

DOI: 10.11779/CJGE201612009

# 低频机械振动含瓦斯煤体积应变变化规律研究

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对含瓦斯煤体积应变的影响, 建立煤体孔隙瓦斯压力、吸附膨胀力、振动衰减应力作用下煤体体积应变变化方程。以 10, 20, 30 Hz 振动 1, 2, 3, 4, 5 h 后的煤体试件单轴抗压强度变化试验检验方程所反映的规律性, 发现振动频率相同, 振动时间越长, 试件单轴抗压强度越低, 计算应变越大; 振动时间相同, 振动频率越小, 试件单轴抗压强度越高, 计算应变越小。分析认为振动使煤体孔隙率变大, 应变变大, 从而单轴抗压强度降低。振动时间相同, 振动频率越大, 单轴抗压强度越低, 试件孔隙率就越大, 试件应变就越大; 振动频率相同, 振动时间越短, 单轴抗压强度越高, 试件孔隙率就越小, 试件应变就越小。且无论频率为何值, 单轴抗压强度均随时间的增加而降低, 表明试件孔隙率均随时间的增加而变大, 试件应变均随时间的增加而增大, 抗压强度所反映出的应变变化与计算得出的应变规律相一致。方程计算值能较好地反应低频机械振动作用下不同振动频率、振动时间影响煤体应变变化规律。

**关键词:** 低频机械振动; 煤体; 体积应变; 有效应力; 振动衰减应力; 单轴抗压强度

**中图分类号:** TD32      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000 - 4548(2016)12 - 2212 - 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、非稳态渗流力学、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 volume strain on gas filled coal under low frequency

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 influence of low-frequency disturbance load on volume strain of gas-filled coal, the equation for change of volume strain of coal under porous pressure of coal, absorption strength and decreasing vibration stress is established. Then the rules depicted by the above equation are verified by changes of uniaxial compressive strength of samples which are vibrated for 1, 2, 3, 4, 5 hours under the action of frequency of 10, 20, 30 hz. It is found that under the constant vibrating frequency, with the increase of he vibrating time, the uniaxial compressive strength of samples gradually decreases, and the calculated strain increases. Under the constant vibrating time, with the decrease of the vibrating frequency, the uniaxial compressive strength of samples gradually increases, and the calculated strain decreases. The analysis shows that the vibration makes coal porosity increases, then the strain becomes larger, so the uniaxial compressive strength declines. Under the same vibrating time, when the frequency increases, the uniaxial compressive strength declines, the porosity increases, and the strain also becomes larger. However, under the same frequency, when the vibrating time gets shorter, the uniaxial compressive strength becomes greater, the porosity gets smaller, and the strain also becomes smaller. Whatever the value of the frequency gets, the uniaxial compressive strength decreases with the increasing time, which indicates that the porosity and the strain both increase with the increasing time. The variation of strain reflected by the compressive strength is the same as that of the calculated strain. The calculated values satisfactorily reveal influence of different frequencies and time ranges on strain changes under low frequency.

**Key words:** low-frequency vibration; coal; volume strain; effective stress; decreasing vibration stress; uniaxial compressive strength

## 0 引言

有效应力是煤体骨架上的平均法向应力, 其决定煤体的变形与破坏, 反映流体与多孔固体之间的力学关系。采掘过程中不断变化的振动力作用下, 煤体内部受到变化的有效应力, 产生动态应变, 瓦斯吸附状

态发生变化, 使煤体内部气体压力改变, 从而影响瓦斯渗透率。因此研究采掘振动对煤体应力应变的影响,

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: 2015 - 10 - 19

\*通讯作者(E-mail: zy6863368@163.com)

