

文章编号:0253-9993(2013)03-0367-06

煤与瓦斯突出冲击波的形成机理

苗法田^{1,2}, 孙东玲^{1,2,3}, 胡千庭^{1,2}

(1 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室,重庆 400037;2. 中煤科工集团重庆研究院,重庆 400037;3 山东科技大学 资源与环境工程学院,山东 青岛 266510)

摘要:根据煤与瓦斯突出过程中煤-瓦斯两相流运动参数的研究成果,对不同流动状态下冲击波的形成机理进行了分析。当孔洞中喷出的煤-瓦斯两相流未超过临界状态或处于低度未完全膨胀状态时,流体在巷道空间完全膨胀后的速度较低,产生的冲击波超压值较小;当高度或超高度未完全膨胀流体在巷道空间中膨胀时,如果巷道空间足够大,则流体将进行“爆炸式”加速过程并可能产生强冲击波;而如果巷道空间受限时,最终形成的冲击波的超压值较小,但两相流的动压和膨胀过程中的气体静压可能会严重破坏矿井生产设备或设施。

关键词:煤与瓦斯突出;煤-瓦斯两相流;临界状态;冲击波;机理

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A

The formation mechanism of shock waves in the coal and gas outburst process

MIAO Fa-tian^{1,2}, SUN Dong-ling^{1,2,3}, HU Qian-ting^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China; 2. Chongqing Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group Corp., Chongqing 400037, China; 3. College of Resource and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: Based on research results of motion parameters of coal-gas flow, this paper analyzes the formation mechanism of shock waves at different states of coal-gas flow in the coal and gas outburst process. While the ejected coal-gas flow has not exceeded the critical state, nor has it reached the state of low under-expansion, both the flow velocity after complete expansion in the roadway, and the overpressure of forming shock wave will be small. While the high or super high degree of under-expanded flow expands in the roadway, the flow will speed up with an explosive process if the roadway space is big enough. Conversely, if the roadway space is limited, the final overpressure of forming shock wave will be smaller, but the dynamic pressure of the two-phase flow and gas static pressure in the expansion process could seriously damage mine production equipment or facilities. The results of these tests are significant to the pre-warning and prevention of outburst disasters, the formulation of contingency plans, and the optimization of mine safety facilities.

Key words: coal and gas outburst; coal-gas flow; critical state; shock wave; mechanism

煤与瓦斯突出时,煤-瓦斯两相流在矿山环境、瓦斯和煤的物理力学性质综合作用下以一定速度由孔洞中喷出,冲击和扰动巷道空间气体。在流场中,扰动是以波的形式向外传播的。扰动有强弱之分,使物理参数值改变很小的,称为微弱扰动,其传播速度就是声速。而强扰动在介质中的传播速度比声速大,其大小不仅取决于介质的属性和状态,还取决于扰动

源对介质扰动强度的大小^[1]。

突出冲击波也是一种扰动波,它在气体中的运动速度,与煤-瓦斯两相流对巷道气体的压缩程度紧密相关。因此,煤-瓦斯两相流的运动参数是形成煤与瓦斯突出冲击波的重要前提条件。长期以来,矿山安全领域的专家、学者在讨论煤与瓦斯突出冲击波问题时,往往忽略了突出过程中两相流运动参数的变化规

律对冲击波的影响,仅从冲击波本身特性出发来研究其对矿井设施的破坏作用,无法掌握突出冲击波的本质特征,因此许多学者认为突出冲击波的理论研究对于矿井突出灾害的治理方面并无太多实际意义。其实,事实刚好相反,只有深入了解煤与瓦斯突出两相流运动状态的变化过程,才能正确认识冲击波的形成机理,进而提出相应的灾害防治措施。

