵蚀; 混凝土骨料; 体积分数; 剪切强度

中图分类号: O385 **国标学科代码:** 13025 **文献标志码:** A

动能弹高速侵彻混凝土时, 弹靶界面的高温、高压以及高速摩擦作用使得弹体发生明显的质量侵蚀现象^[1]。质量侵蚀引起弹体头形钝化, 随着侵彻速度的提高, 侵蚀效应变得愈加显著, 甚至可能导致弹体发生动态屈曲、弯曲和破裂等结构破坏失效以及诱发弹道倾斜等不稳定性, 严重影响弹体的侵彻性能^[2-6]。因此, 研究高速侵彻混凝土弹体的侵蚀效应对弹体的结构设计和优化具有重要意义。

Forrestal 等^[2]和 Frew 等^[7]开展了不同弹材的尖卵形弹体高速侵彻混凝土的实验, 首次关注到弹体的质量侵蚀现象, 完整地记录了弹体的质量损失, 并发现实验弹体头部表面有熔化和剧烈刮擦的迹象。另外, 何翔等^[5]、杨建超等^[6]和 Mu 等^[8]也开展了弹体高速侵彻混凝土的实验, 发现类似的实验现象。对文献 [2] 获得的实验数据进行分析, Silling 等^[9]发现, 当撞击速度低于约 1 km/s 时, 侵彻后弹体的质量损失与初始动能存在线性关系, 当撞击速度高于约 1 km/s 时, 侵彻后弹体质量损失基本保持不变。Chen 等^[10-11]进一步综合分析文献 [2,7] 的实验结果, 发现侵彻后的剩余弹头仍接近尖卵形, 同时指出混凝土骨料硬度对弹体的质量损失有显著影响。Jones 等^[12]假设弹体的质量损失全部来源于侵彻过程中弹靶间剧烈摩擦造成的弹头表面材料的熔化脱落, 建立了相应的弹体质量损失的理论模型。He 等^[13]基于 Jones 等^[12]的工作在其模型中引入了骨料硬度的影响, 得到了考虑骨料影响的弹体质量损失预测公式。

本文进一步深入分析混凝土骨料对弹体侵蚀效应的影响, 将混凝土视为骨料和砂浆混合的二相复合材料, 采用混凝土骨料体积分数 χ 和骨料剪切强度 τ_1 代替骨料莫氏硬度 H , 引入无量纲骨料修正因子 β , 建立 β 修正的弹体质量损失工程预测模型, 并基于泰勒展开, 推导 Silling 关系中弹体质量损失与弹体初始动能的线性系数的解析表达式。

1 骨料修正的弹体质量损失模型

通过拟合实验数据, Silling 等^[9]得出当初始撞击速度 $v_0 \leq 1$ km/s 时弹体的质量损失与弹体的初始动能满足线性关系, 弹体的相对质量损失 δ 可表示为

* 收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-05-04

第一作者: 欧阳昊(1989—), 男, 博士研究生, 助理研究员, oyhustc1989@163.com;

通信作者: 陈小伟(1967—), 男, 博士, 教授, chenxiaoweintu@bit.edu.cn。

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

式中: 线性系数 C 通过实验数据拟合得到, 单位为 s^2/km^2 。

Jones 等^[12] 假设弹体的质量损失全部来源于侵彻过程中弹靶间剧烈摩擦造成的弹体头部表面材料熔化脱落, 并认为摩擦功全部转化为热, 且全部用于熔化弹体表面材料, 得到弹体质量损失表达式为:

$$\Delta M = \frac{\pi d^2 \tau_0 N_0^a Z}{4\kappa Q} \quad (2)$$

式中: κ 为热功当量; Q 为单位质量弹体材料的熔化热, 在模型中, Q 取纯铁的熔化热, 则 $\kappa Q = 1\,264.8 \times 10^3 \text{ J/kg}$; d 为弹体直径; Z 为计及质量损失的弹体侵彻深度; τ_0 为靶体的剪切强度, 根据相应的侵彻深度实验数据拟合得到; 对于任意弹体, 弹头的无量纲纵截面面积 N^a 为

$$N^a = \frac{8}{d^2} \int_0^b y \, dx \quad (3a)$$

式中: b 为弹头长度, x 为弹体轴向坐标, y 为弹头轮廓线的函数; 特殊地, 对于尖卵形弹体, 式 (3a) 可简化为:

$$N^a = 4\psi^2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{1}{2\psi} \right) - (2\psi - 1) \sqrt{4\psi - 1} \quad (3b)$$

式中: $\psi = s/d$ 为尖卵形弹头的曲径比, s 为尖卵形母线的曲率半径; 当 $\psi = \psi_0$ (ψ_0 初始弹头的曲径比) 时, $N^a = N_0^a$ 为初始弹头的无量纲纵截面面积。

He 等^[13] 在 Jones 模型的基础上, 考虑骨料的影响, 引入无量纲骨料硬度 η , 得到 η 修正的弹体质量损失表达式:

$$\Delta M = \eta \frac{\pi d^2 \tau_0 N_0^a Z}{4\kappa Q} \quad (4)$$

式中: $\eta = H/H_0$, H 为骨料的莫氏硬度, $H_0 = 7$ 为参考硬度, η 为骨料莫氏硬度的相对值。当骨料为石英石时, $\eta = 1$; 骨料为石灰石时, $\eta = 3/7 \approx 0.43$ 。He 等^[13] 在其修正模型中采用 Tresca 准则估计混凝土的剪切强度为 $\tau_0 = f_c / \sqrt{3}$ ^[1, 14, 15], 并取 Z 为刚性弹的侵彻深度:

$$Z = \frac{2M_0}{\pi d^2 N_0^* \rho_t} \ln \left(1 + \frac{\rho_t N_0^* v_0^2}{S f_c} \right) \quad (5)$$

