

# 地下爆炸耦合系数与填塞系数确定方法\*

张效晗<sup>1,2</sup>, 徐天涵<sup>3\*</sup>, 王明洋<sup>3</sup>

(1. 上海市地下空间设计研究总院有限公司, 上海 200001; 2. 南京理工大学机械工程学院工程安全防护技术研究所, 江苏 南京 210094; 3. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 耦合系数与填塞系数广泛应用于地下爆炸地冲击大小预测及爆炸破坏范围评估, 随着埋深增加, 爆炸地冲击耦合机制发生变化, 不同耦合系数呈现不同演化规律。系统总结了地下爆炸耦合系数与填塞系数的试验与理论研究成果, 介绍了常用耦合系数类型及换算关系, 分析了现有试验中不同耦合系数及不同介质中耦合系数随埋深的变化规律, 讨论了耦合系数计算方法及临界埋深确定方法, 对比了不同介质中的等效当量系数与填塞系数, 并对目前研究中尚有待解决的问题和下一步的研究方向进行了展望。

**关键词:** 地下爆炸; 耦合系数; 填塞系数; 地冲击; 临界埋深

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

## Methods for determining the coupling coefficient and stemming coefficient of underground explosions

ZHANG Xiaohan<sup>1,2</sup>, XU Tianhan<sup>3\*</sup>, WANG Mingyang<sup>3</sup>

(1. Shanghai Underground Space Design and Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200001, China; 2. Institute of Engineering Safety Protection Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 3. State Key Laboratory of Explosion and Impact and Disaster Prevention and Mitigation, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** Coupling coefficients and stemming coefficients are essential for predicting ground shock magnitude and damage zones from underground explosions, yet their variation with burial depth and dependence on media and explosion types remain insufficiently compared. Experimental and theoretical methods for determining these coefficients in concrete, rock, and soil under both chemical and nuclear explosions were systematically reviewed. Based on collected data from published tests, definitions of different coupling coefficients (energy coupling, ground shock parameter coupling, equivalent yield, and stemming coefficients) were clarified, and conversion relationships among them were derived using energy conservation and wave attenuation principles. The critical burial depth for full coupling was analyzed separately for peak quantities (e.g., peak stress, particle velocity) and integral quantities (e.g., impulse, surface vibration). Experimental results show that peak quantities reach full coupling at a depth approximately equal to the contained explosion cavity radius, which is much shallower than the critical depth for contained explosions. In contrast, impulse and ground motion require depths close to the contained explosion threshold. The coupling energy is proportional to the volume of the damaged zone, and the evolution of coupling coefficients with scaled depth of burial follows a Boltzmann function, requiring only two parameters to define the entire curve. For chemical explosions, the fully coupled

\*收稿日期: 2025-12-10; 修回日期: 2026-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52509159), 国家重点研发计划项目 (2024YFF0508204);

第一作者: 张效晗 (1987-), 女, 博士研究生, 高级工程师. E-mail: zhangxiaohan@suadi.com.cn;

通信作者: 徐天涵 (1995-), 男, 博士, 副教授. E-mail: martinxu41@qq.com.

equivalent yield coefficient (relative to contained explosions) in concrete, limestone, and soils was quantified, with stemming coefficients ranging from 1.4~1.8 in rocks and 2.4~2.6 in soils. It is concluded that different ground shock parameters exhibit distinct coupling behaviors, challenging the assumption of a universal coupling coefficient. Proposed empirical formulas provide conservative estimates for engineering design, while the underlying mechanisms of free-surface unloading require further quantitative investigation.

**Key words:** underground explosion; coupling coefficient; stemming coefficient; ground shock; critical burial depth

自海湾战争以来, 钻地弹在战争中的作用日益显著。对于浅埋工事, 钻地弹可直接钻入工事内部爆炸, 对于深埋防护工程, 钻地弹地下爆炸产生的强烈地冲击可使防护工程产生震塌破坏。近年来, 钻地弹由小当量向大当量发展, 由常规装药向核装药发展, 以美国为例, 已列装了 GBU-57 巨型钻地弹, 以及 B61-11、B61-12 等小型钻地核弹, 并正在研制新型的 B61-13 钻地核弹。深埋战略防护工程所受威胁日益严峻, 准确评估钻地弹的爆炸地冲击效应对地下防护工程建设设计具有重要意义。

对于空中爆炸、触地爆炸(装药置于地表上)和半埋爆炸(爆心位于地表), 大部分能量耗散至空气中, 引起的地冲击较小。对于地下爆炸, 爆炸产生的高压产物直接压缩周围介质, 在介质内部产生强烈的地冲击。由于地表自由面的存在, 地冲击在介质中的分布并不均匀, 在爆心正下方地冲击最强。对于地下防护工程而言, 所关注的即为爆心下方的地冲击大小。随着爆炸埋深增加, 爆炸地冲击逐渐增强, 直至某一深度处达到最大值, 而后不再随埋深增加而增大, 此时称为地冲击完全耦合。需要注意的是, 地冲击完全耦合时通常地表仍存在可见弹坑, 因此不同于所谓的“封闭爆炸”, 封闭爆炸指地下爆炸对地表不产生明显影响, 所有爆炸产物、能量均封闭于介质中, 且封闭爆炸临界埋深远大于完全耦合临界埋深<sup>[1]</sup>。根据美国核威胁降低局的数值计算结果<sup>[2]</sup>, 岩体介质中比例埋深

(SDOB, scaled depth of burial) 为  $6.7\text{m}/\text{kt}^{1/3}$  时爆炸耦合能量达到饱和, 为半埋爆炸的 17 倍, 可见深埋爆炸较半埋爆炸可对地下工程造成更大威胁。现有钻地弹在岩石中的侵彻深度一般难以达到完全耦合深度, 因此需确定不同埋深处的地冲击大小。

达到完全耦合深度后爆心下方的地冲击大小不再随埋深增大而增大, 可等价于封闭爆炸, 因此可将其视为在无限空间中的球对称爆炸, 利用爆炸力学理论可得到地冲击的理论解<sup>[3]</sup>, 完全耦合爆炸的试验结果较为稳定, 相关试验数据丰富<sup>[4]</sup>。非完全耦合爆炸受地表自由面的影响, 地冲击理论求解较为困难, 通常采用试验手段测量不同埋深爆炸的地冲击大小<sup>[5-12]</sup>, 或用数值模型进行计算<sup>[13, 14]</sup>。为归一化表征地冲击的耦合程度, 引入耦合系数, 其定义为某一深度处爆炸地冲击与封闭爆炸或半埋爆炸地冲击之比。若以封闭爆炸为基准, 则耦合系数为小于 1 的量, 当埋深大于等于完全耦合临界埋深时恒为 1, 其表征了自由面对地冲击的削弱作用; 若以半埋爆炸为基准, 则耦合系数为大于 1 的量, 仅当埋深等于 0 时为 1, 其表征了埋深对地冲击的放大作用。

地冲击峰值应力、粒子速度、加速度、能量等参数均有对应的耦合系数, 较为常用的有美国核防局通过数值模拟给出的能量耦合系数曲线<sup>[2]</sup>以及工程兵水道站通过大量地下爆炸试验给出的应力峰值、粒子速度、加速度通用耦合系数曲线<sup>[15]</sup>。此外, 我国常用的还有等效当量系数与填塞系数。等效当量系数指在相同距离上产生相同地冲击大小的两种不同埋深爆炸当量之比; 填塞系数指地下爆炸介质压缩半径与半埋爆炸压缩半径之比。虽然等效当量系数与填塞系数不直接表征地冲击耦合程度, 但在计算地冲击大小、爆炸破坏范围及地下工程安全防护层厚度中均有重要应用。由于等效当量系数与填塞系数的相关物理过程和耦合系数一致, 且均能表征爆炸在介质中的耦合程度, 为方便表述, 本文将其统称为“耦合系数”。

无论采用试验、数值或是理论方法, 确定上述系数随埋深变化曲线均需解决的两个关键问题为:

(1) 任意埋深处耦合系数的具体数值为多少? (2) 地冲击达到完全耦合的临界深度为多少?

现有研究均在一定程度上回答了这两个问题, 但相关结论独立于各文献, 对于不同介质材料、不同类型爆炸的异同缺乏对比讨论。本文系统总结了国内外在各种介质中耦合系数与填塞系数的试验与理论确定方法, 分析了不同物理量的完全耦合机理与临界埋深确定方法, 给出了不同介质中等效当量

系数与堵塞系数计算公式，并对尚待解决的问题和下一步研究方向进行展望。

## 1 地下爆炸分类

在爆炸发生后，爆心附近进行着十分强烈的物理与化学作用。爆炸产生的高压气体推动药室附近介质迅速向外扩张，在爆心处形成爆炸成坑（空腔），从成坑（腔）向外，介质发生破坏并依次形成压实区（破碎区）、径向裂纹区与弹性区，通常将弹性区边界内侧统称为非弹性区或塑性区。介质受到压缩的同时形成地冲击并向远处传播，地冲击经过破碎区与径向裂纹区不断衰减，到达弹性边界时地冲击幅值小于介质强度，衰减为弹性波，弹性波又被称为地震波<sup>[16]</sup>。地下防护工程选址应位于爆炸弹性区内。

成坑（腔）效应是地下爆炸最显著的现象。在当量不变的情况下，爆炸埋深的不同会导致成坑（腔）形态发生明显变化，同时耦合入介质中的地冲击强度也不一样。因此成坑（腔）效应与地冲击大小存在密切关系。根据成坑大小与形态不同，可区分近地爆炸、半埋爆炸、浅埋爆炸、深埋爆炸以及封闭爆炸等不同类型，如图 1 所示。

