

半封闭空间瓦斯爆炸冲击波传播距离研究

杨书召, 吴金刚

(河南工程学院 安全工程学院, 河南 郑州 451191)

摘要:为揭示瓦斯在强爆和弱爆情况下冲击波超压变化规律,利用一维爆炸物理模型和爆炸理论,构建了冲击波超压随距离变化的数学模型,并用一端开口的半封闭爆炸试验装置,在保持瓦斯浓度和其他条件不变,仅改变点火能量大小实现了瓦斯爆燃和爆轰,验证理论求解.结果表明:半封闭受限空间内,爆燃情况下火焰传播速度要远小于爆轰条件下火焰传播速度,爆燃火焰传播速度为亚音速,爆轰为超音速;爆轰与爆燃的冲击波超压的理论解都小于实验值,但整个传播变化趋势基本一致;极强冲击波最大超压值与传播距离成反比,极弱冲击波最大超压值与传播距离的平方根成反比;爆燃和爆轰冲击波在燃烧区内的传播变化趋势与理论解基本吻合.研究结果为防治瓦斯爆炸破坏及爆炸事故灾害勘验提供了技术和理论支持.

关键词: 瓦斯爆炸;爆燃;爆轰;半封闭空间

中图分类号: TD712.71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2014)01-0008-04

Study on propagation distance of gas explosion in semi-enclosed spaces

YANG Shu-zhao, WU Jin-gang

(College of Safety Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: To reveal the laws about gas under the condition of strong detonation and weak detonation shock wave overpressure changing, with one-dimension explosion physical model and the theory, the mathematical model of shock wave overpressure changing with distance was set up. With a change of ignition energy and gas concentration of unchanged in the pipe, the gas detonation was achieved and the theory solution was verified in semi-enclosed space. Results show that the strong shock wave overpressure change is inversely proportional to the propagation distance, very weak shock wave overpressure and the propagation distance is inversely proportional to the square root of. Under the condition of deflagration flame propagation speed is much less than the detonation under the conditions of flame propagation speed. Detonation and deflagration of the theoretical solution is less than the experimental value, but the whole transmission trends are basically identical. Value theory solution agreed with the experimental values. The research results provide technical support and theoretical guidance for the prevention and control of gas explosion accident.

Key words: Gas explosion; deflagration; detonation; semi-enclosed space

煤矿瓦斯爆炸事故分析表明,不同点火条件下的爆炸有强有弱,造成人员的伤害和财产损失截然不同^[1],强爆即爆轰,能量大,冲击波产生的超压

也大,波及范围广,甚至到整个矿井;弱爆即爆轰,超压相对较小,有的仅波及几十米或上百米^[2].爆燃和爆轰产生的超压均大于人能承受的压力,一定

条件下,爆燃还会转化为爆轰,加重人员伤害和财产损失^[3]. 因此,研究瓦斯爆燃和爆轰的传播特性,抑制爆燃转爆轰,对减少瓦斯事故损失有着重要的理论和现实意义.

巷道半封闭受限空间内受点火等诸多因素影响,爆轰不易形成,爆炸传播也比较复杂,国内外学者对此研究较多. 国外学者在大型巷道内实现了预混瓦斯气体爆轰,但资料较少^[4];国内学者在封闭激波管内用丙烷做点火源实验实现了爆轰,对爆炸冲击波等特征参数进行了研究^[5-6],并取得了一定的成果. 但在半封闭管道内实现瓦斯爆轰和理论分析强弱爆传播随距离变化的关系及传播特征研究较少.

本文在爆炸传播一维物理模型的基础上,构建了强弱爆冲击波超压随传播距离变化的数学模型,并在半封闭受限空间用强点火实验实现爆轰,并得到超压传播中不同位置的超压值,试验结果与理论求解基本吻合,为减少爆炸灾害损失和事故波及范围勘验提供理论和技术支持.

