高速/超高速侵彻的尺度效应及相似规律

蒋东^{1*}, 史文卿¹, 黄瑞源², 刘志林¹, 李名锐³, 钱秉文³, 周刚³

1. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076;

2. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094;

3. 西北核技术研究所, 西安 710000

*联系人, E-mail: jiangd@ustc.edu.cn

收稿日期: 2021-03-14; 接受日期: 2021-05-28; 网络出版日期: 2021-09-17

国家重点基础研究发展计划(编号: 613312)资助项目

摘要 基于量纲理论建立了高速/超高速侵彻相似律的一般形式, 研究了不同速度下撞击缩比试验与原型试验的尺度效应及起因, 通过对国内外已有试验数据进行分析, 揭示了尺度效应对高速/超高速侵彻的影响规律, 认为材料的率相关性、破坏的发生和发展、热传导、转动和重力等因素影响了几何相似律的应用. 其中, 热传导与重力对侵彻过程的几何相似律影响较小. 如果严格控制实验条件, 在不改变弹靶材料的条件下, 使应变率的影响、弹体破坏和转动不起主要作用, 高速/超高速侵彻过程的几何相似律近似成立.

关键词 高速, 超高速, 尺度效应, 相似律

PACS: 43.28.Mw, 43.25.Cb, 43.50.Pn

1 引言

我们的世界受到两组基本定律的支配: 万有引力定律与量子力学定律. 尽管这两组定律各自采用不同的数学表达方式, 但却在各自的领域给出了令人称奇的预言. 万有引力定律控制着宇宙中的一切大尺度物体的运动. 量子力学定律从根本上改变了人类对微观世界的认知. 从宏观到微观, 从太阳系到基本粒子, 这两种极端尺度所采用的不同物理定律使得我们的世界极度神秘. 究竟什么是尺度效应呢? 我们非常困惑^[1]. 在现实世界里, 材料力学理论家很少考虑尺度效应问题, 这是因为现有的材料力学理论采用了应力与应变

的理论, 而这个应力或者应变都没有尺度效应. 本文所指的“尺度效应”^[2]是指在一族运动或者一个现象里, 我们讨论的宏观尺寸会与其他物理量耦合, 这样, 我们讨论的运动或者现象不再符合几何相似律, 也就是说我们在实验室内的缩比实验结果不能简单地推广到工程原型中去, 从而几何相似规律不再成立^[3]. 本文主要讨论的运动或现象是高速撞击. 高速撞击作为一个特殊的研究领域, 涉及高速度、高压、高温等极端条件, 同时又具有材料、物理、化学学科相结合的特点, 又要处理材料和结构的尺度效应等复杂问题. 考虑到实验室条件的加载方式和能力, 高速条件下很难将大尺度、大质量的物体加载到高速, 这就给研究这

引用格式: 蒋东, 史文卿, 黄瑞源, 等. 高速/超高速侵彻的尺度效应及相似规律. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 104710

Jiang D, Shi W Q, Huang R Y, et al. Scale effects and similarity laws on high/hypervelocity impact penetration (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 104710, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0070](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0070)

些复杂的问题带来了较大难度. 所以研究人员需要在理论上加以考虑, 虽然工程原型试验实现较为困难, 但其撞击过程某些参数与缩比实验在理论上是相似的, 故我们可以通过量纲理论结合缩比实验获得相关参数比对, 建立一般的规律性, 有助于深入理解所研究问题的本质, 找到不同尺度问题的相似性, 并作出定性分析. 关于尺度效应研究问题, 诸多学者开展了大量的研究工作, Zhao^[4-6]提出了一个表征惯性和塑性比值的无量纲数, 同时考虑了惯性效应、材料抵抗变形能力和几何变形, 可用于预测强动载荷作用下梁、板、壳等结构的临界失效行为. Rosenberg和De-
kel^[7]认为弹体材料性质引起了几何相似律偏离. Heine和Wickert^[8]研究了直径为7.5, 10.0, 13.5 mm球形弹丸的侵彻砖块试验, 结果表明在刚性侵彻阶段基本满足相似关系. Mazzariol等人^[9]从量纲分析的角度进行了研究并考虑了应变率效应的影响. Rittel课题组^[10]通过数值模拟研究了动态破坏的尺度效应. 国内, 郑哲敏等人^[11]、李卧东等人^[12]、王道荣等人^[13]、高举贤等人^[14]、高光发等人^[15]针对聚能射流、超高速撞击、侵彻混凝土和穿甲过程的相似律进行了研究.

