




国家重点实验室自主项目

高瓦斯易自燃采场瓦斯抽采与自燃特性的理论与实验研究

杨胜强教授

2015年12月

汇报大纲

- 1 研究的目的是和重要意义
 - 2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究
 - 3 高瓦斯易自燃采场瓦斯抽采相似模化及实验研究
 - 4 立体抽采条件下高瓦斯采空区煤自燃危险性的预测
 - 5 本项目的特色与创新之处
 - 6 研究成果
- 

1 研究目的和重要意义

- 矿井瓦斯和煤自燃是严重威胁煤矿井下安全生产的两大主要灾害，当矿井瓦斯和煤层自燃同时存在时，对于煤矿的生产和人员的安全则构成双重的威胁。
- 高瓦斯易自燃煤层开采过程中，往往在解决瓦斯问题的同时，由于瓦斯抽采及排放，通常会造成漏风加剧，使采空区氧化带扩大，增大了自然发火的危险性，甚至可能引发采空区松散遗煤及破裂煤柱自然发火。同时自燃又成为瓦斯燃烧和爆炸的引火源，严重地影响瓦斯的安全抽采和排放，逐渐演化为矿井生产的重大危险源。反之，在降低采空区自然发火危险性的同时又容易导致工作面瓦斯超限，出现两种安全隐患在治理时顾此失彼的失衡问题。

1 研究目的和重要意义

- 2007年，阳泉某综采工作面，由于开采初期推进速度慢，采空区浮煤氧化时间长，出现自燃，同时在瓦斯抽采初期，老顶没有垮落，高抽巷与工作面采空区之间没有裂隙贯通，抽采效果不好，大量瓦斯涌入到工作面，当碰到自燃浮煤时引起瓦斯燃烧，同时加剧了采空区浮煤的自燃，在难以控制自燃火灾发展的情况下，不得不封闭采面，但在封闭采面的过程中，由于瓦斯涌出较大，再加上已经出现明火，当风量减少到难以稀释瓦斯浓度小于5%以下时，引起了瓦斯爆炸。
- 2004年11月28日铜川矿务局陈家山煤矿特大瓦斯爆炸事故，主要原因就是采空区煤炭自燃，采空区漏风流经煤炭自燃区域时，点燃了浓度在爆炸范围内的瓦斯，导致了特大瓦斯爆炸，造成166人遇难；

- 另外一起典型事故就是吉林通化矿业（集团）公司八宝煤矿于**2013年3月29日晚**发生瓦斯爆炸，造成**36人**死亡；**4月1日**，该矿再次发生瓦斯事故，造成**17人**死亡，主要原因就是采空区煤炭自燃引爆采空区瓦斯；
- 还有**2013年6月3日**重庆砚石台煤矿重大瓦斯爆炸事故直接原因认定为采空区高硫煤自燃引发瓦斯爆炸等等，
- 有文献对中国重点煤矿调研发现，其中**32.3 %**的矿井存在瓦斯与煤自燃双重灾害。因此，在高瓦斯易自燃矿井，煤自燃与瓦斯灾害的耦合综合防治极其重要，与此相关的理论与实验研究就是建立煤-瓦斯-氧-热微循环演化过程的自燃链式反应理论，以及煤自燃和瓦斯爆炸的复合灾害防治技术研究。

1 研究目的和重要意义

- 高瓦斯易自燃采空区的漏风是含瓦斯漏风，所含瓦斯浓度大小在其所流过的不同区域是不相同的，而瓦斯浓度大小对煤体自燃氧化特性及其过程的影响并不十分清楚，为了掌握瓦斯浓度大小对煤体自然氧化特性及其过程的影响，因此，必须研究含不同浓度瓦斯的漏风流对于在低温和自热氧化阶段煤自然氧化影响，特别是在煤的高温氧化阶段和明火阶段，必须研究煤自燃可能带来的瓦斯燃烧和瓦斯爆炸等重大灾害的可能性。

1 研究目的和重要意义

对高瓦斯易自燃煤体的瓦斯和自燃灾害尚需研究：

- 含不同瓦斯浓度风流对煤自燃氧化特性的影响
- 瓦斯抽采参数对煤自燃影响的理论技术研究
- 既有利于进行瓦斯抽采又能有效地预防采空区遗煤自燃的综合技术体系的研究。