1 空气冲击波基础理论

经典流体力学中对空气冲击波的形成机理已经有了非常详细的分析过程^[1-3],本文不再赘述。简单来说,冲击波就是气体受强烈压缩后产生的非线性传播波。凡被冲击波扰动过的气体,参数值都会发生一个突跃的变化。如图1所示,在一段等截面管道内,冲击波 QQ' 的前方为未受扰动的静止气体,设其压强、密度、温度参数分别为 p_1, ρ_1, T_1 ,在冲击波 QQ' 后为受到强扰动的气体,其对应参数值突跃为 p_2, ρ_2, T_2 ^[4-6]。

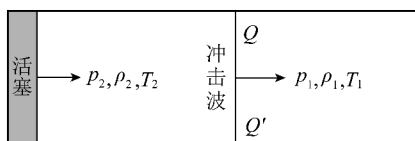


图1 管内冲击波示意

Fig. 1 Sketch drawing of shock wave in pipe

冲击波阵面(图1中 QQ')是确定其传播特性的一个重要因素。波阵面以超过未受扰动空气中声速的速度传播,当波阵面压力较大时其速度可达每秒几千米。波阵面传播速度可用式(1)表示。

$$U = c_1 \sqrt{1 + \frac{k+1}{2k} \frac{p_b - p_m}{p_m}} = c_1 \sqrt{1 + \frac{k+1}{2k} \frac{\Delta p}{p_m}} \quad (1)$$

式中, p_m 为未受冲击波扰动的气体绝对压力; c_1 为未受扰动的空气中的声速; p_b 为波阵面上的绝对压力; k 为比热比; Δp 为波阵面上的超压。

研究表明,空气冲击波在管道中传播时,波阵面上的压力值随传播距离的增大呈指数级衰减趋势,即压力高时衰减迅速,而后期压力低时衰减很慢。因此,波阵面超压 Δp 很小时,冲击波仍然能够传播很远的距离。随着传播距离的增大,被扰动的空气质量不断增加,波强不断衰减。当波阵面超压最终降低为未扰动气体中的压力 p_m 时,冲击波转变为声波。

在井下煤与瓦斯突出过程中,瞬间涌出的大量煤和瓦斯必然会压缩巷道气体,导致冲击波的产生,但是不同能量的突出流体在巷道流场中产生的冲击波能量大小不同。突出规模较小时,流体扰动产生的冲

击波能量较小,只是造成井下一定范围内瓦斯超限或小范围内的瓦斯逆流,但不会对井下采掘设备和通风设置造成破坏;但是当大型或者特大型煤与瓦斯突出发生时,产生的强冲击波或承压气流会导致设备损毁、支架折断、风门破坏、大范围瓦斯逆流等,对矿井安全和生产造成重大损失^[7-9]。图2为突出事故发生后,井下钻机被破坏的情况。



图2 井下被严重毁坏的钻机

Fig. 2 Heavily destroyed driller

2 突出冲击波的主要特征及危害

煤与瓦斯突出冲击波与煤矿井下其他空气冲击波(如瓦斯爆炸、煤尘爆炸、大面积顶板冒落等引起的冲击波)一样,具有若干描述其主要特征的基本参数^[10],如波阵面超压 Δp 、压缩相作用时间 τ 、波阵面速度 U 、波阵面温度 T 和有效作用时间 τ_e 等,但这些参数的大小、变化规律等又有明显的不同,主要表现在:

(1) 突出冲击波的波阵面超压值与孔洞形态、瓦斯压力、煤体性质、突出的煤量和瓦斯量等多个参数密切相关,其变化(或衰减)曲线取决于突出形式、过程和巷道环境。在有记录的突出实例中,很多都有多次巨响的数据纪录,这是突出过程中存在多次流体冲击的结果。此时突出冲击波超压的时间历程曲线也会存在多个波浪形的变化区间,且由于整个突出过程中系统环境的不断变化,其超压峰值不一定出现在首个升压区间。

(2) 煤与瓦斯突出过程伴随着大量的粉煤运移和堆积,使得突出冲击波形成和传播的各个阶段都处于含有高浓度煤尘(或颗粒)的巷道环境中。粉煤的颗粒体积浓度显著高于其他井下冲击波。粉煤颗粒浓度对突出冲击波的传播特性有重要影响^[11]。由于颗粒与冲击波相互作用的过程会吸收大量的能量,从而加快了冲击波的衰减速度,降低了冲击波超压的破坏作用。同时,粉煤的存在增加了波后高速运动气流的质量,使其在同样的运动速度下动压破坏力增大。

