

采空区顶板大面积冒落诱发冲击气浪模拟

郑怀昌^{1,2)} 宋存义¹⁾ 胡 龙²⁾ 肖 刚²⁾ 李 明²⁾ 张晓君²⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255049

摘 要 基于采空区冒落过程中冒落岩体与空气相互作用中能量的守恒与转化,建立了冲击气浪风速模型,设计制作了模拟实验测试装置。实验表明,随着下落高度增加,冲击气浪风速增加幅度略有减缓,采用大断面空间小尺寸的“打气筒”模型计算能够更好地反映冒落过程中的气体流动过程,但应该以“打气筒”和“绕流”的复合模型表征冲击起浪。在实验基础上建立的实验模型与理论模型有很好的相似性。

关键词 地下采矿; 冒落; 危害; 预测; 冲击气浪; 风速

分类号 TD 324

Simulation of air shock waves induced by large-scale roof caving in huge mined-out area

ZHENG Huai-chang^{1,2)}, SONG Cun-yi¹⁾, HU Long²⁾, XIAO Gang²⁾, LI Ming²⁾, ZHANG Xiao-jun²⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering University of Science and Technology Beijing Beijing 100083, China

2) School of Resources and Environmental Engineering Shandong University of Technology Zibo 255049, China

ABSTRACT Based on energy conservation and transformation caused by the interaction of caving rock and air in the course of roof caving in large-size mined-out area a wind speed model of impact waves was constructed and an experimental device was designed. Experimental results show that with the increasing of rock falling height the amplitude of wind speed of impact waves slowly increases. The small-size inflator model in a large cross-section space could better describe air flow during roof caving but air shock waves should be expressed by the inflator and external flow compound model. The established experimental and theoretical models have a great similarity.

KEY WORDS underground mining; caving; hazard; prediction; air shock waves; wind speed

随着矿床开采的持续进行,采空区面积累积越来越大,许多矿山采空区面积已达数万 m^2 。近年来,矿山大面积采空区顶板垮落事件时有发生。1993年枣庄某石膏矿 $5\,000$ 多 m^2 的采空区顶板突然垮落,产生的冲击气浪使井下十余人当场丧生;2006年8月19日湖南石门县孟全镇天德石膏矿发生 1.8 万 m^2 的采空区冒落,9名矿工被采空区顶板冒落形成的空气冲击波(冲击气浪)致死,据调查部门测算,当时的空气冲击波最大速度为 $274\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1 冲击气浪形成分析模型

冲击气浪灾害是指采空区冒落过程中诱发的高速气流,作用在人员、设备和设施上等,造成人员伤

亡、设备和设施破坏。冲击气浪灾害是非煤地下矿山最早被认知的采空区危害之一,然而定量研究冲击气浪最大风速在近几年才开始。目前主要采用“打气筒”或“绕流”两种模型研究,分别从能量守恒和无限空间内物体下落冲击角度建立了气流风速模型^[1];两种计算模型随着采空区面积和冒落高度的变化差异增大,“打气筒”模型反映了采空区冒落的极值状态。对于井下空气冲击波,主要研究井下爆破所产生的空气冲击波极其防护技术^[2-3],而对于因采空区顶板大面积冒落所产生的空气冲击波则研究不多^[4]。由于采空区围岩的差异及所处环境的多样性,顶板大面积冒落多难以准确预测,其造成的破坏往往很大。相关研究计算采用 Lagrange一维人

收稿日期: 2009-06-27

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(No. Y2006E06); 山东省科技攻关资助项目(No. 2008GG10006016)

作者简介: 郑怀昌(1964—),男,教授,博士研究生, E-mail: hchzheng@126.com; 宋存义(1954—),男,教授,博士生导师

工黏性差分格式,研究冒落体在空区的运动方程及其对空区内空气的压缩作用,在考虑初始边界条件和运动条件的基础上,分析冒落体下落过程中在空区内气体的最大压力和流速^[5].文献[6]以“整体切冒型”垮落为背景、基于能量守恒研究采空区飓风灾害,建立了飓风风速预测模型.文献[7]提出了一维 Lagrange 黏性差分格式,建立了一个有效的计算模型,对空腔的底部压力、风速进行了计算分析,为削波试验提供了理论上的指导.文献[8]运用气体动力学理论,对采空区大面积顶板瞬时一次冒落进行分析计算,求出了冲击气浪涌入巷道瞬间的速度、冲击气浪沿程损失和冲击所产生的附加压强.文献[9]采用采场顶板动力冲击机理理论和数值模拟的方法,研究了暴风形成的机理.

