

基于TNT当量法的木粉爆炸超压及致灾距离研究

张浩楠, 原琪, 苑春苗, 李刚
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 为快速评估木粉爆炸超压及致灾距离,采用TNT当量法预测木粉爆炸超压值. 利用ANSYS/LS-DYNA对木粉最大爆炸压力进行模拟. 结果表明:当初始压力为0 MPa、粉尘质量浓度为750 g/m³时,模拟值与实验值误差在10%以内;当初始压力为0.101 MPa、粉尘质量浓度为730 g/m³时,计算值与实验值误差为2.44%,模拟值与实验值误差在7%以内,与计算值误差在8%以内,证明TNT当量法预测木粉爆炸超压在有/无标准大气压下均适用. 根据TNT当量法估算建筑内粉尘爆炸超压分布结果,得到了人员伤亡、建筑损毁阈值,研究结果为木粉爆炸危险场所安全距离确定等防灾减灾措施提供参考依据.

关键词: TNT当量法;爆炸超压;木粉尘;ANSYS/LS-DYNA;安全距离

中图分类号: X 932 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)01-0119-08

Study on Overpressure and Disaster Distance of Wood Dust Explosion Based on TNT Equivalent Method

ZHANG Hao-nan, YUAN Qi, YUAN Chun-miao, LI Gang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YUAN Chun-miao, professor, E-mail: yuanchunmiao@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To quickly assess the overpressure and disaster distance of wood dust explosion, the TNT equivalent method was used to predict the overpressure value of wood dust explosion. The explosion pressure maximum of wood dust was simulated using ANSYS/LS-DYNA. The experimental results show that when the initial pressure is 0 MPa and the dust concentration is 750 g/m³, the error between simulated values and experimental values is within 10%; When the initial pressure is 0.101 MPa and the dust concentration is 730 g/m³, the error between the calculated value and the experimental value is 2.44%, the error between the simulated value and the experimental value is within 7%, and the error between the simulated value and the calculated value is within 8%. It proves that the TNT equivalent method is applicable for predicting the overpressure of wood dust explosion with or without standard atmospheric pressure. Based on the TNT equivalent method, the distribution of dust explosion overpressure in buildings was estimated, and the thresholds for casualties and building damage were analyzed. The research conclusion provides a reference basis for disaster prevention and mitigation measures such as the safe distance determination of hazardous areas for wood dust explosion.

Key words: TNT equivalent method; explosion overpressure; wood dust; ANSYS/LS-DYNA; safe distance

近年来,各种粉尘爆炸事故频发,造成了大量的人员伤亡和财产损失^[1-4].对于常见的木材处理行业,防止木粉尘爆炸、减轻事故后果更是一个值得关注的主题.对于木粉尘爆炸的危险性,

现有研究多集中在木粉尘的最小点火能、最大爆炸压力、最大压力上升速率、粉尘云/层最低着火温度等参数^[5-6].对于能直接造成人员伤亡、建筑损毁的冲击波超压值这个参数,大多数情况下是

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274180).

作者简介: 张浩楠(1999—),男,山西长治人,东北大学硕士研究生;苑春苗(1978—),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师;李刚(1969—),男,河南信阳人,东北大学教授,博士生导师.

在标准测试装置如 20 L 球、1 m³ 这类密闭空间中通过粉尘爆炸后压力值的变化进行表征^[7-9]。但并未对大尺寸空间内部,粉尘爆炸造成的事故后果进行分析。

TNT 当量法是一个在相关工程领域中被广泛使用的方法,它是 TNT 的质量与其他燃料/空气(或燃料/氧气)或炸药质量的比。许多学者将其应用于可燃气体爆炸后对建筑物的破坏等的研究中。Prugh^[10]提出了一种估算 BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) 的 TNT 当量的方法,该方法可以将罐体破裂时刻液体爆炸闪动的能量和液化石油气罐内高压蒸气转化为当量 TNT 质量,进而分析 BLEVE 爆炸后造成的事故后果。Cheng 等^[11]利用 TNT 当量法分析了 BLEVE 爆炸载荷峰值压力,分析了隧道在爆炸过程中的破坏状况。Zhou 等^[12]利用 TNT 当量法揭示了在密闭爆炸条件下爆轰产物的加力效应的影响,同时发现现有的自由空气爆炸 TNT 当量法不能直接应用于密闭爆炸,改进后的 TNT 当量法可以定量评价不同炸药在不同环境下的破坏力。Guo 等^[13-14]针对地面管道并联燃气管道,提出了一种基于 TNT 当量法的埋地平行输气管道泄漏爆炸数值模拟方法,对泄漏天然气进行了数值模拟,得出了管道爆炸破坏程度随管道距离的增加而减小的结论,分析了埋地管线平行间距的危险程度,确定了安全间距,为埋地平行输气管道的建设和运行提供了指导。