2 侵彻相似律的一般形式

关于侵彻响应物理方程及侵彻机理, Piekutowski等人^[16]进行了系列实验研究并建立了空腔膨胀理论模型. Li和Chen^[17]提出的无量纲撞击函数表明刚性弹的深侵彻主要由两个无量纲物理量控制. Wen等人^[18]、焦文俊^[19]、楼建锋^[20]开展了长杆侵彻的一维理论和模拟研究. 这些高速撞击机理研究认为侵彻过程与弹的几何形状、弹的着速和转速以及弹靶的材料性质有关. 按照侵彻速度大小可将侵彻过程分为中低速侵彻、高速侵彻和超高速侵彻, 其中中低速侵彻速度范围为300–800 m/s, 高速侵彻速度范围为800–1500 m/s, 超高速侵彻一般认为大于2000 m/s. 采用质量、时间、长度和温度作为基本量纲, 很显然, 含非长度的基本量纲不符合几何相似律. 例如, 与时间耦合的物理量会导致几何不相似, 也就是说是否有尺度效应取决于能否忽略这些与时间耦合的物理量. 再如, 热传导使温度发生变化从而导致非几何相似.

所以, 高速侵彻过程中, 产生尺度效应的原因有以下三类. (1) 时间相关的物理量: 材料的动态强度、破

坏的发生和发展、转动和边界效应; (2) 质量相关的物理量: 重力及重力加速度; (3) 热传导相关的物理量: 温度.

如果我们采用的模型和原型具有相同的弹、靶材料和几何相似的弹体结构形状, 并且具有相同的弹速 v_0 , 假设缩比因子为 ξ , 缩比弹长为 L , 原型弹长为 L' , 缩比模型与原型的几何尺寸的缩尺比为 $\xi = \frac{L}{L'}$, 则

几何尺寸和缩比因子成比例: $L = \xi L'$;

应变是相同的: $\varepsilon = E$;

应力是相同的: $\sigma = \Sigma$;

静水压是相同的: $p = P$;

材料中的声速是相同的: $c = C$;

速度是相同的: $v = V$.

时间与缩比因子成比例: $T = \xi t$;

位移与缩比因子成比例: $\Delta = \xi \delta$;

应变率加速度与缩比因子的倒数成比例: $\dot{E} = \frac{1}{\xi} \dot{\varepsilon}$;

加速度与缩比因子的倒数成比例: $A = \frac{1}{\xi} a$;

力与缩比因子的平方成比例: $F = \xi^2 f$;

质量与缩比因子的立方成比例: $M = \xi^3 m$;

能量与缩比因子的立方成比例: $E' = \xi^3 e$.

对于给定的弹靶材料组合, 如果严格控制弹体垂直入射, 可以不考虑转动带来的不相似, 并保证着靶速度相同, 那么, 采用质量、时间、长度和温度作为基本量纲, 侵彻相似公式的一般形式可变为

$$\frac{P}{L} = F \left[\frac{L}{L'}, \frac{\omega L}{v_0}, \phi, \frac{v_0 t}{L}, \frac{\lambda \theta}{\rho_0 v_0^3 L}, \frac{\lambda' \theta'}{\rho'_0 v_0^3 L'}, \frac{a}{E \left(\frac{L}{v_0} \right)^n}, \frac{a'}{E' \left(\frac{L'}{v_0} \right)^{n'}} \right],$$