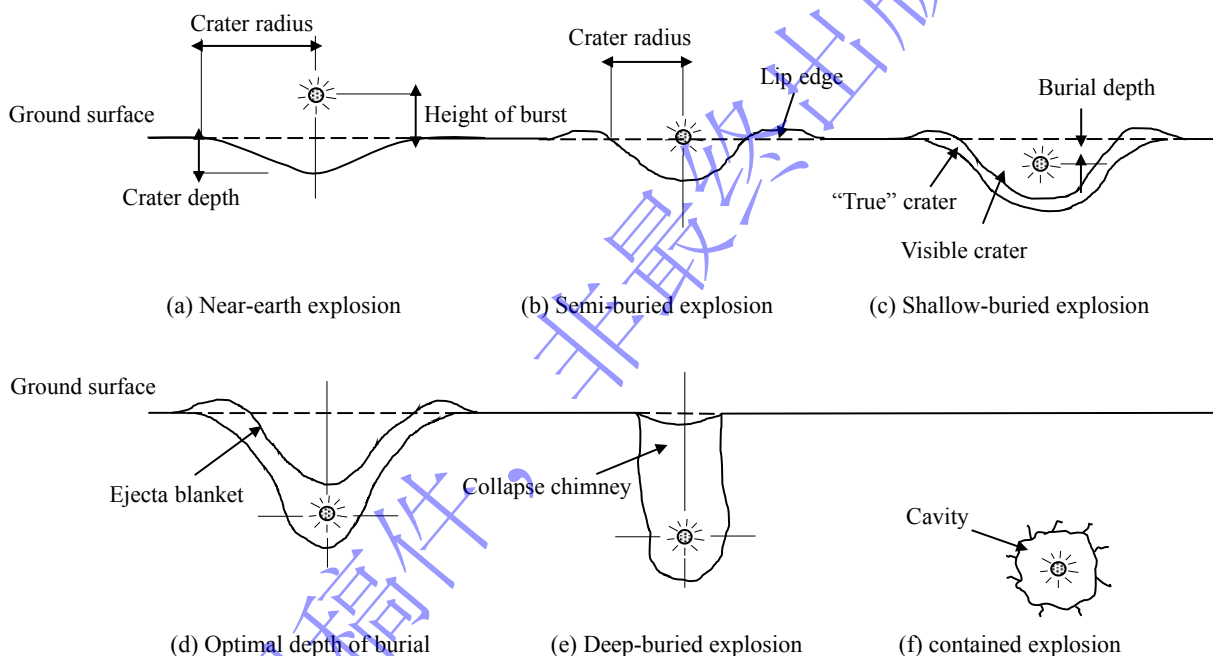


图 1 成坑形态随爆炸埋深的变化

Fig. 1 Variation of crater shape with the depth of burial of the explosion

近地爆炸的装药中心位于地表之上，爆炸后大部分能量耗散于空气中，形成空气冲击波。空气冲击波作用于地表后会在地下形成感生地冲击，并在地表形成爆炸成坑。

半埋爆炸的装药中心正好位于地面时。大部分能量仍以冲击波的形式传入空中，一部分则以地冲击的形式传入下方岩土介质。装药下方介质受到强烈压缩作用，形成爆炸成坑。地表处介质向外扩张至成坑半径，在成坑半径外侧，由于介质的塑性变形以及破碎介质的流动形成高于地面的唇沿。

浅埋爆炸爆心位于地表以下，但埋深较浅，其最显著特征是能将大量破碎介质抛入空中，因此又被称为抛掷爆炸。爆心上方介质被抛掷的同时，爆心下方介质受到强烈压缩而形成凹陷坑，该过程的机理与半埋爆炸成坑相同。爆炸后期部分被抛掷的介质落回坑内，抬高坑底。另外有部分抛掷物落在成坑边缘，形成高于地面的唇沿。由回落物堆积后形成的新的成坑表面被称为表观成坑，而在爆炸初期受到压缩形成的成坑被称为真实成坑，表观成坑尺寸小于真实成坑。

随着浅埋爆炸埋深的增加，有更多介质被抛出坑外，而落回坑内的较少，因此形成的表观坑尺寸

随埋深增加而增大。但随着埋深增加，爆心上方介质的重力也在增大，对抛掷作用产生抑制，因此成坑体积存在一个最大值，对应的埋深被称为最佳埋深。当埋深大于最佳埋深时，爆心上方介质的重力效应更加明显，被抛出坑外的介质减少，落回坑内的增多，因此表现坑尺寸逐渐减小。最佳埋深爆炸是浅埋爆炸的特殊情况。

当埋深增大至几乎没有介质抛掷时，达到深埋爆炸。深埋爆炸在介质内部形成一个爆炸空腔，在地表处由于反射稀疏波的作用将形成一个鼓包，即“反向成坑”。通常爆炸空腔上方的介质会向空腔内塌陷，塌陷作用向上传至地表时，将在地表形成塌陷成坑。若爆炸当量较小，则有可能形成永久的反向成坑。从爆炸空腔延伸至地表的疏松介质被称为烟囱体，爆炸气体可沿其中的缝隙缓慢释放至空气中。

若爆炸后地表没有明显可见的变化，则达到封闭爆炸。封闭爆炸在介质内形成爆炸球腔，爆炸破坏区与地表未连通，因此爆炸产物被封闭在地下，一般不会泄露至空气中。爆腔上方介质有可能向腔体内塌陷，但不会形成连通至地表的烟囱体。

## 2 耦合系数定义

### 2.1 能量耦合系数

爆炸产生的高压气体推动周围介质向外运动，在此过程中爆炸空腔内壁上的压力不断做功，将爆炸能量转化为介质的机械能。当空腔扩张停止后，除去介质破坏所消耗的能量，机械能一部分作为静弹性势能存储在介质中，一部分以动能形式不断向外转播，介质耦合能量即为该部分动能。非封闭爆炸产生的空气冲击波与地面相互作用会产生感生地冲击，本文所指耦合能量不包含感生地冲击耦合能量。

不同埋深爆炸的爆室压力、气体作用时间等均不相同，因此耦合入介质中的能量也不同。能量耦合系数  $\eta_c$ ，定义为相同介质、相同爆炸当量情况下，浅埋爆炸耦合能量与封闭爆炸耦合能量之比<sup>[2]</sup>，即

$$\eta_c = \frac{W_{sh}}{W_{sc}} \quad (1)$$

式中， $W_{sc}$ 为封闭爆炸耦合能量； $W_{sh}$ 为浅埋爆炸耦合能量。

### 2.2 地冲击参数耦合系数

地冲击参数耦合系数  $\eta_p$ ，定义为相同介质、相同当量、相同爆心距情况下地下爆炸地冲击参数与封闭爆炸地冲击参数之比<sup>[15]</sup>，即

$$\eta_p = \frac{(\sigma, v, a, u, I)_h}{(\sigma, v, a, u, I)_c} \quad (2)$$

式中， $\sigma$ 、 $v$ 、 $a$ 、 $u$ 、 $I$ 分别为地冲击峰值应力、峰值粒子速度、峰值加速度、峰值质点位移以及冲量；下标 h 与 c 分别代表浅埋爆炸以及封闭爆炸的情况。

根据计算所用的地冲击参数不同，可分为应力耦合系数  $\eta_{p,\sigma}$ 、粒子速度耦合系数  $\eta_{p,v}$ 、加速度耦合系数  $\eta_{p,a}$ 、位移耦合系数  $\eta_{p,u}$ 、冲量耦合系数  $\eta_{p,I}$  等。

地下爆炸地冲击随距离按指数衰减，地冲击粒子速度、应力、加速度的衰减规律可分别写为<sup>[4]</sup>

$$v = A \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n_1} \quad (3)$$

$$\sigma = B \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n_2} \quad (4)$$

$$aQ^{1/3} = C \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n_3} \quad (5)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  称为衰减系数,  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  称为衰减指数, 通常均由试验确定。

大量试验表明, 随着埋深增大, 衰减系数增大, 而衰减指数变化不大<sup>[5, 6]</sup>, 因此可利用耦合系数对不同埋深爆炸进行换算。封闭爆炸与半埋爆炸的试验数据较为丰富, 因此通常利用封闭爆炸或半埋爆炸地冲击衰减规律计算浅埋爆炸地冲击。以封闭爆炸为例, 设封闭爆炸地冲击的衰减系数为  $A_c$ 、 $B_c$  及  $C_c$ , 当量为  $Q$ , 则利用地冲击参数耦合系数可得当量同样为  $Q$  的浅埋爆炸地冲击为

$$v = \eta_{p,v} A_c \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n_1} \quad (6)$$

$$\sigma = \eta_{p,\sigma} B_c \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n_2} \quad (7)$$

$$aQ^{1/3} = \eta_{p,a} C_c \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-n_3} \quad (8)$$

若地冲击应力与粒子速度之间可按平面波关系换算, 即  $\sigma = \rho C_p v$  ( $\rho$  为介质密度,  $C_p$  为纵波波速), 则有  $\eta_{p,\sigma} = \eta_{p,v}$ 。

### 2.3 等效当量系数

等效当量系数  $\eta_Q$ , 相同距离处, 产生相同地冲击参数大小的两种爆炸埋深的当量之比<sup>[8]</sup>, 即

$$\eta_Q = \frac{Q_e}{Q} \quad (9)$$

式中,  $Q_e$  与  $Q$  为不同埋深的爆炸当量, 称  $Q_e$  为  $Q$  的等效当量。

根据等效计算所用的地冲击参数不同,  $\eta_Q$  可分为应力等效当量系数  $\eta_{Q,\sigma}$ 、粒子速度等效当量系数  $\eta_{Q,v}$ 、加速度等效当量系数  $\eta_{Q,a}$  等。

等效当量  $Q_e$  通常取等效封闭爆炸当量  $Q_{ec}$  或等效半埋爆当量  $Q_{e0}$ ,  $Q$  则取为某一埋深处的实际爆炸当量。等效当量系数在爆破工程中应用较广, 可用于计算产生一定爆炸效果所需的实际装药量。

假设需计算当量为  $Q$  的浅埋爆炸地冲击, 则首先将当量  $Q$  转化为等效封闭爆炸当量

$Q_{ec} = \eta_Q \cdot Q$ , 而后将  $Q_{ec}$  代入封闭爆炸地冲击衰减规律中进行计算, 按此可得浅埋爆炸地冲击为

$$v = A_c \left( \frac{r}{(\eta_{Q,v} Q)^{1/3}} \right)^{-n_1} \quad (10)$$

$$\sigma = B_c \left( \frac{r}{(\eta_{Q,\sigma} Q)^{1/3}} \right)^{-n_2} \quad (11)$$

$$a(\eta_{Q,a} Q)^{1/3} = C_c \left( \frac{r}{(\eta_{Q,a} Q)^{1/3}} \right)^{-n_3} \quad (12)$$