1 研究目的和重要意义

意义

- 为解决瓦斯与自燃双重灾害提供一条新的技术途径
- 具有重要的理论价值
- 对保障瓦斯与自燃灾害共存矿井的安全高效开采具有重大现实意义。

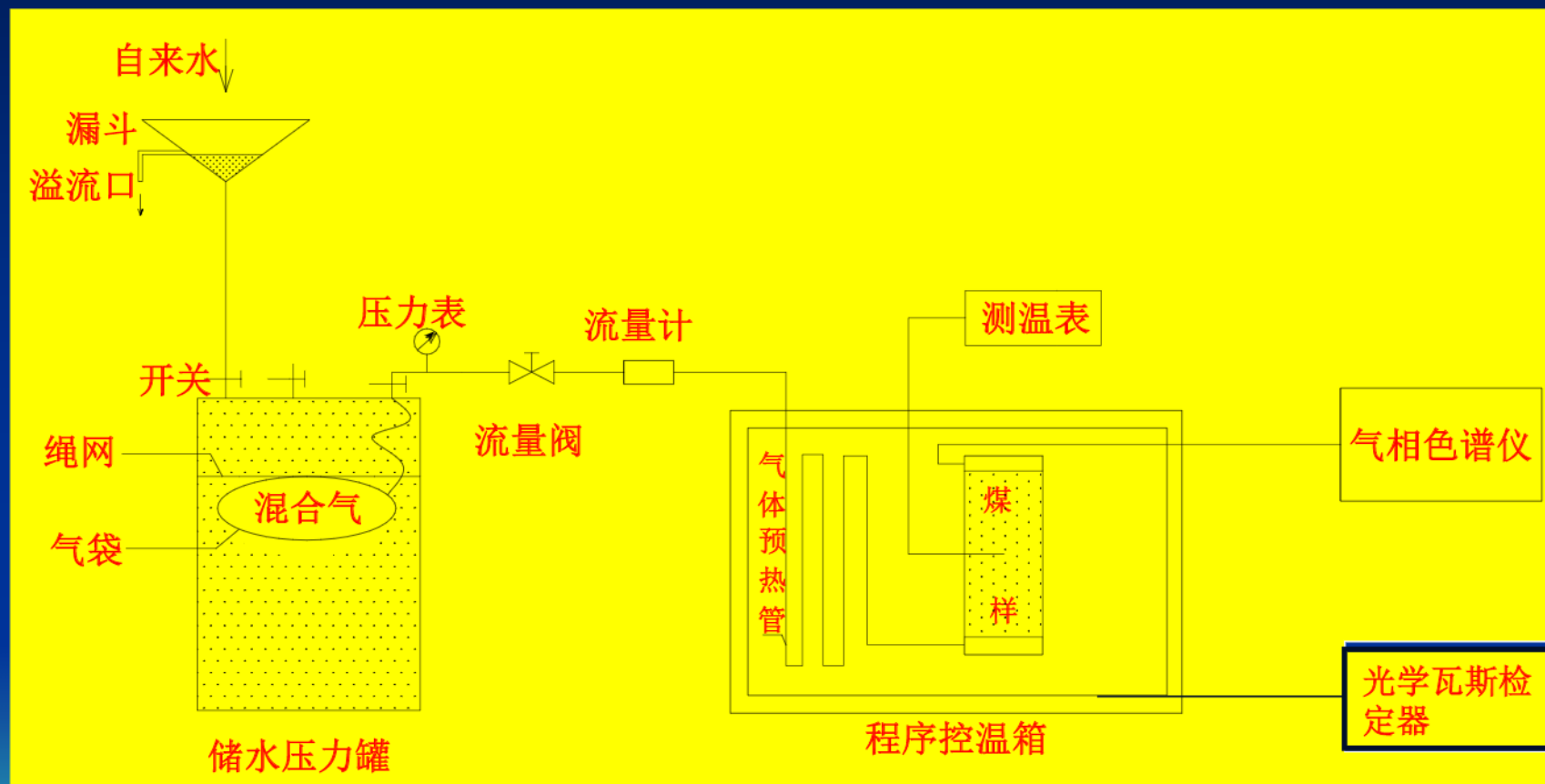


2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

2.1 实验装置要满足的条件

- (1) 三元混合气体的配制要精度高且简单易行；
- (2) 把所配的混合气体以恒定的流量稳定地通入到煤样罐中；
- (3) 实验要安全可靠

2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究



含瓦斯风流条件下煤低温氧化实验装置



2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

2.2 氧化产物生成的初始温度

表 2-4 含瓦斯风流条件下 CO 生成的初始温度

混合气体的成分	21% O ₂ 0% CH ₄	14% O ₂ 0% CH ₄	14% O ₂ 8.7% CH ₄	14% O ₂ 17.04% CH ₄
CO 生成的初始温度(?)	20	30	30	40
混合气体的成分	14% O ₂ 25% CH ₄	8% O ₂ 0% CH ₄	8% O ₂ 17% CH ₄	8% O ₂ 24.9% CH ₄
CO 生成的初始温度(?)	40	50	50	60

表 2-5 含瓦斯风流条件下 C₂H₄ 生成的初始温度

混合气体的成分	21% O ₂ 0% CH ₄	14% O ₂ 0% CH ₄	14% O ₂ 8.7% CH ₄	14% O ₂ 17.04% CH ₄
C ₂ H ₄ 生成的初始温度(?)	160	175	190	190
混合气体的成分	14% O ₂ 25% CH ₄	8% O ₂ 0% CH ₄	8% O ₂ 17% CH ₄	8% O ₂ 24.9% CH ₄
C ₂ H ₄ 生成的初始温度(?)	190	190	205	225

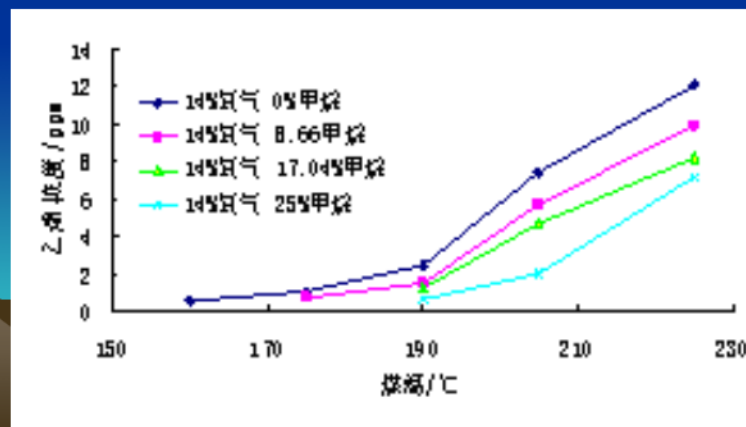
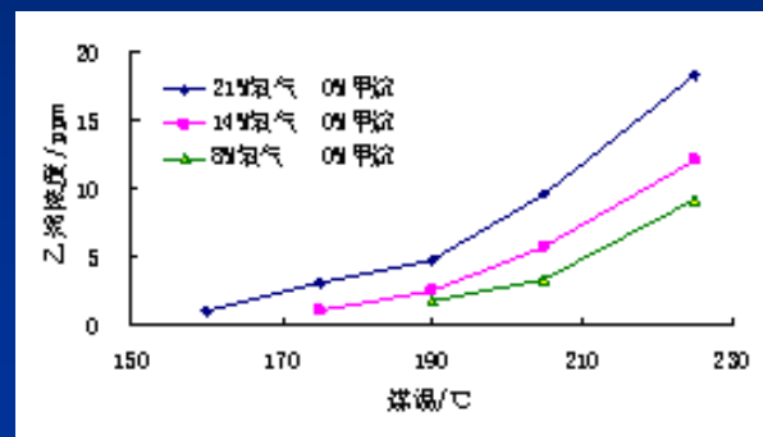
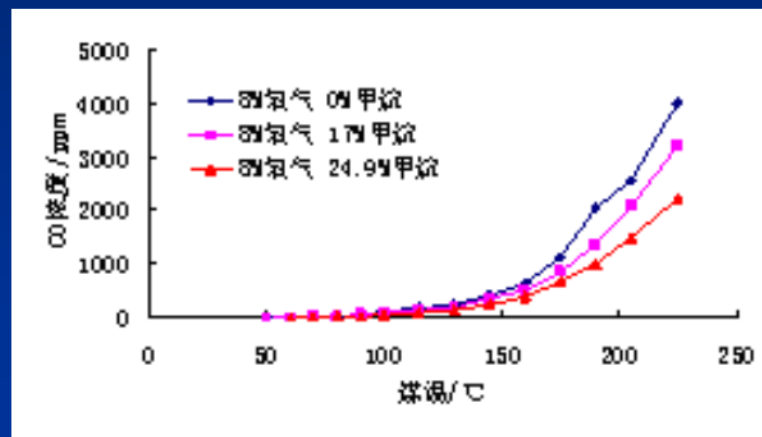
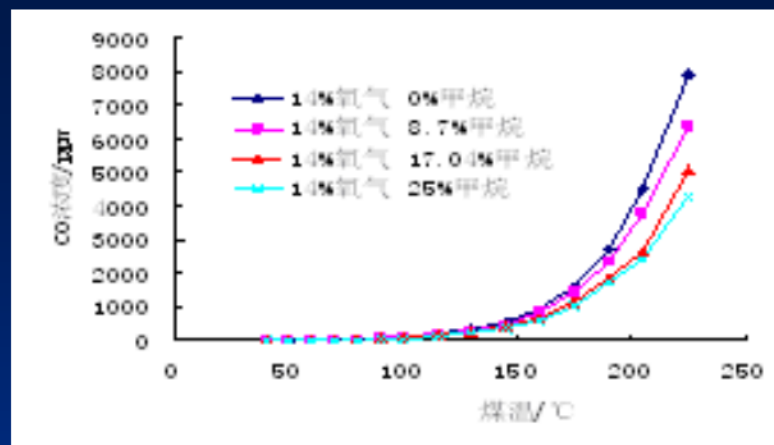
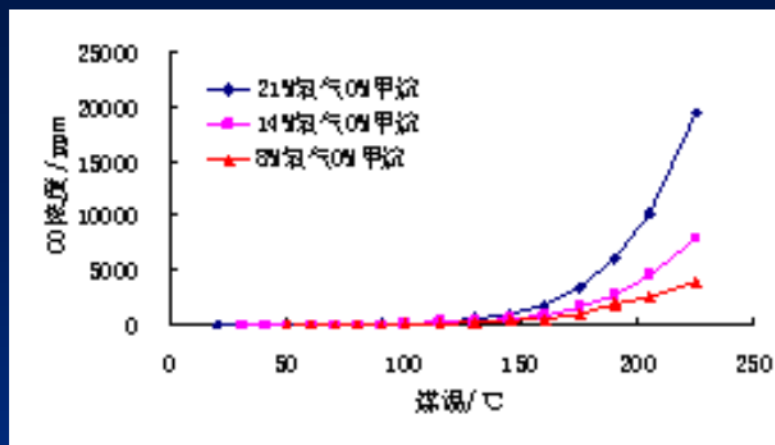


2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

氧化产物生成的初始温度

由于低氧体积分数和高瓦斯体积分数的“滞后效应”导致氧化产物生成的初始温度相对滞后，如果把低氧体积分数和高瓦斯体积分数的气体当作新鲜空气（氧气体积分数为21%，甲烷体积分数为0）考虑，按照新鲜空气条件下煤自燃指标气体生成规律与温度的关系来预测自燃进程，就会造成延迟预报甚至误判，贻误自燃防治的最佳时机。