其中, L, L' 为弹靶几何特征尺寸, ω 为弹转速, ϕ 为弹着角, v_0 为弹着速, λ, λ' 为弹靶热传导系数, θ, θ' 为德拜温度, 是由状态方程引入的独立物理量, a, a', n, n' 为材料常数, 表示应变率对弹靶材料动态屈服强度的影响. E, E' 为弹靶材料弹性参数. 相似参数 $\frac{a}{E \left(\frac{L}{v_0} \right)^n}, \frac{a'}{E' \left(\frac{L'}{v_0} \right)^{n'}}$ 为

与材料应变率相关的量, 这便是在确定弹形(几何相似)和确定弹靶材料组合下的高速侵彻相似律. 式中最

后4个相似参数为非几何相似参数, 它们都是具有时间效应的物理因素, 几何相似律能否成立取决于是否允许忽略这些具有时效的物理因素.

我们依次分析上述非几何相似参数, 一是材料应变率效应对材料动态强度的影响. 当材料应变率效应不明显而可以忽略时, 侵彻几何相似律基本成立. 对于金属靶板, 从试验结果和数值计算结果来看, 几何相似律是基本成立的, 侵彻过程中, 应变率随着弹速一直变化, 但应变率是速度与弹的尺寸的函数, 因此缩比小尺度的试验应变率大于原型实验, 如果弹体和靶板都是金属材料, 缩比实验的应变率较高, 其应变率效应使得弹体和靶板动强度同时提高, 此时弹体和靶板产生的尺度效应能够近似抵消, 反映到试验中就是尺度效应不太明显. 但对于混凝土侵彻, 一般认为, 混凝土是一种应变率较敏感的材料, 此时如果缩比尺度较大则弹体和靶板的应变率效应无法抵消, 表现在试验上就是存在明显的尺度效应. 但当缩比因子较小时, 也可能基本满足几何相似律, 故实际模拟实验使用的模拟比例不能特别大, 一般不超过5倍, 此时侵彻过程的几何相似律能够近似成立.

材料本构中除了应变率效应会导致尺度效应, 材料的破坏也同样会导致尺度效应. 材料的损伤演化导致破坏是一个动态过程, 文献[3]认为, 材料的动态拉伸破坏和绝热剪切破坏是与时间耦合相关的, 如修正的Tuler-Butcher模型认为, 某一时刻的损伤一定会影响下一时刻的损伤演化, 由于时间是与缩比因子成比例的, 从而动态拉伸破坏是有尺度效应的; 同样的, 绝热剪切破坏准则可能包括材料动态再结晶的应变率效应, 此外绝热剪切时损伤演化、热传导效应也与时间耦合, 所以绝热剪切破坏也是有尺度效应的.

如果与转动相关的参数 $\frac{\omega L}{v_0}$ 相同, 则几何相似, 这就要求 ωL 相等, 如果尺寸缩小, 转速 ω 应该增大, 实际上是有尺度效应的, 但如果侵彻过程不考虑攻角, 或者攻角很小, 且攻角对侵彻过程不起主要作用, 可以不考虑转动带来的尺度效应问题.

重力也是不遵守缩比法则的. 不能根据比例法则进行缩放, 但是, 处理涉及高加速度的动态情况, 如爆炸、冲击载荷, 重力通常可以忽视. 以侵彻过程为例, 弹体受到的过载通常为数千g, 重力加速度仅仅为其数千分之一, 如果缩比尺度未达到 10^2 以上量级, 可以不

考虑由重力引起的尺度效应.

此外, 由于边界效应涉及应力波传播、反射等问题, 有时候会引起破坏, 严格意义上讲也是不相似的. 但是, 有研究表明靶板的横向尺寸大于10倍弹径时, 靶板的边界效应较小, 也可认为符合相似规律.