从采空区结构、围岩结构和岩体的破坏特征分析,采空区顶板整体一次性冒落的可能性很小,因此利用“打气筒”模型计算的冲击气浪风速过大^[10],甚至出现了几 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的计算风速,夸大了采空区冲击气浪的危害程度.“绕流”模型计算的风速虽然主要取决于冒落体的几何尺寸和采空区高度,但忽略了采空区顶板冒落是发生在有限、半密闭空间(绝大多数采空区冒落不是瞬间冒落到地表的)中这一基本现实,利用无限空间小块体下落计算不可避免造成较大误差,其结果往往造成“冲击气浪最大风速与采空区面积无关”这样的错误结果.

整个采空区冒落可以认为是不同尺寸冒落体相继冒落发生,冒落体几何尺寸与采空区面积相比仅仅是几倍最多是百倍的关系,空气绕流断面很小,因此采用大断面空间小尺寸的“打气筒”模型计算更加能够反映冒落过程中的气体流动过程,应该用“打气筒”和“绕流”两种模型的复合模型表征冲击气浪.

2 冲击气浪风速预测

准确地预测采空区顶板大面积冒落所形成的冲击气浪的风速是很困难的,因为在采空区顶板冒落过程中存在许多的随机因素.如初次冒落的顶板面积及冒落持续时间难以准确确定;初次冒落与后续冒落间的时间间隔;后续冒落中,同时冒落顶板面积及冒落持续时间等.

采空区顶板冒落(实际是非整体下落),使采空区内空气受到压缩,导致采空区内气体压力升高,密度上升,由于压力不平衡,气体必然由巷道涌出.然而,采空区面积与巷道断面相差悬殊,巷道中空气喷出过程必然滞后于空区内空气受压缩过程;其结

果必然是空区内空气压力越来越高,从而使巷道中空气喷出速度越来越大;当采空区垮落到地表或下部受压缩空气扩散到冒落岩石之上时,采空区内空气压力大幅度下降,巷道中空气喷出速度随之下降.

因此,可将顶板冒落形成高压风流的风速预测简化模型分成两个相对独立的过程进行分析,即采空区内空气压缩过程和高压气体从巷道(喷口)喷出过程.

冲击气浪的大小与有无气体补给源有关.当没有外部气体补给时(采空区未垮落至地表),冒落体之下的被压缩气体,一部分受负压作用绕回冒落体上面的新空区,另一部分形成气浪扑出后,又被负压逐步吸回空区,只留下由气浪激起的粉尘向前方进一步飘散.当有外部气体补给时(采空区与地表部分连通),被冒落体压缩的气体,有如“打气筒”里的压缩气体,沿联通口冲出,直至在出口排除多余的体积量为止.

基于上述分析,可以将采空区顶板冒落造成冲击气浪过程简化为两种数学模型:一种是“打气筒”模型.采空区的边壁相当于“气筒”,而垮落的岩石相当于“活塞”,岩石冒落相当于“活塞”向下运动,使下部的气体由通道急剧排出,形成冲击气浪.另一种是“绕流”模型.岩块向下运动过程中,一部分气体绕岩块流动,到了岩块的上方;一部分气体流向空区四壁,形成环流;还有一部分气体,连同岩块落地时刻的冲击气流一道,形成冲击气浪.

2.1 “打气筒”模型

顶板大面积冒落时,容器内的气体承受着比巷道内气体高的压力,采空区的面积为 A_0 ,空气的流速 v_1 ,巷道内空气的压力为 P ,巷道的横断面积为 A_1 ,空气的流速为 v_2 .

假定空气为理想流体,其密度为 ρ_0 .

根据连续性方程 $A_0 v_1 = A_1 v_2$,得:

$$v_2 = \frac{A_0 v_1}{A_1}.$$

根据流体运动的阻力公式,其对物体的作用力为:

$$F = \frac{1}{2} K_D v_1^2 A_0 \rho_0.$$

式中, K_D 为阻力系数,对于平板 $K_D = 2$; A_0 为物体的横断面积; ρ_0 为空气密度.

