

DOI: 10.11779/CJGE201505018

低频机械振动煤体瓦斯含量变化规律研究

李树刚, 赵 勇*, 许满贵

(西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为研究低频机械振动频率对煤体瓦斯含量的影响, 建立孔隙瓦斯压力、吸附膨胀力、机械挤压应力作用下振动动态煤体瓦斯含量方程。利用瓦斯吸附/解吸激振与测试系统进行振动未吸附饱和型煤试件试验检验方程, 结果显示: 振动频率相同, 振动时间增加, 煤体孔隙增多, 煤体内部游离瓦斯增多, 瓦斯含量变大; 振动时间相同, 振动频率越大, 煤体孔隙率越大, 煤体瓦斯含量越大, 且 20 Hz 与 10 Hz 含量差值由小变大, 30 Hz 与 20 Hz 含量差值由大变小。表明振动增大了煤体孔隙率, 使煤体瓦斯含量增加, 且振动频率从 10, 20, 30 Hz 逐渐增加, 孔隙率逐渐变大, 煤体瓦斯含量相应变大, 方程计算值能较好反应不同振动频率、振动时间作用下煤体瓦斯含量变化规律。

关键词: 低频机械振动; 振动频率; 振动时间; 孔隙率; 瓦斯含量

中图分类号: TD32 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)05-0918-06

作者简介: 李树刚(1963-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事围岩活动与瓦斯防治技术, 非稳定渗流力学, 矿山安全工程技术等教学与科研工作。E-mail: lisg@xust.edu.cn。

Change law of gas content under low-frequency vibration

LI Shu-gang, ZHAO Yong, XU Man-gui

(School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To study the effect of low-frequency disturbance load on gas volume, a formula for gas content considering coal porosity pressure, absorption strength and decreasing vibration stress is established. Meanwhile, the absorption capacity formula is verified by using vibrating and absorption instruments. The tests indicate that under the constant vibrating frequency, when the vibration time extends, the porosity and free-state gas increase, so gas content increases. Under the constant vibrating time, when the frequency speeds up, the porosity expands and gas content increases. Under frequency of 20 Hz and 10 Hz, D-value of content moves up, while under frequency of 30 Hz and 20 Hz, D-value of content moves down. The vibration expands the porosity inside the samples, thereby the gas content accumulated. When the frequency moves up to 10, 20 and 30 Hz, the porosity expands and the gas content is accelerates accordingly. The proposed formula significantly reveals the change law of gas content under different frequencies and time ranges.

Key words: low frequency vibration; vibrating frequency; vibrating time; porosity; gas content

0 引言

掘进过程中, 煤体在连续的低频机械振动作用下受到的有效应力不断变化, 从而产生动态应变, 煤体应变又使煤体内部吸附空间不断变化, 同时振动力不断衰减使煤体瓦斯获得能量, 打破煤体原有的吸附状态, 煤体内部压力分布产生变化, 改变部分煤体瓦斯含量, 从而影响煤体瓦斯渗流。因此, 研究掘进机械振动作用下煤体瓦斯含量变化规律, 对分析煤层瓦斯运移和聚集规律具有重要意义。

姜永东等^[1]研究了超声波作用下煤体甲烷解吸, 发现超声波的机械振动减弱煤体甲烷附着力, 同时被煤体吸收的声能转化为热能, 减弱煤体甲烷吸附, 促进甲烷解吸与扩散。葛兆龙等^[2]研究了空化水射流液-

气相变规律及声震效应促进瓦斯解吸机理, 发现空化水射流相变及空泡溃灭产生声震效应, 声震效应通过机械振动作用和热效应促进煤层瓦斯解吸。李祥春等^[3]研究了低频振动对瓦斯吸附的作用, 发现振动减少煤对瓦斯的吸附量, 降低煤体吸附能力, 延长吸附平衡时间。李建楼等^[4]研究声波场作用下的瓦斯放散特征, 发现声频振动可以促进煤体瓦斯解吸, 解吸速度随时间变化的过程符合对数规律。齐黎明等^[5]研究外力扰动对煤样瓦斯解吸的影响, 发现外力扰动打破煤体吸

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174157); 国家自然科学基金科学仪器基础研究专款项目(51327007)

