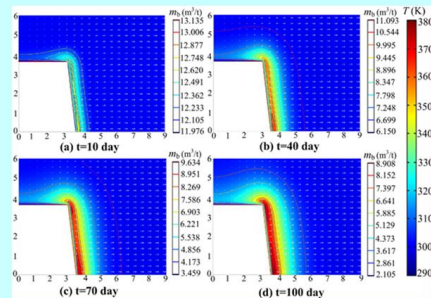


### 摘要

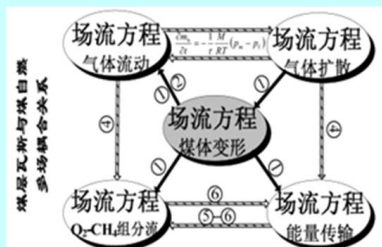
考虑煤层瓦斯抽采引起的漏气与氧化升温特性,建立了煤体变形、基质瓦斯解吸-扩散、裂隙空气-瓦斯混流和煤氧化热能量传输等多场耦合的瓦斯抽采新模型。基于comsol软件数值模拟了煤层瓦斯应力-变形-渗流的多过程行为,研究结果通过已有的研究成果得到验证,证明了模型的有效性和优越性。应用该模型对甲烷脱附扩散时间、煤的渗透性、泄漏压差、煤的氧化反应热、煤的氧化速率等因素对自热敏感性进行了定量分析。

### 模拟图像



不同煤自燃升温时含瓦斯煤自燃升温演化和裂隙气体压力分布 (表面表示温度 T(K), 轮廓线表示裂隙气体压力 p f (x10.5 Pa), 箭头是裂隙气体的流动方向)

### 多场耦合关系及基本控制方程



控制方程

煤变形方程  $G u_{,i} + \frac{G}{1-2\nu} u_{,ii} - \alpha p_{,i} - K \epsilon_{,i} - K \alpha_i T_{,i} + f_i = 0$

气体流动方程  $\rho \frac{d}{dt} \left( \frac{v_i}{\rho} \right) + \rho \frac{d}{dt} \left( \frac{v_i}{\rho} \right) - \frac{d}{dt} \left( \frac{v_i}{\rho} \right) + v_i \left( -\rho \frac{d}{dt} \right) = \frac{1}{\tau} (\rho_s - \rho)$

气体扩散方程  $\frac{d m_0}{dt} = \frac{1}{M} \frac{d}{dt} (\rho_s - \rho)$

O<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>组分流方程  $\frac{d n_i}{dt} + v_i \cdot (-\rho \nabla c_i) + v_i c_i = H_i$

能量传输方程  $\frac{d Q}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{Q}{dt} \right) + \rho c_p \nabla T - v \cdot (\nabla T) = 0 + \theta Q$

交叉耦合方程

① 孔隙度演化模型  $\phi = \alpha - (\alpha - \phi_0) \exp(S_0 - S)$

② 渗透性演化模型  $\frac{k}{k_0} = \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^2 = \left( \frac{\alpha - (\alpha - \phi_0) \exp(S_0 - S)}{\phi_0} \right)^2$

③ 气体状态方程  $\rho = \frac{k}{RT} p$

④ 气体达西渗流方程  $v = -\frac{k}{\mu} \nabla p$

⑤ 煤体耗氧强度  $H_{O_2} = -A c_{O_2} \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right)$

⑥ 煤自燃升温模型  $Q = -Q_0 H_{O_2}$

### 结论

(1) 煤渗透率的演化主要由瓦斯解吸引起的煤基质收缩和煤自燃升温引起的煤膨胀之间的竞争作用所决定。然而,裂隙中多组分气体的流动不仅与煤的渗透率相关,还与瓦斯解吸速度以及气体热膨胀引起的气体自加速效应相关。

(2) 基质瓦斯解吸扩散到煤裂隙中不仅会稀释氧气浓度、惰化自燃煤体,还会阻隔外界空气渗入多孔介质煤中。瓦斯解吸-扩散时间越长,气体渗流速度越大、煤-氧反应越剧烈、煤自燃升温温度越高。而当瓦斯解吸扩散时间足够短时,多孔介质煤中将充满瓦斯,进而削弱煤的氧化能力,甚至阻碍外界空气向煤介质的输运。

(3) 含瓦斯煤自燃升温敏感性分析也表明:漏风压差、煤渗透率和煤-氧反应热越大,煤介质渗透速度越高、煤-氧反应越剧烈和煤自燃升温温度越高。

然而,煤自燃升温氧化速度并不是完全由煤-氧反应速度决定的,而是与煤的活化能和指前因子密切相关。算例中煤氧反应速度越快却对应较低的自燃升温温度,而且由于煤自燃多物理过程耦合作用,气体的速度和煤-氧反应程度变化趋势也很难预测。