(3) 煤与瓦斯突出过程所经历的时间从几秒到

几十秒不等,整个过程都伴随着冲击波的形成和衰减,与典型的井下瓦斯或煤尘爆炸过程相比持续时间更长。

突出冲击波在传播过程中的破坏效应有直接和间接两类,其危害程度与冲击波超压、单位冲量、作用时间和构筑物固有周期等因素有关^[12]。直接效应主要是由超压的挤压和动压的撞击所致,例如空气冲击波超压 Δp 为 0.02 ~ 0.06 MPa 时,人体受挤压和抛掷,造成耳膜、内脏重度损伤,可能发生死亡;井下密闭、木制风门、木支架等被严重破坏,混凝土整体支护发生片状脱落。当空气冲击波超压 Δp 为 0.06 ~ 0.30 MPa 时,大部分人会死亡,金属支架部分破坏,小于 1 t 的设备整体毁坏和变形,大于 1 t 的设备发生位移和部分变形。间接效应是由受冲击波破坏的物体打击而间接造成的。突出发生时,工作面附近人员可能会受到高速运动的煤岩块或其他物体的重击而发生重伤或死亡。

当井下发生严重的煤与瓦斯突出事故时,附近工作人员会面临冲击波挤压、气流冲击、煤岩块体打击及瓦斯气体窒息等多种伤害,其生存几率极小。到目前为止,井下发生较严重的煤与瓦斯突出事故后,还未有工作面人员生还的纪录。正是由于煤与瓦斯突出冲击波的危害如此严重,为了预防和控制其危害,完善矿井安全生产体系,迫切需要对井下突出冲击波的形成机理进行研究。

3 突出过程中两相流的运动状态

不同强度的煤与瓦斯突出过程,两相流的运动状态是不同的。在常规的口小腔大的孔洞中,煤-瓦斯两相流的速度在孔洞口达到声速时的状态被称为临界状态。以临界状态为分界点,突出两相流的运动状态大体可分为两种情况(不考虑突出孔洞内部负压情况):① 出口处流体的静压 p_c 等于巷道气体静压 p_m ,且流体速度小于等于声速 c_2 (声速 c_2 指煤-瓦斯两相流中的声速,其数值远小于气体中的声速 c_1 ,下同);② 出口处流体静压 p_c 大于巷道气体静压 p_m ,且流体速度等于声速 c_2 。此时,出口处流体处于未完全膨胀状态,该情况下煤-瓦斯两相流在巷道空间会继续膨胀。

由于处于不同运动状态的两相流在巷道空间中的运动过程是不同的,因此其压缩巷道空气并产生冲击波的机理也是不同的。

4 煤与瓦斯突出冲击波的形成机理

煤与瓦斯突出的力学作用机理极其复杂,其孕

育、发生、发展、终止的整个过程与矿山压力、煤的物理力学性质、瓦斯压力、瓦斯含量、矿井采掘条件、矿山地质等多个因素相关^[13-14],且各个因素间互相影响并不断变化,即使在矿井同一地点不同时间发生的突出,其特征也不尽相同,因此目前还无法采用具体的数学方程对整个过程参数的变化进行描述。为了对突出过程中产生的冲击波进行研究,本文从宏观角度出发,针对突出过程中的特征阶段,通过气体动力学理论对冲击的波形成机理进行系统分析。

4.1 两相流未超过临界状态(第1种情况)

