

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0194

近距离爆炸比例爆距的界定标准及荷载模型*

甘露, 陈力, 宗周红, 钱海敏

(东南大学爆炸安全防护教育部工程研究中心, 江苏 南京 211189)

摘要: 如何准确界定“近距离爆炸(close-in explosion)”一直是防护工程研究领域的热点。本文中基于已被充分验证的精细化有限元模型,研究了TNT球形装药自由场爆炸冲击波传播与爆轰产物高速膨胀共同作用的特点和规律,发现在比例爆距小于 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 的范围内,爆轰产物对刚性壁面的爆炸荷载影响显著,提出球形装药近距离爆炸的比例爆距界定标准为 $0.30\sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。研究发现,在近距离爆炸下,爆炸波在入射角为 $0^\circ\sim 5^\circ$ 范围内的刚性壁面反射荷载峰值会出现急剧下降的现象,这是由爆轰产物喷射的不均匀性和随机性导致的;近距离爆炸下,刚性壁面反射超压出现了两个峰值的现象,这是由冲击波和爆轰产物分别与刚性壁面相互作用导致的。提出了近距离爆炸情况下两个荷载峰值的计算公式,以及适合工程结构响应计算的简化荷载模型;揭示了近距离爆炸下刚性壁面反射超压的分布规律。

关键词: 爆轰产物;比例爆距;近距离爆炸;荷载模型

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Definition of scaled distance of close-in explosion and blast load calculation model

GAN Lu, CHEN Li, ZONG Zhouhong, QIAN Haimin

(Engineering Research Center of Safety and Protection of Explosion & Impact of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: How to accurately define “close-in explosion” has always been a hotspot in the field of protection engineering research. In this paper, based on the fully validated 2D axisymmetric fine finite element model, the characteristics and laws of the propagation of air shock waves and high-speed expansion of detonation products generated by TNT spherical charge were studied. It is found that there is a significant influence of the detonation products on the blast load on rigid wall when the range of the scaled distance less than $0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$. It is recommended to use the scaled distance range from $0.30 \text{ m/kg}^{1/3}$ to $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ as the definition criterion of close-in explosion for spherical TNT charge explosion. It was found that: due to the inhomogeneity and randomness of the detonation product rapid expansion, the peak value of the rigid-wall reflected overpressure experienced a sharp drop within a range of incident angle of $0^\circ\sim 5^\circ$ in the case of close-in explosion defined in the paper. In addition, there were two peaks on the reflected overpressure curve in close-in explosion cases, and the first peak overpressure was caused by the interaction between the shock wave and rigid wall while the second peak overpressure was generated by the interaction between the detonation products and rigid wall. Based on curve fitting, the formulas for calculating the two peak values were proposed, respectively, and a simplified load model suitable for calculation of engineering structure response was put forward; The distribution law of the reflected overpressure on the rigid wall under close-in explosion was revealed.

Keywords: detonation products; scaled distance; close-in explosion; load calculation model

* 收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-10-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678141, 51978166)

第一作者: 甘露(1996—), 男, 博士研究生, ganlu_1996@seu.edu.cn

通信作者: 宗周红(1966—), 男, 博士, 教授, zongzh@seu.edu.cn

炸药爆轰是一种高速进行的能自行传播的化学变化过程, 此过程会生成爆轰产物, 并对周围介质做功或形成压力突跃状态的传播(冲击波)。炸药在空气自由场近距离爆炸情况下, 由于爆轰产物(火球、高温高压气体等)存在随机性和不均匀性, 且会与冲击波共同作用, 因此其荷载主要呈现两个特征——多峰值和不均匀。目前, 世界各国针对空气冲击波的计算已经提出了很多公式, 适用和界定条件也各不相同, 但对于近距离爆炸的计算仍存在很多争论。

Brode^[1]、Henrych 等^[2] 和 Baker^[3] 分别给出了球形装药爆炸条件下空气冲击波入射和反射的计算公式。Kingery 等^[4] 在此基础上以比例爆距为自变量, 基于高阶多项式的方法提出了球形 TNT 爆炸入射波和反射波的计算方法, 相关研究成果以图表形式在美军 UFC3-340-02 规范^[5] 中呈现, 该成果已在防护工程设计和建设中得到了广泛应用。但 Shin 等^[6-8] 和 Karlos 等^[9] 的研究均认为 UFC3-340-02 对于近距离爆炸的计算未考虑爆轰产物的影响, 不适用于近距离爆炸荷载预测。Shin 等^[6] 使用 AUTODYN 对比例爆距在 0.053 1~40 m/kg^{1/3} 范围内的自由场爆炸进行了模拟计算, 提出了比例爆距与空气冲击波关键参数的关系曲线。Karlos 等^[9] 基于 EUROPLEXUS 也进行了爆炸冲击波相关参数的模拟计算, 与文献 [6] 类似地提出了新的多项式预测公式。

近距离爆炸范围如何界定也是防护工程领域广泛关注的问题, ASCE 59-11^[10] 认为比例爆距小于 1.2 m/kg^{1/3} 范围内的爆炸均属于近距离爆炸。而 Brode^[1] 及宁建国等^[11] 指出我国规范中爆炸荷载计算公式推荐的适用范围为比例爆距大于 1 m/kg^{1/3}。胡攀^[12] 研究近距离爆炸下建筑结构上的爆炸荷载, 同样以 1 m/kg^{1/3} 作为近距离爆炸和远距离爆炸的区分界限。Orton 等^[13] 在研究中引用了 UFC 3-340-02 对于近距离爆炸的界定标准, 将比例爆距小于 0.40 m/kg^{1/3} 界定为近距离爆炸, 比例爆距大于 1 m/kg^{1/3} 界定为远距离爆炸。李臻等^[14] 认为比例爆距 0.40 m/kg^{1/3} 以上为中远距离爆炸, 中远距离爆炸造成的结构破坏主要由空气冲击波导致, 而不是爆轰产物导致。汪维等^[15] 对受近距离爆炸作用的方形板荷载分布函数进行了研究, 他们将比例爆距 0.25~2 m/kg^{1/3} 的范围界定为近距离爆炸。可以看出, 目前对于近距离爆炸的比例爆距界定均基于学者的工程或试验经验, 学者之间的研究结论并不统一, 甚至相互矛盾, 且缺乏系统的机理性分析和理论支撑。

本文中基于 LS-DYNA 建立精细化有限元分析模型, 并将模型计算结果与规范进行对比验证; 基于经过验证的精细化模型, 探讨 TNT 球形装药自由场爆炸冲击波传播与爆轰产物高速膨胀共同作用的特点和规律, 分析近距离爆炸情况下刚性壁面上爆炸荷载的分布特征, 并对近距离爆炸的比例爆距范围进行定量界定; 提出适用于近距离爆炸工况的刚性壁面反射荷载计算公式, 确定爆炸荷载分布的上下限。