收稿日期: 2014-09-16

*通讯作者

附平衡态而使瓦斯解吸。这些研究均表明, 振动可以促进煤体瓦斯解吸, 降低煤体吸附能力。目前研究低频机械振动的频率与煤体瓦斯含量之间的规律还很少, 但诱导含瓦斯煤层突出现象的打钻、掘进作业均为具有一定频率变化范围的低频振动, 为研究低频机械振动频率对煤体瓦斯含量的影响, 本文从孔隙率定义角度出发, 得出了振动作用下煤体瓦斯含量变化方程, 并利用试验对方程进行检验。

1 振动煤体骨架及体积应变表达式

1.1 振动煤体骨架应变

煤体内部被吸附的气体分子吸收掘进振动产生的机械能而解吸, 孔隙压力增大, 煤体被压缩而产生应变, 同时气体分子因内能消耗而被重新吸附, 使煤粒膨胀产生应变; 振动挤压煤体而产生机械挤压应变。因而煤体骨架应变, 是由孔隙受气体压缩产生的应变、吸附膨胀产生的应变及机械挤压产生的应变构成。

机械掘进过程中, 截齿对煤壁产生截割力和挤压力, 截割力主要用于截割煤体, 煤体断裂后, 其传播作用力消失, 煤体内部传播的力为挤压作用力, 挤压作用力驱动下, 煤体受到的振动实测曲线呈类正弦波形式^[6], 煤体不受振动作用时振动频率 $\omega=0$, 此时无论 t 为何值均有 $F=0$, 因此 t 时间内煤体所受的振动力可表示为

$$F = \frac{t}{T_z} \cdot \frac{2}{T_z} \int_0^{\frac{T_z}{2}} F_0 \sin(2\pi\omega t) dt = \frac{2F_0\omega t}{\pi} \quad (1)$$

式中 t 为振动作用时间 (s); T_z 为振动周期 (s); ω 为截割头的振动频率 (Hz); F_0 为驱动力的幅值 (N)。

对单位体积煤体进行积分可得衰减机械挤压力产生的应变为^[7-8]

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_{s\sigma}}{V_{s0}} &= -\frac{\sigma_i}{E_v} = -\frac{\int_0^x \frac{2F_0\omega t}{\pi V_B} e^{-(0.8261D_0+0.1393)s} dx}{E_v} \\ &= -\frac{6F_0\rho_s\omega t(1-2\nu)}{\pi m_s E(0.8261D_0+0.1393)} \quad (2) \end{aligned}$$

式中 $\Delta V_{s\sigma}$ 为外力挤压作用引起的体积变化量 (m^3); V_{s0} 为煤体初始骨架体积 (m^3); σ_i 为单位体积煤体所受到的振动作用力 (N); E_v 为煤体体积模量 (Pa); V_B 为煤体总体积 (m^3); D_0 为煤体初始损伤; s 为振动作用源到受振动作用煤体的距离 (m); ρ_s 为煤的视密度 (kg/m^3); ν 为煤的泊松比; m_s 为振动作用 s m 所影响到的煤体质量 (kg); E 为煤体的弹性模量 (Pa)。

将孔隙受气体压缩产生的应变^[9]、吸附膨胀产生的应变^[9-11]、衰减机械挤压力产生的应变矢量相加, 可知煤体骨架应变为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} &= -\frac{3(1-2\nu)}{E} \Delta p + \frac{2\rho_s RTa(1-2\nu)}{EV_m(1-\varphi_0)} \ln(1+bp) - \\ &\quad \frac{6F_0\rho_s\omega t(1-2\nu)}{\pi m_s E(0.8261D_0+0.1393)} \left[1 - e^{-(0.8261D_0+0.1393)s} \right] \\ &= \frac{(1-2\nu)}{E} \left\{ -3\Delta p + \frac{2\rho_s RTa}{V_m(1-\varphi_0)} \ln(1+bp) - \right. \\ &\quad \left. \frac{6F_0\rho_s\omega t}{\pi m_s (0.8261D_0+0.1393)} \left[1 - e^{-(0.8261D_0+0.1393)s} \right] \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