当煤-瓦斯两相流未超过临界状态时,从突出孔洞出口处的瓦斯气流处于完全膨胀状态,其最大喷出速度为当前流体介质条件下的声速 c_2 。根据空气冲击波的基础理论,两相流在冲击和压缩巷道空气时,会立即出现一个离开两相流体前端界面的冲击波阵面,波阵面速度为 U ,其大小与波后流体速度 V_b 、波前流体声速 c_1 和密度 ρ_m 、波阵面绝对压力 p_b ,波后流体密度 ρ_b 等参数有关(忽略巷道内通风气流的速度)^[2,15]。

$$\begin{cases} U = \sqrt{\frac{p_m (p_b/p_m) - 1}{\rho_m (1 - \rho_m/\rho_b)}} \\ V_b = \sqrt{\frac{(p_b - p_m)(\rho_b - \rho_m)}{\rho_m \rho_b}} \end{cases} \quad (2)$$

联合式(1),(2)可得

$$V_b = \frac{\Delta p}{\rho_m c_1 \sqrt{1 + \frac{k+1}{2k} \frac{\Delta p}{p_m}}} \quad (3)$$

当 $c_1 = 340$ m/s, $k = 1.4$, $p_m = 0.1$ MPa, $\rho_m = 1.29$ kg/m³ 时,由式(3)可得波后流体速度 V_b 与波阵面最大超压 Δp 之间的关系曲线,如图3所示。

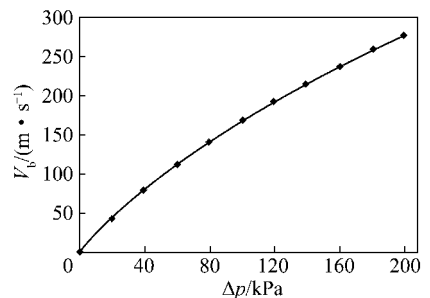


图3 V_b 与 Δp 的关系曲线

Fig. 3 Relation curve between V_b and Δp

由图3可以看出,波阵面最大超压 Δp 随波后流体速度的增大而增大。由于固气两相流中的声速值 c_2 只有几十米每秒,因此,煤-瓦斯两相流未超过临界状态时,其冲击波的形成与图1类似,波阵面超压

Δp 也较低。例如当 $V_b = 50 \text{ m/s}$ 时,最大波阵面超压 Δp 为 0.024 MPa 。

4.2 两相流超过临界状态(第2种情况)

当煤-瓦斯两相流在突出孔洞出口处超过临界状态时,两相流出口静压 p_c 大于巷道气体静压 p_m 。根据气体动力学理论,该情况下煤-瓦斯两相流喷出孔洞时,孔口发出负压扰动,由于流体通过该扰动波区时压力降低并发生膨胀,因此该扰动波区被称为膨胀波区(图4虚线,设巷道空间足够大)。经过膨胀波区时,流体向外折转 δ 角。折转角 δ 的大小,由波前流体参数和外界压强 p_m 的大小所决定^[1,3]。

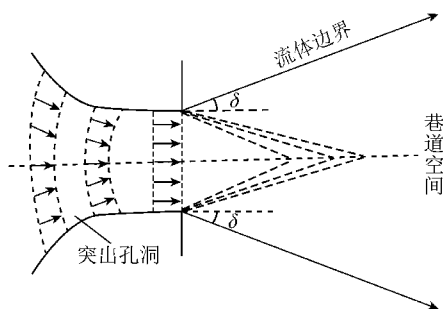


图4 流体膨胀原理示意

Fig. 4 Diagram of flow expansion principle

单相气体射流情况下流体结构研究已很完善。当出口压力 p_c 较小($1 < p_c/p_m < 2$)时,气流处于低度未完全膨胀状态。随着 p_c/p_m 的增大,气流变为高度未完全膨胀状态,反射压缩波将在未达到边界之前就汇集起来,出现马赫盘的流动结构。当 p_c/p_m 进一步增大到一定数值时,气流进入另一种膨胀状态,称为超高度未完全膨胀状态,该状态下的气流喷出后立即会极速膨胀开来^[16-19]。