2.3 氧化产物的生成量





2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

氧化产物的生成量

由图2-8可知，不同的氧体积分数条件下氧化产物CO和C₂H₄的生成量不同，而在相同的氧体积分数条件下，随着甲烷体积分数的变化氧化产物CO和C₂H₄的生成量也有很大不同，低氧体积分数和高瓦斯体积分数对氧化产物CO和C₂H₄的生成量的影响也呈现明显的“滞后效应”，具体表现为：相同温度时，随氧体积分数的降低，CO和C₂H₄的生成量减小，随甲烷体积分数的升高（氧体积分数相同），CO和C₂H₄的生成量减小。



2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

2.4 氧化产物生成规律的理论分析

- (1) 氧和煤的化学反应是整个煤氧化反应的速率控制步骤
- (2) 含瓦斯风流条件下煤对氧的物理吸附

物理吸附覆盖度符合Langmuir吸附公式

$$\theta_i = \frac{b_i p_i}{1 + \sum b_i p_i}$$

O₂、N₂和CH₄三元混合气体同时在煤表面进行物理吸附，Langmuir吸附公式可变为：

$$\theta_{O_2} = \frac{b_{O_2} p_{O_2}}{1 + b_{O_2} p_{O_2} + b_{N_2} p_{N_2} + b_{CH_4} p_{CH_4}} = \frac{b_{O_2} p_{O_2}}{1 + p_{总}(b_{O_2} C_{O_2} + b_{N_2} C_{N_2} + b_{CH_4} C_{CH_4})}$$

其中，煤对瓦斯的吸附能力大于对氮气，氮气大于氧气

2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

2.4 氧化产物生成规律的理论分析

(3) 煤表面的物理吸附氧是化学吸附氧的直接来源

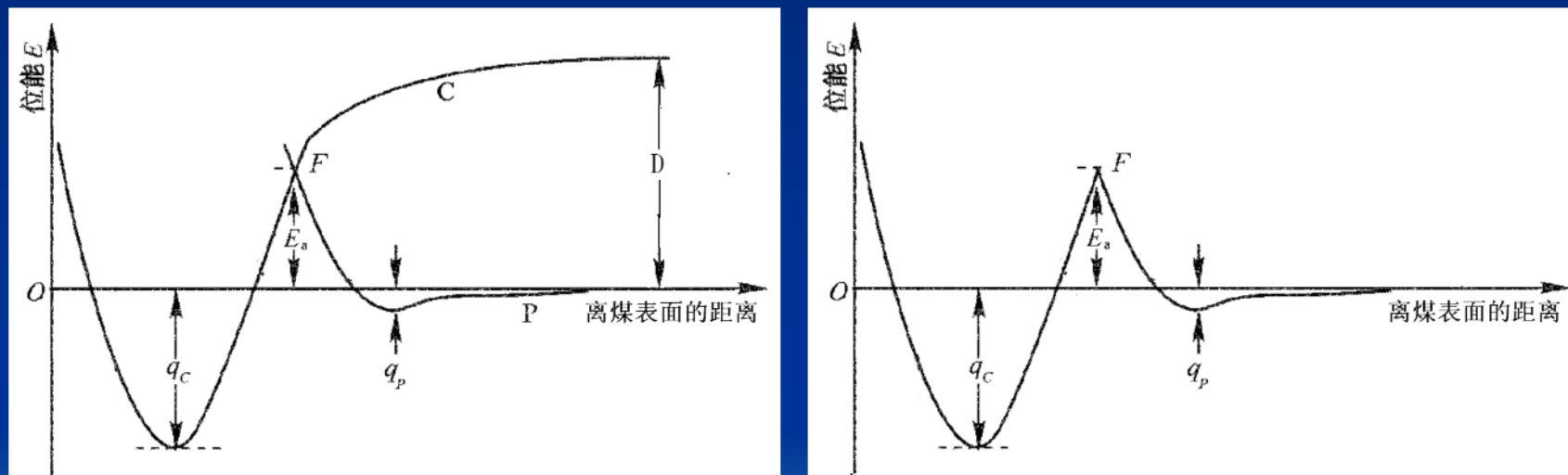


图2-9 氧分子物理吸附和化学吸附的位能曲线



2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

2.4 氧化产物生成规律的理论分析

(4) 煤的化学吸附

$$\theta'_{O_2} = \frac{k_1 \theta_{O_2}}{k_1 \theta_{O_2} + k_{-1}} = \frac{K \theta_{O_2}}{1 + K \theta_{O_2}} = \frac{1}{\frac{1}{K \theta_{O_2}} + 1}$$

(5) 煤氧化学反应

$$V(T) = k \cdot \theta'_{O_2}$$

由此看来，尽管通入煤样中的混合气体的氧体积分数虽然相等，但其和煤样反应的速率却并不相同，随着其中的CH₄含量增加，化学反应速率逐渐降低，CO的生成量随之变小，反之，随着其中的CH₄含量的降低，化学反应速率则逐渐升高，CO的生成量随之变大。而当无甲烷情况下，随着其中的O₂含量降低，化学反应速率逐渐降低，CO的生成量则随之变小。

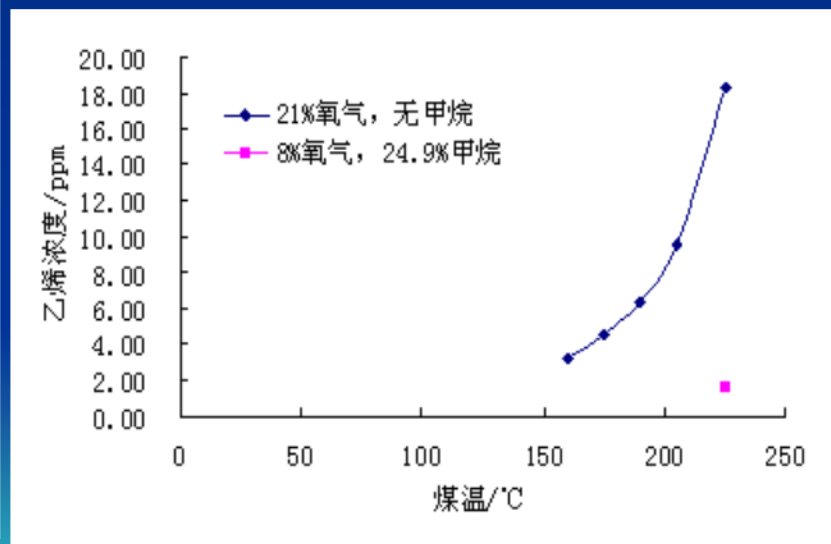
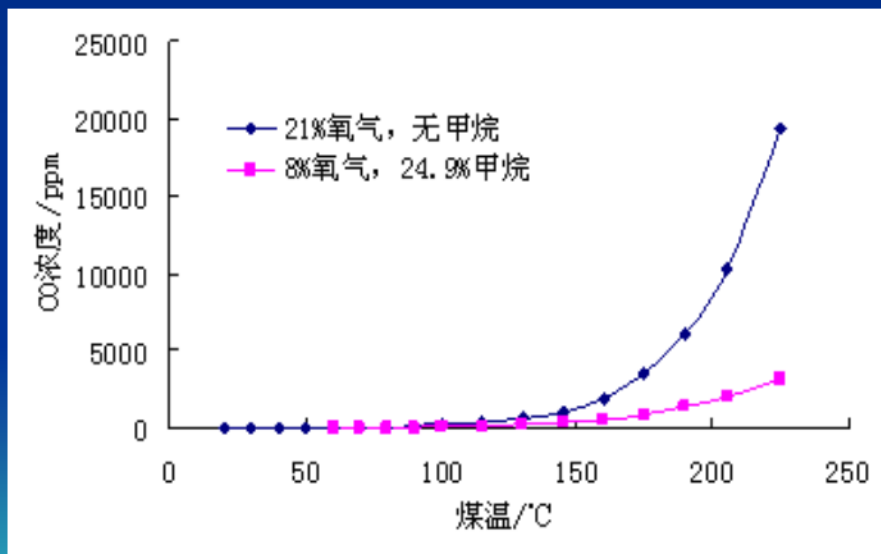