对认识瓦斯解吸吸附、渗流规律具有重要意义。

许多学者对含瓦斯煤有效应力进行研究, 建立有效应力特性方程。卢平等<sup>[1]</sup>通过分析力学变形与破坏机制理论, 提出本体有效应力和结构有效应力作用下应力应变本构关系式。吴世跃等<sup>[2]</sup>依据表面物理化学和弹性力学原理, 得到有效应力、外应力、膨胀应力间关系式。李祥春等<sup>[3]</sup>通过理论分析, 找出总应力、孔隙压力、吸附膨胀力共同作用下有效应力表达式。陶云奇等<sup>[4]</sup>分析孔隙率定义及力学平衡原理, 找出瓦斯压力、吸附膨胀、热膨胀共同作用下有效应力表达式。刘星光等<sup>[5]</sup>利用损伤力学和多孔介质理论, 得出孔隙瓦斯压力、吸附膨胀力作用下损伤煤体有效应力表达式。

采掘过程中, 不断振动使煤体骨架有效应力应变呈动态特性, 但现有有效应力应变方程较少研究振动因素影响。为分析煤体振动动态应力应变特性, 本文从煤体应力平衡角度出发, 分析振动状态下损伤煤体所受的各项应力, 建立动态有效应力方程。依据应力和应变本构关系, 得到动态损伤煤体应变方程, 并利用试验检验方程所反映的应变变化规律。

## 1 振动煤体体积应变方程

掘进振动作用下, 振动能以振动波的形式在煤体内传播, 振动波一部分使煤体发生破裂形变, 煤体颗粒接触挤压, 产生挤压力, 形成挤压应变, 这种现象发生在掘进煤体表层, 仅产生表层破坏, 即振动的直接效应; 另一部分逐渐损耗转化成煤与瓦斯内能, 改变瓦斯吸附状态。被吸附的瓦斯气体受振动后内能增大, 分子动能增多, 气体分子获得大于吸附势垒能量后解吸<sup>[6]</sup>, 以游离态存在于煤体孔隙裂隙, 从而使煤体内部空间瓦斯压力变大, 气体渗流扩散加剧, 气体内能减小, 直至不能克服煤体表面吸附势, 气体分子重新被吸附。整个过程中, 煤体分子产生相互挤压力、孔隙瓦斯压力、吸附膨胀应力。

沿煤体内部颗粒选取某一面积为  $S$  的曲线截面, 截面上煤体颗粒间相互作用力平衡方程为<sup>[7-9]</sup>

$$0 = \sigma_m(1-\varphi)S - p\varphi S + \sigma_{ads}(1-\varphi)S - \sigma_i S \quad (1)$$

式中  $\sigma_m$  为煤粒间挤压产生的支撑力 (N);  $(1-\varphi)S$  为煤体颗粒相互接触面积之和 (m<sup>2</sup>);  $\varphi$  为振动作用下煤体孔隙率;  $p$  为煤体孔隙内瓦斯压力 (N);  $\varphi S$  为孔隙面积 (m<sup>2</sup>);  $\sigma_{ads}$  为煤体颗粒吸附膨胀产生的应力 (N);  $\sigma_i$  为单位体积煤体所受的振动均值应力 (N)。

式 (1) 可变化为

$$\sigma_i = \sigma_m(1-\varphi) - p\varphi + \sigma_{ads}(1-\varphi) \quad (2)$$

其中, 膨胀应力为<sup>[2, 8, 10]</sup>

$$\begin{aligned} \sigma_{ads} &= E_v \varepsilon_p \\ &= \frac{E}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{2\rho_s RT a(1-2\nu) \ln(1+bp)}{V_m E} \end{aligned}$$

$$= \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} \quad (3)$$

式中  $E_v$  为体积弹性模量 (Pa);  $\varepsilon_p$  为吸附膨胀应变;  $E$  为煤体的弹性模量 (Pa);  $\nu$  为煤的泊松比;  $\rho_s$  为煤的视密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $R$  为普适气体常数, 取值 8.3143 J/(mol·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<sup>3</sup>/kg);  $b$  为煤的吸附平衡常数 (Pa<sup>-1</sup>);  $V_m$  为气体摩尔体积, 取值  $22.4 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/mol;  $p$  为煤体孔隙瓦斯压力 (Pa<sup>-1</sup>)。