1 球形装药爆炸有限元模型的建立与验证

1.1 有限元模型的建立

基于 LS-DYNA 建立了包括 TNT 球形炸药和空气的自由场 2D 轴对称计算模型, 如图 1 所示。选取 1 kg 装药进行计算, 并根据 FEMA453^[16] 选取了背心炸弹和箱包炸弹两种典型的装药质量进行对比验证, 分别为 9 kg(20 lbs) 和 23 kg(50 lbs)。1、9、23 kg 装药的计算模型尺寸分别为 120 cm×120 cm, 250 cm×250 cm 和 340 cm×340 cm。TNT 炸药和空气采用 Multi-material ALE 算法的 ALE2D 单元进行模拟, 模型边界条件包括轴对称边界、镜像对称边界和无反射边界(见图 1), 模型网格划分如图 2 所示, TNT 炸药及附近空气网格采用渐变网格, 其余空气网格采用均匀网格划分。

1.2 材料模型

1.2.1 TNT 炸药

炸药材料模型采用 LS-DYNA 中的 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 进行描述, 炸药的状态方程采用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 方程进行描述:

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 w 、 R_1 、 R_2 为与炸药特性相关的参数, V 为相对体积。炸药材料模型及状态方程参数采用 Dobratz 等^[17] 提出的参数, 参数值见表 1。

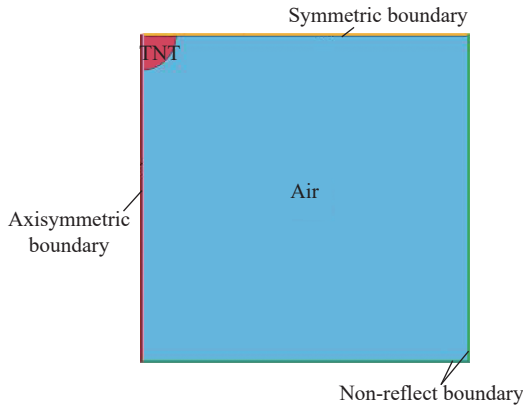


图 1 2D 轴对称模型

Fig. 1 2D axisymmetric model

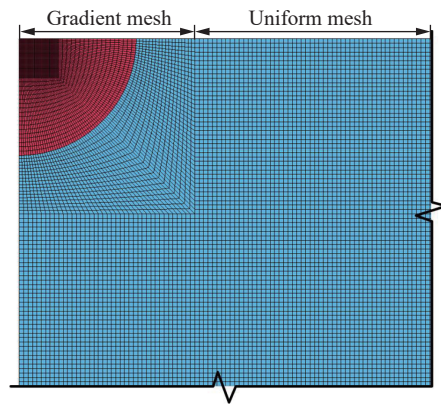


图 2 有限元网格划分

Fig. 2 Mesh of the finite element model

表 1 炸药模型参数^[17]

Table 1 Parameters for modeling TNT explosive^[17]

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	爆速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	w	R_1	R_2	$E/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$
1630	6930	21	371.2	3.231	0.3	4.15	0.95	7000

1.2.2 空气

空气采用 LS-DYNA 中的 *MAT_NULL 材料模型描述, 并使用 *EOS_LINER_POLYNOMIAL 状态方程:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (2)$$

式中: C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为自定义系数; $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, ρ/ρ_0 为当前空气密度与参考空气密度之比; E 为单位参考体积的初始能量。其材料模型参数及状态方程参数见表 2。

表 2 空气模型参数

Table 2 Parameters for modeling air

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$
1.2929	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25

1.3 计算网格尺寸的确定

分别开展了 3 种质量(1、9、23 kg)装药的数值试验, 并对这 3 种质量装药分别进行了网格尺寸收敛性分析。3 种炸药的半径分别为 5.27、11.00、15.00 cm。1 kg 炸药采用了 1.00、2.00、4.00 mm 等 3 种网格尺寸进行比较计算, 9 kg 炸药采用了 1.50、3.00、6.00 mm 等 3 种网格尺寸, 23 kg 炸药采用了 2.50、5.00、10.00 mm 等 3 种网格尺寸。计算出的自由场超压峰值如图 3 所示, 并与 UFC 3-340-02 的计算结果及其正负误差 10% 进行对比。

由图 3 可知, 比例爆距大于 $0.60 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,

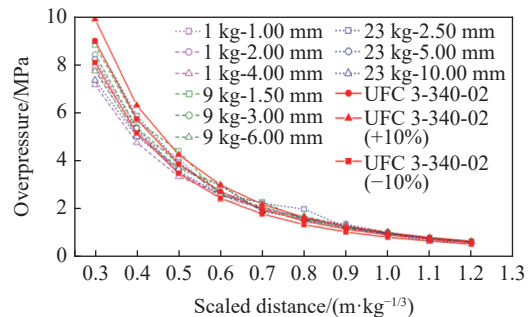


图 3 不同网格尺寸情况下超压峰值与比例爆距的关系

Fig. 3 Peak overpressure versus scaled distances with different mesh sizes

所有装药情况下不同网格尺寸模型的计算结果误差几乎全部在 UFC 3-340-02 计算值的 10% 以内。但当比例爆距小于 $0.60 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 所有装药情况下, 4.00、6.00、10.00 mm 网格尺寸模型的计算误差均超出 10%。因此, 为了保证计算结果的准确性并兼顾计算效率, 1、9、23 kg 装药模型的网格尺寸分别确定为 2.00、3.00、5.00 mm, 这些网格尺寸大小均处于相对应的炸药半径的 $1/40 \sim 1/25$ 范围内。

1.4 有限元模型验证

UFC3-340-02^[5] 给出了球形 TNT 装药在不同比例爆距下的自由场入射超压及刚性反射超压计算图。Shin^[7] 计算发现, UFC 3-340-02 中的自由场入射超压及正反射超压计算图在比例爆距大于 $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时较为准确。本文中选取 UFC 3-340-02 公式进行对比验证, 建立的有限元模型包含炸药、空气和刚体, 刚体采用关键字 *MAT_RIGID 模拟, 流固耦合采用 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字进行描述, 验证计算了 1、9、23 kg 等 3 种装药工况。自由场入射超压峰值的计算结果与 UFC 3-340-02 对比如图 4 所示, 正反射超压峰值的计算结果对比如图 5 所示。

由图 4~5 可以看出, 建立的有限元模型计算结果与 UFC 3-340-02 吻合较好, 在比例爆距大于 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内计算结果可信。