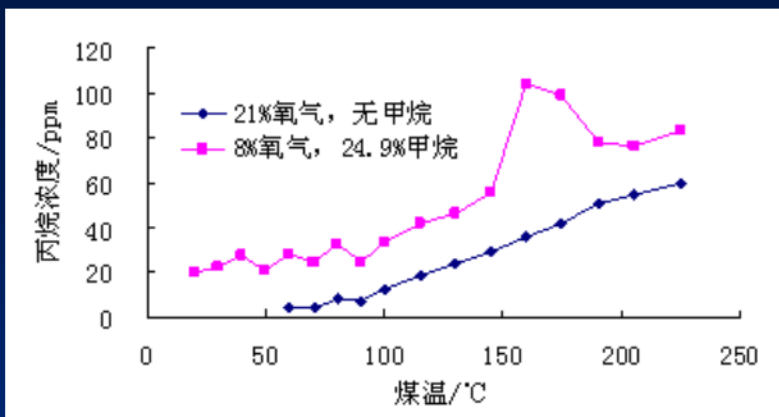
2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

通入反映采空区高温点实际情况的含瓦斯风流进行氧化升温实验，
实验所供气体的浓度

实验是以天池煤矿401综放面为基础进行的，经实测，401综放面高温点的气体浓度分别为氧气=8%，甲烷浓度=24.9%，氮气=67.1%，因此我们以此浓度作为氧化升温实验的供气浓度。

2.5 标志性气体的优选





2.5 标志性气体的优选

如果把含瓦斯风流（低氧体积分数和高瓦斯体积分数）当作新鲜空气考虑，按照新鲜空气条件下煤自燃指标气体生成规律与温度的关系来预测自燃进程，就会造成延迟预报甚至误判，贻误自燃防治的最佳时机。

对于实验一来说，丙烷可以作为指标气体，而从实验二来看，丙烷显然不能满足作为指标气体的条件，因此，丙烷不能作为判断高瓦斯采空区煤自燃的指标气体。

从这里也可看出，在高瓦斯采空区，用新鲜空气代替含瓦斯风流做氧化升温实验来寻找指标气体的方法是不可行的，容易造成对煤自燃危险性的误判。

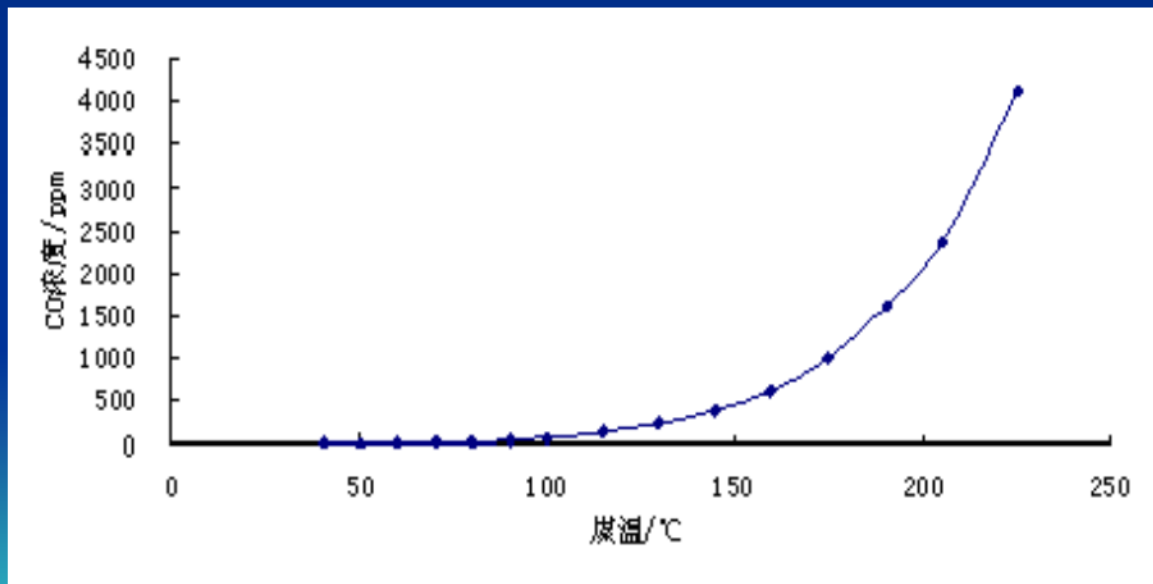


2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

2.6 采空区遗煤自燃氧化程度的判定

1) 采空区临界温度的确定

高温点遗煤的临界温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，当高温点达到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，采空区遗煤由缓慢氧化阶段进入到加速氧化阶段。经实测，在天池煤矿401工作面的采空区高温点温度是其采空区平均温度的1.5倍。那么可以认为，当高温点的温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，采空区的平均环境温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，即采空区可接受的环境温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。





2 含瓦斯风流条件下煤自燃特性的实验研究

2.6 采空区遗煤自燃氧化程度的判定

2) 临界的采空区平均CO浓度

以采空区的平均浓度（经实测，氧气浓度=11%，甲烷浓度=17%）作为所供气体的浓度，进行氧化升温实验，当温度为70 °C时所得到的CO浓度，即为CO气体的判定指标。

当采空区环境温度为70 °C时，CO浓度为59.62 ppm，而此时所对应的高温点的温度为100 °C（临界温度），因此，可接受的CO平均浓度为59.62 ppm以下。

3) C₂H₄标志性气体的判定指标

根据煤样自燃氧化实验，煤样出现C₂H₄气体温度为225 °C，因此，如果在工作面风流中能检测出C₂H₄气体，则说明采空区已存在225°C以上的高温区域，应立即采取措施，治理煤炭自燃。