$\sigma_m(1-\varphi)$  为煤体骨架的有效支撑力, 由应力平衡原理可表示为截面上煤体所受的均值有效应力<sup>[4]</sup>:

$$\sigma_m(1-\varphi) = -\sigma' \quad (4)$$

式中,  $\sigma'$  为煤体有效应力 (N)。

则外力振动作用下煤体有效应力表达式为

$$\sigma' = \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} (1-\varphi) - p\varphi - \sigma_i \quad (5)$$

实际掘进过程中, 煤体内部受到不断变化的衰减机械挤压作用力  $\sigma'_i$ , 其表达式为<sup>[11]</sup>

$$\sigma'_i = F e^{-(0.8261D_0 + 0.1393)x} \quad (6)$$

式中  $F$  为周期性变化的驱动力 (N),  $D_0$  为煤体初始损伤;  $x$  为振动源到受振动煤体的距离 (m)。

$t$  时间内力幅  $F_0$  作用下, 振动实测曲线呈类正弦波形式<sup>[12]</sup>, 振动频率为 0 时, 时间无论为何值, 均有驱动力为 0。因此,  $t$  时间内煤体所受的振动应力可表示为

$$F = F_0 \sin(2\pi\omega t) \quad (7)$$

式中,  $\omega$  为截割头的振动频率 (Hz),  $F_0$  为驱动力的幅值 (N)。

煤体所受的振动均值应力  $F$  可表示为

$$F = f \frac{t}{T_z} = \frac{2t}{T_z^2} \int_0^{T_z/2} F_0 \sin(2\pi\omega t) dt = \frac{2F_0\omega t}{\pi} \quad (8)$$

式中,  $f$  为一个周期内的振动均值应力 (N);  $T_z$  为振动周期 (s)。

将式 (8) 代入式 (6) 可得振动作用  $s$  m 影响到的单位体积煤体所受到振动均值应力:

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \int_0^s \frac{2F_0\omega t}{\pi V_B} e^{-(0.8261D_0 + 0.1393)x} dx \\ &= \frac{2F_0\omega t [1 - e^{-(0.8261D_0 + 0.1393)s}]}{\pi V_B (0.8261D_0 + 0.1393)} \\ &= \frac{2F_0\rho_s\omega t [1 - e^{-(0.8261D_0 + 0.1393)s}]}{\pi m_s (0.8261D_0 + 0.1393)} \quad (9) \end{aligned}$$

式中  $V_B$  为振动传播  $s$  m 影响到的煤体总体积 (m<sup>3</sup>);  $m_s$  为振动传播  $s$  m 影响到的煤体质量 (kg)。

振动应力作用下, 当煤体体积应变  $\varepsilon_v$  不大于峰值应变  $\varepsilon_c$  时, 煤体所受裂变损伤量和煤体体积应变之间的关系为<sup>[13]</sup>

$$D = A_1 \left( \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_c} \right)^{B_1}, \quad (10)$$

式中,  $A_1$ ,  $B_1$  均为材料常数。

将式 (10) 代入式 (9) 得

$$\sigma_i = \frac{2F_0 \rho_s \omega t \left\{ 1 - e^{-\left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right] s} \right\}}{\pi m_s \left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right]}, \quad (11)$$

式中,  $\varepsilon_{v_0}$  为煤体初始应变。

将式 (11) 代入式 (5) 得低频机械振动作用下处于平衡态煤体有效应力表达式:

$$\sigma' = \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} (1-\varphi) - p\varphi - \frac{2F_0 \rho_s \omega t \left\{ 1 - e^{-\left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right] s} \right\}}{\pi m_s \left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right]} \quad (12)$$