关于温度相关的物理量, 当 $\frac{\lambda \theta}{\rho_0 v_0^3 L} \ll 1$ 时, 热传导过程会导致尺度效应, 现在进行定量分析, 以钢为例: $\lambda=1.6 \times 10^5 \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\theta=453 \text{ K}$, $L=0.1 \text{ m}$, $\rho_0=7800 \text{ kg m}^{-3}$, $v_0=1800 \text{ m s}^{-1}$, 则

$$\frac{\lambda \theta}{\rho_0 v_0^3 L} = 4.92 \times 10^{-9} \ll 1,$$

可以看到热传导在侵彻过程中的影响可以忽略不计.

当然, 我们也可用傅里叶数 $\frac{t \theta^2}{c_p \rho_0 L^2}$ 来分析, 热传导使弹靶温度发生明显变化所需要的特征时间为 $\frac{c_p \rho_0 L^2}{\lambda}$,

如果其远远大于侵彻过程所需时间, 则热传导的尺度效应可不考虑. 对于钢而言, 热传导时间量级为 $\frac{c_p \rho_0 L^2}{\lambda} = 792 \text{ s}$, 而侵彻时间量级为ms级, 故高速侵彻过程中热传导引起的尺度效应可以忽略.

综上所述, 材料的率相关性、破坏的发生和发展、热传导、转动、重力和边界条件等几个因素影响了几何相似律.

如果我们不考虑转动, 即不考虑侵彻中的着角和攻角效应, 由于热传导、重力近似满足相似规律, 并且将靶板横向尺寸设置为大于弹径的10倍, 则影响尺度效应的量只有材料的应变率效应和破坏的发生和发展.

由此可得出一个重要的结论: 如果严格控制不改变弹和靶的材料, 则上述相似参数就会自行满足, 即最大无量纲侵彻深度由无量纲初始速度所决定. 这便是在弹形确定的条件下最一般的侵彻相似律, 通常称这种关系为几何相似律. 简言之, 若应变率的影响不起主要作用, 则几何相似律成立.

3 率无关材料相似规律

上文提到如果应变率的影响不起主要作用则几何相似律成立. 一方面, 如果我们的弹靶材料都没有应变

率效应, 则几何相似律成立; 另一方面, 如果我们的弹靶材料有应变率效应, 但在缩比尺度不大时, 它们的应变率效应不太明显而可以忽略时, 几何相似律也是基本成立的.

以金属弹靶为例, 当弹体的撞击速度为 v_0 , 子弹的长度为 L , 其应变率大约为 v_0/L , 如果缩比因子 ξ 为10, 因此应变率在模型弹中的值大约是原型弹的10倍. 同样的, 应变率在靶板中的值也大约是原型靶的10倍. 对于应变率正敏感材料, 原型试验时弹体的应变率较低, 使得原型弹体侵彻深度减小, 相应地, 靶板应变率也较低, 使得原型弹体侵彻深度增加, 原型弹体侵彻深度是弹靶综合影响的过程. 对于金属材料, 其强度的应变率效应只有当其应变率增加几个量级时才有明显增加, 所以对于金属来说, 当缩比尺度不大、弹靶材料为金属时, 几何相似律是近似成立的. 这在工程上有较多的实例.

文献[21]给出了大量超高速撞击实验结果, 如图1所示, 弹丸形状为球形, 弹丸材料为2017-T4铝合金, 靶板材料为6061-T6. 球形弹丸的直径从1.40到19.05 mm, 最大缩比率约为13.6, 靶厚与弹丸直径比 t/D 范围为0.008–0.618, t/D 主要的尺寸比小于0.234. 撞击速度从1.98升高至9.89 km/s. 其中 d_h 是孔直径, t 是靶厚, D 是球直径. 实验结果表明, 在速度约为2–9 km/s时, 铝合金球撞击铝合金薄靶符合基本几何相似律.