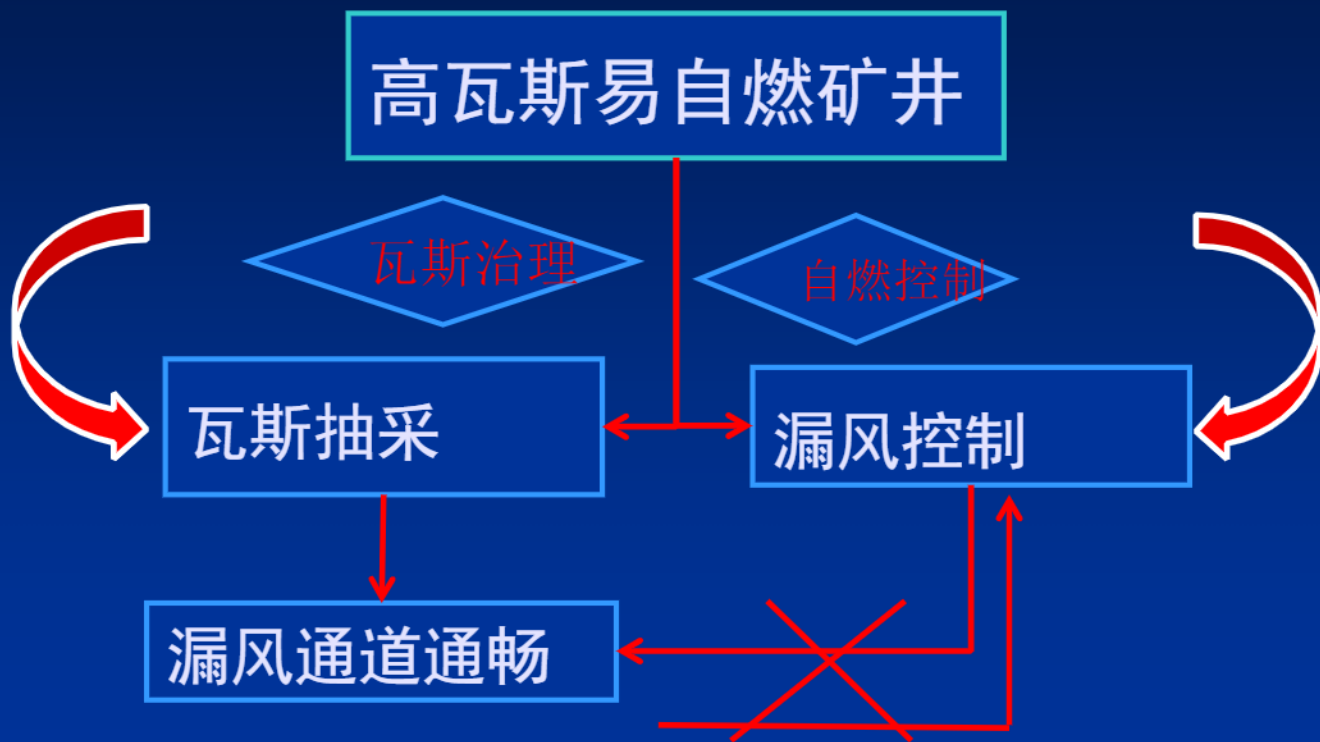
实验结论

(1) 针对高瓦斯采空区漏风流中不仅含有 O_2 、 N_2 ，而且包括一定浓度 CH_4 的实际情况，自己设计制作了含瓦斯风流条件下煤的低温氧化实验系统，开展了多种条件下的低温氧化实验，优选了含瓦斯风流条件下煤自燃早期预报的标志性气体。结果表明，在新鲜空气条件下，某些气体可以作为煤自燃的标志性气体，但在符合现场实际情况的含瓦斯风流条件下，并不符合作为煤自燃标志性气体的条件。因此，选择高瓦斯采空区煤自燃早期预报的标志性气体时，采用含瓦斯风流得出的结果更符合现场实际情况。

(2) 对含瓦斯风流条件下煤的低温氧化实验结果进行分析，结果表明，氧化产物的生成随氧浓度的降低或甲烷浓度的升高总体呈现“滞后效应”：氧化产物生成的初始温度滞后；相同温度时氧化产物的生成量减小，如按照新鲜空气条件下煤自燃指标气体生成规律与温度的关系来预测自燃进程，则会造成预报延迟、甚至误报结果，因此，研究高瓦斯采空区遗煤的自燃特性时，采用含瓦斯风流得出的结果更符合现场实际情况。

3

高瓦斯易自燃采场瓦斯抽采相似模化及实验研究

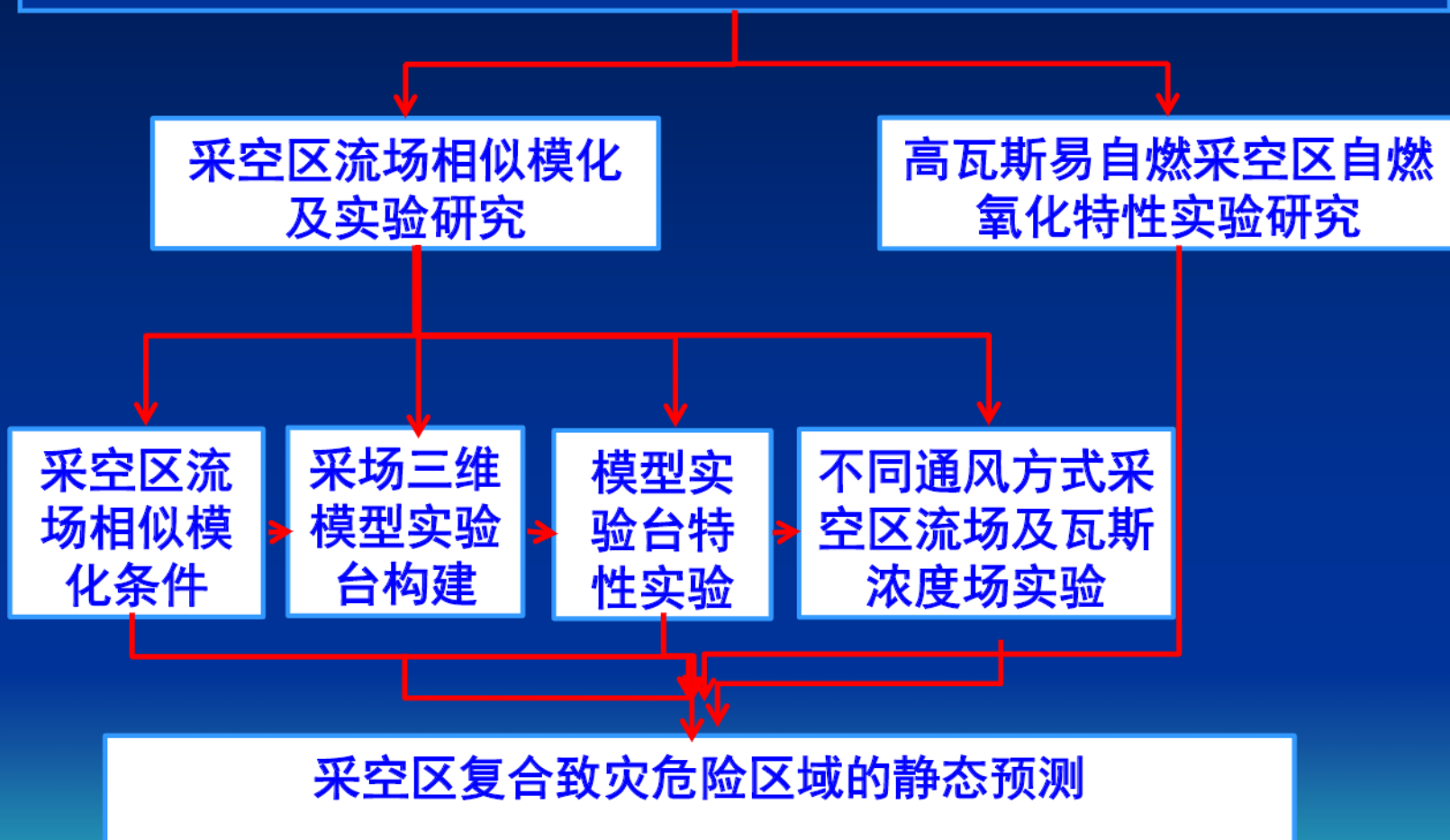


瓦斯治理与自燃控制顾此失彼

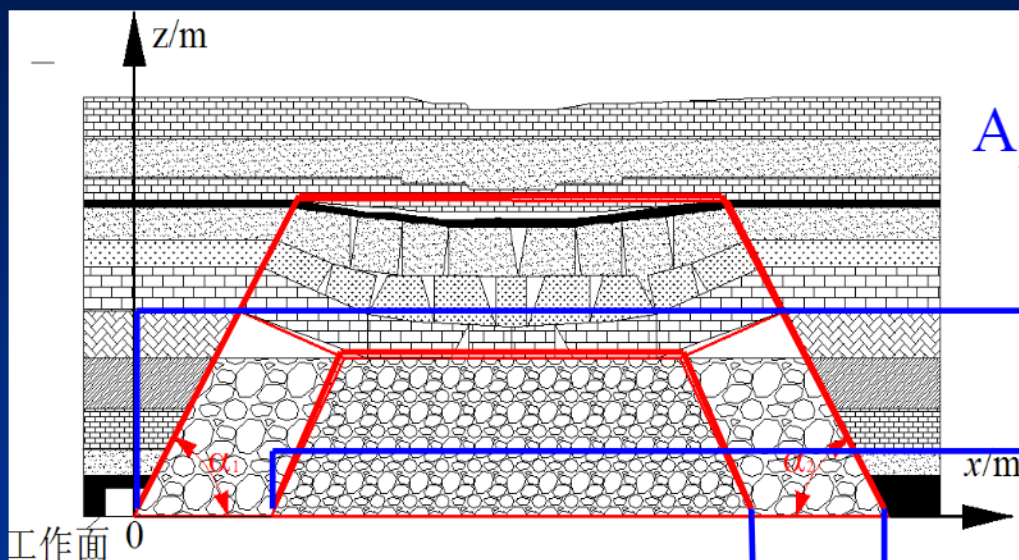
- (1) 建立采场三维模型实验台，并对其进行实验，得出不同通风方式下的采空区漏风流场和瓦斯浓度分布情况；
- (2) 针对高瓦斯易自燃采空区复合致灾条件，利用模糊函数理论，初步建立高瓦斯易自燃采空区复合致灾危险区域预测数学模型。