## 2.4 填塞系数

爆炸地冲击随埋深增加而增大，爆炸破坏范围也呈现相同变化趋势，即随着埋深增加，空腔半径、破碎区半径、径向裂纹区半径均增大。不同埋深的爆炸破坏区示意图如图 2 所示（图中略去了破碎区），其中， $r_a$  为爆心下方介质压缩范围， $r_p$  为爆心下方介质破坏范围， $r_b$  为地表成坑半径，下标中 0、h、c 分别代表半埋爆炸、浅埋爆炸、封闭爆炸情况， $\bar{h}$  为比例埋深（爆深与当量的立方根之比）。 $r_b$  与  $r_a$  均随埋深变化，对于封闭爆炸， $r_{ac} = r_{ah}$  即为空腔半径，地表无可见成坑， $r_{bc} = 0$ 。

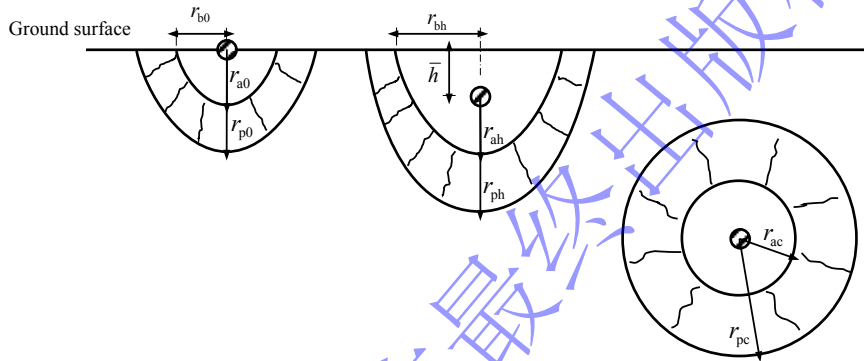


图 2 地下爆炸破坏区演化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the evolution of damage zones of underground explosion

为表征地下爆炸对介质破坏的尺度效应，定义填塞系数  $\eta_m$  为相同介质，相同爆炸当量条件下，不同埋深处压缩范围与半埋爆炸压缩范围之比，即

$$\eta_m = \frac{r_{ah}}{r_{a0}} \quad (13)$$

由于填塞系数是由破坏区尺度定义的，因此在工程中常用于计算不同埋深爆炸的压缩半径、破坏半径等物理量，即

$$\begin{aligned} r_{ah} &= \eta_m \cdot K_a \cdot \sqrt[3]{Q} \\ r_{ph} &= \eta_m \cdot K_p \cdot \sqrt[3]{Q} \end{aligned} \quad (14)$$

式中， $K_a$  与  $K_p$  分别为半埋爆炸时的爆炸压缩系数与破坏系数，仅与介质性质有关。

## 3 耦合系数换算关系

### 3.1 参数耦合系数与等效当量系数换算

根据浅埋爆炸地冲击的计算公式可建立地冲击参数耦合系数与等效当量系数之间的换算关系，式 (6)~(8) 与式 (10)~(12) 中的当量  $Q$  均为实际浅埋爆炸当量，所得到的地冲击参数大小相等，可得

$$\begin{aligned}\eta_{p,v} &= \eta_{Q,v}^{n_1/3} \\ \eta_{p,\sigma} &= \eta_{Q,\sigma}^{n_2/3} \\ \eta_{p,a} &= \eta_{Q,a}^{(n_3-1)/3}\end{aligned}\quad (15)$$

可以看出，参数耦合系数与等效当量系数之间的换算与地冲击衰减指数  $n$  有关，因此在不同的介质中换算关系不同。由于质点加速度的衰减规律不同于粒子速度和应力，因此其耦合系数与等效当量系数换算关系不同于应力与粒子速度相应系数的换算关系。

### 3.2 能量耦合系数与参数耦合系数换算

地下爆炸产生的介质粒子速度可写为<sup>[17,18]</sup>

$$v = v_p \left( \frac{r}{r_p} \right)^{-n_1} \quad (16)$$

式中， $v_p$  为介质破坏区边界的粒子速度。

理论计算为

$$\eta_e = \frac{W_{sh}}{W_{sc}} = \frac{V_{ph}}{V_{pc}} = \frac{r_{ph}^3}{r_{pc}^3} \quad (17)$$

对于相同介质中不同埋深爆炸，介质破坏区边界的极限应变应当相同，即  $v_p / C_p$  为定值，因此可假定对于不同埋深爆炸  $v_p$  不变，则有

$$v_c = v_p \left( \frac{r}{r_{pc}} \right)^{-n_1} \quad (18)$$

$$v_h = v_p \left( \frac{r}{r_{ph}} \right)^{-n_1} \quad (19)$$

式中，下标中  $h$  与  $c$  分别代表浅埋爆炸和封闭爆炸情况。

将式(19)与式(18)相除可得

$$\frac{v_h}{v_c} = \left( \frac{r_{ph}}{r_{pc}} \right)^{n_1}, \quad \text{即 } \eta_{p,v} = \eta_e^{n_1/3} \quad (20)$$

结合式(15)可得

$$\eta_{Q,v} = \eta_e \quad (21)$$

李杰等<sup>[17]</sup>引入了参数  $\lambda$  表征不同埋深爆炸时破坏区的球形度，以修正式(17)中破坏区体积与破坏区半径的关系，即设爆心下方破坏区竖直方向半径为水平方向半径的  $\lambda$  倍， $\lambda$  为大于 1 的数，则有

$$\eta_{Q,v} = \lambda^2 \eta_e \quad (22)$$

需注意的是， $\lambda$  随埋深增加而减小，当地冲击完全耦合时， $\lambda = 1$ ，此时破坏区为球形。与能量耦合系数进行换算的参数耦合系数及等效当量系数均应以封闭爆炸地冲击为基准进行计算。

### 3.3 填塞系数与能量耦合系数换算

对于岩石、混凝土等材料，介质破坏半径  $r_p$  与压缩半径  $r_a$  存在以下关系<sup>[18]</sup>：

$$\frac{r_p}{r_a} = \theta r_a^{1/3} \quad (23)$$

式中， $\theta$  为介质相关参数。

根据式(17)，能量耦合系数可写为

$$\eta_e = \frac{r_{ph}^3}{r_{pc}^3} = \frac{r_{ah}^4}{r_{ac}^4} \quad (24)$$

结合式(13)可得

$$\eta_m = \left( \frac{\eta_e}{\eta_e(0)} \right)^{1/4} \quad (25)$$

式中， $\eta_e(0)$  为埋深为 0，即半埋爆炸的能量耦合系数。

## 4 国内外耦合系数数据

### 4.1 混凝土中耦合系数

穆朝民等<sup>[5]</sup>与李重情等<sup>[11]</sup>在 C30 混凝土中开展了变埋深爆炸试验，并测量了不同爆炸埋深、相同爆心距处的质点加速度与应力。共进行 7 发试验，每发 6 个加速度测点，装药当量为 1kg，混凝土泊松比为 0.202，弹性模量为 33.4GPa，装药埋深为 -0.25m/kg<sup>1/3</sup> 至 1.2m/kg<sup>1/3</sup>（负埋深表示爆心在地表上方）。

根据不同埋深的加速度与应力可得以半埋爆为基准的等效当量系数，在比例埋深 -0.25~1.2m/kg<sup>1/3</sup> 范围内，加速度等效当量系数与应力等效当量系数的拟合函数为

$$\eta_{Q,\sigma} = 0.74 + 2.54\bar{h} + 0.05\bar{h}^2 - 0.61\bar{h}^3 \quad (26)$$

$$\eta_{Q,a} = 0.86 + 5.14\bar{h} + 4.66\bar{h}^2 - 2.95\bar{h}^3 \quad (27)$$

试验数据与拟合曲线见图 3。当比例埋深大于 1m/kg<sup>1/3</sup> 时， $\eta_{Q,a}$  与  $\eta_{Q,\sigma}$  的变化已较小，可认为在比例埋深 1.2m/kg<sup>1/3</sup> 时两者同时达到完全耦合，此时  $\eta_{Q,a}$  取 9， $\eta_{Q,\sigma}$  取 3。

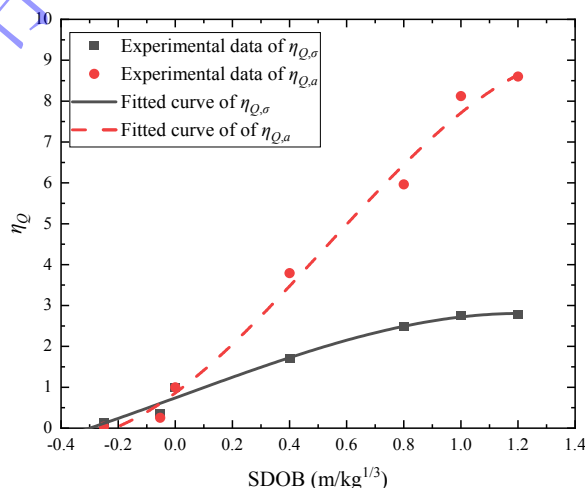


图 3 混凝土中等效当量系数

Fig. 3 Equivalent coefficient in concrete

试验中不同埋深爆炸引起的靶体表面破坏现象见图4，当埋深为  $1.0\text{m/kg}^{1/3}$  时，地面仍有破裂现象，因此封闭爆埋深应大于  $1.0\text{m/kg}^{1/3}$ 。