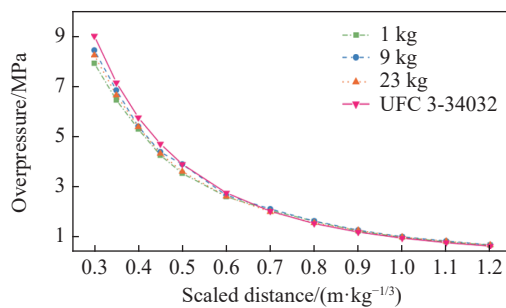


图 4 自由场超压峰值与比例爆距的关系

Fig. 4 Incident free-field overpressures versus scaled distances

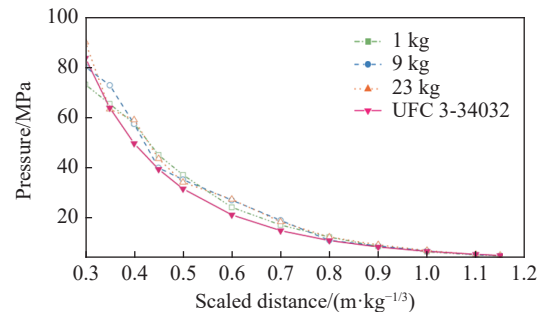


图 5 正反射超压峰值与比例爆距的关系

Fig. 5 Reflected overpressures versus scaled distances

2 近距离爆炸比例爆距范围的界定

2.1 空气冲击波传播与爆轰产物高速膨胀机理

炸药的 JWL 状态方程能够准确地描述爆轰产物的膨胀过程^[18], 且该状态方程对爆轰产物模拟的准确性在试验中得到了验证^[19]。基于已经验证的数值模型, 计算出了球形 TNT 爆炸产生的冲击波传播及爆轰产物膨胀的过程, 如图 6 所示, 爆炸时爆轰产物高速膨胀, 并强烈压缩周边空气; 在比例爆距小于 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内, 爆轰产物与空气界面清晰和平滑(见图 6(a)); 当比例爆距达到 $0.35 \text{ m/kg}^{1/3}$ 左右时, 爆轰产物与空气界面开始变得不平滑(见图 6(a)); 当比例爆距达到 $0.50 \text{ m/kg}^{1/3}$ 左右时, 出现了明显的湍流效应(见图 6(b)), 且随着比例爆距的不断增大, 湍流效应越来越显著; 如图 6(c)~(d) 所示, 在比例爆距达到 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 左右时, 爆轰产物达到最大膨胀体积, 且由于负压作用, 爆轰产物开始回缩。文献 [11] 中的研究结果显示, 当距离为 10~15 倍炸药半径时, 空气冲击波与爆轰产物开始缓慢分离, 本文计算结果与此段描述一致。

2.2 刚性壁面正反射荷载规律

分别针对 1、9、23 kg 等 3 种装药, 开展 12 种比例爆距工况的爆炸荷载计算, 比例爆距范围为 $0.30 \sim 1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。

以 1 kg TNT 爆炸为例, 选取比例爆距分别为 0.30、0.50、0.85、1.00、1.20 $\text{m/kg}^{1/3}$ 的 5 条正反射超压曲线(见图 7)进行分析比较。如图 7(a) 所示, 在比例爆距为 0.30、0.50 $\text{m/kg}^{1/3}$ 时, 反射超压曲线呈现出与文献 [20] 实测结果相似的多峰值现象, 且第 2 个峰值明显大于第 1 个峰值。在比例爆距为 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3}$

时, 两个峰值出现的时间相差较短, 而比例爆距为 $0.50 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 2 个峰值(见图 7(a))分别出现在 166、194 μs 时刻, 时间相差较大。