由于突出两相流的固气比较大,且粉煤粒度非常不均匀,因此即使是处于高度未完全膨胀状态,煤-瓦斯两相流也不会出现单相气流那样规则的马赫盘结构,其未完全膨胀程度的划分及膨胀过程中的流体结构肯定更加复杂,目前仍未见相关文献资料发表,因此无法以膨胀流体结构为出发点来研究冲击波的形成过程。但从突出两相流运动规律的角度分析,若将突出过程中喷出的流体看作一个整体,避开膨胀过程中的流体结构问题,则流体结构对冲击波形成的影响只是表现在流体速度的变化规律方面,因此超过临界状态的突出冲击波的形成又有以下2种情况(两相流膨胀过程中流体局部结构会有负压存在,本文不详细分析):

(1) 喷出孔洞的未完全膨胀流体立即膨胀加速,直到出口流体静压 p_c 与巷道空间的气体静压 p_m 相等。此时流体核心结构在完全膨胀之前,始终处于单

调地加速过程,达到最高速度 V_{bmax} 后减速并停止。

该情况下,孔洞中喷出的气固两相流体处于低度未完全膨胀状态时,其在巷道空间完全膨胀后的最高速度 V_{bmax} 仍会较低,产生的冲击波超压值较小。但当出口流体处于高度或超高度未完全膨胀状态且巷道空间足够大时,由于出口处流体静压 p_c 与巷道气体静压 p_m 之间的压差很大,流体将在巷道空间内进行“爆炸式”加速过程,加速后流体的瞬间速度 V_{bmax} 可能会超过空气中的声速 c_1 ,因此根据图3可知,此时产生的冲击波超压将远远高于低度未完全膨胀状态时产生的冲击波超压。

(2) 喷出孔洞的未完全膨胀流体在巷道空间内膨胀过程为脉冲式的加速、短暂减速,然后再加速过程,如此往复,最终流体静压与巷道空间的气体静压 p_m 相等。

该情况主要出现在高度或超高度未完全膨胀流体在空间受限的等截面巷道中流动的过程中。无论两相流是否会出现马赫盘的流体结构,该情况都是有可能的。根据摩擦堵塞原理,气体在等截面管道中流动时,其极限速度为该介质条件下的声速^[6]。因此,为了便于分析,以静压值为 p_{c1} 的高度或超高度未完全膨胀的煤-瓦斯两相流体微元 ΔV 为研究对象,并假定其位于突出流体与巷道气体分界面上。流体微元 ΔV 在巷道空间膨胀加速时,如果在完全膨胀之前两相流体速度达到声速,则此时静压为 p_{c2} ,速度为声速的流体会出现瞬间的减速过程,即“壅塞现象”。由于“壅塞”过程中流体动压向静压转化,其静压升高为 p_{c3} ,且 $p_{c2} < p_{c3} < p_{c1}$ 。而后,静压为 p_{c3} 的未完全膨胀流体会再次加速到壅塞状态,如此往复,直至流体完全膨胀为止。整个膨胀过程中流体微元 ΔV 的静压值呈振荡衰减变化趋势,如图5所示,其中横坐标 x 表示沿巷道距离。

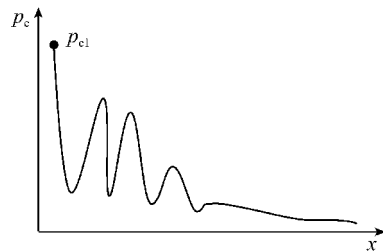


图5 出口静压 p_c 变化趋势

Fig. 5 Change trend of outlet static pressure p_c

从图5可以看出,未完全膨胀流体在巷道空间膨胀的过程中,在一定距离内仍存在较高的气体静压。当该静压值大于巷道内设备或设施的抗冲击强度时,会造成设备或设施的极大破坏。

根据冲击波基础理论^[1,20],流体微元 ΔV 加速过程中会始终伴随着扰动波的形成和叠加,且每次堵塞状态都会使冲击波形成短暂间隔,因此,流体膨胀的整个过程将形成一系列的脉冲式冲击波,而每个脉冲式冲击波又是由无数的微弱扰动波叠加而成的,且其波后最高流体速度为该流体介质条件下的声速。在脉冲波不发生叠加的情况下,巷道中气体压强分布如图6所示,其中坐标原点 O 表示 ΔV 的位置,横坐标 x 表示脉冲波距 ΔV 的距离,纵坐标 p 表示脉冲波压力。