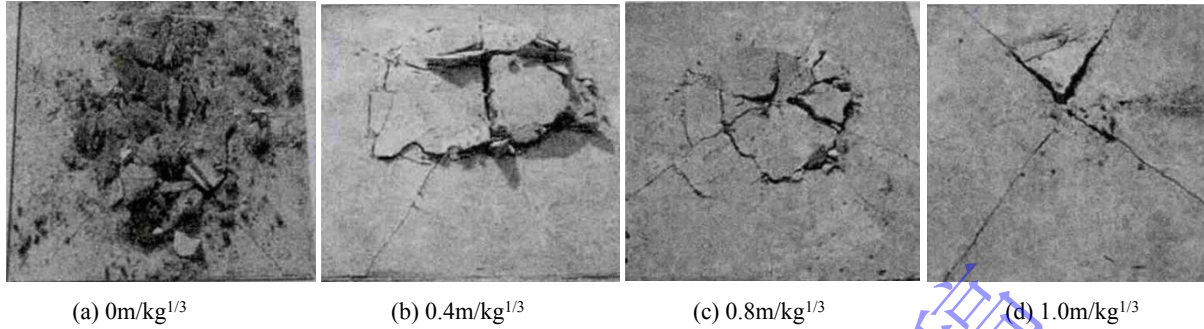


图4 靶体破坏现象<sup>[11]</sup>

Fig. 4 Phenomena of target destruction

#### 4.2 岩体中耦合系数

赵红玲等<sup>[6]</sup>在石灰岩中开展了变埋深爆炸试验，装药当量为  $27\text{kg}$ ，共设置6种埋深，在  $0.053\text{m/kg}^{1/3}$  至  $0.8\text{m/kg}^{1/3}$  之间。试验对介质中自由场应力与加速度进行了测量，根据试验数据可得以半埋爆为基准的应力等效当量系数与加速度等效当量系数，将数据拟合后得到在埋深  $0.053\sim 0.8\text{m/kg}^{1/3}$  范围内，应力与加速度等效当量曲线分别为

$$\eta_{Q,\sigma} = 0.88 + 6.08\bar{h} + 5.74\bar{h}^2 - 1.07\bar{h}^3 \quad (28)$$

$$\eta_{Q,a} = 0.99 + 4.20\bar{h} + 0.94\bar{h}^2 + 2.34\bar{h}^3 \quad (29)$$

试验数据与拟合曲线见图5，原文中认为当埋深大于  $0.8\text{m/kg}^{1/3}$  时达到完全耦合，但根据试验数据可以看出，从埋深  $0.6\text{m/kg}^{1/3}$  变化至  $0.8\text{m/kg}^{1/3}$  时，当量系数仍变化较大，未达到稳定阶段，因此无法判定完全耦合临界埋深。但可以看出，在该试验中，以半埋爆为基准的应力等效当量系数大于加速度等效当量系数，在埋深  $0.8\text{m/kg}^{1/3}$  处， $\eta_{Q,\sigma}$  约为  $\eta_{Q,a}$  的1.4倍。

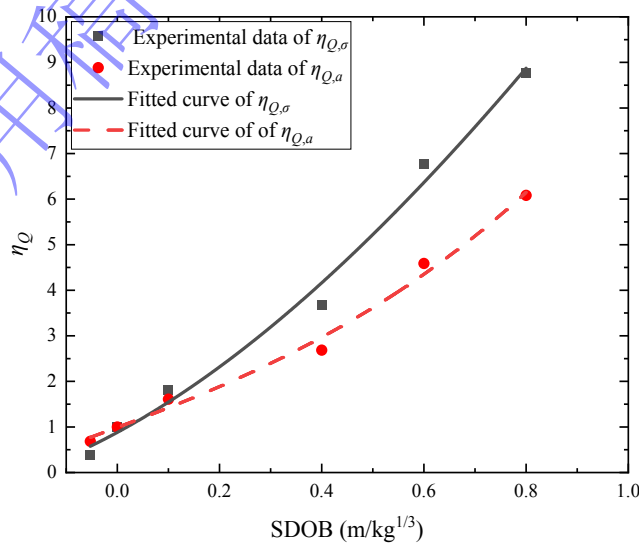


图5 石灰岩中等效当量系数

Fig. 5 Equivalent coefficient in limestone

### 4.3 土中耦合系数

叶亚齐等<sup>[8]</sup>在砂质黏土中开展了变埋深爆炸试验，共进行 8 发试验，埋深为 $-0.2\text{m/kg}^{1/3}$ 至 $1.0\text{m/kg}^{1/3}$ ，砂质黏土含水量为 16.3%，容重为  $19.4\text{kN/m}^3$ ，单轴抗压强度为  $0.31\text{MPa}$ ，泊松比为 0.473，试验对介质中自由场应力进行了测量，根据试验数据计算得**以半埋爆为基准的应力等效当量系数**，将数据拟合后可得在比例埋深 $-0.05\sim 1.0\text{m/kg}^{1/3}$ 范围内应力等效当量耦合系数函数为

$$\eta_{Q,\sigma} = 1.00 + 4.69\bar{h} + 2.56\bar{h}^2 - 2.50\bar{h}^3 \quad (30)$$

试验数据与拟合曲线见图 6。可以看出，埋深  $1.00 \text{ m/kg}^{1/3}$  时的耦合系数相较  $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$  有所下降，但变化不大，可以认为在  $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$  处已达到完全耦合，从偏安全的角度考虑，可以取完全耦合时  $\eta_{Q,\sigma} = 6$ 。

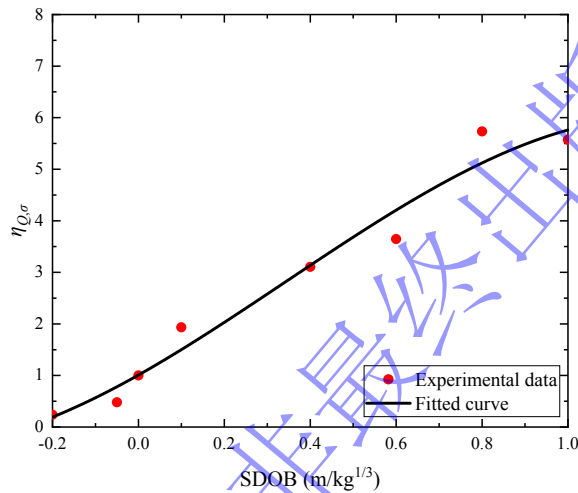


图 6 砂质黏土中应力等效当量系数

Fig. 6 Equivalent coefficient in sandy clay

施鹏等<sup>[19, 20]</sup>与穆朝民等<sup>[10]</sup>在黄土中开展了变埋深爆炸试验，试验测量了地冲击应力以及爆炸成坑，并计算了应力冲量，得到了按式(2)计算的**以封闭爆为基准的冲量耦合系数**。共进行了 30 炮试验，根据试验数据拟合得到冲量耦合系数曲线如图 7 所示，可以看出，地冲击冲量在比例埋深约为  $1.9\text{m/kg}^{1/3}$  时达到完全耦合。

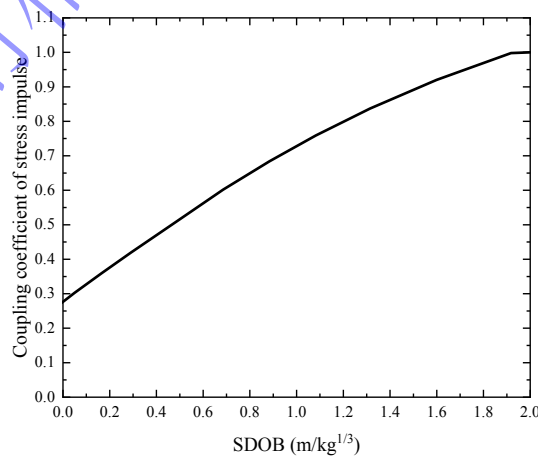


图 7 黄土中应力冲量耦合系数

Fig. 7 Coupling coefficient of stress impulse in loess

试验还观测了地表爆炸现象，并测量了爆炸成坑尺寸，不同比例埋深的爆炸现场如图 8 所示，当

埋深较浅时，爆炸后可见显著成坑，当比例埋深为  $1.96\text{m/kg}^{1/3}$  时，地表无明显现象，与冲量完全耦合临界深度一致。

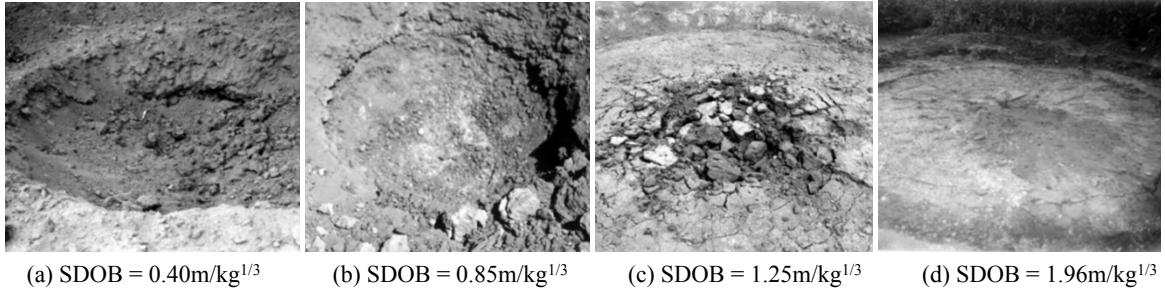


图 8 爆炸成坑现象<sup>[10]</sup>

Fig. 8 Explosive craters of the experiments

爆炸后装药下方压缩半径（图 2 中  $r_{ah}$ ）与地表弹坑半径（图 2 中  $r_{bh}$ ）随埋深变化如图 9 所示。可以看出，在比例埋深大于  $0.4\text{m/kg}^{1/3}$  时，爆心下方的压缩半径随埋深变化不明显，而地表成坑半径尚未达到最大值。对比图 7 与图 8，比例埋深  $0.4\text{m/kg}^{1/3}$  时冲量远未达到完全耦合。