本文以木粉尘为例,结合 20 L 球测得的木粉尘最大爆炸压力数值,提出使用 TNT 当量法预测其爆炸超压的方法。利用 ANSYS/LS-DYNA 模拟软件验证 TNT 当量法对木粉尘爆炸超压预测的合理性,并结合冲击波作用下人员伤亡、建筑损毁的超压值,从而可以快速评估木粉尘爆炸后造成的事故后果严重程度,为安全距离的确定以及减轻事故后果提供参考依据。

1 爆炸冲击波

1.1 TNT 当量法

TNT 当量法建立在假设燃料爆炸的行为如同具有相等能量的 TNT 爆炸的基础之上预测爆心周围不同位置处的爆炸超压。它是以爆炸破坏程度大小划分半径范围的评价法,评价结果直观、可靠,评价结果可用死亡半径、重伤半径和轻伤半径粗略描述爆炸危害程度的分区,也可用于

进一步计算伤害区域内的人员及其人员的伤害程度、破坏范围内物体损害程度和直接经济损失。该方法的优点是比较简单,使用方便。

TNT 当量质量可由式(1)进行估算^[15]:

$$m_{\text{TNT}} = \frac{\eta m \Delta H_{\text{C}}}{E_{\text{TNT}}} \quad (1)$$

其中: η 为经验爆炸效率; m 为可燃物质的质量,kg; ΔH_{C} 为可燃气体的爆炸能/燃烧热,kJ/kg; E_{TNT} 为 TNT 的爆炸能,为 4 686 kJ/kg。

η 是一个严重依赖经验的数值,该值的大小直接影响着计算结果的精准度。不同可燃物质具有不同的爆炸效率,对于粉尘爆炸,并没有可以参考的范围,所以,事先需根据已有数据对该值进行计算,寻找适用于木粉尘的爆炸效率,这也是后续对木粉尘爆炸超压进行预测的基础。

1.2 爆炸冲击波经验公式

由于爆炸过程的复杂性,冲击波各参数很难通过理论分析得到,许多研究者通过试验提出了近似计算公式。当已知 TNT 当量质量时,可以根据 Wu 等^[16]提出的计算公式计算出爆炸超压:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{1.056}{Z^{2.56}} - 0.051, & 0.1 \leq Z \leq 1; \\ \frac{1.008}{Z^{2.01}}, & 1 \leq Z \leq 15. \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δp 为爆炸超压,MPa; Z 为比例距离, $Z = \frac{R}{\sqrt[3]{m_{\text{TNT}}}}$, R 为爆心到测点距离,m。

同样,当知道距离爆心某一点处爆炸超压 Δp 时,根据式(1),式(2),可以将其看成 η 是关于 Δp 的函数,具体形式如下:

$$Z = f(\Delta p), \quad (3)$$

$$m_{\text{TNT}} = \left(\frac{R}{Z}\right)^3, \quad (4)$$

$$\eta = f(m_{\text{TNT}}, E_{\text{TNT}}, \Delta H_{\text{C}}, m). \quad (5)$$

只需将 $\Delta p, R, E_{\text{TNT}}, \Delta H_{\text{C}}, m$ 代入,即可反推得到 TNT 当量质量 m_{TNT} 以及爆炸效率 η 。

2 木粉尘相关参数测定及数值模拟模型建立

2.1 木粉尘最大爆炸压力及燃烧热测定

按照 GB/T 16426—1996^[17]使用 20 L 球测试木粉尘最大爆炸压力、最大压力上升速率,点火头能量为 10 kJ,温度为室温,初始氧体积分数为 20.6%。分别称取 5, 10, 14.6, 15, 20, 25 g 粒径为

75 μm 的木粉尘进行粉尘质量浓度为 250, 500, 730, 750, 1 000, 1 250 g/m³ 的粉尘爆炸实验。

图 1 为不同质量浓度粉尘爆炸过程的压力变化曲线, 最终确定木粉尘在质量浓度为 750 g/m³ 时会达到最大爆炸压力. 从图中可以看出, 其最大爆炸压力为 0.68 MPa.