式中: ρ_t 为靶体密度; f_c 为靶体无约束抗压强度; S 是与 f_c 相关的无量纲经验常数, 取 $S = 82.6 f_c^{-0.544}$ 或 $S = 72.0 f_c^{-0.5}$ ^[1, 15]; 弹头形状因子 N^* 为:

$$N^* = \frac{8}{d^2} \int_0^b \frac{y y'^3}{1 + y'^2} \, dx \quad (6a)$$

对于尖卵形弹体, 上式可简化为:

$$N^* = \frac{1}{3\psi} - \frac{1}{24\psi^2} \quad (6b)$$

当 $\psi = \psi_0$ 时, $N^* = N_0^*$ 为初始弹头形状因子。

将式 (5) 代入式 (4), He 等^[13] 得到 η 修正的弹体相对质量损失的预测公式:

$$\delta = \frac{\eta \tau_0 N_0^a}{2 \rho_t N_0^* \kappa Q} \ln \left(1 + \frac{\rho_t N_0^* v_0^2}{S f_c} \right) \quad (7)$$

式中: N_0^* 为初始弹头形状因子。

对比式 (4) 和式 (2) 可以发现, He 等^[13] 模型仅仅是通过引入骨料莫氏硬度的相对值 η 来修正弹体的质量损失。而莫氏硬度 H 本身只是按照十种矿物之间相对硬度顺序表示的值, 并非绝对硬度值。因此, He 等^[13] 考虑骨料影响的弹体质量损失模型较为粗糙。事实上, 弹体高速侵彻混凝土时, 弹靶之间发生

强烈的局部作用, 因此考虑局部效应和混凝土靶体的非均匀性, 式(2)中混凝土的剪切强度 τ_0 受到骨料的影响。式(4)可以视为将混凝土的剪切强度 τ_0 修正为 $\eta\tau_0$ 。本文将混凝土靶体视为骨料和砂浆的二相混合材料, 根据 Hill 等人^[16]提出的混合物与各相材料之间的关系, 引入骨料的剪切强度 τ_1 和体积分数 χ , 对混凝土靶体的剪切强度由 τ_0 修正为 τ_R :

$$\frac{1}{\tau_R} = \frac{1-\chi}{\tau_0} + \frac{\chi}{\tau_1} \tag{8a}$$

即

$$\tau_R = \frac{1}{(1-\chi) + \chi \frac{\tau_0}{\tau_1}} \tau_0 = \beta \tau_0 \tag{8b}$$

式中: χ 为骨料的体积分数, τ_1 为骨料的剪切强度。由于骨料对于混凝土整体的无约束抗压强度 f_c 影响较小, 因此将 $\tau_0 = f_c / \sqrt{3}$ 视为砂浆的剪切强度。由式(8b)可得到无量纲骨料修正因子 β , β 与骨料的体积分数 χ 以及砂浆和骨料的相对强度 τ_0/τ_1 相关。

$$\beta = \frac{1}{(1-\chi) + \chi \frac{\tau_0}{\tau_1}} = \frac{1}{(1-\chi) + \chi \frac{f_c}{\sqrt{3}\tau_1}} \tag{9}$$

则修正的弹体相对质量损失可表示为:

$$\delta_R = \frac{\beta \tau_0 N_0^a}{2 \rho_t N_0^* \kappa Q} \ln \left(1 + \frac{\rho_t N_0^* v_0^2}{S f_c} \right) \tag{10}$$

式(10)给出了本文考虑骨料影响的弹体相对质量损失的解析表达式, 其中 $\beta\tau_0$ 是考虑局部效应的混凝土剪切强度, 将混凝土视为骨料和砂浆的混合材料, 从而引入骨料对弹体质量损失的影响。

图 1 给出了不同骨料含量 χ 和骨料剪切强度 τ_1 下的 $\beta-f_c$ 曲线。其中图 1(a)表示强度较高的石英石骨料(取骨料体积分数为 40%、50%、60%, 剪切强度为 20 MPa、30 MPa); 图 1(b)表示强度较低的石灰石骨料(取骨料体积分数为 40%、50%、60%, 剪切强度为 8 MPa、10 MPa)。从图 1 可以看出, 对于相同体积分数和强度的骨料, 骨料修正因子 β 随着靶体无约束抗压强度 f_c 的增大而减小。当骨料强度大于靶体强度时, $\beta > 1$; 当骨料强度小于靶体强度时, $\beta < 1$ 。而 He 等^[13]的骨料修正因子 η 只与骨料自身的硬度相关, 与靶体强度无关, 这会导致: 当高强度骨料、低强度靶体时, 其模型会低估骨料的影响, 从而低估弹体的质量损失; 而当低强度骨料、高强度靶体时, 其模型会高估骨料的影响, 从而高估弹体的质量损失。