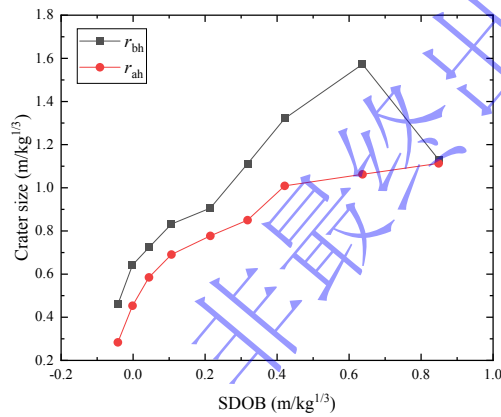


图 9 黄土中爆炸成坑尺寸

Fig. 9 Crater sizes in loess

利用图 9 中爆心下方压缩半径可计算填塞系数（式(13)），结果见图 10。

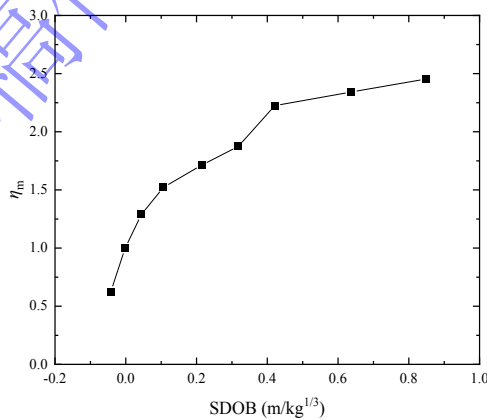


图 10 黄土中填塞系数

Fig. 10 Stemming coefficient in loess

时本军等<sup>[12, 13]</sup>在黏土中开展了变埋深爆炸试验，共进行 7 发试验，采用 10.5g 球形 TNT 药球，装药埋深为  $-0.056\sim 1.46\text{m/kg}^{1/3}$ ，对地冲击应力及成坑尺寸进行了测量，根据测量结果，得到以封闭爆为基准的应力耦合系数  $\eta_{p,\sigma}$  与填塞系数  $\eta_m$ ，见图 11。可以看出，埋深为  $0.55\text{m/kg}^{1/3}$  时应力耦合系数

与填塞系数均接近完全耦合，该深度与图 10 中填塞系数完全耦合临界深度相近。

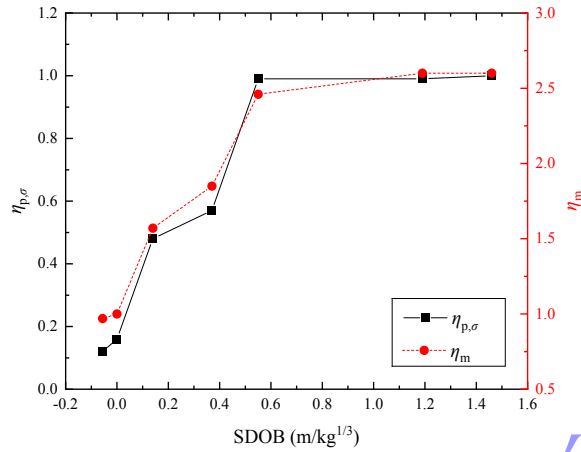


图 11 黏土中应力耦合系数与填塞系数

Fig. 11  $\eta_{p,\sigma}$  and  $\eta_m$  in clay

试验中地表破坏现象见图 12，将靶体沿成坑中心纵向切开后可见介质内成坑形态，测量得到爆心下方土的压缩半径  $r_{ah}$ ，见表 1。在完全耦合临界埋深  $0.55\text{m/kg}^{1/3}$  处，地表仍有明显成坑，但在爆心下方已形成完整的半球形空腔，根据测量结果，爆心下方半球形空腔尺寸在埋深大于  $0.55\text{m/kg}^{1/3}$  后变化不明显，值得注意的是，该埋深与封闭爆炸空腔半径  $0.479\text{m/kg}^{1/3}$  相近。在埋深  $1.46\text{m/kg}^{1/3}$  处，地表仅有轻微破坏，介质内已形成完整的球形空腔，说明封闭爆炸临界埋深应略大于  $1.46\text{m/kg}^{1/3}$ ，这与图 8 的试验现象相符。

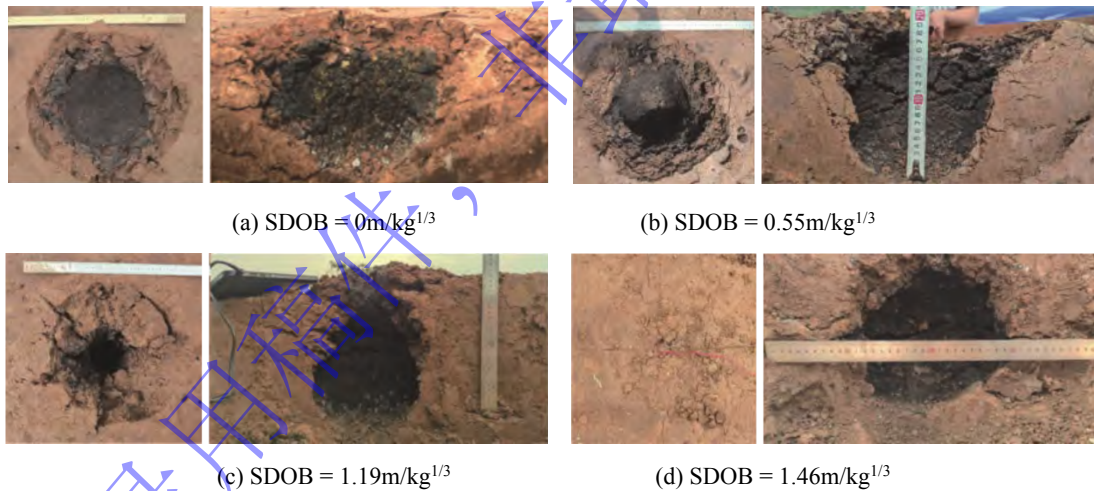


图 12 黏土中爆炸现象<sup>[12]</sup>

Fig. 12 Craters and cavities in clay

表 1 黏土中试验结果

Table 1 Experimental results in clay

装药埋深 (m/kg <sup>1/3</sup> )	爆心下方压缩半径 (m/kg <sup>1/3</sup> )
-0.056	0.179
0	0.184
0.14	0.289
0.37	0.340

0.55	0.453
1.19	0.478
1.46	0.479

#### 4.4 国外规范中耦合系数

美国工程兵水道试验站编写的技术手册 TM5-855-1<sup>[15]</sup>中给出了通过大量化爆得到的以封闭爆为基准的土与混凝土中地冲击参数耦合系数  $\eta_p$  的曲线，见图 13，手册中指出该曲线适用于所有地冲击参数。可以看出，混凝土中半埋爆时  $\eta_p$  为 0.82，当比例埋深约为  $0.1\text{m}/\text{kg}^{1/3}$  时达到完全耦合；土中半埋爆时  $\eta_p$  为 0.43，当比例埋深约为  $0.55\text{m}/\text{kg}^{1/3}$  时达到完全耦合，与图 11 中完全耦合深度一致。

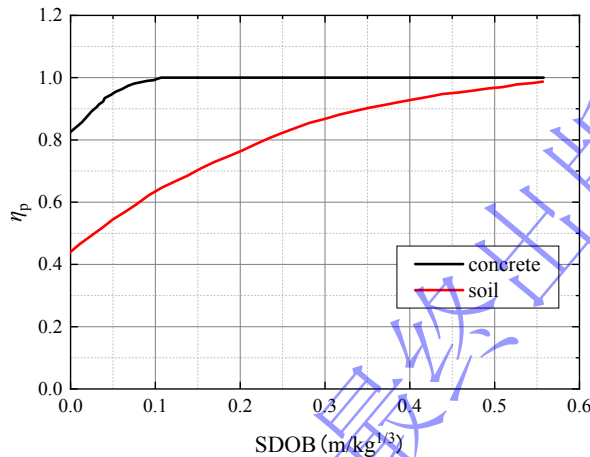


图 13 TM5-855-1 地冲击参数耦合系数<sup>[15]</sup>

Fig. 13  $\eta_p$  in TM5-855-1

美国陆军工程兵教范 (EM1110-345-434)<sup>[21]</sup>中给出了花岗岩中半埋爆炸的应变衰减规律：

$$\varepsilon = 863 \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-2} \quad (31)$$

式中， $r$  为爆心距，m； $Q$  为爆炸当量，kg； $\varepsilon$  为微应变。

该教范指出，当比例埋深大于  $0.14\text{m}/\text{kg}^{1/3}$  时，地下爆炸在花岗岩中产生的应变不再随埋深变化，即达到完全耦合<sup>[21]</sup>，此时应变随比例距离变化为：

$$\varepsilon = 1887 \left( \frac{r}{Q^{1/3}} \right)^{-2} \quad (32)$$

根据式(31)与式(32)，假定按平面波计算地冲击粒子速度与应力，则以封闭爆为基准的半埋爆地冲击应力与粒子速度耦合系数为

$$\eta_{p,v} = \eta_{p,\sigma} = 0.457 \quad (33)$$

#### 4.5 地下核爆耦合系数

美国国防部核子局<sup>[2]</sup>给出了以封闭爆炸为基准的地下核爆炸能量耦合系数  $\eta_e$  的计算公式：

$$\eta_e = \begin{cases} 0.0146 \cdot |\bar{h}|^{-0.106}, & \bar{h} < -0.05 \\ 0.059 \exp(21.455\bar{h}), & -0.05 \leq \bar{h} \leq 0.05 \\ \min(0.504\bar{h}^{0.36}, 1), & \bar{h} > 0.05 \end{cases} \quad (34)$$

式中， $\bar{h}$  为比例埋深 ( $\text{m}/\text{kt}^{1/3}$ )，负值代表地面以上爆炸。

式(34)由数值模拟得到，其所用算法综合考虑了武器特征、岩体介质性质以及爆炸位置等因素的影响。根据式(34)可绘制能量耦合系数曲线，如图 14 所示。从图中可看出，当比例埋深为  $6.7\text{m}/\text{kt}^{1/3}$  时爆炸能量达到完全耦合。半埋爆炸的能量耦合系数为 0.059，换算得到完全耦合时耦合能量约为半埋爆炸的 17 倍。