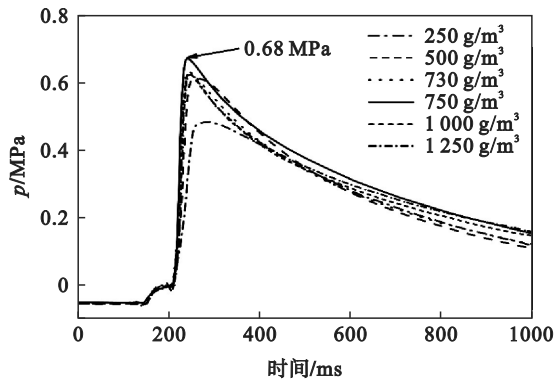


图 1 木粉尘爆炸过程压力变化

Fig. 1 Pressure change during wood dust explosion

根据 GB/T 13464—2008^[18], JB/T 6856—2017^[19] 的 TG-DSC 测试标准, 选用 5 mg 木粉尘样品进行燃烧热测定. 图 2 为所测木粉尘的 TG-DSC 曲线, 为了得出准确的单位质量放热功率, 将燃烧峰的起始点和终止点相连, 之后在峰值点引一条直线, 读出该直线与相连线交点的数值, 最后用峰值点的数值减去相交点的数值即为实际的单位质量放热功率^[20-21]. 用该方法计算出的木粉尘的燃烧热为 9 031 kJ/kg, 最大单位质量放热功率为 -11.1 W/g, 所对应的温度为 404.6 °C.

2.2 爆炸效率

由于爆炸效率是一个极其依赖经验的数值, 根据事故统计, 大多数可燃气的爆炸效率参考

范围为 1%~10%. 但是对于粉尘爆炸, 该值暂时还没有可供参考的范围, 所以只能根据现有数据来估算该值的大小. 因此将上述实验中粉尘质量浓度 750 g/m³、体积 0.02 m³、爆心到测点距离 R=0.168 m、爆炸超压 Δp=0.68 MPa、木粉尘燃烧热 ΔH_c=9 031 kJ/kg、TNT 爆炸能 E_{TNT}=4 686 kJ/kg 作为初始条件代入式(3)~式(5)中, 可以得出 TNT 当量质量 m_{TNT}=2.66 g, 爆炸效率 η=9.204%.

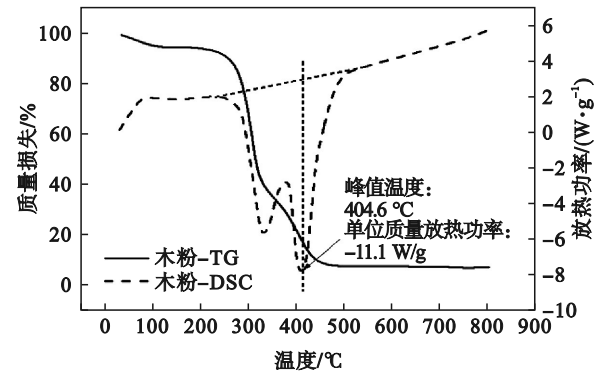


图 2 木粉尘的 TG-DSC 曲线

Fig. 2 TG-DSC curves of wood dust

2.3 炸药、空气、钢材的材料模型和状态方程

数值模拟时, 炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN^[22] 材料模型, 爆轰压力 p 和单位体积内能及相对体积 V 的关系采用 JWL^[22] (Jones-Wilkins-Le) 状态方程加以描述. JWL 状态方程如下:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) E^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) E^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}. \quad (6)$$

式中: A, B, R₁, R₂ 和 ω 为 JWL 状态方程参数, 其值由实验确定; E 为炸药的内能; V 为当前相对体积. 表 1 给出了 TNT 炸药的参数.

表 1 TNT 炸药材料参数

Table 1 Material parameters of TNT explosive

| ρ_0 /(kg·m ⁻³) | v /(m·s ⁻¹) | p_{CJ} /GPa | A/GPa | B/GPa | R_1 | R_2 | ω | E/GPa |
|---------------------------------|---------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|----------|---------|
| 1 583 | 6 880 | 19.4 | 307 | 3.898 | 4.485 | 0.79 | 0.3 | 6.968 4 |

注: ρ₀ 是炸药的密度; v 是炸药的起爆速度; p_{CJ} 是 CJ (Chapman-Jouget) 压力.

数值模拟时空气采用 MAT_NULL 材料模型^[22] 和线性多项式状态方程 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL^[22] 来描述, 其表达式如下:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_a. \quad (7)$$

式中: 当 μ = ρ/ρ₁ - 1 (如果 μ < 0, 则 C₂μ² 和 C₆μ² 等于 0), ρ 为当前密度, ρ₁ 为初始密度; E_a 为空气材料的内能; C₀, C₁, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆ 为状态方程参数. 空气的材料参数见表 2.

表 2 空气材料参数

Table 2 Material parameters of air

| ρ_1 /(kg·m ⁻³) | C ₀ /MPa | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₄ | C ₅ | C ₆ | E _a /Pa | V |
|---------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|---|
| 1.290 | -0.1 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 0 | 2.5 | 1 |

20 L 球球壁的钢材类型采用 304 不锈钢,数值模拟时钢材采用 MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK 模型^[22]来描述,其表达式如下:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (8)$$

式中: σ_y 为等效应力; A, B, C 为输入常数; ε_p 为有效塑性应变, $\dot{\varepsilon}^*$ 为归一化有效应变率,可表述为

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_s} \quad (9)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_p$ 为有效塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_s$ 为准静态阈值应变率.