高瓦斯易自燃煤层瓦斯与自燃复合致灾及危险区域预测



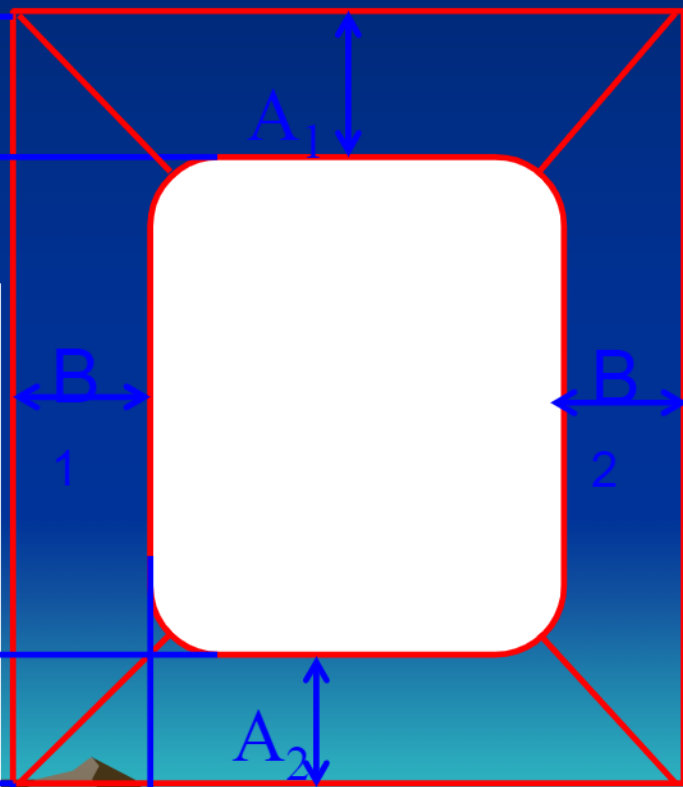
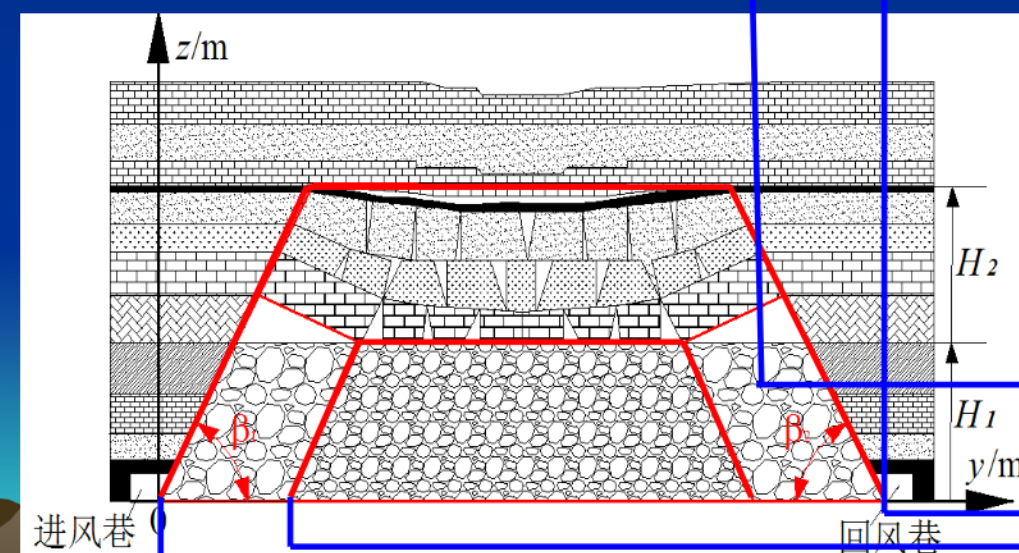
3 采空区气体流动及自然发火控制



$$A_1 \approx (2-3)L_1$$

$$A_2 \approx L_1$$

$$B_1 \approx B_2 = (0.7-0.8)L_0$$



3 采空区气体流动及自然发火控制

连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

动量微分方程：

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\lambda}{\psi} u - \frac{F}{\sqrt{\psi}} |u| u + \frac{\lambda}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}$$

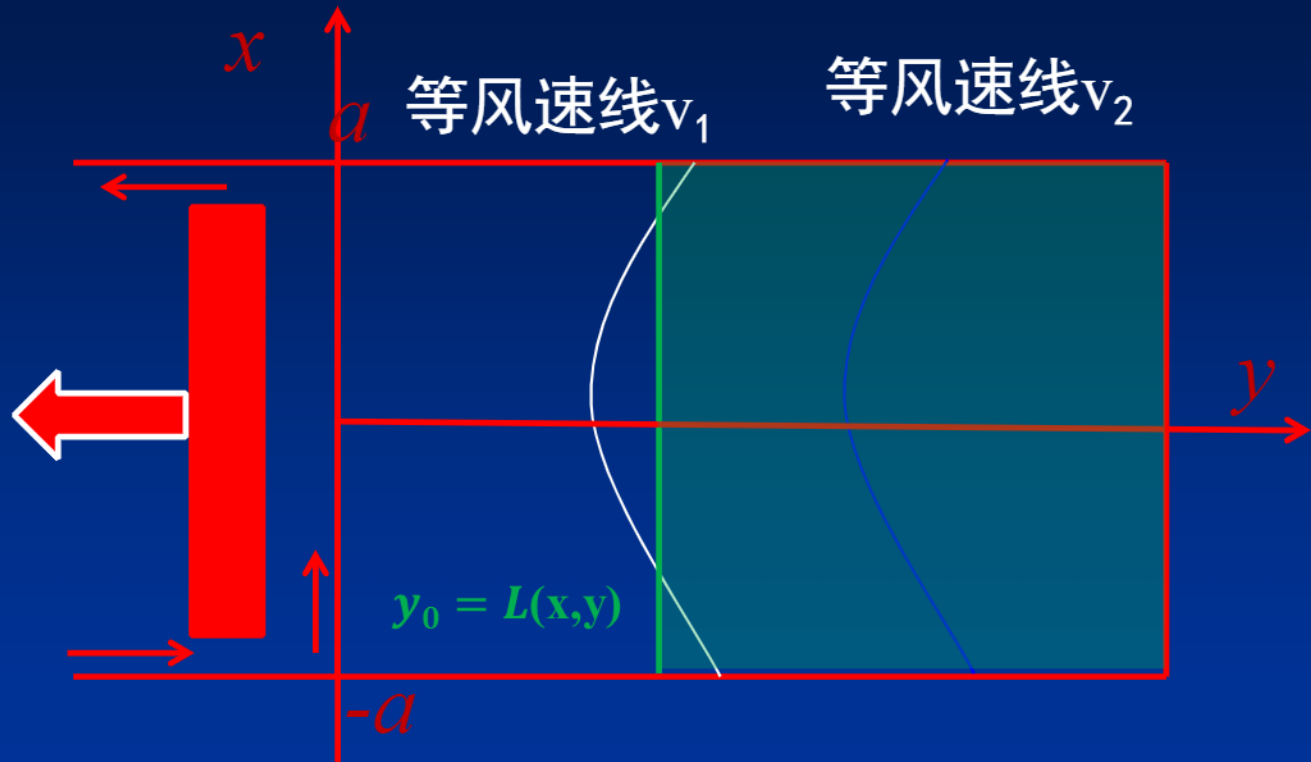
$$\frac{1}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\lambda}{\psi} w - \frac{F}{\sqrt{\psi}} |w| w + \frac{\lambda}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$$

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\lambda}{\psi} v - \frac{F}{\sqrt{\psi}} |v| v + \frac{\lambda}{\varepsilon} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}$$

瓦斯弥散方程：

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \varepsilon D_d \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + \varepsilon F_c$$