如表1所示, 文献[14]给出了一组实验结果, 其缩比因子为7.87, 实验表明, 当适当加深缩比弹丸的断裂槽深度而其他弹形尺寸严格按照几何相似规律时, 缩比实验可以较好地模拟原型实验, 不仅破坏现象能够完全模拟, 而且临界穿透速度也近似相同, 弹坑和冲塞的几何尺寸也相似. 这就说明了上文的观点, 即破坏会影响尺度效应, 但如果我们针对破坏的尺度效应进行适当修正后, 缩比实验和原型实验是可以相似的.

文献[22]提供了一组杆式弹穿透装甲钢的临界穿甲速度实验结果, 实验中原型靶厚和弹径各为100和40 mm, 模型弹靶厚和弹径各为19和7.6 mm, 缩比率为19:100. 从表2中可以看出, 几何相似律基本成立.

4 率相关材料相似规律

针对率相关材料如混凝土类材料, 近年来许多学者对其相似关系进行了研究, 结果表明在缩尺比并不

图 1 (网络版彩图)铝合金球撞击铝合金薄靶
Figure 1 (Color online) Impact of thin aluminum sheets with aluminum spheres.

表 1 文献[14]实验结果
Table 1 Experiment results in ref. [14]

编号	原型 v_{50} (m/s)	缩比 v_{50} (m/s)	相对偏差 (%)
1	510	513	0.6
2	535	540	0.9
3	550	565	2.7
4	545	549	0.7
5	535	544	1.7
6	515	536	4.1
7	525	537	2.3
8	532	544	2.3
9	525	531	1.1
10	560	569	1.6

表 2 文献[22]实验结果
Table 2 Experiment results in ref. [22]

编号	原型 v_{50} (m/s)	缩比 v_{50} (m/s)	相对偏差 (%)
1	1360	1370	-1
2	1350	1340	+1
3	1350	1320	+2
4	1340	1370	-2
5	1380	1380	0
6	1380	1370	+1

大时, 其基本符合几何相似律; 当缩比尺度较大时, 其原型实际实验值与缩比模型值呈现偏离, 此时, 尺度效应应当予以考虑.

图2-4为无量纲侵深随速度变化曲线^[23-25], 从图中可以看到有某种趋势, 即所有实验的无量纲侵彻深度

图 2 (网络版彩图)文献[23]中无量纲侵深随速度变化
Figure 2 (Color online) The dimensionless penetration depth with velocity in ref. [23].

图 3 (网络版彩图)文献[24]中无量纲侵深随速度变化
Figure 3 (Color online) The dimensionless penetration depth with velocity in ref. [24].

图 4 (网络版彩图)文献[25]中无量纲侵深随速度变化
Figure 4 (Color online) The dimensionless penetration depth with velocity in ref. [25].

曲线同时发生了偏移和偏转, 在低速范围内, 随着弹体尺寸的增大, 弹体的无量纲侵彻深度也是上升的. 这表明在低速范围内, 原型弹的无量纲侵彻深度大于缩比弹. 这是由于缩比实验时的应变率大于原型实验, 作为率敏感材料, 混凝土在缩比实验时其动强度显著大于原型实验, 由于缩比实验靶板动强度较高, 较难侵彻, 表现在侵彻深度上就是缩比实验的无量纲侵彻深度小于原型实验. 换言之, 在同样的侵彻条件下, 如果缩比实验的侵彻深度能达到某一个值, 则原型实验相应地也能达到某一个对应的值, 这个结论在工程上有较大用处.

从图2中可以看出, 无量纲侵彻深度曲线偏转量为7.4%. 侵彻速度为500 m/s时, 无量纲侵彻深度曲线偏移量为1.3%, 而同一速度下图4的无量纲侵彻深度曲线偏移量为6.3%, 说明缩比因子越大, 工程实际实验值与几何相似模型值偏离越大. 图3中实验由于弹的质量较大且数据量较少, 偏转和偏移得更厉害. 以上这些都表明几何相似律是不成立的, 这就是侵彻试验的尺度效应. 从材料物性的角度出发, 造成尺度效应的原因是材料的应变率效应和材料的破坏.