煤体所受的有效应力和体积应变之间的关系可表示为<sup>[15]</sup>

$$\sigma' = E_v \varepsilon_v = \frac{E \varepsilon_v}{3(1-2\nu)} \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (12) 可得振动含瓦斯煤体积应变变化关系式, 即

$$\frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} - \left[ \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} + p \right] \varphi - \frac{2F_0 \rho_s \omega t \left\{ 1 - e^{-\left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right] s} \right\}}{\pi m_s \left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right]} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \varepsilon_v \quad (14)$$

将孔隙率定义式代入式 (14) 并简化可得

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} + p \right] (1-\varphi_0) \left( 1 + \frac{\Delta V_S}{V_{S0}} \right) \\ &= \left\{ \frac{E}{3(1-2\nu)} \varepsilon_v + p + \right. \\ & \quad \left. \frac{2F_0 \rho_s \omega t \left\{ 1 - e^{-\left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right] s} \right\}}{\pi m_s \left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right]} \right\} \cdot (1+\varepsilon_v). \quad (15) \end{aligned}$$

式中  $\varphi_0$  为初始孔隙率;  $\Delta V_S$  为煤体骨架体积变化量 ( $m^3$ );  $V_{S0}$  为煤体初始骨架体积 ( $m^3$ )。

$\Delta V_S/V_{S0}$  为煤体骨架应变, 振动影响下煤体分子之间的相互挤压压力、孔隙瓦斯压力、吸附膨胀应力使煤体骨架产生孔隙压缩应变<sup>[14]</sup>、吸附膨胀应变<sup>[2, 14-15]</sup>及挤压应变。

由式 (9) 可知挤压应变可表示为

$$\frac{\Delta V_{S\sigma}}{V_{S0}} = -\frac{\sigma_i}{E_v} = -\frac{6F_0 \rho_s \omega t (1-2\nu) \left[ 1 - e^{-(0.8261 D_0 + 0.1393)s} \right]}{\pi m_s E (0.8261 D_0 + 0.1393)}, \quad (16)$$

式中,  $\Delta V_{S\sigma}$  为外力挤压作用引起的骨架体积变化量 ( $m^3$ )。

则煤体骨架应变可表示为

$$\frac{\Delta V_S}{V_{S0}} = \frac{(1-2\nu)}{E} \left\{ -3\Delta p + \frac{2\rho_s RT a}{V_m (1-\varphi_0)} \ln(1+bp) - \frac{6F_0 \rho_s \omega t \left[ 1 - e^{-(0.8261 D_0 + 0.1393)s} \right]}{\pi m_s (0.8261 D_0 + 0.1393)} \right\}, \quad (17)$$

式中,  $\Delta p$  为孔隙压力增量 (Pa)。

将式 (17) 代入式 (15) 即可得低频机械振动含瓦斯煤体积应变变化方程, 即

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} + p \right] (1-\varphi_0) \cdot \\ & \left\{ 1 + \frac{(1-2\nu)}{E} \left\{ -3\Delta p + \frac{2\rho_s RT a}{V_m (1-\varphi_0)} \ln(1+bp) - \right. \right. \\ & \quad \left. \left. 6F_0 \rho_s \omega t \left\{ 1 - e^{-\left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right] s} \right\} \right\} \right\} \\ & \quad \left. \frac{2F_0 \rho_s \omega t \left\{ 1 - e^{-\left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right] s} \right\}}{\pi m_s \left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right]} \right\} \\ &= \left\{ \frac{E}{3(1-2\nu)} \varepsilon_v + p + \frac{2F_0 \rho_s \omega t \left\{ 1 - e^{-\left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right] s} \right\}}{\pi m_s \left[ 0.8261 A_1 \left( \frac{\varepsilon_{v_0}}{\varepsilon_c} \right)^{B_1} + 0.1393 \right]} \right\} \cdot (1+\varepsilon_v). \quad (18) \end{aligned}$$