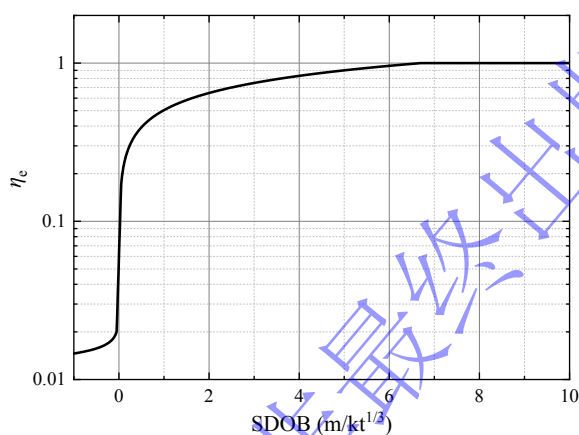


图 14 美国地下核爆能量耦合系数

Fig. 14  $\eta_e$  of underground nuclear explosions of USA

美国空军设计手册 (AD295408) [22] 中根据核爆试验给出半埋核爆与封闭核爆之间的等效当量系数为 0.06，根据式(21)，等效当量系数与能量耦合系数相同，因此试验结果与图 14 中半埋爆炸能量耦合系数 0.059 一致。此外，还指出封闭核爆与封闭化爆之间的地冲击换算当量系数为 0.16，即封闭核爆耦合入岩体中的能量仅为同当量化爆的 0.16 倍。

俄罗斯[4]也给出了以封闭爆为基准的能量耦合系数曲线，如图 15 所示。原文并未给出曲线的计算方法以及适用的情况。根据曲线可得半埋爆炸时能量耦合系数约为 0.09，完全耦合时比例埋深约为  $10\text{m}/\text{kt}^{1/3}$ ，耦合能量约为半埋爆炸的 11 倍。

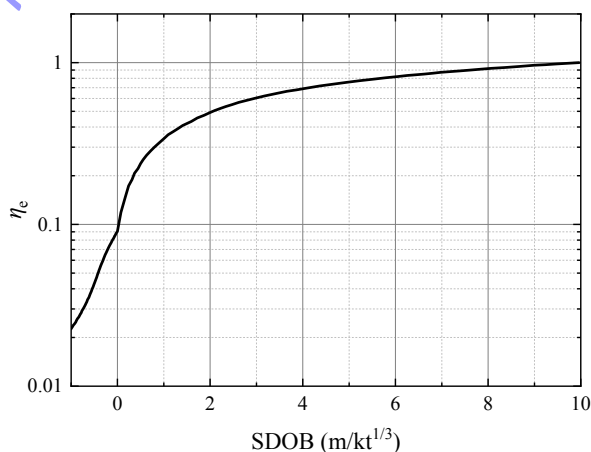


图 15 俄罗斯地下核爆能量耦合系数[4]

Fig. 15  $\eta_e$  of underground nuclear explosions of Russia<sup>[4]</sup>

通过在地表布置震动速度传感器，俄罗斯得到了在相似地质条件下不同埋深爆炸引发的地震动速度，给出了以半埋爆炸为基准的地表震动速度耦合系数随埋深的变化关系，如图 16 所示。从图中可以看出，当比例埋深在  $80 \text{ m/kt}^{1/3}$  时，已接近完全耦合，此时峰值速度大约为半埋爆炸时的 8.6 倍。与图 14 和图 15 相比，图 16 中完全耦合临界深度远大于图 14 与图 15。

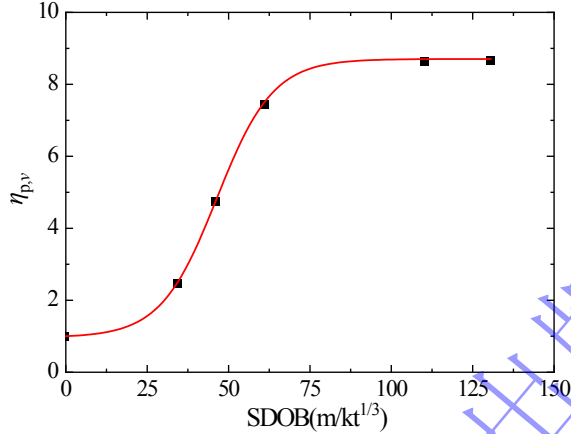


图 16 地下核爆地表震动速度耦合系数<sup>[4]</sup>

Fig. 16 Coupling coefficient of the ground vibration velocity of underground nuclear explosions<sup>[4]</sup>

## 5 耦合系数曲线计算方法

受地表自由面影响，浅埋爆炸耦合系数理论计算较为困难，难以获得耦合系数随埋深变化的解析规律，目前常用方法为根据试验数据直接利用多项式进行拟合<sup>[6-9, 11]</sup>。大量试验和数值模拟表明，能量耦合系数的变化曲线与 Boltzmann 函数曲线类似，可表示为<sup>[23]</sup>

$$\eta_e = \frac{2D_1 + e^{\bar{h}/D_2} - 1}{e^{\bar{h}/D_2} + 1} = 1 - \frac{2(1-D_1)}{e^{\bar{h}/D_2} + 1} \quad (35)$$

式中， $\bar{h}$  为比例埋深； $D_1$  为半埋爆炸时的  $\eta_e$  值； $D_2$  为控制曲线变化速率的参数。

取  $\eta_e = 0.99$  时为完全耦合，则

$$D_2 = \bar{h}_c \ln^{-1}(199 - 200D_1) \quad (36)$$

式中， $\bar{h}_c$  为封闭爆炸比例埋深。

与美、俄核爆耦合系数曲线进行对比。图 14 中半埋爆炸能量耦合系数为 0.059，图 15 中为 0.09，取平均值，则  $D_1 = 0.075$ ，完全耦合临界埋深取  $9\text{m/kt}^{1/3}$ ，则根据式(36)计算得到  $D_2 = 1.73$ ，将参数代入式(35)可得能量耦合系数曲线，如图 17 所示。可以看出，Boltzmann 函数曲线总体位于美俄曲线之间，埋深较浅时与俄罗斯曲线接近，埋深较大时与美国曲线接近，可以较好反应能量耦合系数随埋深变化规律。

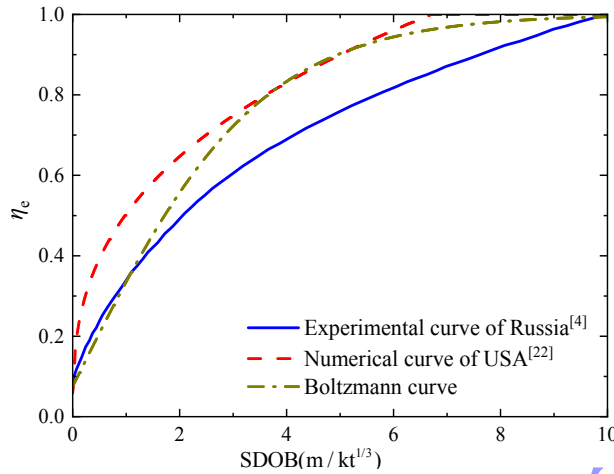


图 17 与美俄耦合系数曲线对比

Fig. 17 Comparison between the Boltzmann curve and the curves of USA and Russia

利用式(35)与式(36), 即可根据半埋爆能量耦合系数与完全耦合临界埋深两个参数确定耦合系数演化曲线。

根据能量守恒定律, 从介质某一边界辐射出的机械能等于该边界上的介质应力做功, 即

$$W = S_r \int_0^{u_r(\infty)} \sigma_r du_r \quad (37)$$

式中,  $W$  为耦合入介质中的机械能;  $\sigma_r$  为介质径向应力;  $u_r$  为径向位移;  $u_r(\infty)$  表示介质的永久位移;  $S_r$  为对应边界的面积。

积分式(37)后可得到两项, 分别代表介质的静态弹性势能与向远处传播的动能, 爆炸耦合能量指的就是介质运动动能, 可写为<sup>[23]</sup>

$$W_s = \frac{B_* \tau_s^2 C_p^2}{12 G C_s^2} V_p \quad (38)$$

式中,  $V_p$  为介质边界所围区域的体积;  $\tau_s$  为介质剪切强度;  $G$  为介质剪切模量;  $C_p$  与  $C_s$  分别为介质的纵波波速与剪切波速;  $B_* = [5 + 3(1 + 24\nu)^2] / 64$ ,  $\nu$  为介质泊松比。

从式(38)可以看出, 耦合能量与  $V_p$  成正比, 而比例系数仅与介质性质有关。  $V_p$  的边界可以是空腔区或裂纹区等破坏区的边界, 考虑耦合能量为向下传播部分, 对于封闭爆炸,  $V_p$  为半球体体积, 对于浅埋爆炸及半埋爆炸,  $V_p$  为爆心下方半空间内的破坏区体积。

根据式(1)的定义, 半埋爆炸能量耦合系数可写为

$$\eta_e(0) = \frac{W_{s0}}{W_{sc}} = \frac{V_{p0}}{V_{pc}} \quad (39)$$

$V_{p0}$  可取半埋爆炸的成坑体积, 可由经验公式计算或试验测得,  $V_{pc}$  可取封闭爆炸的空腔半体积, 可由理论或经验公式计算<sup>[3]</sup>。由此即可根据介质性质确定半埋爆炸能量耦合系数。

完全耦合临界埋深可通过试验测得, 具体分析见下节。由此, 即可通过经验或半经验的方法确定式(35)中  $D_1$  与  $D_2$  两个系数, 进而确定耦合系数变化曲线。

## 6 地冲击完全耦合临界埋深

地下爆炸地冲击的完全耦合,是指随着埋深增加,某一物理量(如峰值应力、粒子速度、加速度、位移、冲量等)不再随埋深变化,其响应等同于无限介质中爆炸的状态,达到该状态的最小埋深即完全耦合临界深度。根据第4节的国内外试验数据可以看出,不同物理量的临界深度存在显著差异:爆心下方峰值应力与粒子速度的完全耦合深度接近封闭爆炸的空腔半径,如图11与图13中,土中应力完全耦合临界埋深约为 $0.55\text{m/kg}^{1/3}$ ,与封闭爆炸空腔半径 $0.479\text{m/kg}^{1/3}$ (表1)接近;而冲量与地表震动速度的完全耦合深度则远大于封闭爆炸空腔半径,甚至与封闭爆炸深度相当,如图7中,黄土中地冲击冲量的完全耦合临界埋深约为 $2\text{m/kg}^{1/3}$ ,接近土的封闭爆炸临界埋深。图16中,地下核爆产生的地表震动速度完全耦合深度约为 $80\text{m/kt}^{1/3}$ ,处于地下封闭核爆临界埋深范围 $70\sim 120\text{m/kt}^{1/3}$ 内<sup>[4]</sup>。