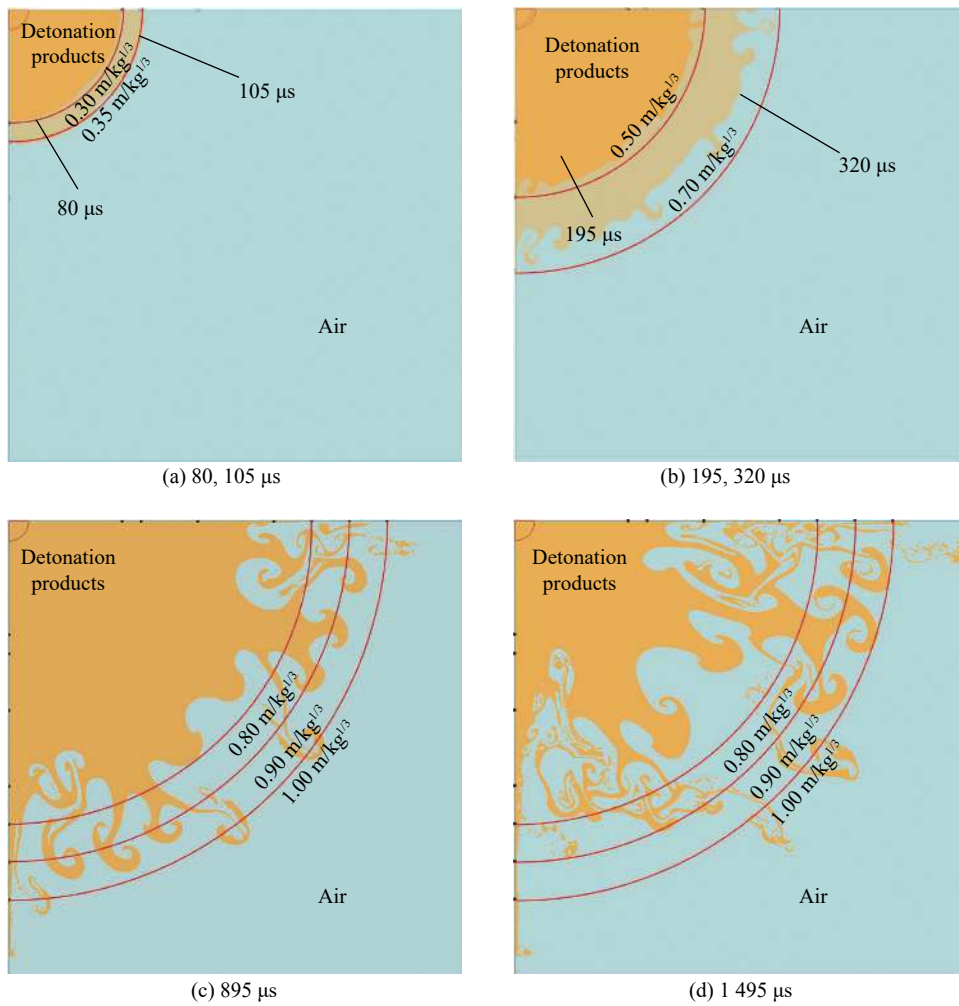


图 6 爆轰产物膨胀过程

Fig. 6 Expansion of detonation products

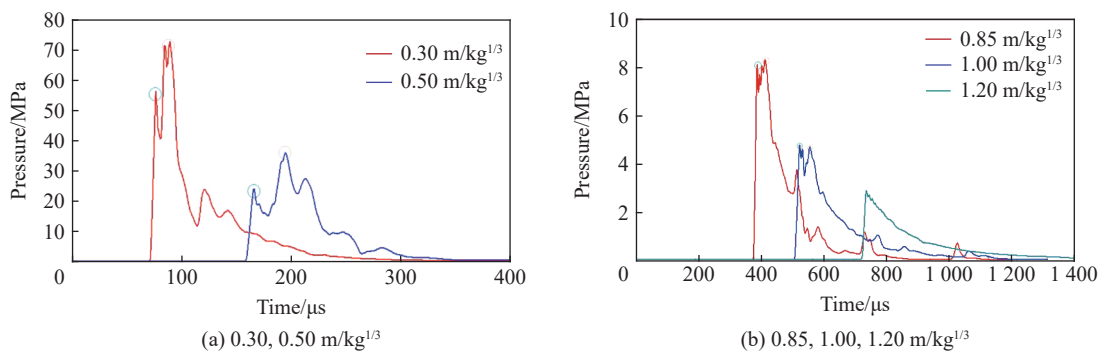


图 7 5 种比例爆距工况的刚体反射超压曲线

Fig. 7 Reflected overpressure curves at five types of scale distances

如图 8~9 所示, 当刚体位于 $0.50 \text{ m/kg}^{1/3}$ 比例爆距位置时, 冲击波在 166 μs 时刻先于爆轰产物到达刚体表面发生反射, 对应图 7(a) 中的第 1 个波峰; 随后爆轰产物在 194 μs 时刻到达刚体表面, 对应

图 7(a) 中的第 2 个波峰。图 9 给出了不同比例爆距时空气冲击波和爆轰产物的到达时间以及对应的刚体表面荷载峰值。对比图 7(b) 和图 9 可以看出, 比例爆距为 0.85、1.00 m/kg^{1/3} 时, 反射超压曲线依然存在多峰现象, 但是比例爆距为 0.85 m/kg^{1/3} 时, 反射冲击波荷载峰值与爆轰产物荷载峰值大小相当。当比例爆距为 1.00 m/kg^{1/3} 时, 冲击波反射荷载峰值大于爆轰产物荷载峰值。当比例爆距为 1.20 m/kg^{1/3} 时, 刚体上的爆炸荷载曲线只存在一个由空气冲击波反射引起的峰值, 爆轰产物不再影响结构上的爆炸荷载。

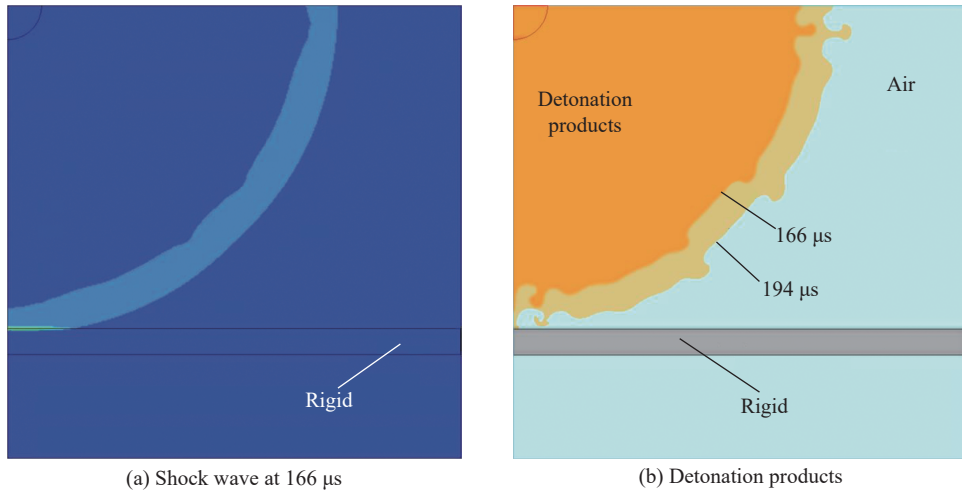


图 8 0.50 m/kg^{1/3} 比例爆距工况下冲击波反射与爆轰产物撞击作用现象
Fig. 8 Reflection of blast wave and detonation product at 0.50 m/kg^{1/3}

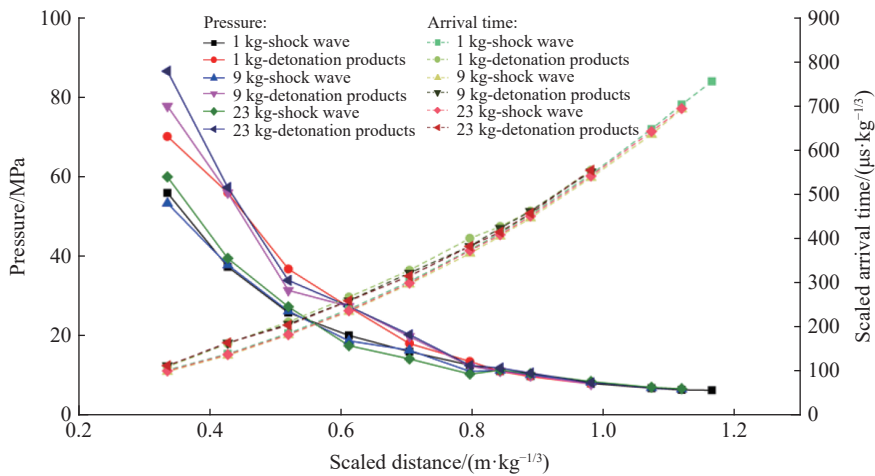


图 9 冲击波与爆轰产物到达时间及荷载峰值
Fig. 9 Scaled arrival times and peak pressures of shock wave and detonation products

2.3 近距离爆炸刚性壁面荷载分布规律

爆炸荷载分布对结构的动力响应影响很大。针对不同比例爆距工况, 选取 1、9、23 kg 当量的 TNT 分别计算近距离爆炸下刚性壁面的荷载分布。由 UFC 3-340-02 可知, 在 40°~60° 范围内, 反射会受到马赫反射影响。因此, 为避免马赫反射的影响, 荷载分布计算的入射角取为 $\alpha=0^\circ\sim 40^\circ$ (见图 10)。