5 侵彻中的尺度效应

由于破坏具有尺度效应, 所以我们可以以弹体是否破坏来对侵彻过程进行区分. 我们知道, 在低速侵彻时, 弹体的变形较小, 可将弹体视为刚体, 相似规律可以适用; 当撞击速度超过某一个临界值后, 弹体会发生大变形甚至破坏, 侵彻深度急剧下降, 此时相似规律应做适当修改; 随着速度的进一步提高, 侵彻深度进一步提高, 此时进入半流体状态, 适用半流体侵彻理论, 直至最后到达流体极限, 此时适用流体侵彻理论. 控制不同侵彻机制转变问题的一个重要条件就是弹体是否破坏.

如图5所示, 文献[16]给出了卵形弹侵彻6061-T6511铝合金的实验结果, 其中弹长71.1 mm, 长径比10, 弹体材料为4340钢, 侵彻速度从569到2988 m/s. 从图中可以看出, 随着侵彻速度的提高, 可分为四个阶段: (1) 刚性侵彻阶段; (2) 变形破坏侵彻阶段; (3) 半流体侵彻阶段; (4) 流体侵彻阶段. 由于每个阶段的侵彻机理不一定相同, 所以适用的理论也不一样, 在刚性侵彻阶段, 空腔膨胀理论应用较多; 在半流体侵彻阶

图 5 (网络版彩图)铝合金球侵彻铝合金薄靶

Figure 5 (Color online) Penetration of aluminum spheres into aluminum targets.

段, A-T模型应用较多; 在流体侵彻阶段, Bernoulli方程应用较多, 此时由于材料处于流体状态, 没有应变率效应, 无量纲侵彻深度只与弹靶密度比有关, 故该阶段基本符合相似规律; 在变形破坏侵彻阶段, 由于涉及破坏, 尚未有较好的理论描述该过程, 很显然, 这一阶段侵彻过程不符合相似规律.

图6给出了破坏影响尺度效应的实验结果^[26-28], 从图中可以看出, 在侵彻速度达到刚体侵彻极限速度附近时, 无量纲侵彻深度发生了偏移.

6 结论

本文通过理论分析结合国内外已有试验数据, 认为材料的率相关性、破坏的发生和发展、热传导、转动、重力和边界效应等因素影响着几何相似律的应用. 如果严格控制实验条件, 在不改变材料的条件下, 使应变率的影响、弹体破坏和转动不起主要作用, 则几何相似律近似成立.

图 6 (网络版彩图)钢侵彻混凝土

Figure 6 (Color online) Steel projectiles penetration concrete targets.

所以, 如果不考虑转动且侵彻速度不在变形破坏侵彻阶段时, 当弹靶材料均为金属时, 认为几何相似律近似成立. 当靶板为混凝土类应变率敏感材料时, 应变率效应的影响使得相似律平移和偏转了少许, 在缩尺因子较小时, 几何相似律是基本符合要求的, 在缩尺尺度较大时应变率效应对相似律产生影响. 下面给出高速/超高速侵彻无量纲深度相似公式的一般形式:

$$\frac{P/L}{P'/L'} = \xi(d^*)^m(b^*)^n,$$

其中

$$d^* = \frac{\bar{d}_Y}{\bar{d}_s}, b^* = \frac{\bar{b}_Y}{\bar{b}_s},$$

$\bar{d}_Y$ 表示原型弹体特征尺寸, $\bar{d}_s$ 表示缩比弹体特征尺寸; $\bar{b}_Y$ 表示原型靶板的特征尺寸, $\bar{b}_s$ 表示缩比靶板的特征尺寸. 幂指数 m 和 n 是与弹靶材料相关的参数, 特别地, 如果是钢弹体侵彻混凝土靶板, m 和 n 建议取值为0和1.