最大应力受 σ_{\max} 和 σ_s 的限制,

$$\sigma_y = \min \left\{ \min [A + B\varepsilon_p^n, \sigma_{\max}] (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*), \sigma_s \right\} \quad (10)$$

当有效塑性应变超过失效时的塑性应变(ε_c)时发生失效. σ_{\max} 为从加工硬化获得的最大应力, σ_s 是饱和应力.304 不锈钢的材料参数见表 3.

表 3 304 不锈钢材料参数^[23]
Table 3 Material parameters of 304 stainless steel

| $\rho_2/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | E_0/GPa | 泊松比 | A/MPa | B/MPa | $\dot{\varepsilon}_s/\text{s}^{-1}$ | C | N | σ_{\max}/MPa | σ_s/MPa | ε_c/mm |
|--|------------------|-----|----------------|----------------|-------------------------------------|---------|---------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 7 850 | 194.02 | 0.3 | 460 | 915 | 1 | 0.009 6 | 0.373 8 | 843 | 1 800 | 0.17 |

注: E_0 为弹性模量.

2.4 模型参数及边界条件设置

因 20 L 球具有良好的对称性,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了 20 L 球八分之一简化数值模型.为了保证网格参数对模拟结果没有影响,需对网格无关性进行验证.对炸药和空气采用 3 种不同尺寸的网格单元进行划分,选取坐标为 (0.118, 0, 0.118) 处的监测网格查看压力值,验证结果如表 4 所示.从表 4 中可以看出,当炸药和空气网格尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 时,监测网格的压力值已经接近实验值,减小网格尺寸已经不会对模拟结果产生较大影响,因此,炸药和空气网格尺寸采用 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$.

表 4 网格无关性验证

Table 4 Grid independence verification

| 网格尺寸/mm | 网格总数 $\times 10^{-4}$ | 监测点压力/MPa |
|-------------------------------|-----------------------|-----------|
| 3 \times 3 \times 3 | 19 | 0.604 |
| 2 \times 2 \times 2 | 73 | 0.728 |
| 1.5 \times 1.5 \times 1.5 | 170 | 0.647 |

在建模软件中,20 L 球显示边长为 0.168 m 的八分之一球型,球壁厚度为 10 mm,空气模型为边长 180 mm 的正方体,炸药模型为边长 6 mm 的正方体,模型如图 3 所示.

炸药与空气采用 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 网格单元,炸药共 27 网格,空气共 728 523 网格;20 L 球采用 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 网格单元,共 4 126 网格.爆炸点坐标 (0, 0, 0),起爆时间为 0 s.XY, YZ, XZ 平面采用对称边界条件,剩余面采用阻抗边界条件,保证冲击波可以自由通过.炸药与空气采用沙漏控制,沙漏系数为 1×10^{-6} ,计算时间为 0.002 s,共计算 200 步.球壁采用 Lagrange 体,空气和炸药采用 ALE (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) 体,三者采用欧拉/拉格朗日流固耦合.

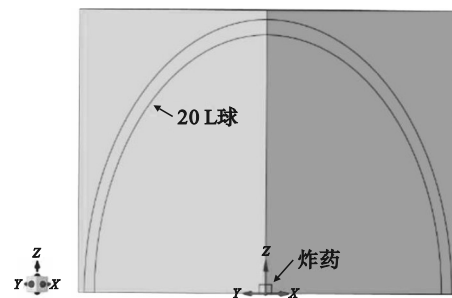


图 3 炸药、20 L 球、空气模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of explosive, 20 L ball, and air model

3 爆炸冲击波数值模拟

3.1 初始压力值为 0 MPa 时模拟结果及分析

采用上述模型以及相关参数和边界条件在 ANSYS/LS-DYNA 中进行模拟计算,再将其计算结果导入到 LS-PrePost 中进行结果分析.在其球壁边缘选取 6 个监测网格查看内部压力分布以及变化情况,这 6 个监测网格分布在 X, Y, Z 轴线与 20 L 球相交处的网格,以及 3 个面上各对角线与 20 L 球壁面相交处的网格,位置示意图如图 4 所示.监测网格的压力值如图 5 和表 5 所示.