以正反射(入射角 $\alpha=0^\circ$) 荷载超压峰值为基准, 对不同入射角激发的反射超压荷载峰值进行归一化处理, 即:

$$\gamma = \frac{P_\alpha}{P_0} \tag{3}$$

式中: p_α 为 α 入射角对应的反射超压峰值, p_0 为正反射超压峰值。

计算结果如图 11 所示, 当比例爆距在 $0.30 \sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内时, 爆炸荷载在 $\alpha=0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内急剧下降。主要原因在于 $0.30 \sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内爆轰产物喷射不均匀。如图 6 所示, 爆轰产物在 $0.35 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时开始出现边界不平滑现象, 而比例爆距小于 $0.35 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆轰产物呈球面规则扩散。因此, 当比例爆距为 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆炸荷载峰值在入射角 $\alpha=0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内的下降幅度明显小于比例爆距 $0.35 \sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内的下降幅度。而比例爆距大于 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆轰产物几乎达到最大膨胀体积, 爆轰产物对刚性壁面荷载的影响减小。因此, 比例爆距大于 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆炸荷载在刚性壁面上的分布也较为均匀, 在入射角 $\alpha=0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内未出现荷载峰值急剧下降的现象。

在 $0.30 \sim 1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内, 刚性壁面爆炸荷载可以分为 2 个比例爆距区, 即 $0.30 \sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 和 $0.80 \sim 1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。比例爆距在 $0.30 \sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 内, 入射角 $\alpha=0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内的刚性壁面荷载峰值相对于正反射荷载峰值下降 $25\% \sim 60\%$; 比例爆距大于 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 入射角 $\alpha=0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内的刚性壁面荷载峰值相对于正反射荷载峰值下降幅度小于 20% 。

2.4 近距离爆炸的比例爆距界定

通过以上计算分析可以发现, 当比例爆距在 $0.30 \sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 的范围内时, 空气冲击波将先于爆轰产物到达结构表面, 结构表面荷载存在多个峰值, 且冲击波反射荷载的峰值小于爆轰产物荷载峰值, 结构上的爆炸荷载受爆轰产物的影响较为显著。

受爆轰产物喷射随机性和不均匀性的影响, 当比例爆距在 $0.30 \sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内时, 刚性壁面荷载峰值在入射角 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内急剧下降; 当比例爆距大于 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆轰产物对壁面爆炸荷载的影响降低, 直至比例爆距大于 $1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆轰产物几乎无影响, 壁面荷载峰值由空气冲击波决定。因此, 当比例爆距大于 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 入射角 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内的荷载峰值突降现象不显著, 刚性壁面爆炸荷载分布开始趋于平滑。

对于球形 TNT 爆炸, 比例爆距等于 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆轰产物与空气冲击波几乎同时到达结构表面。当比例爆距小于 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 爆轰产物先于冲击波到达, 受此影响, 此时理想气体状态方程也已不能

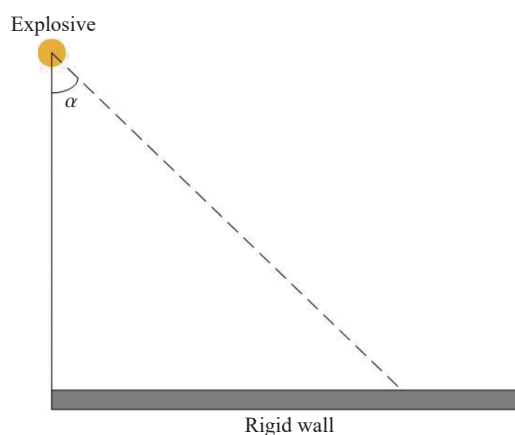
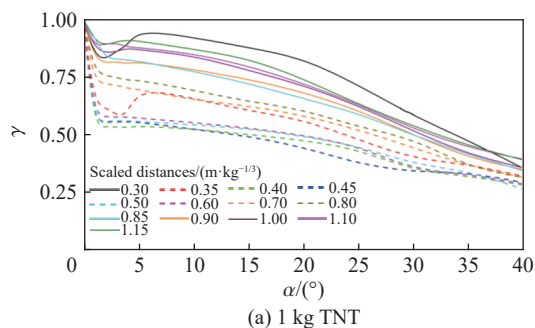
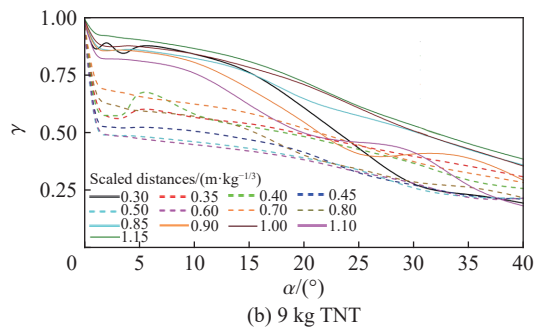


图 10 板面荷载计算范围

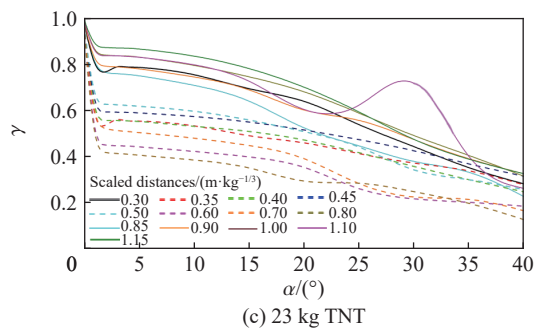
Fig. 10 Calculated scope of load distribution



(a) 1 kg TNT



(b) 9 kg TNT



(c) 23 kg TNT

图 11 不同比例爆距工况下刚性壁面荷载峰值分布

Fig. 11 Load distributions at different types of scale distances

用于描述空气的压力与体积关系;且在高压环境下,空气的不定常特征更显著^[21],本文中的模型已不适用于讨论比例爆距小于 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3}$ 工况下的爆炸荷载。因此,考虑爆轰产物的影响,综合分析自由场冲击波入射超压峰值、刚性壁面爆炸荷载峰值及分布规律后,建议将比例爆距 $0.30 \sim 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内的爆炸定义为近距离爆炸,将比例爆距 $0.80 \sim 1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内的爆炸定义为中距离爆炸,将比例爆距大于 $1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围的爆炸定义为远距离爆炸。

3 近距离爆炸刚性壁面荷载模型

3.1 刚性壁面近距离爆炸正反射荷载计算模型

在近距离爆炸的比例爆距范围内,刚性壁面正反射荷载时程曲线上存在由冲击波和爆轰产物分别引起的 2 个峰值,因此,可以将爆炸荷载分为冲击波反射荷载和爆轰产物荷载分别计算。