参考文献

- Yang W. The way of mechanics: Seven engineering problems and seven scientific problems in the fundamentals and applications of mechanics (in Chinese). Mech Eng, 2010, 40: 458–464 [杨卫. 力学之道两周天. 力学与实践, 2010, 40: 458–464]
- Л.И. Седов. Similarity and Dimension Methods in Mechanics (in Chinese). Beijing: Science Press, 1982 [Л.И. 谢多夫. 力学中的相似方法与量纲理论. 北京: 科学出版社, 1982]
- Jiang D, Huang R Y, Yu D J, et al. Similarity laws and scaling of penetration tests (in Chinese). Mech Eng, 2017, 39: 561–565 [蒋东, 黄瑞源, 余道建, 等. 侵彻试验尺度效应和相似准则. 力学与实践, 2017, 39: 561–565]
- Zhao Y P. Suggestion of a new dimensionless number for dynamic plastic response of beams and plates. Archive Appl Mech, 1998, 68: 524–538

- 5 Zhao Y P. On some dimensionless numbers in fracture mechanics. *Int J Fracture*, 1997, 83: 7–13
- 6 Zhao Y P. Prediction of structural dynamic plastic shear failure by Johnson's damage number. *Forsch Ing-Wes*, 1998, 63: 349–352
- 7 Rosenberg Z, Dekel E. Material similarities in long-rod penetration mechanics. *Int J Impact Eng*, 2001, 25: 361–372
- 8 Heine A, Wickert M. Scale-independent description of the rigid-body penetration of spherical projectiles into semi-infinite adobe targets. *Int J Impact Eng*, 2015, 75: 27–29
- 9 Mazzariol L M, Oshiro R E, Alves M. A method to represent impacted structures using scaled models made of different materials. *Int J Impact Eng*, 2016, 90: 81–94
- 10 Noam T, Dolinski M, Rittel D. Scaling dynamic failure: A numerical study. *Int J Impact Eng*, 2014, 69: 69–79
- 11 Zheng Z M, Gao J X, Tan Q M, et al. The similarity law in penetration of shaped chargejet (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 1974, 1: 1–10 [郑哲敏, 高举贤, 谈庆明, 等. 聚能射流侵彻过程模型律. 力学学报, 1974, 1: 1–10]
- 12 Li W D, Wang M Y, Shi C C, et al. Review of similarity laws and scaling experiments research of hypervelocity impact on geological material targets (in Chinese). *Protect Eng*, 2015, 37: 55–62 [李卧东, 王明洋, 施存程, 等. 地质类材料超高速撞击相似关系与实验研究综述. 防护工程, 2015, 37: 55–62]
- 13 Wang D R, Sun Y X, Guo Y. Simulation analysis of high velocity penetration into concrete target (in Chinese). *J Ballist*, 2001, 13: 7–11 [王道荣, 孙宇新, 郭扬. 混凝土靶高速侵彻的模型律. 弹道学报, 2001, 13: 7–11]
- 14 Gao J X, Le M K, Lv D Y, et al. Modelling in the process of the perforation of projectile into a target (in Chinese). *Acta Armament*, 1985, 1: 33–39 [高举贤, 乐茂康, 吕德业, 等. 穿甲过程模型律. 兵工学报, 1985, 1: 33–39]
- 15 Gao G F, Li Y C, Luo C T, et al. The study on rate-dependent similarity law of high velocity penetration into concrete target (in Chinese). *J Project, Rockets, Missil Guid*, 2011, 31: 98–100 [高光发, 李永池, 罗春涛, 等. 混凝土靶高速侵彻的率相关相似律研究. 火箭与制导学报, 2011, 31: 98–100]
- 16 Piekutowski A J, Forrestal M J, Poormon K L, et al. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nose steel projectiles with striking velocities between 0.5 and 3.0 km/s. *Int J Impact Eng*, 1999, 23: 723–734
- 17 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
- 18 Wen H M, He Y, Lan B. Analytical model for cratering of semi-infinite metallic targets by long rod penetrators. *Sci China Technol Sci*, 2010, 53: 3189–3196
- 19 Jiao W J. 1D and 2D Theory of Long-rod Hypervelocity Penetration (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019 [焦文俊. 长杆高速侵彻的1D和2D理论模型. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2019]
- 20 Lou J F. Theoretical Model and Numerical Study on Penetrating into Semi-infinite Targets (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012 [楼建锋. 侵彻半无限厚靶的理论模型与数值模拟研究. 博士学位论文. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012]
- 21 Piekutowski A J, Poormon K L. Impact of thin aluminum sheets with aluminum spheres up to 9 km/s. *Int J Impact Eng*, 2008, 35: 1716–1722
- 22 Tan Q M. High speed impact model law (in Chinese). In: Wang L L, Yu T X, Li Y C, eds. *Advances in Impact Dynamics*. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 1992. 88–116 [谈庆明. 高速冲击模型律. 见: 王礼立, 余同希, 李永池, 编. 冲击动力学进展. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1992. 88–116]
- 23 Xu J B, Lin J D, Tang R L, et al. The penetration of steel bar projectiles into concrete targets (in Chinese). *Explo Shock Waves*, 2002, 22: 174–178 [徐建波, 林俊德, 唐润棣, 等. 长杆射弹侵彻混凝土实验研究. 爆炸与冲击, 2002, 22: 174–178]
- 24 Larigberg H, Markeset G. High performance concrete-penetration resistance and material development. In: 9th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Berlin, 1999
- 25 Canfield J, Clator I. Development of a scaling law and techniques to investigate penetration in concrete. *NWL Technic Report*, No. 2057, US Naval Weapons Labortory. 1966
- 26 Zhao X N. Study on the Effect of Projectiles High-velocity Normal Penetrating into Concrete Targets (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012 [赵晓宁. 高速弹体对混凝土垂直侵彻效应研究. 博士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2012]
- 27 Liang B, Chen X W, Ji Y Q, et al. Experimental study on deep penetration of reduced-scale advanced earth penetrating weapon (in Chinese). *Explo Shock Waves*, 2008, 28: 1–9 [梁斌, 陈小伟, 姬永强, 等. 先进钻地弹概念弹的次口径高速深侵彻实验研究. 爆炸与冲击, 2008, 28: 1–9]