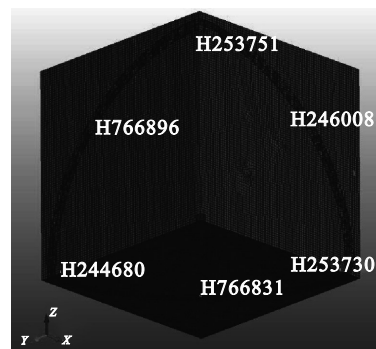


图 4 监测网格点位置图

Fig. 4 Location of monitoring grid points

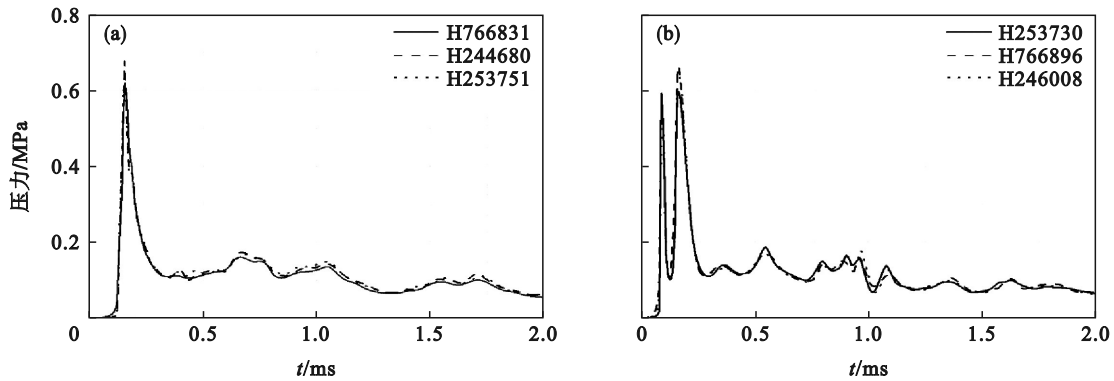


图 5 监测网格压力变化

Fig. 5 Change of monitoring grid pressure

(a)—X, Y, Z轴线上监测网格压力变化情况; (b)—3个对角线上监测网格压力变化情况.

表 5 各网格单元压力以及误差

Table 5 Pressure values and errors for each grid unit

| 网格编号 | 坐标/cm | 模拟压力/MPa | 实验测量压力/MPa | 误差/% |
|---------|-------------------|----------|------------|-------|
| H246008 | (11. 85,0,11. 85) | 0. 728 | 0. 68 | 7. 06 |
| H253751 | (0,0,16. 25) | 0. 650 | 0. 68 | 4. 41 |
| H766896 | (0,11. 85,11. 85) | 0. 732 | 0. 68 | 7. 64 |
| H244680 | (0,16. 25,0) | 0. 651 | 0. 68 | 4. 26 |
| H766831 | (11. 85,11. 85,0) | 0. 744 | 0. 68 | 9. 41 |
| H253730 | (16. 25,0,0) | 0. 643 | 0. 68 | 5. 44 |

图 5 中显示的压力值是从 0 MPa 开始,表明图中显示的均是超压值,没有考虑空气压力. 由于起爆时间是 0 s,图 5 中在压力值上升之前都有一段压力值持续是 0 MPa 的时间,时间持续约 9×10^{-5} s,这段时间代表着 TNT 起爆后,冲击波开始从爆心向球壁传播. 从表 5 的压力模拟值与实验值的误差可以看出,最大压力值出现在网格 H766831 处,压力值为 0.744 MPa,与实验值 0.68 MPa 误差为 9.41%,最小压力值出现在网格 H253730 处,压力值为 0.643 MPa,与实验值 0.68 MPa 误差为 5.44%. 所有误差均小于 10%,误差处于可以接受的范围,初步证明了 TNT 当量法是适用于粉尘爆炸冲击波压力值的预测.

3.2 初始压力值为 0.101 MPa 时模拟结果及分析

由于木粉尘类型不同,粒径不同,造成粉尘最佳燃爆浓度、粉尘最大爆炸压力等相关参数也会有所不同,为了验证 TNT 当量法在粉尘最大爆炸压力预测上的适用性,使用喻孜等^[6]的实验数据进行验证,用的设备为 20 L 球,木粉尘粒径为 25~45 μm ,质量浓度为 130~2 045 g/m^3 ,该粒径范围的木粉尘爆炸压力实验数据如图 6 所示. 从图中可以看出,该粉尘的最佳燃爆质量浓度出现在 730 g/m^3 (图中质量为 14.6 g) 时,最大爆炸压力

$p_{\text{max}}=0.757$ MPa. 需要说明的是,初始压力值是 0.101 MPa,也就是说实验测量值是在大气压力值的基础上测得的,因此最大爆炸超压 Δp_{max} 为 0.656 MPa.