3.1.1 冲击波荷载模型

(1) 冲击波峰值

分别对 1、9、23 kg 炸药爆炸情况下,刚性壁面冲击波正反射荷载峰值数据进行拟合,采用了负次幂函数、指数函数和多项式函数 3 种拟合公式:

$$p_{r1} = -11.68 + \frac{11.83}{Z} + \frac{4.046}{Z^2} - \frac{0.4226}{Z^3} \tag{4}$$

$$p_{r1} = 183.5e^{-3.96Z} \tag{5}$$

$$p_{r1} = -399.8Z^3 + 857.7Z^2 - 652.2Z + 186 \tag{6}$$

式中: p_{r1} 为冲击波正反射超压峰值, MPa; Z 为比例爆距, $\text{m/kg}^{1/3}$ 。

拟合结果如图 12 所示,可以发现 3 种公式的拟合程度均较高,式(4)~(6)拟合优度均大于 0.99。考虑到 UFC 3-340-02 采用的荷载预测公式为多项式形式,为方便计算,本文中也推荐采用拟合出的多项式公式进行峰值计算。

(2) 冲击波到达时间

将比时间定义为:

$$t = \frac{t_a}{\sqrt[3]{W}} \tag{7}$$

式中: t 为比时间, $\mu\text{s/kg}^{1/3}$; t_a 为真实时间, μs ; W 为 TNT 的质量, kg。

采用多项式函数对 1、9、23 kg 的冲击波到达比时间数据进行拟合:

$$t_1 = \frac{t_{a1}}{\sqrt[3]{W}} = 44.58Z^3 + 394Z^2 + 109.8Z + 4.709 \tag{8}$$

式中: t_1 为冲击波到达比时间, t_{a1} 为冲击波到达真实时间。拟合关系如图 13 所示。

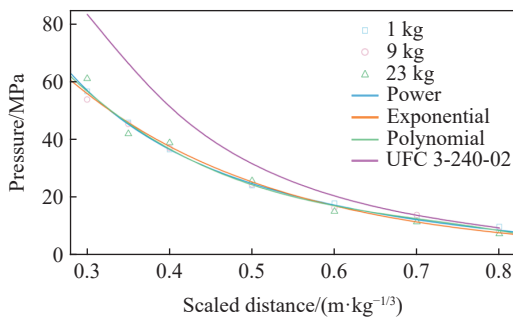


图 12 冲击波正反射超压峰值拟合曲线
($0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$)

Fig. 12 Fitting curve of peak normal reflected overpressures of shock waves ($0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$)

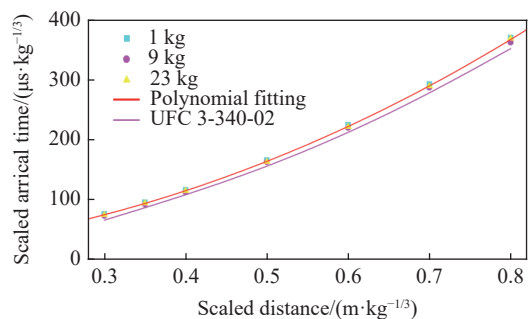


图 13 冲击波到达比时间拟合曲线
($0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$)

Fig. 13 Fitting curve of scaled arrival times of shock waves ($0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$)

如图 12~13 所示, 由于未能具体区分冲击波和爆轰产物的各自影响, UFC 3-340-02 计算出的荷载峰值显著大于本文中计算出的冲击波反射引起的荷载峰值, 且比例爆距越小, 差距越大, 差距的产生正是由于爆轰产物对爆炸荷载的影响; UFC 3-340-02 的荷载到达比时间与本文计算出的冲击波到达比时间较吻合, 而这进一步支撑了近距离爆炸情况下冲击波要早于爆轰产物到达的结论。

3.1.2 爆轰产物荷载模型

(1) 爆轰产物峰值

采用与冲击波峰值相同的公式进行爆轰产物荷载峰值拟合:

$$p_{r2} = -43.56 + \frac{44.92}{Z} - \frac{2.096}{Z^2} \tag{9}$$

$$p_{r2} = 281.5e^{-4.061Z} \tag{10}$$

拟合曲线如图 14 所示, 可以发现在 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内, 三种曲线拟合精度均较高。为与 UFC 3-340-02 统一, 建议采用下式进行荷载计算:

$$p_{r2} = -310Z^3 + 778.2Z^2 - 700.1Z + 231.2 \tag{11}$$

式中: p_{r2} 为爆轰产物作用引起的荷载峰值, MPa。

(2) 爆轰产物到达时间

爆轰产物到达比时间拟合结果如图 15 所示, 拟合公式如下:

$$t_2 = \frac{t_{a2}}{\sqrt[3]{W}} = 576.9Z^3 - 683.1Z^2 + 791Z - 104.2 \tag{12}$$

式中: t_2 为爆轰产物到达比时间, t_{a1} 为爆轰产物到达真实时间。

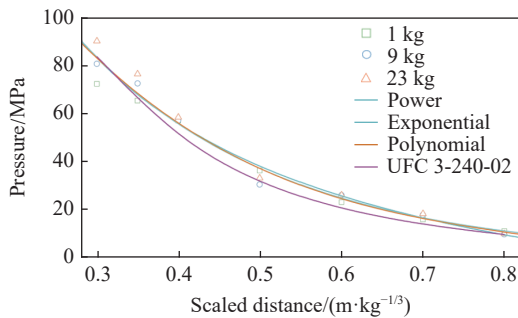


图 14 爆轰产物荷载峰值拟合曲线
($0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$)

Fig. 14 Fitting curve of peak overpressures of detonation products ($0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$)

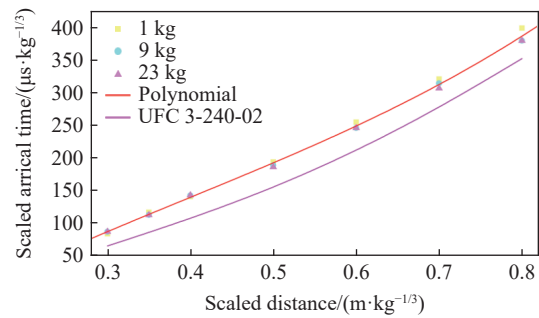


图 15 爆轰产物到达比时间拟合曲线
($0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$)

Fig. 15 Fitting curve of scaled arrival times of detonation products ($0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$)