式中 ΔV_s 为煤骨架体积变化量 (m^3); Δp 为孔隙压力增量 (Pa); R 为普适气体常数, 取 $8.3143 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为煤体温度 (K); a 为单位质量煤在参考压力下的极限吸附量 (m^3/kg); φ_0 为初始孔隙率; V_m 为气体摩尔体积, 取 $22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$; b 为煤的吸附平衡常数 (Pa^{-1}); p 为煤体孔隙瓦斯压力, (Pa)。

1.2 振动煤体体积应变变化

单独考虑吸附膨胀应力作用, 煤体吸附膨胀应变为^[9, 11]

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta V}{V_{B0}} = \frac{V - V_{B0}}{V_{B0}} = \frac{2\rho_s RTa(1-2\nu) \ln(1+bp)}{V_m E} \quad (4)$$

式中 ΔV 为热膨胀单独作用下单位体积含瓦斯煤体积变化量 (m^3), V_{B0} 为单位体积含瓦斯煤初始总体积 (m^3), V 为单独考虑吸附膨胀作用下煤体体积 (m^3)。

孔隙气体压力、吸附膨胀力、机械振动挤压力共同作用, 将式 (4) 代入体积压缩系数的定义式可得^[12-13]

$$\begin{aligned} K \int_{\sigma_0}^{\sigma_f} d\sigma_f &= K \int_0^\infty \Delta p dx + \frac{2KF_0\rho_s\omega t \left[1 - e^{-(0.8261D_0+0.1393)\times\infty} \right]}{\pi m_s (0.8261D_0+0.1393)} \\ &= - \int_{V_{B0}}^{V'} \frac{2\rho_s RTa(1-2\nu) \ln(1+bp) + V_m E}{V_m E} V_{B0} d(\ln V) \quad (5) \end{aligned}$$

式中 K 为体积压缩系数; σ_f 为煤体所受到的孔隙气体压力和机械振动挤压力 (N); V' 为吸附膨胀作用下煤体体积变化 (m^3)。

气体压力增量 Δp 随煤体距振源的距离 x 的变化而改变, 且其变化无规律, 为简化计算此处忽略气压变化引起的作用力, 将煤体体积压缩系数^[9]代入式 (5) 可得

$$\varepsilon_v = e^{\frac{-6F_0\rho_s\omega t V_m (1-2\nu)}{\pi m_s (0.8261D_0+0.1393) [2\rho_s RTa(1-2\nu) \ln(1+bp) + V_m E] V_{B0}}} - 1 \quad (6)$$

式中, ε_v 为煤体体积应变。

式(6)即为振动作用下煤体体积应变变化表达式。

2 振动煤体瓦斯含量方程

煤体内部瓦斯含量包括吸附态瓦斯含量和游离态

瓦斯含量。忽略温度影响时, 煤层中瓦斯的吸附量可表示为^[14-15]

$$Q_a = \frac{abp}{1+bp} \cdot \frac{100-A-M}{100} \cdot \frac{1}{1+0.31M} \quad (7)$$

式中 a 为饱和吸附量 (m^3/kg); b 为吸附常数 (Pa^{-1}); p 为煤层瓦斯压力 (Pa); A 为煤中的灰分 (%) ; M 为煤中的水分 (%)。

单位质量的煤体在压力 p 时所含的游离态瓦斯质量为^[16]

$$m_b = \rho_g \cdot V_\varphi = \frac{\rho_n p}{p_n} \cdot \frac{1}{\rho_s} \varphi \quad (8)$$

式中 ρ_g 为瓦斯压力 p 时的瓦斯密度 (kg/m^3); V_φ 为单位质量的煤体孔隙体积 (m^3); ρ_n 为标准状态下的瓦斯密度, 取 0.716 kg/m^3 ; p_n 为标准状态下的瓦斯压力, 取 0.10325 MPa ; φ 为振动作用下煤体孔隙率。

则标准状况下煤体游离瓦斯体积 V_b 可表示为

$$V_b = \frac{m_b R T_n}{M_g p_a} = \frac{\rho_n p \varphi R T_n}{p_n \rho_s M_g p_a} \quad (9)$$

式中 M_g 为瓦斯气体的分子量; p_a 为标准大气压力, 取 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$; T_n 为标准状况下的瓦斯气体温度, 取 273 K 。