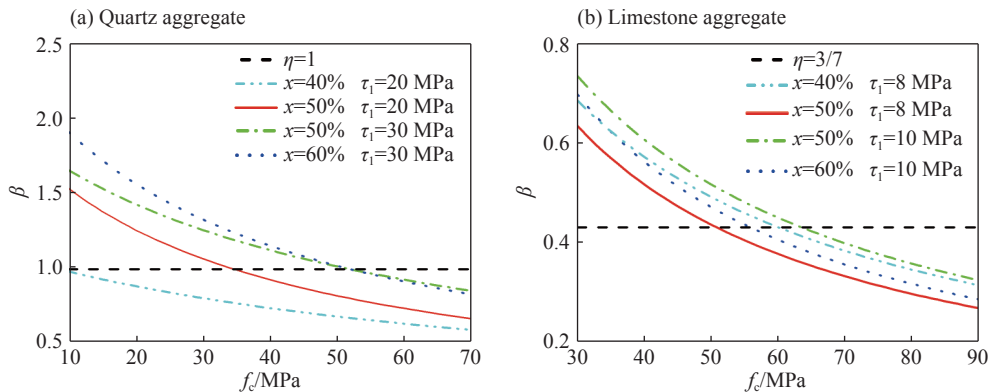


图 1 无量纲骨料修正因子 β

Fig. 1 Dimensionless modified factor β

式(1)表明, 当弹体撞击速度低于某一临界值时, 弹体的质量损失与初始动能成正比。类似 Wu 等^[17]的分析, 可给出弹体的上限撞击速度 v_0^* 以及比例系数 C 的解析式。将式(10)进行泰勒级数展开, 并和式(1)对比即可得到比例系数 C 为:

$$C = \frac{\beta N_0^a}{\sqrt{3\kappa QS}} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{N_0^* \rho_t}{S f_c} v_0^2 + \dots \right) \quad (11)$$

若式 (11) 中的一阶项 $\frac{1}{2} \frac{N_0^* \rho_t}{S f_c} v_0^2 < \frac{1}{5}$, 即 $v_0 < v_0^c = \sqrt{2S f_c / (5N_0^* \rho_t)}$ 时, 仅保留其常数项, 同时考虑忽略了高阶项会使得 C 值偏大, 可取比例系数 C 的解析式为:

$$C = \frac{0.8\beta N_0^a}{\sqrt{3\kappa QS}} \quad (12)$$

2 实验验证

表 1 给出了尖卵形弹体高速侵彻混凝土实验的相关参数^[2,6-7]。本节基于各组实验数据对弹体高速侵彻混凝土靶的质量损失模型进行验证。

表 1 实验弹靶参数

Table 1 Parameters of targets and projectiles

工况	f_c/MPa	$\rho_t/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	骨料	H	弹体材料	Y_p/MPa	$\rho_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	m_0/kg	d/mm	L/d	ψ_0
1-1	13.5	2 000						0.064	12.9	6.88	3
1-2	13.5	2 000						0.064	12.9	6.88	4.25
2-1	21.6	2 000	石英石	7	4340 钢	1 481	7 850	0.064	12.9	6.88	3
2-2	21.6	2 000						0.064	12.9	6.88	4.25
3	62.8	2 300						0.478	20.3	10	3
4	51.0	2 300						1.6	30.5	10	10
5	58.4	2 320			4340 钢/AerMet100	1 481/1 820		0.478	20.3		3
6	58.4	2 320			4340 钢/AerMet100	1 481/1 820		1.62	30.5		3
7	34.8	2 300	石灰石	3	60Si2 Mn/Tc4	1 300/1 030	7 850	0.155	14	10	4.25
8	48.6	2 300			60Si2 Mn/20#钢	1 300/450		0.155	14		4.25
9	61.3	2 300			60Si2 Mn/45#钢	1 300/680		0.155	14		4.25
10	76.4	2 300			60Si2 Mn/35CrMnSi	1 300/1 540		0.155	14		4.25

在文献 [2, 6-7] 中未直接给出骨料体积分数和剪切强度相关实验参数。根据通常混凝土骨料的体积分数在 40%~60% 之间, 本文取骨料体积分数 $\chi=50\%$ 。同时, 利用工况 1-1 和工况 6 的弹体质量损失实验数据拟合得到石英石和石灰石骨料的剪切强度分别为 20 和 8 MPa, 进而应用于其他工况。由式 (9) 计算得到所有工况的不同 f_c 值下的骨料修正因子 η 和 β , 见表 2。

表 2 无量纲骨料修正因子 η 和 β

Table 2 Dimensionless modified factors η and β

f_c/MPa	骨料类型	η	β	f_c/MPa	骨料类型	η	β	f_c/MPa	骨料类型	η	β
13.5	石英石	1	1.44	62.8	石英石	1	0.71	58.4	石灰石	0.43	0.38
21.6	石英石	1	1.23	34.8	石灰石	0.43	0.57	61.3	石灰石	0.43	0.37
51	石英石	1	0.81	48.6	石灰石	0.43	0.44	76.4	石灰石	0.43	0.31