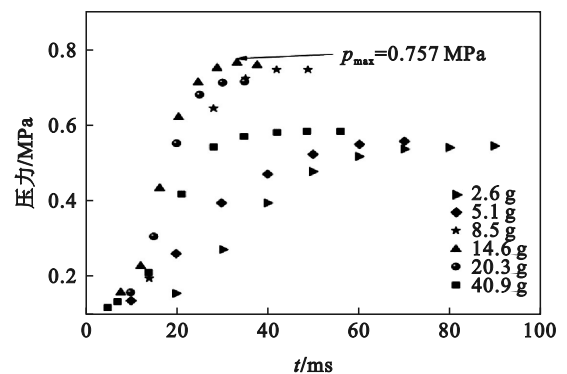


图 6 木粉尘爆炸过程压力变化图^[6]

Fig.6 Pressure change diagram during wood dust explosion^[6]

因此将爆心到压力传感器距离 $R=0.168$ m,质量浓度为 730 g/m^3 、体积 20 L、最大爆炸超压 $\Delta p_{\text{max}}=0.656$ MPa、爆炸效率 $\eta=9.204\%$ 等条件作为初始条件进行验证. 木粉尘的主要成分为纤维素、半纤维素和木质素,因此其燃烧热仍近似为松木粉尘的燃烧热,值为 9 031 J/g. 将上述条件代入式(3)~式(5)中计算得 TNT 当量质量 $m_{\text{TNT}}=$

2.59 g, 根据式(2)计算得出最大爆炸超压 $\Delta p_{\max} = 0.672$ MPa. 计算值与实验值 0.656 MPa 相差 0.016 MPa, 误差仅为 2.44%.

为了验证上述计算值的正确性, 需再次利用 ANSYS/LS-DYNA 对其爆炸期间的压力变化进行模拟. 由于其数值是在标准大气压的基础上测得的, 对此条件下的模拟也能验证初始压力的变化是否会对模拟结果造成影响.

经计算, 在八分之一模型中, 炸药为边长 5.9 mm 的正方体, 空气及 20 L 球的模型与 3.1 节所述保持一致, 仅改变网格尺寸. 再次选用 6 个监测网格进行验证, 在 XY, XZ, YZ 每个面上选用 2 个监测点, 位置示意图如图 7 所示.

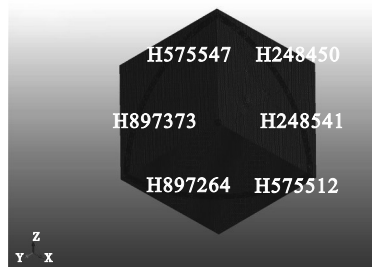


图 7 监测网格位置示意图
Fig.7 Monitoring grid location diagram

这 6 个监测网格的压力值以及与实验值和计算值的误差如图 8 和表 6 所示, 可以看出, 模拟时产生的最大爆炸超压值出现在网格 H248450 处, 压力为 0.697 MPa, 与实验值 0.656 MPa 误差为 6.25%, 与计算值 0.672 MPa 的误差为 3.72%. 模拟

最小爆炸超压值出现在网格 H575547 处, 其压力为 0.620 MPa, 与实验值 0.656 MPa 误差为 5.49%, 与计算值 0.672 MPa 的误差为 7.73%. 所有监测网格的压力值与实验值的误差值均小于 7%, 与计算值误差在 8% 以内. 再一次证明了 TNT 当量法在粉尘最大爆炸压力预测方面的适用性. 同时也证明了在有/无标准大气压下, 该预测方法均可应用于木粉尘爆炸超压的预测. 另外, 相较于粉尘质量浓度为 750 g/m^3 时, 730 g/m^3 粉尘模拟爆炸时产生的误差更小. 可能是由于 730 g/m^3 是该粉尘爆炸时产生最大爆炸压力时的质量浓度, 由于受到空间限制, 氧气含量有限, 粉尘爆炸并不是质量浓度越高, 爆炸压力越大, 所以, 730 g/m^3 粉尘模拟爆炸时产生的误差更小. 说明当初始环境为标准大气压时, TNT 当量法对于木粉尘爆炸超压预测结果更接近真实情况.

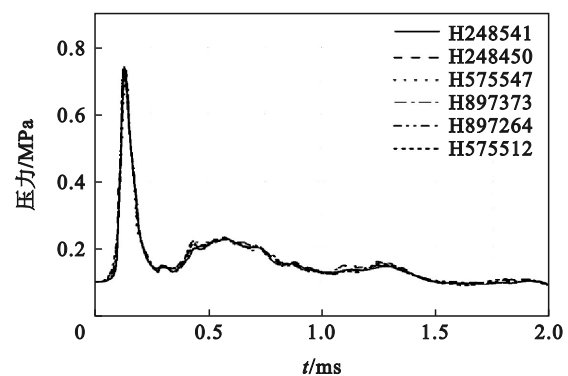


图 8 监测网格压力曲线
Fig. 8 Monitoring grid pressure curves

表 6 监测网格模拟压力值与实验值及计算值

Table 6 Monitoring grid simulated pressure values, experimental values, and calculated values

| 网格编号 | 坐标/cm | 模拟爆炸超压/MPa | 实验 | | 计算 | |
|---------|------------|------------|------------|------|------------|------|
| | | | 最大爆炸超压/MPa | 误差/% | 最大爆炸超压/MPa | 误差/% |
| H248541 | (0,15,7.3) | 0.696 | 0.656 | 6.10 | 0.672 | 3.57 |
| H248450 | (7.3,15,0) | 0.697 | 0.656 | 6.25 | 0.672 | 3.72 |
| H575547 | (0,7.3,15) | 0.620 | 0.656 | 5.49 | 0.672 | 7.73 |
| H897373 | (15,7.3,0) | 0.623 | 0.656 | 5.03 | 0.672 | 7.29 |
| H897264 | (7.3,0,15) | 0.690 | 0.656 | 5.18 | 0.672 | 2.68 |
| H575512 | (15,0,7.3) | 0.635 | 0.656 | 3.20 | 0.672 | 5.50 |

注: 计算最大爆炸超压是利用文献[6]的数据通过式(2)计算得到的.