总之, 以振动作用下煤体孔隙率及骨架应变变化为基础, 分析振动煤体挤压压力、孔隙瓦斯压力、吸附膨胀应力共同作用下煤体有效应力变化, 结合应力应变本构关系, 建立了振动含瓦斯煤体积应变方程, 所建立的体积应变方程考虑了振动挤压压力对平衡态含瓦斯煤体积应变影响, 更能体现出掘进过程中低频机械

振动对煤与瓦斯系统整体体积应变影响。为明确表示应变方程所含各物理表达式之间的关系, 将膨胀应力  $\sigma_{ads}$ 、单位体积煤体所受到的振动均值应力  $\sigma_i$  替换其表达式, 则方程可简化为

$$\begin{aligned} & [\sigma_{ads} + p](1 - \varphi_0) \cdot \\ & \left\{ 1 + \frac{(1-2\nu)}{E} \left[ -3\Delta p + \frac{2\rho_s RT a}{V_m(1-\varphi_0)} \ln(1+bp) - 3\sigma_i \right] \right\} \\ & = \left\{ \frac{E}{3(1-2\nu)} \varepsilon_v + p + \sigma_i \right\} \cdot (1 + \varepsilon_v) \quad . \end{aligned} \quad (19)$$

## 2 低频振动煤体体积应变变化试验

目前研究低频机械振动频率、振动时间对含瓦斯煤体积应变的影响较少, 且测定实际掘进过程中振动频率、振动时间对煤体体积应变影响较难, 因此有必要通过试验测定振动频率、振动时间与煤体体积应变之间的关系, 以检验方程所反映频率、时间与应变变化的规律性。

### (1) 试验装置

试验装置采用研制的瓦斯吸附/解吸激振与测试系统<sup>[16]</sup>, 系统中吸附罐体积较大, 标准型煤试件放入后与罐壁发生碰撞, 影响试验结果, 因此吸附罐采用内腔尺寸为  $\Phi=(50\pm0.15)\times(100\pm0.15)$  mm 的罐子, 为使试件固定于罐内, 将试件裹少量棉花装入吸附罐。

### (2) 试验过程

工作面煤壁原煤直接取芯后测定振动过程中煤体应变变化时, 煤体试件受到取芯作业振动影响, 且试件体积较小, 直接测定振动过程中试件应变变化较困难, 因此采用测定煤粒压制的型煤受振动后单轴抗压强度变化间接得出, 单轴抗压强度的变化反映出试件孔隙率的变化<sup>[17]</sup>, 孔隙率的变化又反应出试件的应变变化。将工作面煤壁原煤直接破碎后, 筛取 40~60 目的煤粒 240 g, 在 25.5 t 的压力作用下制得直径 50 mm, 高 95 mm 的圆柱体型煤试件。将试件装入吸附罐, 通过水浴保持罐内恒温 291 K, 试件脱气后向罐内充入 1 MPa 的瓦斯气体。激振器以相同力幅、不同频率振动试件一定时间后, 打开通大气阀排出罐内气体, 将试件取出, 测定试件单轴抗压强度。

### (3) 试验结果分析

以 10, 20, 30 Hz 振动试件 1, 2, 3, 4, 5 h 后, 得到的试件单轴抗压强度如图 1 所示, 由图中曲线变化趋势可看出: 振动频率相同, 振动时间越长, 试件单轴抗压强度越低; 振动时间相同, 振动频率越小, 试件单轴抗压强度越高。表明振动作用下, 试件孔隙率发生变化, 孔隙率的变化显示试件应变变化。即振动作用下, 试件应变发生变化。实际振动过程中, 振

动频率相同, 振动时间越长, 试件孔隙率变化越大, 应变变化就越大, 单轴抗压强度就越低; 振动时间相同, 振动频率越小, 试件孔隙率变化越小, 应变变化就越小, 单轴抗压强度就越高。