图 2~13 给出了本文 β 修正的弹体质量损失模型与 He 等^[13] 的 η 修正模型的预测结果和实验数据的对比。正如前文分析, 在工况 1-1 和 1-2, 即高强度骨料、低强度靶体时, He 等^[13] 的 η 修正模型低估了弹体质量损失, 如图 2 和图 3; 而在工况 10, 即低强度骨料、高强度靶体时, He 等^[13] 的 η 修正模型高估了弹体质量损失, 如图 13。表 3~4 给出两组高强度骨料、低强度靶体和低强度骨料、高强度靶体工况 (工况 1-2 和工况 10) 的模型预测结果误差数据对比。从预测结果来看, 本文 β 修正的弹体质量损失模型与

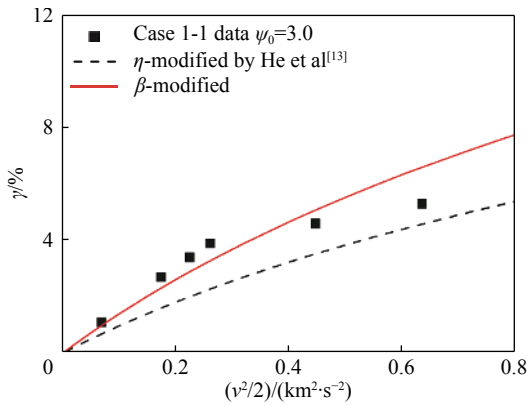


图 2 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 1-1)

Fig. 2 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 1-1)

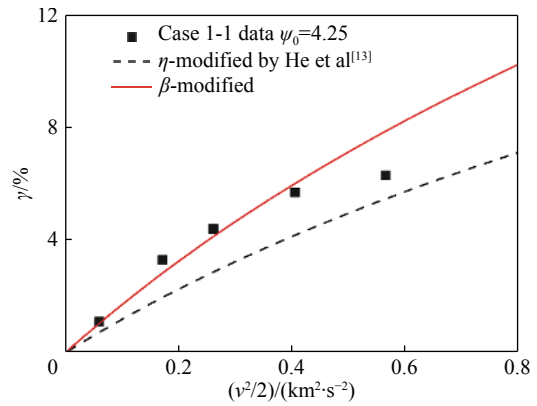


图 3 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 1-2)

Fig. 3 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 1-2)

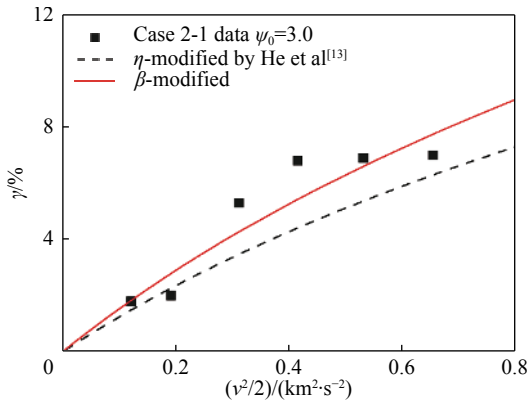


图 4 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 2-1)

Fig. 4 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 2-1)

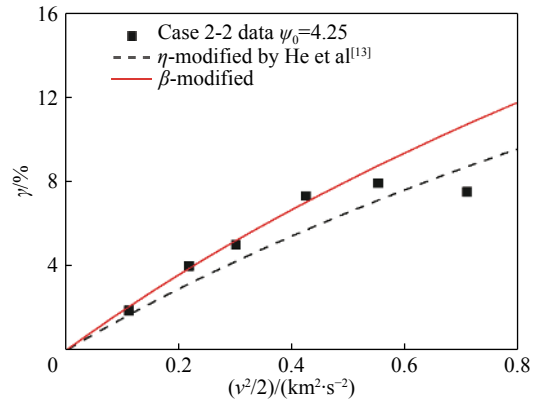


图 5 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 2-2)

Fig. 5 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 2-2)

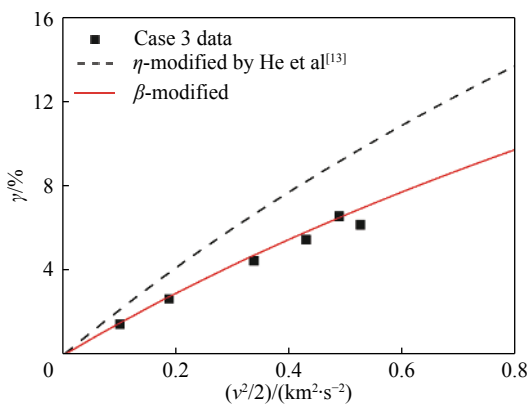


图 6 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 3)

Fig. 6 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 3)

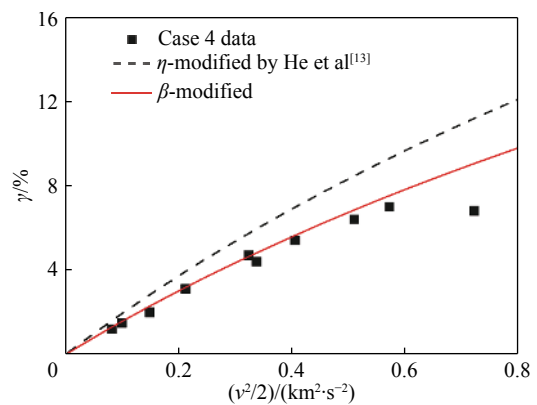


图 7 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 4)

Fig. 7 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 4)