将荷载峰值和到达时间的拟合结果与 UFC 3-340-02 结果进行对比, 发现 UFC 3-340-02 给出的荷载峰值与计算得到的爆轰产物荷载峰值相近, 且比例爆距越小, 差距越小; 这更加说明了近距离爆炸情况下爆轰产物产生的荷载是爆炸荷载的主要影响因素; 而 UFC 3-340-02 给出的荷载到达比时间显著小于计算出的爆轰产物到达比时间, 同样支撑了近距离爆炸情况下, 冲击波要先于爆轰产物到达的结论。

3.1.3 比冲量模型

比冲量数据拟合结果如图 16 所示, 拟合公式如下:

$$i_r = \frac{I}{\sqrt[3]{W}} = -12\,790x^3 + 21\,390x^2 - 14\,930x + 5\,627 \tag{13}$$

式中: i_r 为比冲量, $\text{Pa}\cdot\text{ms}/\text{kg}^{1/3}$; I 为冲量, $\text{Pa}\cdot\text{ms}$ 。

由图 16 可知, 比冲量拟合数据比 UFC 3-340-02 给出的结果偏大, 这是由如图 7 所示的荷载多峰值现象导致的。

3.1.4 近距离爆炸荷载简化计算模型

对于受爆炸荷载作用的工程结构, 需要提出简化模型以进行结构响应计算。针对近距离爆炸冲击波与爆轰产物共同作用的特点, 提出了刚性壁面近距离爆炸荷载简化计算模型, 示意图如图 17 所示。

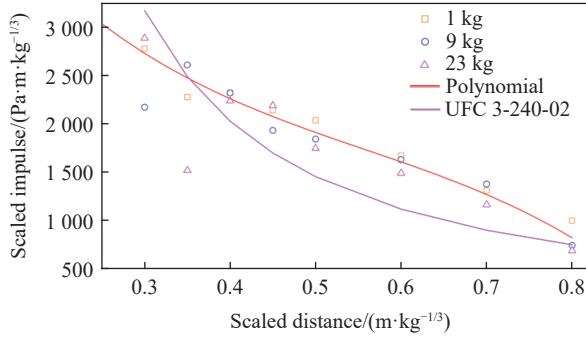


图 16 比冲量结果曲线(0.30 m/kg^{1/3} < Z ≤ 0.80 m/kg^{1/3})

Fig. 16 Scaled impulses fitting curves for 0.30 m/kg^{1/3} < Z ≤ 0.80 m/kg^{1/3}

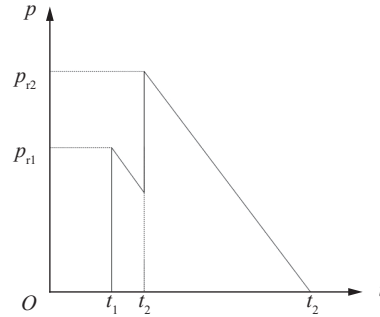


图 17 荷载简化计算模型

Fig. 17 A simplified calculation model for load

采用与 UFC 3-340-02 相同的等冲量方法进行荷载结束时刻 t_3 的计算:

$$\frac{1}{2} \left\{ \left[p_{r2} - \frac{t_3 - 2t_2 + t_1}{t_3 - t_2} p_{r1} \right] (t_2 - t_1) + p_{r2} (t_3 - t_2) \right\} = I = i_r \sqrt[3]{W} \quad (14)$$

因此, 基于拟合公式(6)、(8)、(11)~(12)、(14), 本文中提出的近距离爆炸荷载简化计算模型可以用分段函数表示为:

$$p = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < t_1 \\ p_{r1} \left(1 - \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right) & t_1 \leq t < t_2 \\ p_{r2} \left(1 - \frac{t - t_2}{t_3 - t_2} \right) & t_2 \leq t \leq t_3 \\ 0 & t > t_3 \end{cases} \quad (15)$$

3.2 刚性壁面近距离爆炸荷载峰值分布

根据前述近距离爆炸的比例爆距界定标准, 根据式(3)可将结构壁面荷载以正反射为基准进行归一化处理。并以入射角 α 的正切值为横坐标, 将 0.30 m/kg^{1/3} < Z ≤ 0.80 m/kg^{1/3} 比例爆距范围内的所有数据和比例爆距大于 0.80 m/kg^{1/3} 范围内的所有数据分别进行包络, 得到刚性壁面荷载峰值分布区间, 如图 18 所示。

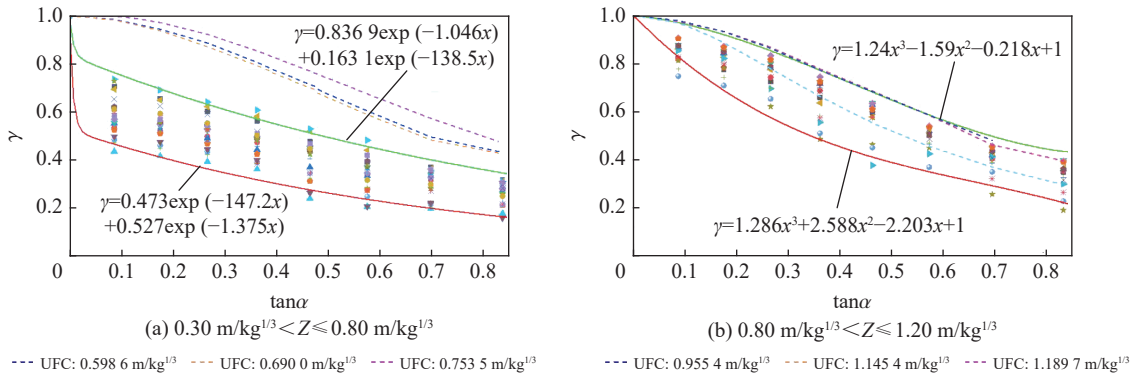


图 18 刚性壁面荷载分布区间

Fig. 18 Distribution of blast loads on rigid walls

近距离爆炸下, 入射角 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内的壁面爆炸荷载峰值范围可表示为:

$$p_{r\alpha, \min} = p_{r0}\gamma = p_{r0}(0.473e^{-147.2x} + 0.527e^{-1.375x}) \quad (16)$$

$$p_{r\alpha, \max} = p_{r0}\gamma = p_{r0}(0.8369e^{-1.046x} + 0.1631e^{138.5x}) \quad (17)$$

式中: $p_{r\alpha, \min}$ 为 α 角度处荷载峰值下限; $p_{r\alpha, \max}$ 为 α 角度处荷载峰值上限; $x = \tan\alpha$ 。