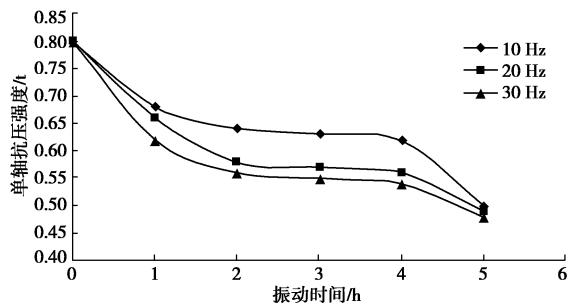


图 1 试验测定振动作用下煤体单轴抗压强度变化

Fig. 1 Variation of test uniaxial compressive strength of coal under vibration

## 3 体积应变变化方程检验

为分析应变方程计算的应变变化值与试验单轴抗压强度曲线反应的规律性是否一致, 必须结合试验条件变化方程, 分析方程计算值的规律性。试验条件下, 煤体试件未受围岩压力作用, 振动过程中, 振动力对试件产生拉伸作用, 因此将式 (19) 变化为

$$\begin{aligned} & [\sigma_{ads} + p](1 - \varphi_0) \cdot \\ & \left\{ 1 + \frac{(1-2\nu)}{E} \left[ -3\Delta p + \frac{2\rho_s RT a}{V_m(1-\varphi_0)} \ln(1+bp) + 3\sigma_i \right] \right\} \\ & = \left\{ \frac{E}{3(1-2\nu)} \varepsilon_v + p - \sigma_i \right\} \cdot (1 + \varepsilon_v) \quad . \end{aligned} \quad (20)$$

由于未测定型煤试件的物理参数, 不能直接计算试件应变变化数值, 为找出试件应变变化规律, 将煤层取芯后的试件物理参数代入计算, 具体参数值如下: 煤体弹性模量  $E$  为  $14.142 \times 10^9$  Pa, 煤体极限吸附量  $a$  为  $3.7416 \times 10^{-1}$  m<sup>3</sup>/kg, 煤体吸附平衡常数  $b$  为  $9.83 \times 10^{-7}$  Pa<sup>-1</sup>, 煤泊松比  $\nu$  为  $2.75 \times 10^{-1}$ , 煤的视密度  $\rho_s$  为  $1.487 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 煤层测定的孔隙率  $\varphi_0$  为 0.0948, 取芯后的原煤试件煤体初始损伤  $D_0$  为 0, 普适气体常数  $R$  为  $8.3143$  J/(mol·K), 气体摩尔体积  $V_m$  为  $22.4 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/mol, 含瓦斯微元初始体积  $V_{B0}$  取单位体积 1 m<sup>3</sup>, 由于煤样试件直径仅为 0.05 m, 计算过程中振动源到受振动煤体的距离  $S$  取值 0.05 m。振动频率  $w$  为 10, 20, 30 Hz, 煤体温度  $T$  取水箱设定的温度 291 K, 驱动力的幅值  $F_0$  为试验实测值 1 N, 受振动煤体的质量  $m_s$  取煤样试件的质量 0.24 kg。

振动过程中, 闭合的煤体孔隙由与外界不连通状态, 逐渐变的与外界相连通, 可认为煤体孔隙瓦斯压力  $p$  与孔隙瓦斯压力增量  $\Delta p$  均为表 2 内实测罐内瓦

斯压力值。

表 1 实测罐内瓦斯压力值  $P$

Table 1 Measured values of gas pressure (MPa)

频率/Hz	1h	2h	3h	4h	5h
10	0.849	0.847	0.835	0.826	0.802
20	0.809	0.789	0.768	0.759	0.751
30	0.794	0.773	0.757	0.749	0.733