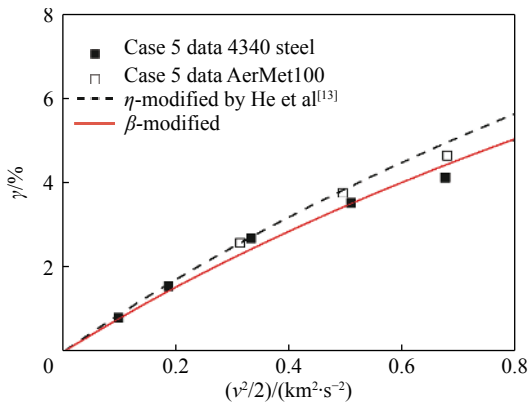


图 8 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 5)

Fig. 8 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 5)

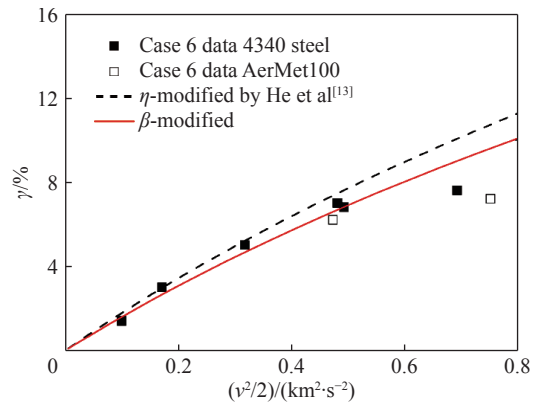


图 9 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 6)

Fig. 9 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 6)

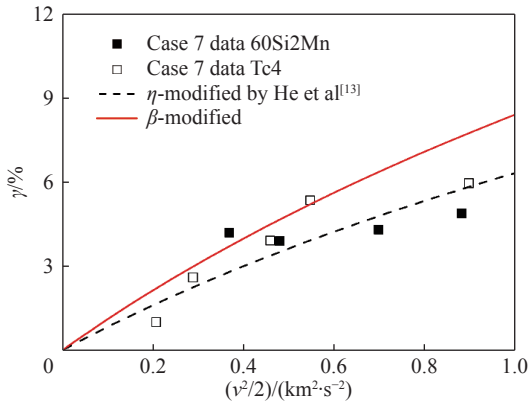


图 10 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 7)

Fig. 10 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 7)

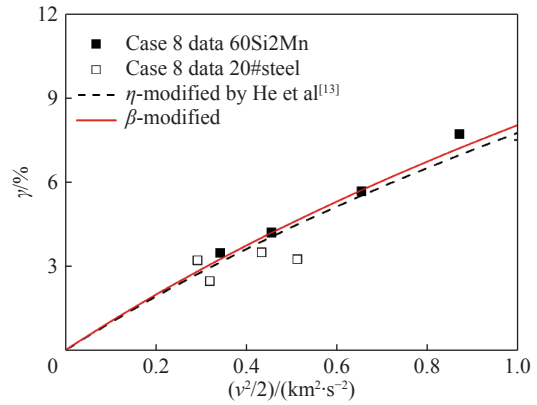


图 11 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 8)

Fig. 11 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 8)

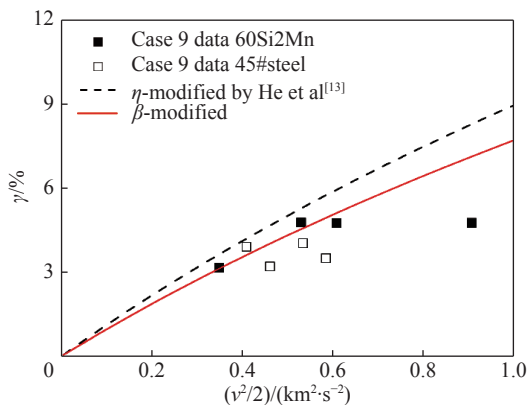


图 12 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 9)

Fig. 12 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 9)

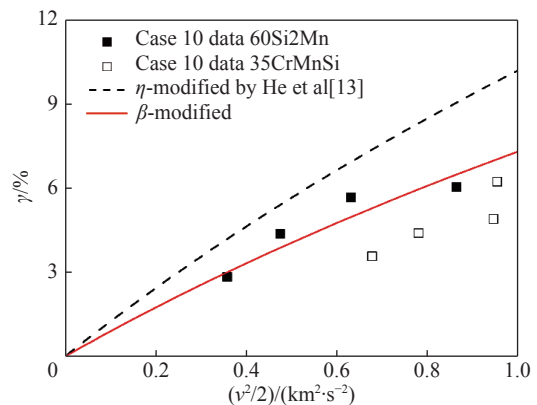


图 13 弹体相对质量损失预测结果与实验数据对比(工况 10)

Fig. 13 Predicted relative mass loss of the projectile compared with experimental data (Case 10)

表 3 工况 1-2 的模拟结果与实验对比

Table 3 Comparison of experimental and simulation results at case 1-2

工况1-2弹速/(m·s ⁻¹)	345	585	722	900	1 063
He等 ^[13] 模型误差	-33%	-41%	-35%	-27%	-13%
本文模型误差	-5%	-15%	-7%	6%	25%

