

前 言

重要军事目标的坚固化与深地下化，大大促进了侵彻技术与钻地武器的发展。随着撞击速度的提高，弹体会发生变形、质量损失、破碎等现象，侵彻深度不再随速度线性增加而是发生递减，传统的刚性侵彻理论已难以适用。本文采用理论分析和试验研究相结合的方法研究了超高速弹体(1200~2400 m/s)对混凝土类介质侵彻效应问题，主要工作和成果如下：

(1) 建立了反映砂土和混凝土孔隙压实效应的 p - α 状态方程和本构关系

基于孔隙演化等效模型和广义 Mises 准则，建立了能够反映砂土和混凝土孔隙压实过程的 p - α 状态方程和动力学本构关系，重点讨论了可压缩性对冲击压缩过程的影响规律。结果显示：在忽略弹性阶段孔隙率的微小变化后，文中推导的 p - α 模型与 Herrmann 经典 p - α 模型在变形的塑性阶段相似，只是函数形式和模型参数不同；通过与 Hugoniot 实验数据的对比验证了孔隙演化方程和状态方程的合理性。

(2) 开展砂浆的冲击压缩实验并建立从孔隙压缩到基体压缩完整过程的状态方程

围绕砂浆的动态冲击压缩实验展开了研究，着重分析了材料在一维应

变下的冲击波传播特性和冲击绝热关系，建立了材料从孔隙压缩到基体压缩过程的状态方程。研究表明：冲击波峰值随传播距离而衰减，冲击速度越高衰减效应越明显；测点越往后，波形展宽，应力脉冲升时也明显地增加；砂浆的状态方程可采用 p - α 状态方程和 Mie-Grüneisen 型状态方程分段描述。

(3) 建立了考虑混凝土非线性本构特性的刚性侵彻工程计算模型

基于动态球形空腔膨胀理论，并结合 p - α 状态方程和非线性屈服准则，建立了刚性弹侵彻混凝土的侵彻深度预测模型，揭示了本构参数对侵彻深度的影响规律。结果表明：上述刚性侵彻模型对侵彻深度的预测能力较好且可以较好反映混凝土的非线性本构特性；本构模型中，密实压力和剪切强度是影响侵彻深度的两个关键参数。

(4) 开展了 1200~2400 m/s 速度范围内弹体超高速侵彻砂浆靶的试验研究

开展了 1200~2400 m/s 速度下高速弹体侵彻砂浆靶的试验，获取了侵彻深度、靶体成坑参数、弹体质量损失等试验数据。分析表明：侵彻深度随撞击速度的增加呈先增加后减小再增加的变化规律；成坑直径、成坑深度和成坑面积均与撞击速度呈线性关系；当速度小于 1720 m/s 时，弹体质量损失率为 3%~10% 且随速度增加而线性增加，当速度大于 1720 m/s 时，弹体的质量损失率骤然上升到 30%~60%。

(5) 界定超高速侵彻速度范围并给出不同速度区间侵彻深度计算模型

修正的 A-T 模型可以较好的揭示随着撞击速度的增加，弹体由刚性侵彻转入拟流体侵彻和流体侵彻的转变机理，且可以界定超高速侵彻速度范围。针对不同撞击速度区间，给出了侵彻深度解析方法和计算公式，揭示了弹体质量损失带来的侵彻深度逆转、侵彻深度趋向流体动力学极限等现象，结合超高速侵彻试验数据验证了理论模型的准确性。