3.3 爆炸冲击波超压对人员及建筑的损伤

对于某些木粉尘涉爆厂房, 当厂房内部空间 1 m^3 质量浓度为 750 g/m^3 的木粉尘发生爆炸时, 计算得厂房内部距离爆心不同位置处的爆炸超压, 如图 9 所示.

根据表 7 冲击波最大超压作用下建筑物及人

员易受破坏(损伤)超压值^[24-25]判断, 当距离爆心小于 8 m 时, 即有可能造成建筑物破坏; 当距离爆心超过 4 m 时, 即有可能造成人员受伤, 当小于 2 m 时, 甚至有可能造成人员死亡. 所以, 对于某些空间相对较小的厂房, 在设计人员工位时要特别注意与易爆场所之间的距离, 结合 TNT 当量法及时

采用抑爆、泄爆等措施,预防粉尘爆炸事故的发生以及减少事故损失,减轻事故后果。

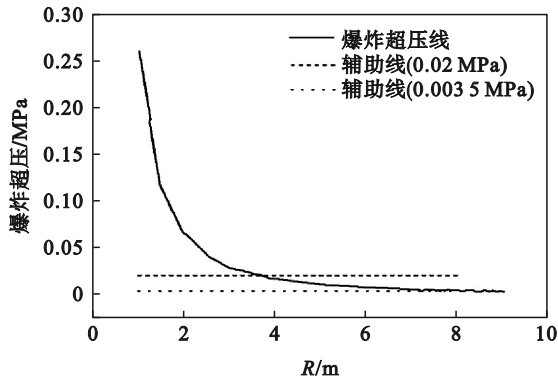


图 9 距离爆心不同位置处的爆炸超压

Fig. 9 Explosion overpressure at different positions from the explosion center

表 7 冲击波最大超压作用下建筑物及人员易受破坏(损伤)超压值

Table 7 The overpressure values of vulnerable buildings and personnel under the maximum overpressure of shock wave

| 建筑物构件 | | 人体 | |
|--------------------|---------------|---------------------|-------------|
| 破坏特征 | 冲击波最大超压/MPa | 损伤程度 | 冲击波最大超压/MPa |
| 大、小窗户玻璃掉落、窗框可能损坏 | 0.003 5~0.007 | 轻微(轻微的挫伤) | 0.02~0.03 |
| 未加固的混凝土墙或矿渣混凝土墙破坏 | 0.014~0.021 | 中等(听觉器官损伤、中等挫伤、骨折等) | 0.03~0.05 |
| 未加固的砖墙剪切和平移引起的破坏 | 0.049~0.056 | 严重(内脏严重挫伤、可引起死亡) | 0.05~0.1 |
| 波纹钢板构建的轻质拱形建筑物完全破坏 | 0.245~0.28 | 极严重(大部分人死亡) | >0.1 |

4 结 论

1) 利用 20 L 球中的爆炸数据进行计算,得出木粉尘的爆炸效率 $\eta=9.204\%$ 。

2) 对无标准大气压下(初始压力为 0 MPa)的木粉尘爆炸进行模拟.与实验值误差最大的模拟压力爆炸超压为 0.744 MPa,误差为 9.41%,与实验值误差最小的爆炸超压为 0.651 MPa,误差为 4.26%。所有模拟误差均小于 10%,证明了 TNT 当量法对木粉尘爆炸超压预测的合理性。

3) 对在标准大气压下(初始压力为 0.101 MPa)粉尘爆炸进行模拟.计算爆炸超压为 0.672 MPa,

计算值与实验最大爆炸超压 0.656 MPa 相差 0.016 MPa,误差仅为 2.44%。与实验最大爆炸超压误差最大的模拟爆炸超压为 0.697 MPa,与实验值误差为 6.25%,与计算值误差为 3.72%。与实验最大爆炸超压误差最小的模拟爆炸超压为 0.620 MPa,与实验值误差为 5.49%,与计算值误差为 7.73%。所有监测网格的压力值与实验值的误差值在 7% 以内,与计算值的误差在 8% 以内。相较于粉尘质量浓度为 750 g/m³ 时,730 g/m³ 粉尘模拟爆炸时产生的误差更小。