煤体内游离瓦斯含量为

$$Q_b = \frac{V_b}{m_{s0}} = \frac{\rho_n p \varphi R T_n}{p_n \rho_s M_g p_a} \quad (10)$$

式中, m_{s0} 为煤体质量, 取单位质量 1 kg 。

煤体内瓦斯含量 Q_c 可表示为

$$Q_c = Q_a + Q_b \\ = \frac{\rho_n p \varphi R T_n}{p_n \rho_s M_g p_a} + \frac{abp}{1+bp} \cdot \frac{100-A-M}{100} \cdot \frac{1}{1+0.31M} \quad (11)$$

其中, 煤体孔隙率可表示为^[9-10]

$$\varphi = \frac{V_p}{V_B} = 1 - \frac{1-\varphi_0}{1+\varepsilon_v} \left(1 + \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \right) \quad (12)$$

式中 V_p 为煤体孔隙体积 (m^3); V_B 为煤体总体积 (m^3); φ_0 为煤体初始孔隙率;。

联立式 (3)、(6)、(11)、(12) 可得低频振动频率、振动时间与煤体瓦斯含量间的动态方程:

$$Q = \frac{abp}{1+bp} \cdot \frac{100-A-M}{100} \cdot \frac{1}{1+0.31M} + \frac{\rho_n p R T_n}{p_n \rho_s M_g p_a} \\ \left\{ 1 - \frac{1-\varphi_0}{e^{\frac{-6F_0\rho_s\omega t V_m(1-2\nu)}{\pi m_s(0.8261D_0+0.1393)[2\rho_s R T a(1-2\nu)\ln(1+bp)+V_m E]V_{B0}}}} \right. \\ \left. \left\{ 1 + \frac{(1-2\nu)}{E} \left\{ -3\Delta p + \frac{2\rho_s R T a}{V_m(1-\varphi_0)} \ln(1+bp) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \frac{6F_0\rho_s\omega t [1-e^{-(0.8261D_0+0.1393)s}]}{\pi m_s[0.8261D_0+0.1393]} \right\} \right\} \right\} \quad (13)$$

总之, 以振动煤体骨架及体积应变为基础, 分析游离态及吸附态瓦斯含量变化, 建立振动煤体瓦斯含量方程, 该方程以振动煤体骨架应变、体积应变、孔隙率为基础, 考虑振动作用下煤体瓦斯含量变化, 更能体现出低频机械振动对煤体瓦斯吸附、解吸及含量的影响。为明确表示出瓦斯含量与各物理量表达式之间的关系可将方程表示为

$$\begin{aligned} Q_c &= \frac{\rho_n p \varphi R T_n}{p_n \rho_s M_g p_a} + \frac{abp}{1+bp} \cdot \frac{100-A-M}{100} \cdot \frac{1}{1+0.31M} \\ \varphi &= 1 - \frac{1-\varphi_0}{1+\varepsilon_v} \left(1 + \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \right), \\ \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} &= \frac{(1-2\nu)}{E} \left\{ -3\Delta p + \frac{2\rho_s R T a}{V_m(1-\varphi_0)} \ln(1+bp) - \right. \\ &\quad \left. \frac{6F_0\rho_s\omega t [1-e^{-(0.8261D_0+0.1393)s}]}{\pi m_s(0.8261D_0+0.1393)} \right\}, \\ \varepsilon_v &= e^{\frac{-6F_0\rho_s\omega t V_m(1-2\nu)}{\pi m_s(0.8261D_0+0.1393)[2\rho_s R T a(1-2\nu)\ln(1+bp)+V_m E]V_{B0}}} - 1. \end{aligned} \quad (14)$$

3 低频振动煤体瓦斯含量变化试验

3.1 试验装置

试验装置采用李树刚等^[1]自主研发的瓦斯吸附/解吸激振与测试系统, 型煤试件直接装入试验系统的外置吸附罐后, 振动过程中试件与吸附罐的内壁发生碰撞, 因此必须改造吸附罐。改造罐形状与原外置吸附罐相同, 不同之处为改造罐通过螺钉将密封盖固定于罐体, 罐体底部开有退模孔, 试验过程中用螺纹堵头堵住退模孔, 罐体内装多孔内胆, 内胆内腔尺寸为 $\Phi=(50 \pm 0.15) \times (100 \pm 0.15) \text{ mm}$, 实现装入罐体内部的试件固定。