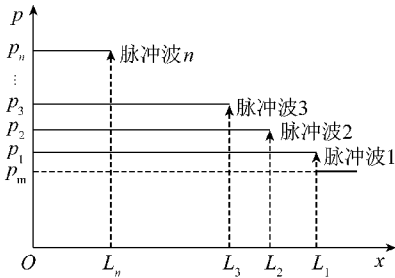


图6 脉冲波不叠加时巷道压强分布

Fig. 6 Pressure distribution in roadway without pulse waves superimposing

以上分析并未考虑流体微元 ΔV 的固气比变化。事实上,井下实际突出过程中,由于固体颗粒的不断沉降和堆积,煤-瓦斯两相流体的固气比应该是不断减小的,因而其在巷道中流动的临界声速会不断增大,使得每个脉冲波的波后最高流体速度 V_{bmax} 也随之增大。

假设流体微元 ΔV 在 $t_n (n=1, 2, 3, \dots, k)$ 时刻达到堵塞状态,且 $t_{n-1} \sim t_n$ 形成的脉冲波的最高超压和波速分别为 Δp_n 和 U_n ,则根据式(1)和图3可知:

$$\begin{cases} \Delta p_n > \Delta p_{n-1} \\ U_n > U_{n-1} \end{cases} \quad (4)$$

因此,只要巷道足够长,总有一个时刻使得后面的脉冲波赶上前面的脉冲波,最终 $t_0 \sim t_k$ 的脉冲波全部叠加在一起,形成一道更强的空气冲击波。

当然,以上理论分析是基于理想的巷道和介质条件之上的,并未考虑能量损失和冲击波的反射。在实际现场条件下,由于巷道断面、支护形式、通风网络等因素的影响,脉冲波可能只是部分叠加或无叠加。即使全部脉冲波都叠加在一起,由于堵塞速度的限制,其叠加后的最终超压也会较小。以 50 m/s 的堵塞速度为例,由图3可知此时脉冲波最大超压为 0.024 MPa。当4个这样的脉冲波叠加在一起时,其最大超压 Δp_{max} 也仅为 0.096 MPa。因此,该情况下形成的冲击波只对突出地点附近的巷道设备和设施

有一定的破坏作用,经过远距离传播衰减后,其波前超压会变得很小。

总之,当突出过程中形成的高度或超高度未完全膨胀流体在空间受限的巷道中膨胀时,最终形成的冲击波的超压值较小,因此冲击波不会对远距离的矿井设备和设施造成大的破坏。但两相流的动压和膨胀过程中的气体静压仍会破坏矿井生产设备或设施,严重威胁矿井安全。

5 结 论

(1) 当孔洞中喷出的煤-瓦斯两相流未超过临界状态或处于低度未完全膨胀状态时,流体在巷道空间完全膨胀后的速度较低,产生的冲击波超压值较小。

(2) 当出口处流体处于高度或超高度未完全膨胀状态且巷道空间足够大时,流体将在巷道空间内进行“爆炸式”加速过程并可能产生强冲击波。

(3) 当高度或超高度未完全膨胀流体在空间受限的巷道中膨胀时,最终形成的冲击波的超压值较小,但两相流的动压和膨胀过程中的气体静压可能会严重破坏矿井生产设备或设施。

参考文献:

- [1] 张 瑜. 膨胀波与激波[M]. 北京:北京大学出版社,1983.
Zhang Yu. Expansive wave and shock wave [M]. Beijing: Beijing University Press, 1983.
- [2] Gilbert Ford Kinney. Explosive shocks in air [M]. New York: The Macmillan Company, 1962.
- [3] 王光祖,张运生. 冲击波和爆轰波的共异性[J]. 超硬材料工程, 2005, 17(2): 14-17.
Wang Guangzu, Zhang Yunsheng. Similarity and difference of shock wave and detonation wave [J]. Superhard Material Engineering, 2005, 17(2): 14-17.
- [4] 耿继辉,汤明钧. 含尘气体中的非定常激波[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(4): 319-331.
Geng Jihui, Tang Mingjun. Unsteady shock waves in dusty gases [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(4): 319-331.
- [5] 王新建. 爆破空气冲击波及其预防[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2003(4): 41-43.
Wang Xinjian. Explosion air shock wave and prevention [J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Science and Technology), 2003(4): 41-43.
- [6] 王保国,刘淑艳,黄伟光. 气体动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
Wang Baoguo, Liu Shuyan, Huang Weiguang. Air dynamics [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2005.
- [7] 钱学森. 气体动力学诸方程[M]. 北京:科学出版社,1966.
Qian Xuesen. Fundamentals of air dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1966.

- [8] 赵承庆,姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.
Zhao Chengqing, Jiang Yi. Gas jet dynamics[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1998.
- [9] 武晓松,陈军,王栋. 固体火箭发动机气体动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
Wu Xiaosong, Chen Jun, Wang Dong. Aerodynamics of solid propulor[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.
- [10] 陈文明. 喷流模拟方法研究[J]. 空气动力学学报, 1995, 13(3):361-364.
Chen Wenming. Study on jet simulation method[J]. Journal of Aerodynamics, 1995, 13(3):361-364.
- [11] 徐强,李军. 燃气射流起始冲击波形成机理的实验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(3):16-18.
Xu Qiang, Li Jun. Experimental study on mechanism of initial shock wave in jet flow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(3):16-18.
- [12] 王新月,胡春波,张堃元,等. 气体动力学基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2006.
Wang Xinyue, Hu Chunbo, Zhang Kunyuan, et al. Foundation of gas dynamics[M]. Xi'an: Northwestern Industry University Press, 2006.
- [13] 程五一,陈国新. 煤与瓦斯突出冲击波的形成及模型建立[J]. 煤矿安全, 2000(9):23-25.
Cheng Wuyi, Chen Guoxin. The forming of shock wave in process of the coal and gas outburst[J]. Mine Safety, 2000(9):23-25.
- [14] 程五一,刘晓宇,王魁军,等. 煤与瓦斯突出冲击波阵面传播规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1):57-60.
Cheng Wuyi, Liu Xiaoyu, Wang Kuijun. Study on regulation about shock-wave-front propagating for coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1):57-60.
- [15] 袁钢,周光泉,唐志平,等. 高压短脉冲激波的传播及衰减[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(4):307-312.
Yuan Gang, Zhou Guangquan, Tang Zhiping, et al. Propagation and decay of short duration pulsed shock waves with high pressure[J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(4):307-312.
- [16] 胡千庭. 煤与瓦斯突出的力学作用机理及应用研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2007.
Hu Qianting. Study on the mechanical mechanism of coal and gas outburst and its application[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2007.
- [17] 胡千庭,周世宁,周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12):1368-1372.
Hu Qianting, Zhou Shining, Zhou Xinquan. The mechanical mechanism of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12):1368-1372.
- [18] 程卫民,王刚,张睿,等. 煤与瓦斯突出形成冲击波的灾变损害[J]. 科技导报, 2008, 26(24):61-65.
Cheng Weimin, Wang Gang, Zhang Rui, et al. The disaster effects of shock wave in the process of coal and gas outburst[J]. Science Technology Review, 2008, 26(24):61-65.
- [19] 张建方,王凯,韦彩平. 煤与瓦斯突出冲击波的形成与传播规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1):67-71.
Zhang Jianfang, Wang Kai, Wei Caiping. Formation and propagation of shock waves during coal and gas outbursts[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1):67-71.
- [20] 张强,孙玉荣,王晓勇,等. 煤与瓦斯突出冲击波传播规律的研究[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(5):21-23.
Zhang Qiang, Sun Yurong, Wang Xiaoyong, et al. The propagation law of shock wave in the process of coal and gas outburst[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(5):21-23.