图 2 为式(20)计算得到的煤体应变变化规律。图中曲线显示振动频率相同, 煤体应变随着振动时间的增加而增大; 振动时间相同, 振动频率越大, 煤体应变越大。

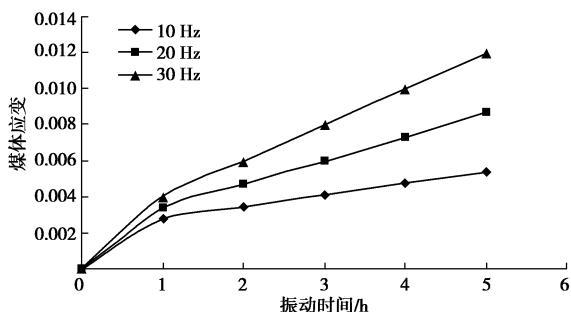


图 2 方程计算振动作用下煤体应变变化

Fig. 2 Variation of calculated strain of coal under vibration

将试验数据与计算数据进行对比: 未受振动时, 试件单轴抗压强度为 0.8 t, 计算应变值为 0。10, 20, 30 Hz 作用下, 振动 1 h 试件单轴抗压强度分别为 0.68, 0.66, 0.62 t; 计算应变值分别为 0.002769, 0.00337, 0.004017。振动 2 h 试件单轴抗压强度分别为 0.64, 0.58, 0.56 t; 计算应变值分别为 0.003441, 0.004683, 0.006003。振动 3 h 试件单轴抗压强度分别为 0.63, 0.57, 0.55 t; 计算应变值分别为 0.004094, 0.005993, 0.007998。振动 4 h 试件单轴抗压强度分别为 0.62, 0.56, 0.54 t; 计算应变值分别为 0.004753, 0.007327, 0.010009。振动 5 h 试件单轴抗压强度分别为 0.5, 0.49, 0.48 t; 计算应变值分别为 0.005383, 0.008662, 0.012004。从单轴抗压强度数据变化角度分析试件应变, 振动时间相同, 振动频率越大, 单轴抗压强度越低, 试件孔隙率就越大, 试件应变就应越大; 振动频率相同, 振动时间越短, 单轴抗压强度越高, 试件孔隙率就越小, 试件应变就应越小。且无论频率为何值, 单轴抗压强度均随时间的增加而降低, 表明试件孔隙率均随时间的增加而变大, 试件应变均随时间的增加而增大, 这些变化规律均与计算得出的应变变化规律相一致。

## 4 结 论

(1) 处于平衡态的含瓦斯煤体所受的有效应力为孔隙瓦斯压力、吸附膨胀力、振动衰减挤压力的矢量

和, 导致体积应变方程计算所得出的体积应变为矢量。其中孔隙瓦斯压力、振动衰减挤压力为负应力, 这两个力均使煤体收缩变小, 吸附膨胀力为正应力, 使煤体膨胀变大。

(2) 振动作用下, 煤体孔隙率的变化与孔隙瓦斯压力作用、吸附膨胀力作用相互影响。煤体孔隙瓦斯压力、吸附膨胀力引起的应变改变煤体孔隙率, 煤体孔隙率变化反过来影响煤体孔隙瓦斯压力、吸附膨胀力, 改变煤体所受的有效应力, 从而影响含瓦斯煤体积应变。

(3) 振动含瓦斯煤体积应变方程是以煤体的体积弹性模量为二次项系数的一元二次方程, 通过改变方程一次项和常数项系数, 使方程得出不同振动频率、振动时间作用下的应变值。

(4) 振动使煤体产生应变变化, 从而影响煤体单轴抗压强度。振动频率相同, 振动时间增加, 试件孔隙率变化越大, 应变变化就越大, 单轴抗压强度就越低; 振动时间相同, 振动频率越小, 试件孔隙率变化越小, 应变变化越小, 单轴抗压强度就越高。