设 H 为总冒落高度, h_i 为第 i 次下落的高度, a_i 为第 i 次冒落岩体的重力加速度, v_{i1} 、 v_{i2} 分别为第 i 次岩体冒落时采空区内的风速和巷道内的风速, g 为重力加速度.当 $h_0 = \Delta h$ 时,

$$a_0 = g$$

$$\begin{aligned}v_{i0} &= \sqrt{2gh_0}, \\v_{i0} &= \frac{A_i}{A_0} v_{i0} = \frac{A_i}{A_0} \sqrt{2gh_0}.\end{aligned}$$

当 $h_i=2\Delta h$ 时,

$$a_i=\frac{G-F}{m}=g-\frac{K_D\rho_D^2v_{i0}^2A_0}{2m}\tag{1}$$

$$v_{i1}=\sqrt{2a_ih_i}=\sqrt{2gh_i-\frac{K_D\rho_D^2v_{i0}^2A_0h_i}{m}}\tag{2}$$

$$\begin{aligned}v_{i1}&=\frac{A_i}{A_0}v_{i1}=\frac{A_i}{A_0}\sqrt{2gh_i-\frac{K_D\rho_D^2v_{i0}^2A_0h_i}{m}}\\&\dots\dots\end{aligned}\tag{3}$$

当 $h_i=\Delta h$ 时,

$$a_i=\frac{G-F}{m}=g-\frac{K_D\rho_D^2v_{i-1}^2A_0}{2m}\tag{4}$$

$$v_{ii}=\sqrt{2a_ih_i}=\sqrt{2gh_i-\frac{K_D\rho_D^2v_{i-1}^2A_0h_i}{m}}\tag{5}$$

$$v_{ii}=\frac{A_i}{A_0}v_{ii}=\frac{A_i}{A_0}\sqrt{2gh_i-\frac{K_D\rho_D^2v_{i-1}^2A_0h_i}{m}}\tag{6}$$

从式中可见,随着冒落高度的增大,以及风流中冒落体断面积的增大,作用在物体上的力也增大,风速也随之增大.

2.2 基于能量守恒的冲击气浪风速预测模型

冒落过程中岩块与空气的能量交换,空气在流动中需要克服空气阻力、通道摩擦阻力及通道中的局部阻力,即岩块对采空区的部分空气做功,转换为空气冲击系统孔口的动能和孔口处局部阻力的损失. 假定孔口厚度极小,可忽略沿程损失. 以孔口为外边界的采空区系统,冲击气流风速模型如下.

顶板跨落时,空气对岩块的阻力所做的功即为岩块压缩空气所做的功.

岩块对空气压力为:

$$F=\frac{1}{2}K_Dv^2A_0\rho\tag{7}$$

岩块所做的功 W 为:

$$W=\int_0^h\frac{1}{2}K_D\rho A_0v^2hdh=\frac{1}{2}K_D A_0gh^2\rho\tag{8}$$

式中, K_D 为岩块冒落时空气的阻力系数, A_0 为一块冒落体的横截面积, h 为冒落高度, ρ 为采空区的空气密度.

石块下落速度 v 是时间 t 的一次函数设为 $v=kt$ 其中 $k\approx g$ 为系数.

孔口处空气动能为:

$$E=\frac{1}{2}mv^2=\int_0^{t_{\max}}\int_0^{v_{\max}}\frac{1}{2}\rho A_i v dt v^2 dv=$$

$$\int_0^{v_{\max}}\frac{\rho A_i khv^2}{2g}dv=\frac{\rho A_i khv_{\max}^3}{6g}\tag{9}$$

式中, A_i 为出风孔口处面积.

考虑局部能量损失,孔口处局部阻力损失的能量为:

$$W_p=\int_0^t\sum\xi\frac{v^2}{2}\rho A_i v dt=\frac{v^3}{2}\sum\xi\rho A_i t\tag{10}$$

式中, $\sum\xi$ 为系统的局部阻力系数之和.

不同尺寸冒落体相继冒落时,根据能量守恒定律 $W=E+W_p+E_c$, 即:

$$\begin{aligned}\sum\frac{1}{2}K_D A_i gh^2\rho &= \frac{1}{2}K_D gh^2\rho\sum A_{oi}= \\&\frac{\rho A_i khv_{\max}^3}{6g}+\frac{v_{\max}^3}{2}\sum\xi\rho A_i t+E_c\end{aligned}\tag{11}$$

式中, A_{oi} 为不同尺寸冒落体的横截面积; E_c 为绕流空气能量,当岩块下落时间极短时可予以忽略.