中距离爆炸下, 入射角 $0^\circ \sim 40^\circ$ 范围内的壁面爆炸荷载峰值范围可表达为:

$$p_{r\alpha, \min} = p_{r0}\gamma = p_{r0}(-1.286x^3 + 2.588x^2 - 2.203x + 1) \quad (18)$$

$$p_{r\alpha, \max} = p_{r0}\gamma = p_{r0}(1.24x^3 - 1.592x^2 - 0.218x + 1) \quad (19)$$

图 18 中同时给出了与 UFC 3-340-02 数据的比较, 可以发现, 对于近距离爆炸, 由于爆轰产物喷射分布的影响, 计算出的刚性壁面荷载峰值分布与 UFC 3-340-02 给出的数据差距较大, 这主要是因为现有模型尚不能全面考虑爆轰产物喷射的随机性, 尚需要改进, 而 UFC 3-340-02 则是基于大量实验数据进行包络拟合的结果, UFC 3-340-02 数据更偏于安全和可靠。但对于比例爆距在 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内的爆炸工况, 由于爆轰产物的影响较小, 冲击波作用的贡献占主导地位, UFC 3-340-02 给出的刚性壁面荷载分布位于本文计算结果的上下限范围内, 同样证明了本文结果的可靠性。

4 结 论

基于 LS-DYNA 平台建立了精细化有限元模型并通过了严格的模型验证, 研究了球形 TNT 装药爆轰产物对刚性壁面正反射爆炸荷载和壁面荷载峰值分布的影响规律, 提出了近距离爆炸、中距离爆炸和远距离爆炸的界定准则。分别给出了刚性壁面冲击波荷载峰值和爆轰产物荷载峰值的计算公式, 提出了近距离爆炸刚性壁面爆炸荷载简化计算模型。主要结论有。

(1) 近距离爆炸下, 爆炸荷载由爆轰产物和冲击波共同作用产生, 受爆轰产物喷射不均匀性和随机性的影响, 爆炸荷载在所作用的结构上呈现高度的不均匀分布;

(2) 近距离爆炸下, 空气冲击波将先于爆轰产物到达结构表面, 结构表面荷载存在多个峰值, 且冲击波反射荷载的峰值小于爆轰产物荷载峰值, 结构上的爆炸荷载受爆轰产物的影响较为显著。中距离爆炸下, 爆轰产物对壁面爆炸荷载的影响降低。远距离爆炸下, 爆轰产物几乎无影响, 壁面荷载峰值由空气冲击波决定;

(3) 球形装药下, 比例爆距在 $0.30 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.80 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内定义为近距离爆炸, 比例爆距在 $0.80 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 范围内定义为中距离爆炸, 比例爆距大于 $1.20 \text{ m/kg}^{1/3}$ 定义为远距离爆炸。

参考文献:

- [1] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge [J]. *The Physics of Fluids*, 1959, 2(2): 217-229. DOI: 10.1063/1.1705911.
- [2] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use [M]. New York: Elsevier, 1979.
- [3] BAKER W E. Explosions in air [M]. Austin: University of Texas Press, 1973.
- [4] KINGERY C N, BULMASH G. Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst [R]. Aberdeen, Maryland, USA: US Army Ballistic Research Laboratory, 1984.
- [5] US Department of Defense. UFC 3-340-02 Structures to resist the effects of accidental explosions [S]. Washington: The US Department of Army, 2008.
- [6] SHIN J, WHITTAKER A, AREF A, et al. Air-blast effects on civil structures: MCEER-14-0006 [R]. Buffalo: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2014. DOI: 10.13140/RG.2.1.3454.1686.
- [7] SHIN J, WHITTAKER A S, CORMIE D. Incident and normally reflected overpressure and impulse for detonations of spherical high explosives in free air [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(12): 04015057. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001305.

- [8] SHIN J, WHITTAKER A S, CORMIE D, et al. Numerical modeling of close-in detonations of high explosives [J]. *Engineering Structures*, 2014, 81: 88–97. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.09.022.
- [9] KARLOS V, SOLOMOS G, LARCHER M. Analysis of blast parameters in the near-field for spherical free-air explosions: JRC101039 [R]. Italy: Joint Research Center, 2016. DOI: 10.2788/778898.
- [10] American Society of Civil Engineers. Blast protection of buildings [M]. New York: ASCE/ Structural Engineering Institute, 2011. DOI: 10.1061/9780784411889.
- [11] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 110.
- [12] 胡攀. 近距离爆炸下作用在建筑结构上的爆炸荷载模型研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016: 10.
- [13] ORTON S L, CHIARITO V P, MINOR J K, et al. Experimental testing of CFRP-strengthened reinforced concrete slab elements loaded by close-in blast [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(2): 04013060. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000821.
- [14] 李臻, 刘彦, 黄风雷, 等. 接触爆炸和近距离爆炸比冲量数值仿真研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2020, 40(2): 143–149. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.049.
- LI Z, LIU Y, HUANG F L, et al. Investigation of specific impulse under contact explosion and close-in explosion conditions using numerical method [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, 40(2): 143–149. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.049.
- [15] 汪维, 刘光昆, 赵强, 等. 近爆作用下方形板表面爆炸载荷分布函数研究 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(2): 024615. DOI: 10.1360/SSPMA-2019-0188.
- WANG W, LIU G K, ZHAO Q, et al. Study on load distributing function of square slab surface under close-in blast loading [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(2): 024615. DOI: 10.1360/SSPMA-2019-0188.
- [16] SMILOWITZ R, BLEWETT W, WILLIAMS P, et al. Design guidance for shelters and safe rooms (Providing protection to people and buildings against terrorist attacks) [R]. Washington: Federal Emergency Management Agency, 2006.
- [17] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosive simulants: UCRL-52997 [R]. Livermore, California: Lawrence Livermore National Lab, 1981.
- [18] 赵铮, 陶钢, 杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究 [J]. *高压物理学报*, 2009, 23(4): 277–282. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5773.2009.04.007.
- ZHAO Z, TAO G, DU C X. Application research on JWL equation of state of detonation products [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(4): 277–282. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5773.2009.04.007.
- [19] JIANG Z L. Shock waves [M]. Berlin: Springer, 2005: 855–860.
- [20] DROTLEFF J E, VINCENT C T, MULLIN S A, et al. Research in close-in blast loading from high explosives: ARL-CR-308 [R]. Virginia: U.S. Army Research Laboratory, 1996.
- [21] 周丰峻, 陈叶青, 任辉启. 爆炸近区空气冲击波规则反射和非规则反射 [C] // 祝贺郑哲敏先生八十华诞应用力学报告会——应用力学进展论文集. 北京: 中国力学学会, 2004: 98–112.

(责任编辑 曾月蓉)