1 爆炸传播的理论推导

如图 1 所示,建立煤矿半封闭掘进工作面因瓦斯突然涌出易产生爆炸一维模型^[7]. 当 $|(D_s - v_0)/c_0| > 1$ 时,冲击波相对于波前气体的传播速度总是超音速的,引入 $M_s = (D_s - v_0)/c_0$, M_s 代表冲击波相对于波前气流运动的马赫数, γ 为绝热指数, D_s 冲击波速度, v_0 空气流速, c_0 当地音速. 冲击波波阵面参数借助于极强冲击波公式^[8-9],可得如下关系式:

$$P_1 = p_0 + \frac{2}{\gamma + 1} \rho_0 D_s^2 \left(1 - \frac{c_0^2}{D_s^2} \right). \quad (1)$$

$$\rho_1 = \frac{\gamma + 1}{\gamma - (1 - c_0^2/D_s^2)} \rho_0. \quad (2)$$

$$u_1 = \frac{2}{\gamma + 1} D_s \left(1 - \frac{c_0^2}{D_s^2} \right). \quad (3)$$

以点爆火源点为原点,距波阵面距离为 x ,建立坐标系. 波阵面附近积聚了爆炸冲击波卷来的气体,被冲击波压缩过的气体质量都集中在厚度为 Δx 的冲击波内,冲击波厚度极薄,故 Δx 很小,此薄层内密度为常数,并等于波后密度 ρ_1 . 即此厚度为 Δx 的薄层质量 M 为

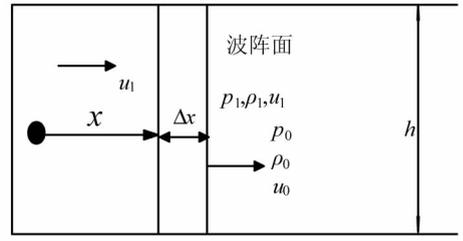


图 1 爆炸平面冲击波物理模型

$$M = S \rho_1 \Delta x = S \rho_0 x.$$

其中, S 为巷道截面积, x 为冲击波所经过的距离.

若厚度 Δx 的薄层内气流速度等于波阵面后气流速度 u_1 ,薄层内压强用 p 表示,它等于波后压强的 φ 倍,即 $p = \varphi p_1$,其中 φ 待定,波前压强 p_0 与 p 相比可忽略. 对薄层内气体用牛顿第二定律可推出

$$\frac{d}{dt}(M u_1) = S(p_1 - p_0) = S(\varphi p_1 - p_0),$$

已知 $\frac{d}{dt} = \frac{d}{dx} \frac{dx}{dt}$, $\frac{dx}{dt} = D_s$, 又 $\frac{d}{dt} = d_s \frac{d}{dx}$, 把 $p_0 = \rho_0 c_0^2 / \gamma$ 代入得:

$$(\varphi - 1)^{-1} \left(1 + \frac{c_0^2}{D_s^2} \right) D_s \left(1 + \frac{1 + \gamma}{2\gamma} \frac{c_0^2}{D_s^2} \right)^{-1} D_s^{-1} = \frac{dx}{x},$$

对上式积分得

$$\sqrt{D_s^2 + \frac{1 - \gamma c_0^2}{2\gamma} \left[D_s^2 \left(D_s^2 + \frac{1 - \gamma c_0^2}{2\gamma} \right)^{-1} \right]^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}} = C x^{\varphi-1}. \quad (4)$$

其中 C 为待定常数. 瓦斯爆炸后,假设爆炸产生爆轰,冲击波为极强冲击波,当 $c_0^2/D_s^2 \rightarrow 0$ 时,上式简化为

$$D_s = C x^{\varphi-1}. \quad (5)$$

在忽略冲击波与壁面的摩擦损失以及热传导、热辐射等其他能量损失,仅考虑冲击波对波前气体做功的损失,冲击波对气体介质所做的功等于冲击波阵面内气体的动能和内能. 设 E_r 被包含在薄层围成的长度为 x 、断面为 S 的巷道内的气体中,则薄层气体内能为

$$E_r = \frac{S x p}{\gamma - 1}. \quad (6)$$

薄层气体动能: $E_k = \frac{1}{2} M u_1^2$, 冲击波对气体介质所做的功 E 为

$$E = E_k + E_r = 2 S \rho_0 \left(\frac{1}{(\gamma + 1)^2} + \frac{\varphi}{\gamma^2 - 1} \right) C^2 x^{2\varphi-1}. \quad (7)$$