这一差异的根源在于,不同物理量受自由面反射拉伸波影响的方式不同——峰值量仅依赖于波阵面到达瞬间的状态,而冲量、地表震动等积分量则取决于完整的加载-卸载历史,地表远场的介质响应还与应力波的空间分布有关。

### 6.1 峰值量与积分量的完全耦合临界埋深

爆炸冲击波形成的过程可分为两个阶段,第一阶段为爆炸初期,高温高压爆轰产物猛烈膨胀,推动空腔向外运动,扩张速度大于冲击波速,介质被不断压缩,应力增大;第二阶段,当空腔扩张速度降至小于冲击波速后,波峰与空腔表面分离并向外传播,空腔剩余压力形成冲击波的下降段。

在冲击波前方首先会有一个弹性前驱波向外传播,当其向上传播至地表自由面时,会向下反射一个拉伸波,拉伸波会产生两种卸载作用,一方面,在其传播路径上使介质原有应力场卸载,另一方面,传播至空腔表面时会加剧空腔扩张,使空腔内部压力降低。

向爆心下方传播的峰值应力、粒子速度等峰值量在冲击波阵面与空腔表面分离后即形成,若反射波在冲击波阵面与空腔分离之前反射回空腔表面,则空腔内部的压力卸载会使峰值量减小,若在冲击波阵面分离后反射回空腔表面,则会加速冲击波峰后曲线的卸载,使位移、冲量等积分量减小。

根据上述机理分析,峰值量与积分量的完全耦合临界深度是不同的,前者应当小于后者。根据试验结果,峰值量的完全耦合深度约为封闭爆炸空腔半径,此时在地表发生破坏之前介质中正好形成了完整的空腔,后续介质抛掷、气体逸散等过程对地冲击峰值的影响较小。积分量的完全耦合深度约为封闭爆炸临界埋深,此时空腔在反射波作用前已扩张充分,形成了完整的应力波曲线。

### 6.2 地表震动的完全耦合临界埋深

对于非封闭爆炸,爆心上方与下方介质对空腔的约束强弱不同。爆心下方空腔扩张时,受到介质较强的法向与侧向约束,其效果可近似为无限介质。而爆心上方由于存在自由面,对空腔扩张的约束较弱,空腔推动介质产生不可逆运动与塑性流动,形成大量张拉裂缝,甚至产生介质抛掷与地表弹坑,大部分爆炸能量耗散于介质的变形、运动与破坏,转换为应力波的能量明显小于爆心下方区域。因此非封闭爆炸的应力波分布在空间中是不均匀的,当埋深较浅时,地表的震动速度远未达到最大值。当埋深接近封闭爆炸深度时,空腔上方介质的约束作用接近无限介质,爆炸转化为冲击波能量的占比增大,因此地表震动速度达到完全耦合。

## 7 等效当量系数对比分析

等效当量系数在工程中应用较广,可用于计算浅埋爆炸的等效封闭爆炸当量,进而计算地冲击大小(式(10)~(12)),利用第3小结中不同系数的换算关系,将第4小结的耦合系数转化为按封闭爆炸等效的等效当量系数,得到结果见图18,其中NE表示核爆。

从图中可以看出,采用按封闭爆等效的等效当量系数时,化爆的曲线较为集中,虽然半埋爆炸时不同介质、不同参数之间有所差异,但随着埋深增大,相对差距逐渐减小。如混凝土中的等效当量系

数，半埋爆时应力等效当量系数约为 0.26，加速度等效当量系数约为 0.1，相差 2.6 倍，当比例埋深为  $0.6\text{m/kg}^{1/3}$  时，应力等效当量系数为 0.76，加速度等效当量系数为 0.58，相差仅 1.3 倍。而若采用按半埋爆炸等效的等效当量系数，如图 3，应力与加速度等效当量系数之间的差距随埋深增大，对于地下爆炸而言必须考虑两者的差异。

现有钻地弹如 GBU-28，装药当量约 300kg，在 300m/s 速度下钻混凝土深度 4m，钻土深度 58m，对应比例埋深为  $0.6\text{m/kg}^{1/3}$  及  $8.7\text{m/kg}^{1/3}$ ，对于土体，该侵彻深度已达到完全耦合深度，其地冲击效应可按封闭爆炸进行计算；对混凝土，应力等效当量系数约为 0.8，加速度等效当量系数约为 0.6，地冲击应力的耦合程度较高，由于地下工程最小安全防护层厚度通常以应力或粒子速度作为设计控制指标，从安全设计角度出发，其地冲击效应同样可按封闭爆炸近似计算。因此，对于地下工程抗常规钻地武器最小安全防护层厚度设计，可采用以封闭爆为基准的等效当量系数，利用式(35)所示的 Boltzmann 函数给出计算公式。取  $D_1 = 0.2$ ， $\bar{h}_c = 1.2 \text{ m/kg}^{1/3}$ ，可得

$$\eta_Q = 1 - \frac{1.6}{e^{\bar{h}/0.237} + 1} \quad (40)$$

从图中可以看出，式(40)可作为不同介质中化爆应力等效当量系数的上限值，该曲线与黏土中试验结果符合较好，在埋深大于  $0.2 \text{ m/kg}^{1/3}$  时最大误差仅 3.5%，对于混凝土和砂质黏土是偏安全的。

地下核爆的等效当量曲线明显不同于化爆，主要在于完全耦合临界深度较小。这可能由于化爆与核爆形成地冲击的机理不同，化爆产生大量高温高压气体直接对介质做机械功，而核爆通过等离子体和气化岩体膨胀做功，因此化爆机械做功效率高于核爆，需更大埋深达到完全耦合。不同因素对化爆、核爆耦合曲线的影响还需进一步研究。考虑到  $\eta_Q = \eta_e$ ，地下核爆等效当量系数可用图 17 中的 Boltzmann 函数表示，即

$$\eta_Q = 1 - \frac{1.85}{e^{\bar{h}/1.73} + 1} \quad (41)$$

式中， $\bar{h}$  单位为  $\text{m/kg}^{1/3}$ 。

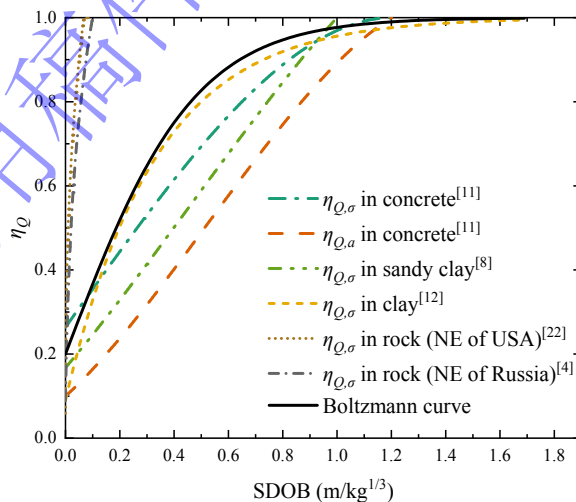


图 18 不同介质中等效当量系数对比

Fig. 18 Comparisons of  $\eta_Q$  in different media

## 8 填塞系数对比分析

防护工程设计中需要确定地下爆炸的破坏半径，而利用填塞系数可直接计算（式(14)），因此，不同介质中的填塞系数具有重要的工程意义。利用第3小结中不同系数的换算关系，将图18中的应力等效当量系数转化为填塞系数，得到结果见图19，其中黄土与黏土中填塞系数分别由图10与图11拟合得到。

从图中可以看出，混凝土中完全耦合时填塞系数约为1.4，石灰岩中完全耦合时填塞系数约为1.8，而土中填塞系数达2.4~2.6，说明随着埋深增大，爆炸对土介质的压缩作用增加更显著，即耦合入土中的能量占比增长更快。考虑到封闭爆炸时核爆对岩石的压缩作用弱于同当量化爆，而图19中地下核爆的填塞系数大于化爆，说明半埋爆炸时核爆对介质的压缩与化爆之比相对封闭爆炸时更小。

与浅埋或封闭爆炸相比，半埋爆炸产生的压缩、破坏区范围更易测得，因此利用以半埋爆为基准的填塞系数可计算任意埋深处的爆炸压缩/破坏区范围。

填塞系数变化规律可用指数函数描述，从偏安全角度考虑，不同介质中化爆填塞系数可写为

$$\eta_m = \begin{cases} 2.65(1-0.62e^{-3.2\bar{h}}), & \text{黏土、黄土} \\ 2(1-0.5e^{-2\bar{h}}), & \text{石灰岩} \\ 1.4(1-0.28e^{-3\bar{h}}), & \text{混凝土} \end{cases} \quad (42)$$

地下核爆填塞系数可写为

$$\eta_m = 2.05(1-0.51e^{-0.6\bar{h}}) \quad (43)$$

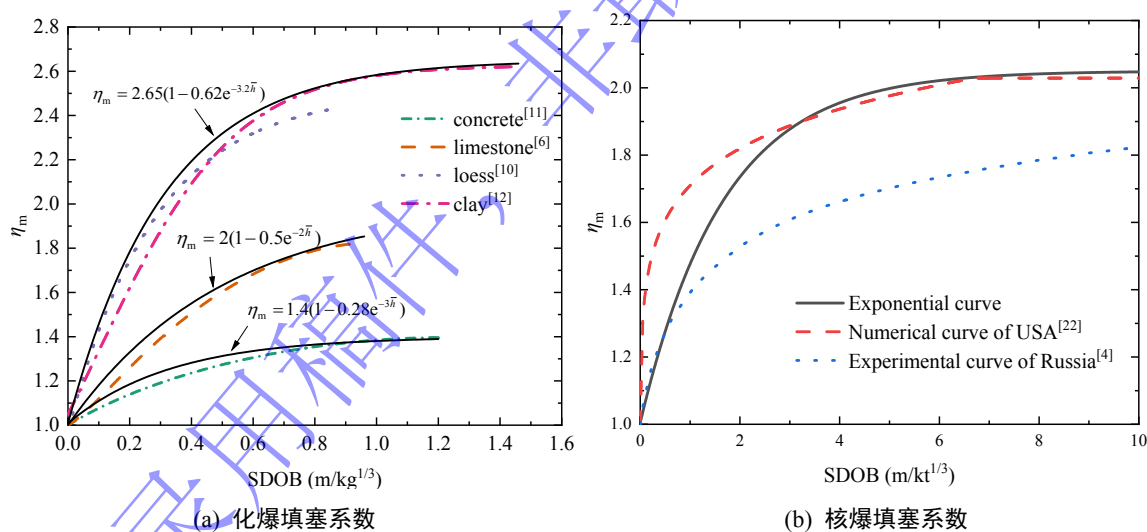


图19 不同介质中填塞系数对比

Fig. 19 Comparisons of  $\eta_m$  in different media

## 9 结论与展望

耦合系数在评估地下爆炸效果、计算地下爆炸应力波大小以及确定地下工程最小安全防护层厚度方面具有重要作用。目前，国内外学者通过试验、理论、数值模拟等方式对耦合系数相关问题开展了广泛研究，本文总结了混凝土、岩体、土等介质中的地下化爆耦合系数以及岩体中地下核爆耦合系数确定方法，通过对相关文献的分析，结合作者前期研究成果，得到主要结论与建议如下：