4) 利用 TNT 当量法计算了厂房内部 1 m³ 空间质量浓度为 750 g/m³ 的木粉尘发生爆炸后,人员伤亡、建筑损毁的阈值.当距离爆心小于 8 m 时,即有可能造成建筑物破坏;当距离爆心超过 4 m 时,即有可能造成人员受伤;当小于 2 m 时,甚至有可能造成人员死亡。

参考文献:

- [1] Yuan Z, Khakzad N, Khan F, et al. Dust explosions: a threat to the process industries [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, 98: 57-71.
- [2] Abbasi T, Abbasi S. A. Dust explosions—cases, causes, consequences, and control [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140(1/2): 7-44.
- [3] Iarossi I, Amyotte P R, Khan F I, et al. Explosibility of polyamide and polyester fibers [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(6): 1627-1633.
- [4] Amyotte P R. Some myths and realities about dust explosions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, 92(4): 292-299.
- [5] Pang Z H, Zhu N F, Cui Y Q, et al. Experimental investigation on explosion flame propagation of wood dust in a semi-closed tube [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 63: 104028.
- [6] 喻孜, 胡涛平, 郭露, 等. 不同木粉浓度下爆炸压力的动力学理论模拟[J]. *林产工业*, 2019, 46(5): 7-11. (Yu Zi, Hu Tao-ping, Guo Lu, et al. The kinetics theoretical simulation of explosion pressure with different wood dust concentrations [J]. *China Forest Products Industry*, 2019, 46(5): 7-11.)
- [7] Bu Y J, Yuan C M, Amyotte P R, et al. Ignition hazard of non-metallic dust clouds exposed to hotspots versus electrical sparks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365: 895-904.
- [8] Lee M C, Kim Y S, Rie D H. Analysis of explosion characteristics of combustible wood dust in confined system using the thermal decomposition rate and mass loss rate [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109: 432-439.
- [9] Islas A, Fernández A R, Betegón C, et al. Computational assessment of biomass dust explosions in the 20 L sphere [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 165: 791-814.
- [10] Prugh R W. Quantitative evaluation of “bleve” hazards [J]. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1991, 3(1): 9-24.
- [11] Cheng R S, Chen W S, Hao H, et al. Dynamic response of road tunnel subjected to internal boiling liquid expansion

- vapour explosion (BLEVE) [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123: 104363.
- [12] Zhou H, Zheng C, Yue X S, et al. TNT equivalency method in confined space based on steel plate deformation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 178: 104587.
- [13] Guo Y B, Liu C C, Wang D G, et al. Numerical study and safety spacing of buried parallel gas pipelines: a study based on TNT equivalent method [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2018, 168: 246–257.
- [14] Guo Y B, He L G, Wang D G, et al. Numerical investigation of surface conduit parallel gas pipeline explosive based on the TNT equivalent weight method [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 44: 360–368.
- [15] Crowl D A, Louvar J F. 化工过程安全理论及应用[M]. 蒋军成, 译. 北京: 化学工业出版社, 2006: 164. (Crowl D A, Louvar J F. *Chemical process safety theory and applications* [M]. Translated by Jiang Jun-cheng. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 164.)
- [16] Wu C Q, Hao H. Modelling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(6): 699–717.
- [17] 国家技术监督局. 粉尘云最大爆炸压力和最大压力上升速率测定方法: GB/T 16426—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. (State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. *Determination for maximum explosion pressure and maximum rate of pressure rise of dust cloud*: GB/T 16426—1996[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.)
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 物质热稳定性的热分析试验方法: GB/T 13464—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Thermal analysis test methods for thermal stability of materials*: GB/T 13464—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.)
- [19] 中华人民共和国工业和信息化部. 热重-差热分析仪: JB/T 6856—2017[S]. 北京: 机械工业出版社, 2017. (Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. *Thermo gravimetric-differential thermal analyzer*: JB/T 6856—2017[S]. Beijing: China Machine Press, 2017.)
- [20] Zhang B, Fu P F, Liu Y, et al. Investigation on the ignition, thermal acceleration and characteristic temperatures of coal char combustion [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 1303–1312.
- [21] Labus M, Lempart M. Studies of polish paleozoic shale rocks using FTIR and TG/DSC methods [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 161: 311–318.
- [22] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2020.
- [23] Wang C Z, Wang H X, Shankar K, et al. Dynamic failure behavior of steel wire mesh subjected to medium velocity impact: experiments and simulations [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 216: 106991.
- [24] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011: 592. (Орлиенко И. *Explosive physics* [M]. Translated by Sun Cheng-wei. Beijing: Science Press, 2011: 592.)
- [25] 吴艳青, 刘彦, 黄风雷, 等. 爆炸力学理论及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021: 211. (Wu Yan-qing, Liu Yan, Huang Feng-lei, et al. *Theory and application of explosion mechanics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021: 211.)