对于瓦斯积聚量一定时, E 为常数. 鉴于冲击

波对气体介质所做的功与 x 无关,则:

$$D_s = Cx^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{(\gamma-1)(\gamma+1)^2 E}{(3\gamma-1)S\rho_0}} x^{-\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

由此得到爆轰状态,极强冲击波在巷道内产生的超压 ΔP 与传播距离 x 的关系:

$$\Delta P = \frac{2(\gamma+1)^2(\gamma-1)E}{(3\gamma-1)\rho_0 S} x^{-1}. \quad (9)$$

而当 $|M_s| \rightarrow 1$ 时,且 $v_0 = 0, v_1 = u_1$, 冲击波阵面参数借助于弱冲击波公式^[10],可得如下关系式:

$$\frac{u_1}{c_0} \approx \frac{4}{\gamma+1}(M_s-1). \quad (10)$$

$$\frac{\Delta p}{\rho_0} \approx \frac{4\gamma}{\gamma+1}(M_s-1),$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} \approx 1 + \frac{4}{\gamma-1}(M_s-1). \quad (11)$$

若爆炸传播过程冲击波处于爆燃极弱状态时,可推出冲击波在传播过程中超压与距离的关系:

$$\Delta p \approx \frac{4\gamma\rho_0}{(\gamma+1)c_0} \left[\frac{(\gamma-1)(\gamma+1)^2 E}{(3\gamma-1)S\rho_0} \right]^{\frac{1}{2}} x^{-\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

式(9)和式(12)看出,爆轰和爆燃状态下,冲击波传播过程中超压与距离非线性规律变化,极强冲击波超压与传播距离成反比,而极弱冲击波超压与传播距离的平方根成反比。

2 实验结果及理论数据对比

2.1 爆燃和爆轰实验及结果

在一端封闭,另一端开口的实验装置内,用 0.2 kJ 和 10 kJ 能量点火,使浓度为 9.5% 瓦斯形成爆燃和爆轰.爆燃情况下火焰传播速度为 280 m/s,爆轰条件下火焰传播速度为 860 m/s.超压随距离变化的实验结果如表 1、表 2 所示。

表 1 爆轰下各测点压力与传播距离实验值

距离/m	1#压力/MPa	2#压力/MPa	3#压力/MPa
1	2.024	1.987	1.962
2	1.480	1.240	1.020
4	0.870	0.602	0.670
6	0.490	0.401	0.389
8	0.370	0.257	0.249
10	0.231	0.240	0.201
12	0.184	0.162	0.160

表 2 爆燃下各测点压力与传播距离实验值

距离/m	4#压力/MPa	5#压力/MPa	6#压力/MPa
1	1.101	1.120	1.210
2	0.812	0.894	0.902
4	0.601	0.623	0.598
6	0.510	0.521	0.513
8	0.412	0.418	0.409
10	0.401	0.418	0.409
12	0.312	0.320	0.345

2.2 爆燃和爆轰理论解与实验数据比较

取瓦斯浓度为 9.5%, 空气的初始状态参数为 $P_0 = 0.1$ MPa, $\rho_0 = 1.25$ kg/m³, $T_0 = 288$ K, $u_0 = 0$, 空气为双原子气体 $\gamma = 1.4$, 断面 $S = 6.4 \times 10^{-3}$ m². 瓦斯爆炸能量来源于瓦斯与空气的燃烧反应,标准状态下每 1 kg 瓦斯完全燃烧放出的热量为 55 MJ,在常温、常压条件下每 1 kg 浓度为 9.5% 的瓦斯完全燃烧放出的热量为 57.90 MJ,瓦斯密度为 0.68 kg/m³,瓦斯的体积能量密度为 3.74 MJ/m³,瓦斯与空气聚积体积为 0.32 m³ 混合气体,其中所含瓦斯分别为 0.304 m³. 则聚积体积 0.304 m³ 的混合气体中瓦斯体积能量为 1.14 MJ.