1–9]

- 28 Wang B, Cao R Y, Tan D W. Experimental study on penetration of reinforced concrete by a high-speed penetrator with large mass (in Chinese). *Explo Shock Waves*, 2013, 33: 98–102 [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. *爆炸与冲击*, 2013, 33: 98–102]

Scale effects and similarity laws on high/hypervelocity impact penetration

JIANG Dong^{1*}, SHI WenQing¹, HUANG RuiYuan², LIU ZhiLin¹, LI MingRui³,
QIAN BingWen³ & ZHOU Gang³

¹ *Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China;*

² *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;*

³ *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710000, China*

Based on dimension theory, a general form of penetration similarity is established. And the existing test data at home and abroad are analyzed. The influence law of penetration on the scale effects is revealed. It is considered that the strain-rate effect of materials, occurrence and evolution of damage, heat conduction, rotation, and gravity affect the geometric similarity laws. Among them, the effect of heat conduction and gravity on the geometric similarity law of the penetration process is less significant. If the experimental conditions are strictly controlled and the influence of strain rate, damage, and rotation of projectile materials is considered insignificant without changing the projectile materials and targets, the geometric similarity law of the high/hypervelocity penetration process can be approximately established.

high velocity, hypervelocity, scale effects, similarity laws

PACS: 43.28.Mw, 43.25.Cb, 43.50.Pn

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0070](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0070)