表 4 工况 10 的模拟结果与实验对比

Table 4 Comparison of experimental and simulation results at case 10

工况10弹速/(m·s ⁻¹)	847	975	1 124	1 165	1 250	1 315	1 376	1 382
He等 ^[13] 模型误差	46%	23%	21%	102%	88%	49%	98%	57%
本文模型误差	5%	-11%	-12%	45%	35%	7%	42%	13%

现有的实验数据较符合, 预测结果优于 He 等^[13]的 η 修正模型, 更为准确地表征了骨料对弹体质量损失的影响。

图 14~25 给出了在较低速度 $v_0 < v_0^c = \sqrt{2S f_c / 5N_0^* \rho_t}$ 下, 弹体相对质量损失的实验值以及 Wu 等^[17]的线性近似解和本文的 β 修正的线性近似解的对比。从图中可以看出, 通过 β 修正的线性近似解也更接近实验值。

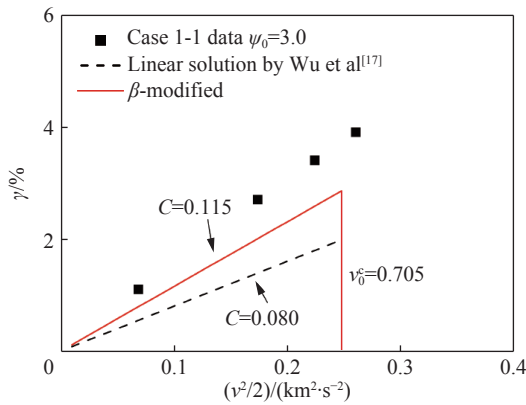


图 14 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 1-1)

Fig. 14 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 1-1)

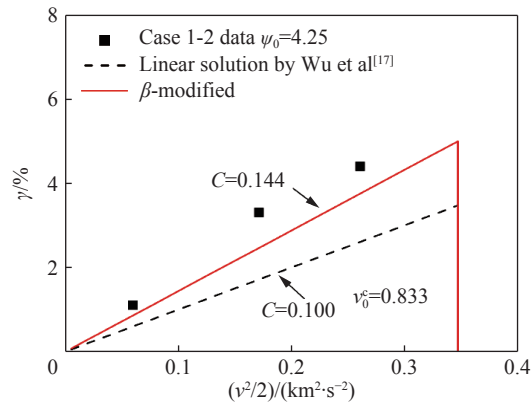


图 15 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 1-2)

Fig. 15 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 1-2)

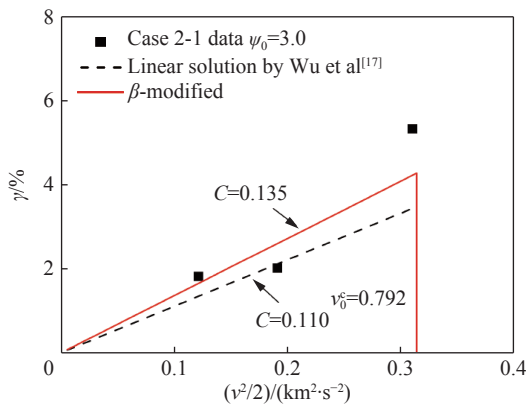


图 16 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 2-1)

Fig. 16 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 2-1)

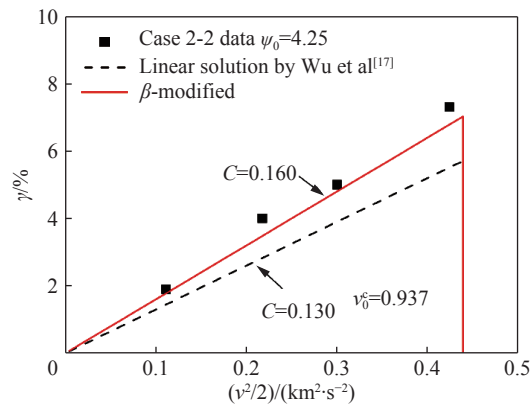


图 17 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 2-2)

Fig. 17 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 2-2)

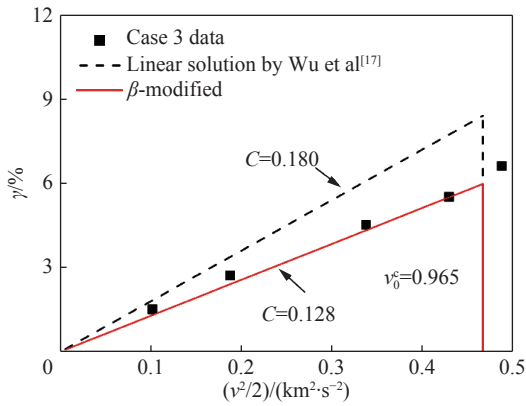


图 18 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 3)

Fig. 18 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 3)

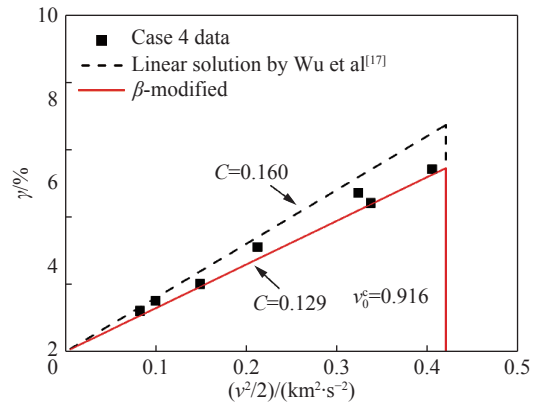


图 19 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 4)