理论求解得强爆炸超压与距离的关系:

$$\Delta P_2 = 1.884x^{-1}. \quad (13)$$

弱爆炸超压与距离的关系:

$$\Delta P_1 = 1.028x^{-\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

利用(13)式和(14)式对试验强爆炸和弱爆炸求解各测点位置的理论超压值,见图 2 和图 3 所示。

理论值与试验值对比看出,弱爆条件下理论解要小于实验值,但整个传播变化趋势一致,理论值

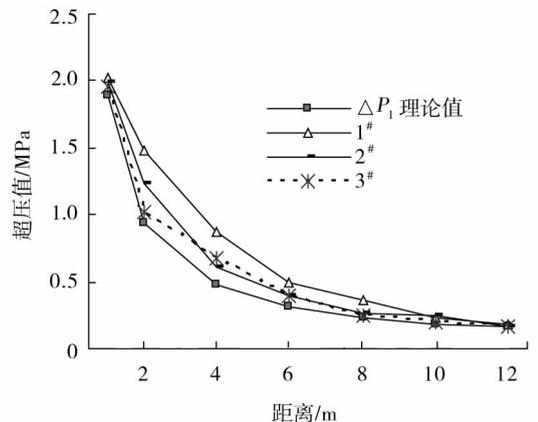


图 2 弱爆炸超压与传播距离的实验值与理论值对比

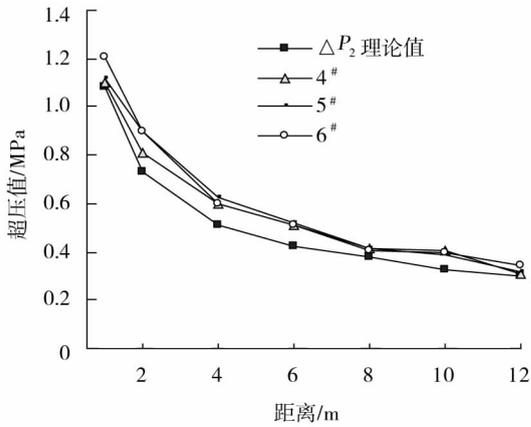


图3 强爆炸超压与传播距离的实验值与理论值对比

与实验值基本吻合。爆燃状态火焰速度较小,超压传播速度较大,理论求解时忽略管壁吸热造成的能量损失,所得超压值略小。

对比分析看出,强爆条件下爆轰理论求解超压值与实验值变化趋势基本一致,理论值与实验值基本吻合。同样,由于理论计算忽略了壁面吸热损失,实验值也大于理论解。

3 结论

1)一维爆炸模型下,推导出瓦斯爆燃和爆轰两状态的超压与传播距离的定量关系。即冲击波传播过程中超压与距离呈非线性规律变化,极强冲击波超压与传播距离成反比,而极弱冲击波超压与传播距离的平方根成反比。

2)在管道内改变点火能量实现瓦斯爆燃和爆

轰,弱爆与强爆条件下,理论解都要小于实验值,但整个传播变化趋势基本一致,理论解与实验值基本吻合。

参考文献:

- [1] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1992.
- [2] 曲志明,吴会阁,郝刚立,等. 瓦斯爆炸衰减规律和破坏效应[J]. 煤矿安全, 2006, 37(4): 5-9.
- [3] 朱建华. 爆炸波破坏/伤害效应评价[J]. 劳动保护科学技术, 1999, 19(3): 38-41.
- [4] 徐景德,徐胜利,杨庚宇,等. 矿井瓦斯爆炸传播的实验研究[J]. 科学技术, 2004, 3(7): 55-57.
- [5] 费国云. 瓦斯爆炸沿巷道传播特性探讨[J]. 煤矿安全, 1996(2): 32-34.
- [6] 仇锐来,张延松. 点火能量对瓦斯爆炸传播压力的影响实验研究[J]. 煤矿安全, 2006, 42(7): 8-11.
- [7] 王海燕,曹涛,周心权,等. 煤矿瓦斯爆炸冲击波衰减规律研究与应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 771-782.
- [8] 曲志明,吴会阁,郝刚立,等. 瓦斯爆炸衰减规律和破坏效应[J]. 煤矿安全, 2006, 37(4): 5-9.
- [9] 曲志明. 瓦斯爆炸衰减规律和破坏效应[J]. 煤矿安全, 2006(2): 3-5.
- [10] 王大龙. 煤矿瓦斯爆炸火焰波和冲击波传播规律的理论研究与试验分析[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(2): 1-3.