(5) 无论频率为何值, 试件应变均随时间的增加而增大, 单轴抗压强度均随时间的增加而降低。

(6) 对比计算值与试验值, 发现计算应变值变化规律与试验条件下煤体单轴抗压强度所反映的应变变化规律相一致。方程计算能准确的反应出振动作用下煤体应变变化规律。

## 参 考 文 献:

- [1] 卢平, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 含瓦斯煤的有效应力与力学变形破坏特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, 31(6): 686 - 693. (LU Ping, SHENG Zhao-wu, ZHU Gui-wang, et al. The effective stress and mechanical deformation and damage characteristics of gas-filled coal[J]. Journal of China University of Science and Technology, 2001, 31(6): 686 - 693. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 李祥春, 郭勇义, 吴世跃, 等. 煤体有效应力与膨胀应力之间关系的分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(4): 535 - 537. (LI Xiang-chun, GUO Yong-yi, WU Shi-yue, et al. Relation between effective stress and swelling stress of coal body[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(4): 535 - 537. (in Chinese))

- [4] 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))
- [5] 刘星光, 高峰, 张志镇, 等. 考虑损伤的含瓦斯煤有效应力方程 [J]. 科技导报, 2013, 31(3): 38 - 41. (LIU Xing-guang, GAO Feng, ZHANG Zhi-zhen, et al. Effective stress equation of gas-saturated coal considering damage[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(3): 38 - 41. (in Chinese))
- [6] 聂百胜, 段三明. 煤吸附瓦斯的本质[J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(4): 417 - 421. (NIE Bai-sheng, DUAN San-ming. The adsorption essence of gas on coal surface[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1998, 29(4): 417 - 421. (in Chinese))
- [7] 李祥春, 郭勇义, 吴世跃, 等. 考虑吸附膨胀应力影响的煤层瓦斯流-固耦合渗流数学模型及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 2743 - 2748. (LI Xiang-chun, GUO Yong-yi, WU Shi-yue, et al. Mathematical model and numerical simulation of fluid-solid coupled flow of coal-bed gas considering swelling stress of adsorption[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2743 - 2748. (in Chinese))
- [8] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩固气耦合动态模型与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 20(10): 1430 - 1436. (YIN Guang-zhi, WANG Deng-ke, ZHANG Dong-ming, et al. Solid-gas coupling dynamic model and numerical simulation of coal containing gas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 20(10): 1430 - 1436. (in Chinese))
- [9] 黄启翔. 卸围压条件下含瓦斯煤岩力学特性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. (HUANG Qi-xiang. Research on mechanical characteristics of gas-bearing coal under the condition of unloading confining pressure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese))
- [10] 吴世跃, 赵文, 郭勇义. 煤岩体吸附膨胀变形与吸附热力学的参数关系[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(7): 683 - 686. (WU Shi-yue, ZHAO Wen, GUO Yong-yi. Parametric correlation between expansion deformation of coal mass and adsorption thermodynamics[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(7): 683 - 686. (in Chinese))
- [11] 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, DUAN Zhu-ping. Stress wave attenuation in isotropic damaged rocks[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 76 - 80. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 钱济成, 周建方. 混凝土的两种损伤模型及其应用[J]. 河海大学学报, 1989, 17(3): 40 - 47. (QIAN Ji-cheng, ZHOU Jian-fang. Two concrete damage models and their application[J]. Journal of Hohai University, 1989, 17(3): 40 - 47. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 吴世跃. 煤层气与煤层耦合运动理论及其应用的研究—具有吸附作用的气固耦合理论[D]. 沈阳: 东北大学, 2005. (WU Shi-yue. Research of methane-coalbed coupling movement theory and its application gas—solid coupling movement theory with adsorption[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 陈法彬, 周爱武. 岩石物理性质对单轴抗压强度的影响分析[J]. 河南科技, 2013, 14: 175. (CHEN Fa-bin, ZHOU Ai-wu. Analysis of rock physical properties influence on uniaxial compressive strength[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013, 14: 175. (in Chinese))