3.2 试验过程

由于原煤内部孔隙、裂隙分布不均匀, 直接从原煤煤壁取标准试件的过程中会对试件造成不同程度的振动损伤, 使煤体内部原有的孔隙、裂隙结构发生变化, 改变煤体内部的比表面积, 从而影响煤体瓦斯含量。因此试件选用破碎煤体压制成型的型煤。

将山西某矿井的四采区 405 掘进工作面煤壁原煤破碎后, 筛取 40~60 目的煤粒 240 g, 在 25.5 t 的成型压力作用下制得直径 50 mm、高 95 mm 的圆柱体型煤试件。为使试件紧密贴合多孔内胆内壁, 将试件裹少量棉花放入改造罐内, 脱气 2 h 后, 设定并打开扫频信号发生器, 使功率放大器以低频正弦波驱动改造罐, 调定水箱使改造罐周围恒温, 然后充入改造罐内一定压力的瓦斯气体, 关闭进气阀, 顺次开启信号采集器、电荷放大器、功率放大器, 振动试件一定时间

后关闭。

3.3 试验结果分析

在 10, 20, 30 Hz 3 个不同频率作用下, 每次试验均充入改造罐 1 MPa 的瓦斯气体, 温度恒定 291 K, 振动煤体试件 120 min, 吸附罐内试件的瓦斯含量如图 1 所示, 图 1 中数据表明: 同一振动频率作用下, 煤体瓦斯含量随着振动时间增加而增多; 振动时间相同, 振动频率越大, 煤体瓦斯含量越大。表明振动通过增大煤体孔隙率而增加煤体瓦斯含量, 振动频率相同, 随着振动时间的增加, 煤体孔隙逐渐增多, 煤体内部游离态瓦斯越多, 瓦斯含量逐渐变大; 振动时间相同, 振动频率越大, 煤体孔隙率越大, 从而煤体瓦斯含量越大。

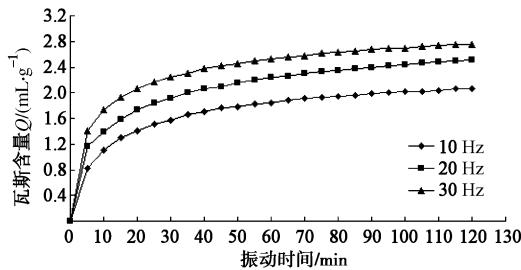


图 1 试验测定低频机械振动作用下煤体瓦斯含量变化

Fig. 1 Gas volume change of experimental determination under the low-frequency disturbance

分析图 1 中数据还可发现当振动 20 min 时, 20 Hz 与 10 Hz 含量差值为 $0.3238 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 30 Hz 与 20 Hz 含量差值为 $0.3379 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 振动 110 min 时, 20 Hz 与 10 Hz 含量差值为 $0.4435 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 30 Hz 与 20 Hz 含量差值为 $0.2534 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 即随着振动时间的增加, 20 Hz 与 10 Hz 含量差值由小变大, 30 Hz 与 20 Hz 含量差值由大变小, 表明含量增大的差值与频率增加的差值不成正比变化, 振动作用下, 煤体孔隙率不随频率增加的数值而相应的正比变化。

4 含量方程检验

为检验振动动态含量方程的计算精度, 分析认为试验条件下煤体不受围压, 煤体受到的振动应力起拉伸煤体作用, 因此将式(13)变化为

$$Q = \frac{abp}{1+bp} \cdot \frac{100 - A - M}{100} \cdot \frac{1}{1 + 0.31M} + \frac{\rho_n pRT_n}{\rho_n \rho_s M_g p_a}.$$

$$\left\{ 1 - \frac{1 - \varphi_0}{e^{\frac{6F_0\rho_s\omega t V_m (1-2\nu)}{\pi m_s [0.8261D_0 + 0.1393] [2\rho_s RT a (1-2\nu) \ln(1+bp) + V_m E] V_{B0}}}} \right\}.$$

$$\left\{ 1 + \frac{(1-2\nu)}{E} \left\{ -3\Delta p + \frac{2\rho_s RT a}{V_m (1-\varphi_0)} \ln(1+bp) + \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{6F_0\rho_s\omega t [1 - e^{-(0.8261D_0 + 0.1393)s}]}{\pi m_s [0.8261D_0 + 0.1393]} \right\} \right\}. \quad (15)$$