解得:

$$v_{\max}=s^{\frac{1}{3}}\left[\frac{3k_Dg^2h^2}{kh+3\sum\xi\sqrt{2gh}}\right]^{\frac{1}{3}}+\varphi(h,s)\tag{12}$$

式中, $\varphi(h,s)$ 为 E_c 不能忽略时,对 $v_{\max}$ 值的影响; s 为冒落体总面积与出风口面积的比值,即 $s=\frac{\sum A_{oi}}{A_i}$.

3 实验模拟

基于上述分析,设计、制作冲击气浪风速测试实验装置. 考虑到大规模采空区顶板多数不是整体一次性冒落,结合房柱式采矿业采空区顶板冒落形式,将实验模型顶板设计为多块镶嵌式结构(图 1). 为保证动力相似,在每块顶板上镶嵌质量为 23 kg 的铁板,使顶板的折合密度为 $2.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. 本实验采用五块 $1\text{ m}\times0.2\text{ m}$ 的板状顶板,顶板通过吊绳与壁板凹槽结合施加约束,保持暂态平衡.

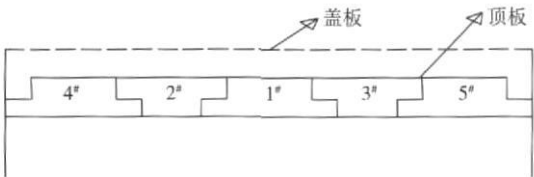


图 1 实验顶板结构示意图
Fig 1 Sketch map of roof structure for experiment

模型设计为最大空区面积 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ (图 2). 为探索面积因素与风速关系,分别设计为 $1\text{ m}\times0.2\text{ m}$ 、 $1\text{ m}\times0.4\text{ m}$ 、 $1\text{ m}\times0.6\text{ m}$ 、 $1\text{ m}\times0.8\text{ m}$ 和 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 五

种规格(通过在地板上间隔 20 cm 设一凹槽,根据要求面积不同,壁板安装在不同的凹槽内),高度方向分别设 0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 m 五种高度测试方案(通过在壁板上每间隔 10 cm 设凹槽,根据高度要求,将顶板安置在相应高度凹槽内,通过吊绳与壁板凹槽结合施加约束)。每种测试方案只需要将壁板和顶板调整到相应位置,相关壁板位置调试好后,进行密封,尽可能降低漏风,调整好顶板的平整度,用钢丝绳固定。当测试条件准备好后,剪断吊绳,则 1[#]板首先掉落,2[#]、3[#]板失去约束相继掉落,然后是 4[#]、5[#]板掉落。风速测试采用数字式风表量取最大值。

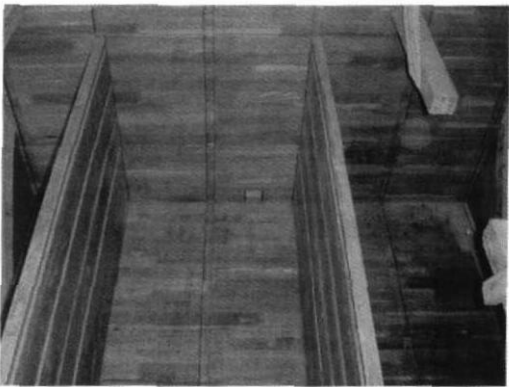


图 2 风速测定实验装置

Fig 2 Experimental device for testing the wind speed

4 实验分析

4.1 类“打气筒”模型分析(不盖板)