3 采空区气体流动及自然发火控制



易自燃风速区

$$D_v = \{(x, y) \mid v_1 \geq v(x, y) \geq v_2, (x, y) \in \Omega\}$$

达到发火期区

$$D_f = \{(x, y) \mid y \geq y_0 = L(x, y), (x, y) \in \Omega\}$$

自然发火区

$$D = D_v \cap D_f$$

3 采空区流场相似模化及实验研究

$$x_r = \frac{(\delta x)_m}{(\delta x)_p} \quad y_r = \frac{(\delta y)_m}{(\delta y)_p} \quad z_r = \frac{(\delta z)_m}{(\delta z)_p} \quad u_r = \frac{(\delta u)_m}{(\delta u)_p}$$

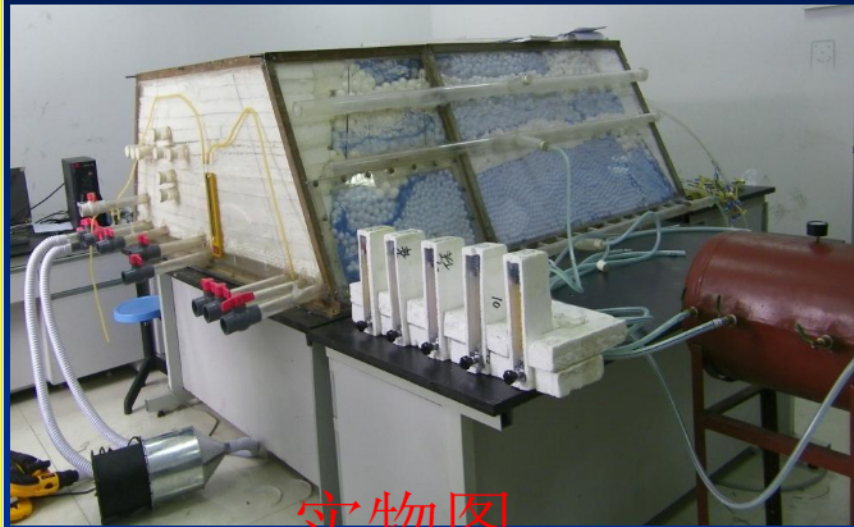
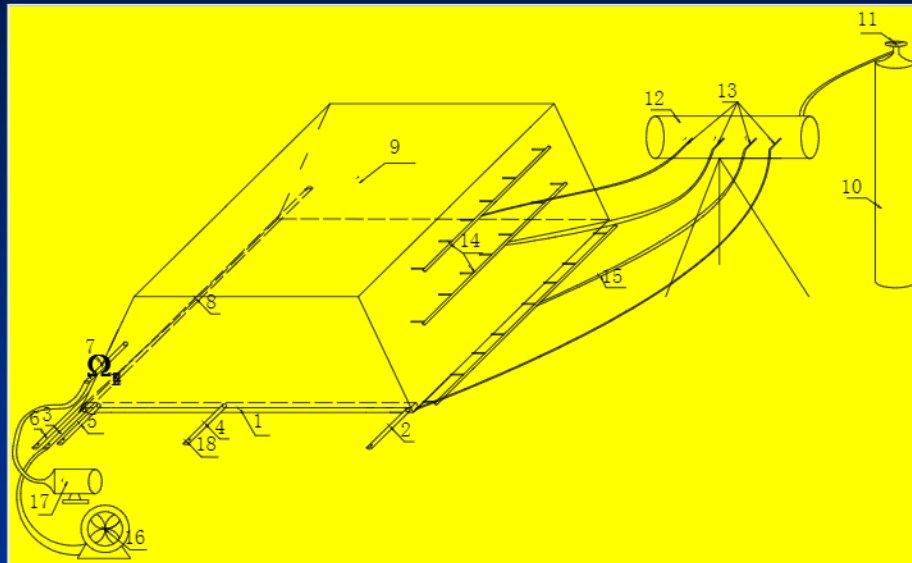
$$v_r = \frac{(\delta v)_m}{(\delta v)_p} \quad w_r = \frac{(\delta w)_m}{(\delta w)_p} \quad \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \quad \lambda_r = \frac{\lambda_m}{\lambda_p}$$

$$D_{nr} = \frac{D_{nm}}{D_{np}} \quad \rho_r = \frac{\rho_m}{\rho_p} \quad P_r = \frac{P_m}{P_p} \quad D_{dr} = \frac{D_{dm}}{D_{dp}}$$

$$F_{cr} = \frac{F_{cm}}{F_{cp}} \quad c_r = \frac{c_m}{c_p} \quad t_r = \frac{(\delta t)_m}{(\delta t)_p}$$

$$\psi_r = \frac{\psi_m}{\psi_p} = \frac{D_{nr}^2 \varepsilon_r^2 (1 - \varepsilon_p)^2}{(1 - \varepsilon_m)^2} = \frac{D_{nr}^2 \varepsilon_r^2 (1/\varepsilon_p - 1)^2}{(1/\varepsilon_p - \varepsilon_r)^2} \quad F_r = \frac{F_m}{F_p} = \frac{1}{\varepsilon_r \sqrt{\varepsilon_r}}$$