试验选用破碎煤体压制的型煤。试验过程中未研究型煤试件的物理参数, 无法直接计算试验型煤瓦斯含量变化数值, 为分析振动实际煤体瓦斯含量变化规律, 方程以实测参数进行计算, 具体参数值如表 1 所示。

表 1 煤层及试验参数

Table 1 Coal bed and test parameters

参数名称	量值
煤体弹性模量 E/Pa	14.142×10^9
煤体极限吸附量 $a/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	3.7416×10^{-2}
煤体吸附平衡常数 b/Pa^{-1}	9.83×10^{-7}
煤泊松比 ν	0.275
煤的视密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.487×10^3
煤层测定的孔隙率 φ_0	0.0948
普适气体常数 $R/(J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K}^{-1}))$	8.3143
气体摩尔体积 $V_m/(\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$	22.4×10^{-3}
含瓦斯微元初始体积 V_{B0}/m^3	取单位体积 1
煤体试件的初始损伤 D_0	试件为型煤, 认为其损伤值为 0
振动源到受振动煤体的距离 s/m	由于煤样试件直径仅为 0.05 m, 计算过程中取其值为 0.05 m
振动频率 ω/Hz	10, 20, 30
煤体温度 T/K	取值为水箱设定温度 291
驱动力的幅值 F_0/N	试验实测值为 1
受振动煤体的质量 m_s/kg	取值为煤样试件的质量 0.24
充入改造罐内瓦斯压力 p_0/MPa	1

煤体内部瓦斯压力 p 可由下式进行计算:

$$p = \frac{p_0}{z_0} - \frac{p_t}{z_t}. \quad (16)$$

式中 p_0 为充入吸附罐中的压强 (Pa); p_t 为 t 时刻测得吸附罐中的压强 (Pa); z_0 为吸附罐中压强 p_0 时甲烷的压缩因子; z_t 为吸附罐中压强 p_t 时甲烷的压缩因子, 取 $z_0=z_t=1$ 。

由于煤体吸附作用使吸附罐内瓦斯压力变化, 煤体瓦斯压力直接用充入气压 p_0 与 t 时刻测得吸附罐中的压强 p_t 之差不能准确的计算出煤体内部瓦斯压力, 但其差值变化能准确的反应出煤体内部瓦斯压力逐渐变大的规律, 并不影响公式计算得出的煤体瓦斯含量变化规律。

式(15)计算得出的煤体瓦斯含量变化规律如图 2 所示, 图 12 中曲线显示振动频率相同时, 振动时间越长, 煤体瓦斯含量越大; 振动时间相同时, 振动频

率越大，煤体瓦斯含量越大。

振动 20 min 时，20 Hz 与 10 Hz 含量差值为 $0.6842 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，30 Hz 与 20 Hz 含量差值为 $0.6852 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，振动 110 min 时，20 Hz 与 10 Hz 含量差值为 $0.8613 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，30 Hz 与 20 Hz 含量差值为 $0.4721 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，这些均与试验测定的煤体瓦斯含量变化规律相吻合，因此所建立的方程能反应出振动煤体瓦斯含量变化规律。

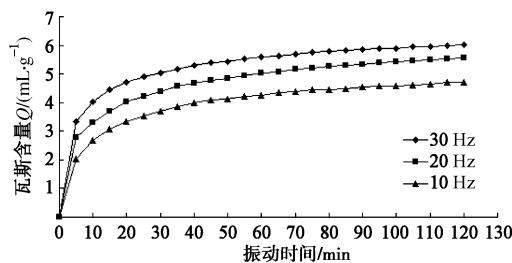


图 2 方程计算低频机械振动作用下煤体含量变化

Fig. 2 Gas volume change of formula calculation under the low-frequency disturbance

5 结 论

(1) 煤体孔隙率变化是振动改变了煤体骨架应变及煤体体积，其中煤体骨架应变为孔隙压缩及机械挤压作用引起的应变减小量与吸附膨胀作用引起应变增大量的矢量和；煤体体积变化系数是以 e 为底的指数形式。