对表 1 中不盖板部分实验数据利用 MATLAB 作二次插值后图像如图 3 所示。

表 1 冲击气浪风速测定实验数据

		m•s ⁻¹							
高度 / m	面积比	125		250		375		500	
		盖板	不盖板	盖板	不盖板	盖板	不盖板	盖板	不盖板
0.2	6.1	8.5	4.2	6.4	6.7	7.9	8.4	8.5	
	6.4	7.8	4.5	6.8	6.3	7.7	8.2	8.3	
	5.8	8.6	5.4	7.2	6.6	8.1	8.4	8.6	
0.3	8.3	9.3	5.8	7.7	7.2	8.4	8.7	10.4	
	7.9	9.4	5.9	7.9	7.1	8.5	8.3	10.2	
	7.5	8.7	5.6	8.0	7.6	8.3	8.6	9.7	
0.4	8.6	11.0	6.5	8.6	8.1	9.2	9.5	9.6	
	8.1	11.3	7.7	8.7	8.4	9.4	8.7	10.2	
	8.3	11.8	7.7	8.7	7.9	9.1	9.3	11.3	
0.5	9.8	13.3	8.8	9.4	9.0	10.3	9.7	11.9	
	8.2	12.5	8.2	10.1	9.3	11.1	10.2	11.7	
	9.3	12.6	8.2	9.6	8.9	10.7	9.8	11.1	
0.6	6.2	8.1	8.3	9.9	9.9	11.3	11.3	12.1	
	6.3	8.3	8.5	10.2	10.1	11.6	11.4	12.7	
	6.9	9.7	8.4	10.1	9.7	10.9	11.1	12.3	

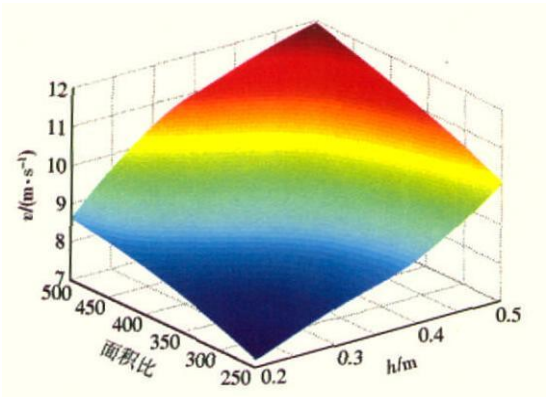


图 3 不盖板数据二次插值后的图像

Fig 3 Image of uncovered board data after inserting quadratic values

根据理论公式(12)中风速与高度、面积比呈幂函数的关系,构造幂函数:

$$v=ah^b s^c$$

取对数得线性函数:

$$lgv=lg a + b lgh + c lgs$$

对表 1 中不盖板部分实验数据利用二元线性回归求得参数估计:

$$lg a = 0.3536 \Rightarrow a = 2.2574,$$

$$b = 0.3447, c = 0.3058$$

所以幂函数为:

$$v = 2.2574 h^{0.3447} s^{0.3058} \tag{13}$$

4.2 类“绕流”模型分析(盖板)

对表 1 中盖板部分实验数据利用 MATLAB 作二次插值后图像如图 4 所示。

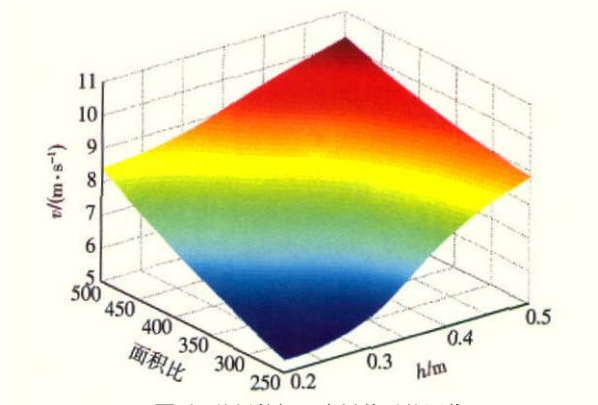


图 4 盖板数据二次插值后的图像

Fig 4 Image of covered board data after inserting quadratic values

构造幂函数:

$$v=ah^b s^c$$

取对数得线性函数:

$$lgv=lg a + b lgh + c lgs$$

对表 1 中盖板部分实验数据利用二元线性回归求得参数估计:

$$lg a = -0.0086 \Rightarrow a = 0.9804,$$

$b=0.3731, c=0.4249.$

所以幂函数为：

$$v=0.9804h^{0.3731}s^{0.4249} \tag{14}$$

4.3 风速预测模型修正

根据理论公式 (12), 在忽略 $\varphi(h, s)$ 项后计算理论风速并作图如图 5 所示.