Fig. 19 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 4)

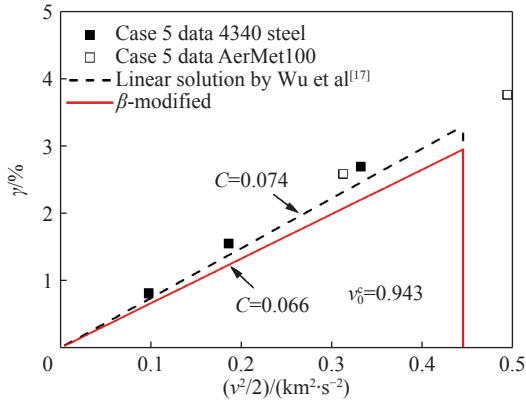


图 20 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 5)

Fig. 20 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 5)

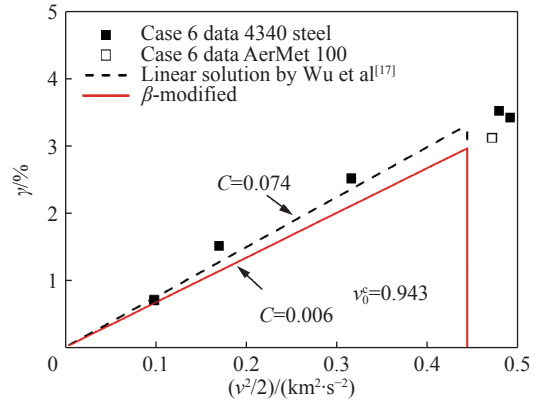


图 21 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 6)

Fig. 21 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 6)

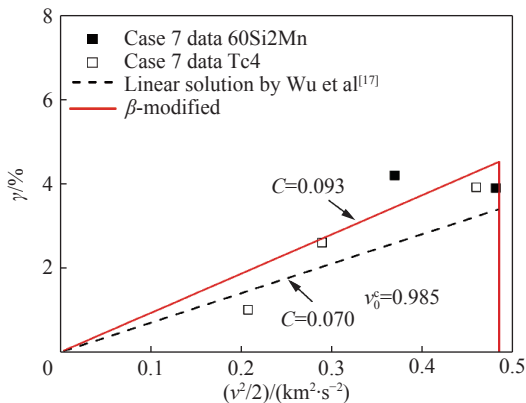


图 22 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 7)

Fig. 22 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 7)

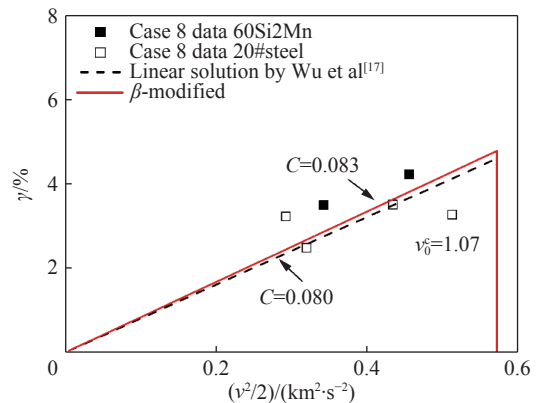


图 23 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 8)

Fig. 23 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 8)

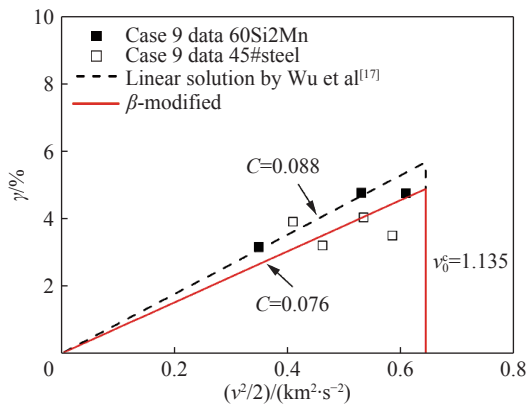


图 24 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 9)

Fig. 24 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 9)

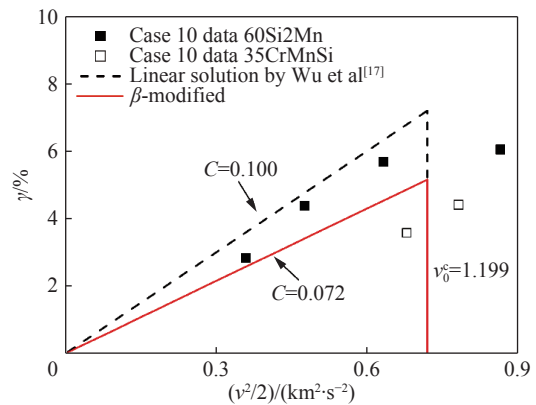


图 25 低速下弹体相对质量损失线性近似解与实验数据对比(工况 10)

Fig. 25 Experimental data and the linear approximate solution at low impact velocity (Case 10)

值得说明的是, 本文为获得弹体质量损失的解析式忽略了弹体头部形状的钝化, 而初始形状的无量纲纵截面面积 N^a 相对偏大, 会高估弹体的质量损失, 因此通过拟合实验数据得到的骨料剪切强度会相对偏低。后续可通过进一步考虑弹体的头形钝化, 建立相应的弹体质量损失数值模型。