(2) 煤体内部瓦斯含量包括吸附态瓦斯含量和游离态瓦斯含量，低频机械振动对吸附态瓦斯含量无直接影响，通过煤体孔隙率的变化改变游离态瓦斯含量，使煤体瓦斯压力变化，从而影响吸附态瓦斯含量；经过试验检验方程得出计算值能较好地体现出低频机械振动影响煤体瓦斯含量的变化规律。

(3) 试验条件下振动通过增大煤体孔隙率，而增加煤体瓦斯含量，振动频率相同，振动时间增加，煤体孔隙增多，瓦斯含量变大；振动时间相同，振动频率越大，煤体孔隙率越大，煤体瓦斯含量越大，且频率不同含量差值变化不同，20 Hz 与 10 Hz 含量差值由小变大，30 Hz 与 20 Hz 含量差值由大变小。

参考文献：

- [1] 姜永东, 鲜学福, 易俊, 等. 声震法促进煤中甲烷气解吸规律的实验及机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 675 - 680. (JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, YI Jun, et al. Experimental and mechanical on the features of ultrasonic vibration stimulating the desorption of methane in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 675 - 680. (in Chinese))
- [2] 葛兆龙, 卢义玉, 周东平, 等. 空化水射流声震效应促进瓦斯解吸实验的规律及机理研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1150 - 1155. (GE Zhao-long, LU Yi-yu, ZHOU Dong-ping, et al. Study on regular and mechanism of coal bed methane desorption experiment under sonic vibrating of cavitation water jets[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1150 - 1155. (in Chinese))
- [3] 李祥春, 聂百胜, 何学秋. 振动诱发煤与瓦斯突出的机理[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(2): 149 - 152. (LI Xiang-chun, NIE Bai-sheng, HE Xue-qiu. Mechanism of coal and gas bursts caused by vibration[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(2): 149 - 152. (in Chinese))
- [4] 李建楼, 严家平, 王来斌, 等. 煤体瓦斯在声波场作用下的放散特征研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 264 - 267. (LI Jian-lou, YAN Jia-ping, WANG Lai-bin, et al. Study of characteristics of coal gas radiation in acoustic field[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 264 - 267. (in Chinese))
- [5] 齐黎明, 郭达, 关联合, 等. 外力扰动条件下的瓦斯解吸机理与实验研究[J]. 中国煤炭, 2013, 39(10): 92 - 95. (QI Li-ming, GO Da, GUAN Lian-he, et al. Methane desorption mechanism and experimental research under external disturbing force[J]. China Coal, 2013, 39(10): 92 - 95. (in Chinese))
- [6] 田晶. 纵轴式掘进机动态模型与动态特性的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2002. (TIAN Jing. Research on dynamic model and dynamic characteristic of vertical axis road-header[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2002. (in Chinese))
- [7] 杨威, 李磊, 马立强. 振动放顶煤技术研究[C]// 煤炭开采新理论与新技术——中国煤炭学会开采专业委员会 2007 年学术年会论文集. 北京, 2007: 69 - 72. (YANG Wei, LI Lei, MA Liqiang. Experimental research of top coal dropping vibration technology[C]// The New Theory and Technology of Coal Mining- Annual Meeting Symposium of Mining Professional Committee of China Coal Society in 2007. Beijing, 2007: 69 - 72. (in Chinese))
- [8] 崔新壮, 李卫民, 段祝平. 爆炸应力波在各向同性损伤岩石中的衰减规律研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 76 - 80. (CUI Xin-zhuang, LI Wei-min, UAN Zhu-ping. Stress wave attenuation in isotropic damaged rocks[J]. Explosion and