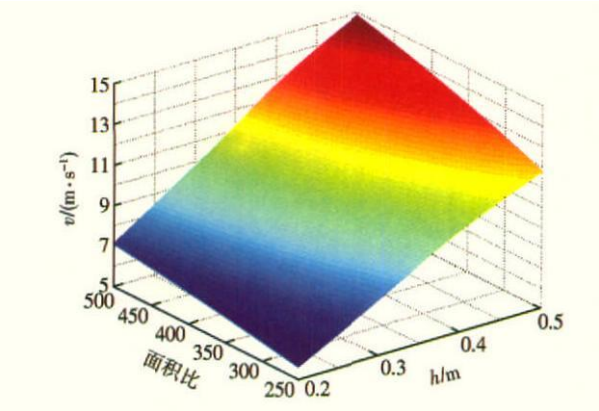


图 5 理论公式计算风速图像

Fig 5 Image of wind speed calculated with theoretical formula

根据理论推导公式 (12), 在忽略 $\varphi(h, s)$ 项后计算理论风速与盖板风速差值如表 2 所示.

表 2 理论风速与盖板风速差值表

Table 2 Difference table of wind speed between theoretical and cover board

面积比	h/m				
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
250	5.134	6.639	6.459	6.741	8.256
375	5.358	6.753	7.808	8.490	9.081
500	4.872	7.098	8.339	9.380	9.711

对表 2 回归, 构造幂函数:

$$\varphi(h, s)=a h^b s^c.$$

取对数得线性函数:

$$\lg \varphi(h, s)=\lg a+b \lg h+c \lg s$$

对表 2 数据利用二元线性回归求得参数估计:

$$\lg a=0.8839 \Rightarrow a=7.6542,$$

$$b=0.3007, c=0.0397.$$

得幂函数:

$$\varphi(h, s)=7.6542 h^{0.3007} s^{0.0397} \tag{15}$$

把式 (15) 代入式 (12), 得风速预测修正模型:

$$v_{\max }=\frac{1}{s^{\frac{1}{3}}}\left(\frac{3 k_0 g^2 h^2}{k h+3 \sum \xi \sqrt{2 g h}}\right)^{\frac{1}{3}}+7.6542 h^{0.3007} s^{0.0397} \tag{16}$$

由以上对“绕流”模型和“打气筒”模型的分析与实验所得结果均表明: 随着冒落高度和冒落面积的增加, “绕流”模型和“打气筒”模型的冲击气浪均

明显增加. 通过 MATLAB 对实验数据进行二元线性回归分析验证, 本实验分析结合了“绕流”模型与“打气筒”模型的特点, 对采空区冒落做出较合理的分析.

5 结束语

(1) 以孔口为边界的采空区系统, 考虑空气阻力所做的功及孔口处局部能量损失, 结合实际情况: 整个采空区冒落可以认为是不同尺寸冒落体相继冒落发生, 冒落面积远远小于采空区面积, 采空区内并非所有的气流都对冒落体做功.

(2) 部分气体绕过冒落体, 回到冒落体上面的新空区, 随着冒落高度加大, 冒落时间延长, 绕流到上部的空气增多, 能量损失加大, 因此随着高度的增加冲击气浪风速增加幅度略有减缓.

(3) 此模型克服了“打气筒”模型中计算的冲击气浪风速过大的不足, 兼顾考虑了顶板下落过程中空气的绕流过程, 应该是“打气筒”和“绕流”的复合模型.

(4) 通过实验分析结果可知, 本模型对“绕流”冒落导致的冲击速度的模拟与计算是合理的.

(5) 上述模型是基于大规模采空区连锁式顶板冒落假设建立的.

参 考 文 献

[1] Chen Q K, Ren F Y, Li Q W, et al Study on the technical measures for controlling the roof-fall in mined area Met Mine 2002 (10): 7
(陈庆凯, 任凤玉, 李清望, 等. 采空区顶板冒落防治技术措施的研究. 金属矿山, 2002(10): 7)

[2] Janovsky B, Selesovskiy P, Horkel J et al Vented confined explosions in Stambek experimental mine and AutoReaGas simulation J Loss Prev Process Ind 2006, 19: 280

[3] Rodriguez R, Torano J, Menendez M. Prediction of the airblast wave effects near a tunnel advanced by drilling and blasting Tunneling Underground Space Technol 2007, 22: 241