- (1) 不同物理量的完全耦合临界埋深可分为两类：对于爆心下方的地冲击峰值应力、粒子速度

等参数，其完全耦合临界埋深约等于封闭爆炸空腔半径，远小于封闭爆炸临界埋深；对于爆心上方的地冲击参数，以及应力冲量等时间相关量，完全耦合临界埋深约等于封闭爆炸临界埋深。

(2) 耦合能量与介质破坏区体积成正比，比例系数仅与介质性质有关。耦合系数随埋深演化规律可用 Boltzmann 函数表征，仅需半埋爆炸耦合系数与完全耦合临界埋深两个参数即可确定完整曲线。

(3) 在地下爆炸地冲击预测方面，推荐采用按封闭爆炸等效的等效当量系数，随埋深增大，不同介质和参数引起的等效系数差异缩小，可采用偏安全的曲线简化计算。预测爆炸压缩半径和破坏范围时可采用填塞系数，岩石和混凝土中化爆的最大填塞系数约 1.4~1.8，土中可达 2.4~2.6。

(4) 美国规范 TM5-855-1 中认为不同地冲击参数适用相同的耦合系数，然而大量试验表明，不同地冲击参数即使同时达到完全耦合，其耦合系数也存在差异。相关的机理分析与定量研究还不充分，对于地下爆炸中不同物理量的耦合机制需进一步研究。

(5) 地冲击完全耦合临界埋深的确定仍主要依赖试验数据，机理讨论多处于定性阶段，地冲击耦合随埋深变化规律的理论表达尚未建立，原型与模型试验之间的尺寸效应亦不明确。建议进一步开展考虑自由面破坏的爆炸地冲击耦合机理研究，明确成坑尺寸和形态的演化规律，

## 符号说明

本文涉及的主要变量及其含义如下：

符号	含义	符号	含义
SDOB	比例埋深	$n, n_1, n_2, n_3$	衰减指数
$A, B, C$	衰减系数	$\rho_0$	介质密度
$\rho_0$	介质初始密度	$C_p$	纵波波速
$Q$	装药当量	$\nu$	泊松比
$\eta_e$	能量耦合系数	$W_{sh}$	浅埋爆炸耦合能量
$W_{sc}$	封闭爆炸耦合能量	$\eta_p$	地冲击参数耦合系数
$\sigma$	地冲击峰值应力	$\eta_{p,\sigma}$	应力耦合系数
$v$	峰值粒子速度	$\eta_{p,v}$	粒子速度耦合系数
$a$	峰值加速度	$\eta_{p,a}$	加速度耦合系数
$u$	峰值质点位移	$\eta_{p,u}$	位移耦合系数
$I$	冲量	$\eta_{p,I}$	冲量耦合系数
$\eta_Q$	等效当量系数	$\eta_{Q,\sigma}$	应力等效当量系数
$\eta_{Q,v}$	粒子速度等效当量系数	$\eta_{Q,a}$	加速度等效当量系数
$Q_e$	$Q$ 的等效当量	$Q_{ec}$	等效封闭爆炸当量
$Q_{e0}$	等效半埋爆炸当量	$A_c, B_c, C_c$	封闭爆炸衰减系数
$r_a$	爆心下方介质压缩范围	$r_{a0}, r_{ah}, r_{ac}$	半埋爆炸、浅埋爆炸、封闭爆炸对应的 $r_a$
$r_b$	地表成坑半径	$r_{b0}, r_{bh}, r_{bc}$	半埋爆炸、浅埋爆炸、封闭爆炸对应的 $r_b$
$r_p$	爆心下方介质破坏范围	$r_{p0}, r_{ph}, r_{pc}$	半埋爆炸、浅埋爆炸、封闭爆炸对应的 $r_p$
$\bar{h}$	比例埋深	$\eta_m$	填塞系数
$K_a$	半埋爆炸时的压缩系数	$K_p$	半埋爆炸时的破坏系数

## 参考文献

- [1] 邓国强, 刘国军, 郑全平. 爆炸地冲击临界深度研究[J]. 防护工程, 2019, 41(2): 31-37.  
DENG G Q, LIU G J, ZHENG Q P. Research on the critical depth of explosion ground shock[J]. Protective Engineering, 2019, 41(2): 31-37.
- [2] National Research Council. Effects of nuclear earth-penetrator and other weapons[M]. Washington D C: National Academies Press, 2005.
- [3] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] ADUSHKIN V V, SPIVAK A. Underground explosions[R]. Washington, DC: U. S. Department of State, 2015.
- [5] 穆朝民, 任辉启, 石必明. 变埋深条件下混凝土中爆炸加速度的传播规律[J]. 振动与冲击, 2016, 35(3): 1-6.  
MU C M, REN H Q, SHI B M. Investigation on the shock acceleration of concrete at different depths of burst[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(3): 1-6.
- [6] 赵红玲, 侯爱军, 童怀峰, 等. 石灰岩中不同埋深爆炸自由场直接地冲击参数的预计方法[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3): 290-294.  
ZHAO H L, HOU A J, DONG H F, et al. Prediction method of the direct ground shock parameters of explosion at different buried depths in free field of limestone[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(3): 290-294.
- [7] 吴祥云, 曲建波, 张光明, 等. 岩石中不同埋深爆炸自由场直接地冲击参数的预计方法[C]//第20届全国结构工程学术会议, 北京: 中国力学学会工程力学编辑部, 2011: 262-267.  
WU X Y, QU J B, ZHANG G M, et al. Prediction method of the direct ground shock parameters of explosion at different buried depths in free field of rock[C]// Proceedings of the Twentieth National Conference on Structural Engineering. Beijing: Engineering Mechanics, 2011: 262-267.
- [8] 叶亚齐, 任辉启, 李永池, 等. 砂质黏土中不同深度爆炸自由场地冲击参数预计方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1918-1923.  
YE Y Q, REN H Q, LI Y C, et al. Study of prediction of ground shock parameters in free field at different depths of burst in sandy clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1918-1923.
- [9] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 变埋深条件下饱和土爆炸能量耦合系数的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1574-1578.  
MU C M, REN H Q, LI Y C, et al. Experiment study of explosion energy coupling coefficient with different burial depths in saturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1574-1578.
- [10] 穆朝民, 任辉启, 辛凯, 等. 变埋深条件下土中爆炸成坑效应[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 112-116.  
MU C M, REN H Q, XIN K, et al. Effects of crater formed by explosion in soils[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2010, 11(2): 112-116.
- [11] 李重情, 穆朝民, 石必明. 变埋深条件下混凝土中爆炸应力传播规律的研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(6): 140-145.  
LI C Q, MU C M, SHI B M. Investigate on shock stress propagation in concrete at different depths under blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(6): 140-145.
- [12] 时本军, 李杰, 郭纬, 等. 黏土中爆炸成坑地冲击耦合效应实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(6): 160-173.  
SHI B J, LI J, GUO W, et al. Experimental study on explosion cratering and coupled ground shock in clay[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(6): 160-173.
- [13] SHI B J, XU X H, LI J, et al. Experimental and numerical study on explosion cratering and coupled ground shock in clay[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 187: 104923.
- [14] 刘琦, 翟超辰, 张跃飞, 等. 地面和埋置爆炸土中地冲击作用分区数值模拟及试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(8): 1-19.

- LIU Q, ZHAI C C, ZHANG Y F, et al. Numerical simulation and test study on ground shock subzones in soil produced by ground and buried explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(8): 1-19.
- [15] U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. *Fundamentals of protective design for conventional weapons*[R]. Washington D C: Department of The Army, 1986.
- [16] SHISHKIN N I. Seismic efficiency of a contact explosion and a high-velocity impact[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, 48(2): 145-152.
- [17] 李杰, 郭纬, 徐天涵, 等. 地下爆炸等效当量及耦合地冲击计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S2): 4064-4072.  
LI J, GUO W, XU T H, et al. Calculation of equivalent and coupled ground shock of underground explosion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S2): 4064-4072.
- [18] 钱七虎, 王明洋. *岩土中的冲击爆炸效应*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [19] 施鹏, 辛凯, 杨秀敏, 等. 土中装药不同埋深爆炸试验研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(12): 171-174.  
SHI P, XIN K, YANG X M, et al. Experimental study of explosion with different burial depths in soil[J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(12): 171-174.
- [20] 施鹏, 邓国强, 杨秀敏, 等. 土中爆炸地冲击能量分布研究[J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(3): 240-244.  
SHI P, DENG G Q, YANG X M, et al. Study on ground shock energy distribution of explosion in soil[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(3): 240-244.
- [21] 建筑工程部技术情报局. *岩石中地下建筑的设计侵彻和爆炸效应: 美国陆军工程兵教范 EM1110-345-434*[M]. 北京: 建筑工程部技术情报局, 1964.
- [22] 建筑工程部技术情报局. *防护结构的设计原理和方法*[M]. 北京: 建筑工程部技术情报局, 1965.
- [23] 徐天涵, 邱艳宇, 谢方, 等. 钻地爆炸耦合地冲击等效计算理论与方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6): 811-817.  
XU T H, QIU Y Y, XIE F, et al. Theory and method of equivalent calculation of coupling ground shock of earth-penetrating explosion[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2023, 51(6): 811-817.