- Shock Waves, 2001, **21**(1): 76 – 80. (in Chinese))
- [9] 陶云奇. 含瓦斯煤 THM 耦合模型及煤与瓦斯突出模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. (TAO Yun-qi. Study on the gassy coal THM coupling model and coal and gas outburst simulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese))
- [10] 陶云奇, 许江, 彭守建, 等. 含瓦斯煤孔隙率和有效应力影响因素试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3417 – 3422. (TAO Yun-qi, XU Jiang, PENG Shou-jian, et al. Experimental study of influencing factor of porosity and effective stress of gas-filled coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3417 – 3422. (in Chinese))
- [11] 吴世跃, 赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(10): 1674 – 1678. (WU Shi-yue, ZHAO Wen. Analysis of effective stress in adsorbed methane-coal system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1674 – 1678. (in Chinese))
- [12] 刘荣和, 冯文光, 龙玲, 等. 岩石孔隙体积压缩系数实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2009, **31**(4): 79 – 82. (LIU Rong-he, FENG Wen-guang, LONG Ling, et al. Experimental study on rock pore volume compressibility[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, **31**(4): 79 – 82. (in Chinese))
- [13] 迟善武, 任荣亭. 岩石孔隙体积压缩系数测量仪的设计[J]. 石油仪器, 1997, **11**(2): 23 – 25. (CHI Shan-wu, REN Rong-ting. Design of rock pore compressibility apparatus[J]. Petroleum Instruments, 1997, **11**(2): 23 – 25. (in Chinese))
- [14] 易俊, 姜永东, 鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性实验研究[J]. 中国矿业, 2007, **16**(5): 113 – 116. (YI Jun, JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu. An experimental research on the characters of methane seepage in stress field and temperature field[J]. China Mining Magazine, 2007, **16**(5): 113 – 116. (in Chinese))
- [15] 黄启翔, 尹光志, 姜永东, 等. 型煤试件在应力场中的瓦斯渗流特性分析[J]. 重庆大学学报, 2008, **31**(12): 1436 – 1440. (HUANG Qi-xiang, YI Guang-zhi, JIANG Yong-dong, et al. Gas seepage characteristics of briquette samples in a stress field[J]. Journal of Chongqing University, 2008, **31**(12): 1436 – 1440. (in Chinese))
- [16] 郭平, 曹树刚, 张遵国, 等. 含瓦斯煤体固气耦合数学模型及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(增刊2): 330 – 335. (GUO Ping, CAO Shu-gang, ZHANG Zun-guo, et al. Analysis of solid-gas coupling model and simulation of coal containing gas[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(S2): 330 – 335. (in Chinese))
- [17] 李树刚, 赵勇, 张天军. 基于低频振动的煤样吸附/解吸特性测试系统[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(7): 1142 – 1146. (LI Shu-gang, ZHAO Yong, ZHANG Tian-jun. Test systems of the coal sample adsorption/desorption characteristics based on low-frequency vibration[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(7): 1142 – 1146. (in Chinese))

中东部岩土力学与工程中的热点问题研讨会

Hot topic seminar of Rock and Soil Mechanics and Engineering in Middle and East of China 安徽宣城 第一号通知 (2015年3月)

主办单位: 中国力学学会岩土力学专业委员会。

承办单位: 合肥工业大学; 安徽省土木结构与材料重点实验室; 安徽省岩石力学与工程学会。

主要学术议题: 边坡工程与预报预警技术; 城市轨道交通工程与安全监测监控技术; 地基处理和复合地基新方法; 特殊土(膨胀土、软土等)的力学性能; 重大工程建设实例。

大会秘书处: 卢坤林, 电话15555127260; 黄镜淳, 电话14705606396; 联系邮箱: zdbytyh@163.com; 通信地址: 安徽合肥屯溪路193号合肥工业大学土木与水利工程学院; 邮政编码: 230009。

论文征集: 本次会议不公开征集论文, 拟交流的论文以内

部资料形式印刷, 供会议研讨, 请于2015年6月30日前发送至邮箱zdbytyh@163.com。

学术会议安排: 大会特邀和主题报告由大会学术委员会提名并邀请, 每人报告30分钟。分组学术报告及讨论(自由申请): 每人报告15分钟。

会议费用: 正式代表: 1000元, 学生(陪同)代表600元。

会议、住宿地点地址: 安徽省宣城市宣州区薰化路301号; 合肥工业大学宣城校区轩苑宾馆; 联系人程萌萌, 电话0563-3831088, 手机18856308123。为确保顺利住宿, “会议回执”请于2015年6月30日前通过E-mail或快递形式返回大会秘书处E-mail: zdbytyh@163.com。住宿由大会统一安排, 费用自理。

(大会组委会 供稿)