[4] Liu Z Y, Ji H G. Prediction of air shock wave disasters caused by roof falling of finished stopes West China Explor Eng 2007 (3): 101
(刘宗燕, 纪洪广. 采空区顶板垮落造成的冲击性灾害预测. 西部探矿工程, 2007(3): 101)

[5] Wu A X, Wang Y M, Hu G B. Air shock wave induced by roof falling in a large scale in ultra-huge mined-area J China Univ Min Technol 2007, 36(4): 473
(吴爱祥, 王贻明, 胡国斌. 采空区顶板大面积冒落的空气冲击波. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 473)

[6] Gu T F. Analysis of hurricane impact disaster in mining faces J Liaoning Tech Univ 2007, 26: 11

assimilation on sinter structure ISIJ Int 2004, 44(8): 1308

[2] Yang L X, Davis L. Assimilation and mineral formation during sintering for blends containing magnetite concentrate and hematite/pisolite sintering fines ISIJ Int 1999, 39(3): 239

[3] Wu S L, Liu Y, Du J X, et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics J Univ Sci Technol Beijing 2002, 24(3): 254
(吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 254)

[4] Wu S L, Liu Y, Du J X, et al. Experimental study of assimilation ability between iron ores and CaO J Univ Sci Technol Beijing 2002, 24(3): 258
(吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿粉与 CaO 同化能力的试验研究. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 258)

[5] Ohtomo T, Takasaki Y, Kawaguchi T. Properties of core ore in quasi-particle required for large amounts usage of limonite ores in iron ore sintering process ISIJ Int 2005, 45(4): 532

[6] Yang L X, W itchard D, Yu Z N. Introduction of pisolitic goethite ore into a Chinese ore blend ISIJ Int 2000, 40(7): 647

[7] Ohtomo T, Taguchi N, Kasai E. Suppression of the formation of large pores in the assimilated parts of sinter produced using pisolitic ores ISIJ Int 1996, 36(11): 1338

[8] Loo C E. A Perspective of goethitic ore sintering fundamentals ISIJ Int 2005, 45(4): 436

[9] Wu S L, Du J X, Ma H B, et al. Fluidity of liquid phase in iron ores during sintering J Univ Sci Technol Beijing 2005, 27(3): 291
(吴胜利, 杜建新, 马洪斌, 等. 铁矿粉烧结液相流动特征. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 291)

[10] Wu S L, Pei Y D, Chen H, et al. Evaluation on liquid phase fluidity of iron ores in sintering J Univ Sci Technol Beijing 2008, 30(10): 1095
(吴胜利, 裴元东, 陈辉, 等. 铁矿粉烧结液相流动性评价. 北京科技大学学报, 2008, 30(10): 1095)

[11] Pei Y D. Ore Proportioning During Sintering and its Application Technology [Dissertation]. Beijing University of Science and Technology Beijing 2008: 50
(裴元东. 铁矿粉的烧结配合性及其应用技术研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2008: 50)

(上接第 281 页)

(顾铁凤. 采场飓风冲击灾害分析. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26: 11)

[7] Zheng Z H, Zha Z X. Theoretical analysis of high pressure shock wave caused by roof falling in underground space Tunnel Constr 2004, 24(1): 15
(郑志辉, 查支祥. 地下空间顶部塌落产生高压气浪的理论分析. 隧道建设, 2004, 24(1): 15)

[8] Li D Y, Zhang K Z, Yu H L, et al. Research on the mine shock air bump and anti-shock bulkhead J Shandong Univ Sci Technol 2008, 27(2): 13
(李大勇, 张开智, 俞海玲, 等. 矿震冲击气浪与防冲密闭研究. 山东科技大学学报, 2008, 27(2): 13)

[9] Yan G C, Xi J B, Song X M, et al. Simulation of lashing blast of compressed air in coal face J Liaoning Tech Univ Nat Sci 2009, 28(2): 177
(严国超, 息金波, 宋选民, 等. 采场冲击气浪的灾害模拟. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(2): 177)

[10] Zheng H C, Li M, Zhang J, et al. The prediction of the hazard caused by weighting over great extent of top layer in mine worked-out section area Ind Miner Process 2005, 34(11): 9
(郑怀昌, 李明, 张军, 等. 采空区顶板大面积冒落危害预测. 化工矿物与加工, 2005, 34(11): 9)