3 结 语

本文考虑混凝土骨料影响的弹体损失工程模型预测结果与实验数据较吻合, 模型的有效性得到验证。将混凝土靶体视为骨料和砂浆的二相复合材料, 引入混凝土骨料的体积分数 χ 和骨料的剪切强度 τ_1 代替骨料的莫氏硬度 H , 给出无量纲骨料修正因子 β , 更好地表征了混凝土骨料对弹体质量损失的影响, 体现了混凝土骨料和砂浆对弹体质量侵蚀的耦合作用, 物理意义更加明确。根据 β 修正的弹体相对质量损失表达式, 基于泰勒级数展开, 给出了 Silling 关系中弹体质量损失与弹体初始动能的线性系数的解析式。

参考文献:

- [1] FORRESTAL M J, ALTMAN B S, CARGILE J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395–405. DOI: 10.1016/0734-743X(94)80024-4.
- [2] 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. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00048-F.
- [3] 孔祥振, 方秦, 吴昊, 等. 弹体高速侵彻混凝土靶质量损失和头形钝化的数值模拟研究 [J]. *固体力学学报*, 2015, 36(S1): 65–73.
KONG Xiangzhen, FANG qin, WU Hao, et al. Numerical study on mass loss and nose-blunting for the projectile during the high-speed penetration on concrete target [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2015, 36(S1): 65–73.
- [4] 刘志林, 王晓鸣, 李文彬, 等. 考虑侵蚀效应的卵形弹丸侵彻混凝土介质模型研究 [J]. *弹道学报*, 2017, 29(2): 19–25.
LIU Zhilin, WANG Xiaoming, LI Wenbin, et al. Model of ogive-nose projectile penetrating concrete target considering effect of mass loss and nose blunting [J]. *Journal of Ballistics*, 2017, 29(2): 19–25.
- [5] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土效应的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 1–6. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
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. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0001-06.
- [6] 杨建超, 何翔, 金栋梁. 弹体高速侵彻混凝土质量侵蚀特性试验研究 [J]. *防护工程*, 2010, 32(1): 6–10.
YANG Jianchao, HE Xiang, JIN Dongliang. Experimental investigation into mass loss of projectiles that penetrate concrete

- targets at high velocity [J]. *Protective Engineering*, 2010, 32(1): 6–10.
- [7] 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. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00008-6.
- [8] MU Z C, ZHANG W. An investigation on mass loss of ogival projectiles penetrating concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(8–9): 770–778. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.04.002.
- [9] 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. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.10.008.
- [10] CHEN X W, HE L L, YANG S Q. Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator [J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2010, 29(1): 7–17. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2009.07.006.
- [11] 陈小伟, 杨世全, 何丽灵. 动能侵彻弹体的质量侵蚀模型分析 [J]. *力学学报*, 2009, 41(5): 739–747. DOI: 10.3321/j.issn:0459-1879.2009.05.017.
- CHEN Xiaowei, YANG Shiquan, HE Liling. Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2009, 41(5): 739–747. DOI: 10.3321/j.issn:0459-1879.2009.05.017.
- [12] JONES S E, FOSTER J C, TONESS O A, et al. An estimate for mass loss from high velocity steel penetrators [C] // *Pressure Vessels and Piping Conference*. New York: ASME, 2002: 227–237. DOI: 10.1115/PVP2002-1149.
- [13] HE L L, CHEN X W, HE X. Parametric study on mass loss of penetrators [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 26(4): 585–597. DOI: 10.1007/s10409-010-0341-8.
- [14] CHEN X W. Dynamics of metallic and reinforced concrete targets subjected to projectile impact [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2003: 1–62.
- [15] LI Q M, CHEN X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(1): 93–116. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00037-4.
- [16] HILL R. Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1963, 11(5): 357–372. DOI: 10.1016/0022-5096(63)90036-X.
- [17] WU H, CHEN X W, HE L L, et al. Stability analyses of the mass abrasive projectile high-speed penetrating into concrete target, Part I: engineering model for the mass loss and nose-blunting of ogive-nosed projectiles [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2014, 30(6): 933–942. DOI: 10.1007/s10409-014-0090-1.

Analysis of mass abrasion of high-speed penetrator influenced by aggregate in concrete target

OUYANG Hao¹, CHEN Xiaowei^{2,3}

(1. Institute of Computer Application, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. Advanced Research Institute for Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The extreme local interaction between the projectile and target will cause mass erosion of the projectile during high-speed penetrating, and then decreases penetration performance of the penetrator. Aggregates in the concrete target will affect mass loss of the projectile obviously. Analysis about the experimental data is conducted to further discuss the effect of concrete aggregate on mass loss of the residual projectile after high speed penetration into concrete target. By assuming the concrete as a two-phase composite composed of mortar and aggregate and introducing the volume fraction and shear strength of aggregate instead of the aggregate Moh's hardness, a modified engineering model is presented to predict the mass loss of projectile by giving a dimensionless modified factor β affected by aggregate. The modified model is in good agreement with available experimental data and can better characterize the effect of aggregate on the mass abrasion of penetrator into concrete target.

Keywords: high speed penetration; mass abrasion; aggregate; volume fraction; shear strength

(责任编辑 王小飞)