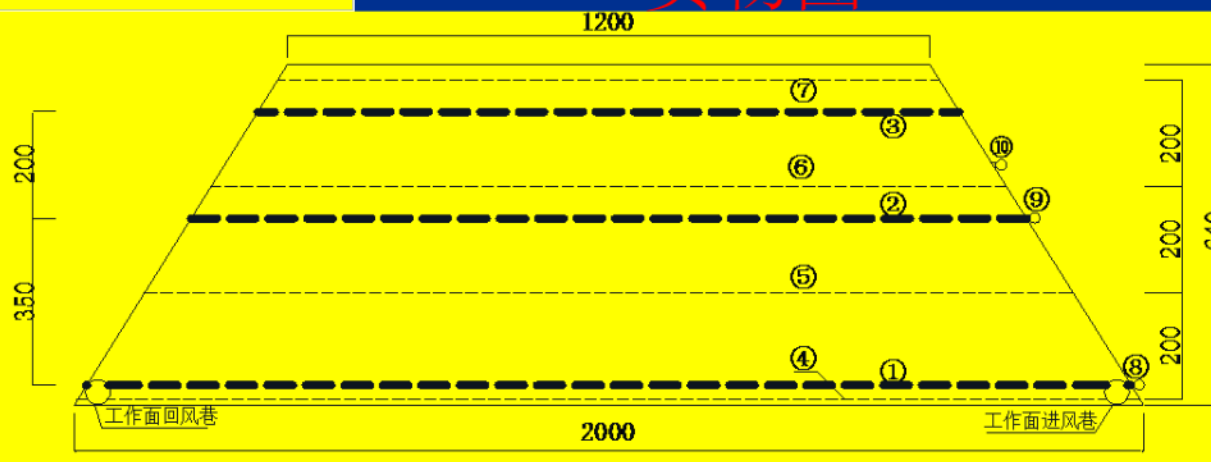
3 采空区流场相似模化及实验研究



实物图

几何示意图

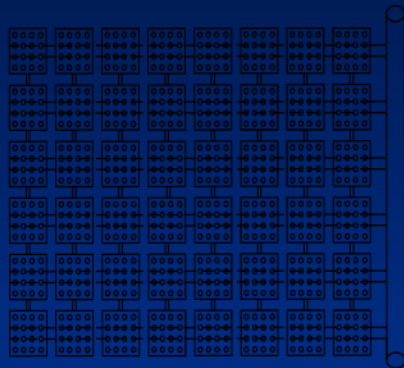
包括模型主体、瓦斯释放系统、风机动力系统、采样系统、测试系统和附属装置5部分



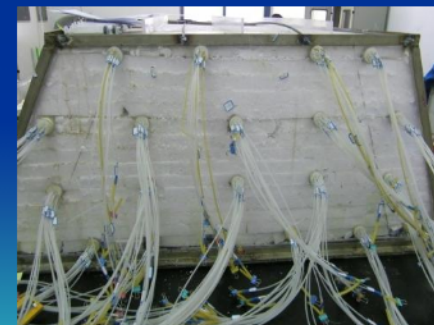
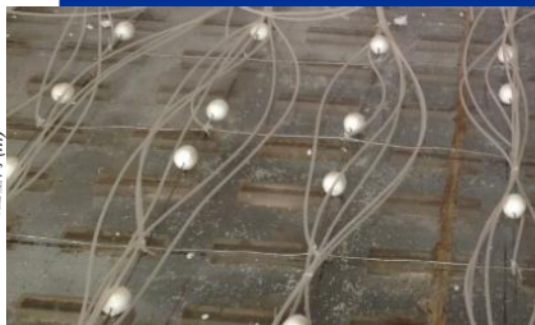
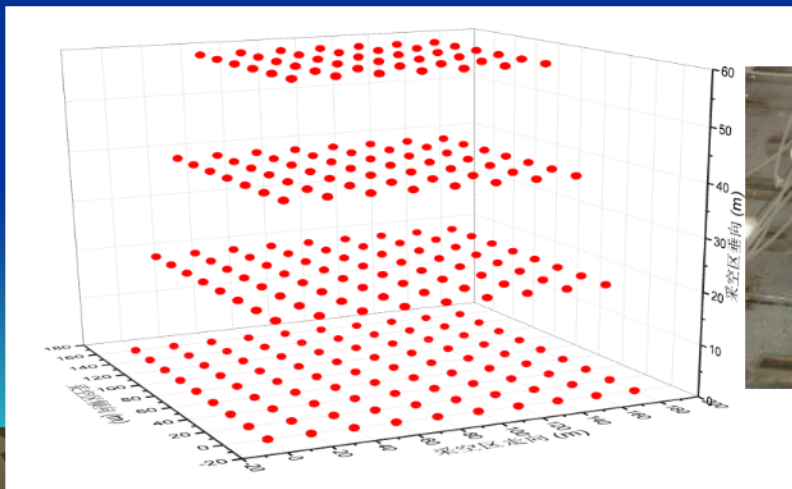
说明：①、②、③：瓦斯释放板； ④、⑤、⑥、⑦：测点网格；
⑧、⑨、⑩：瓦斯释放均压管；

模型走向剖面图

3 采空区流场相似模化及实验研究



瓦斯释放系统



采样和测试系统

3 采空区流场相似模化及实验研究

➤ 模型实验台特性实验

模型模拟实验中，模型与原型相似程度决定了实验还原现场的程度。该模型实验台主要用于分析采空区流场特性，对模型的密封性有较高要求，同时实验采样和参数测定均为人工操作，存在一定的检测周期，实验中必须确保在采样和测压期间内流场具有一定的稳定性，才能保证测量结果相对客观、可靠。

◆ 流场漏风实验

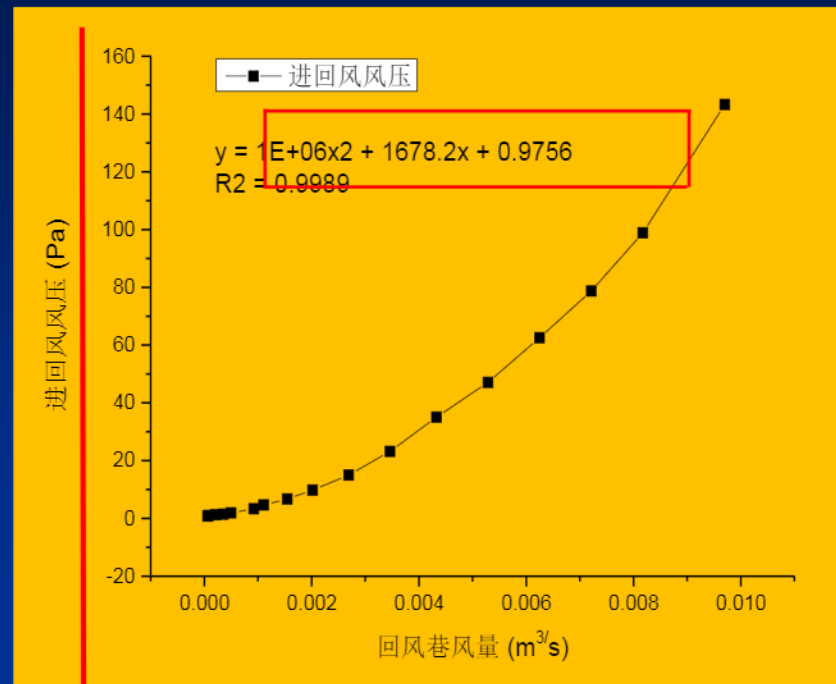
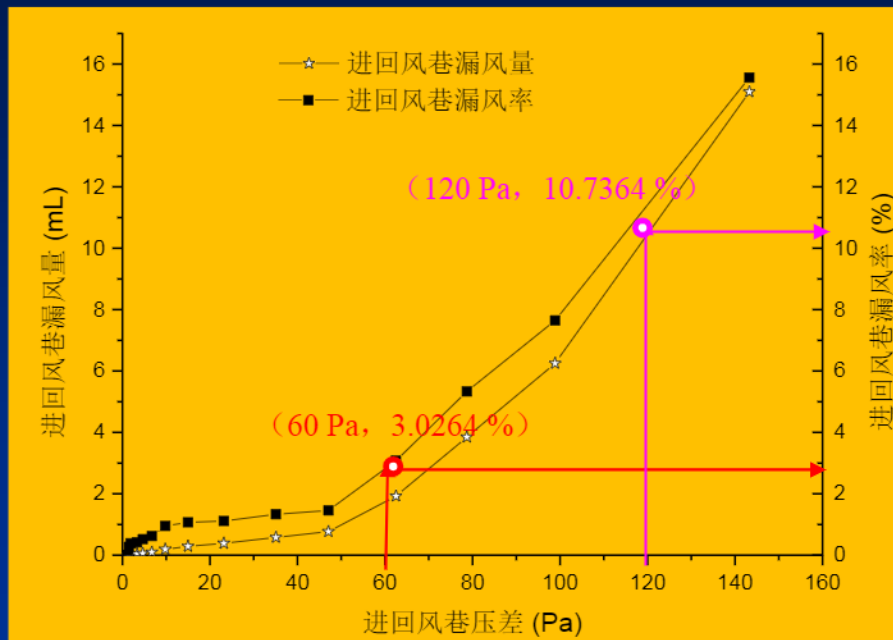
压力场稳定性实验

◆ 瓦斯场稳定性实验

瓦斯静置实验



3 采空区流场相似模化及实验研究

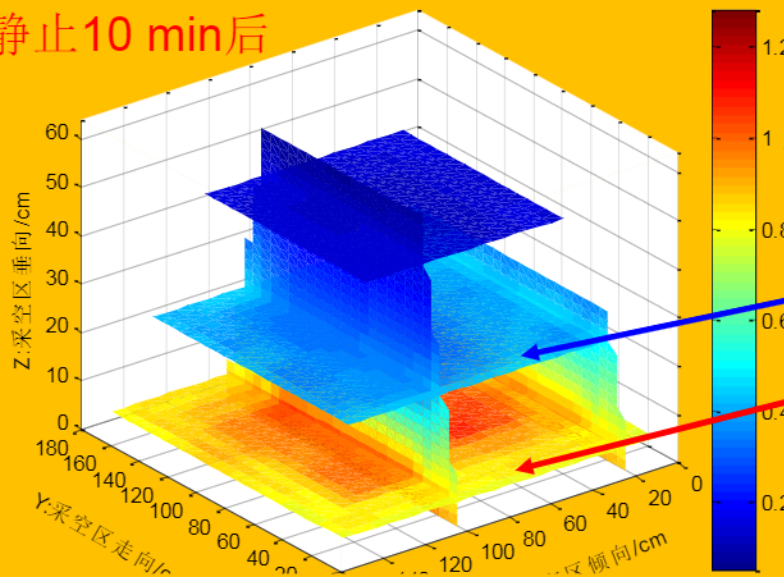


漏风量和漏风率随进回风压差增大变化的规律是一致的，随压差增大，漏风量和漏风率均增加。

采场中气流接近完全紊流流态，进一步证明模型气流流动已经超越层流区，进入过渡区到充分紊流区之间。

3 采空区流场相似模化及实验研究

静止 10 min 后



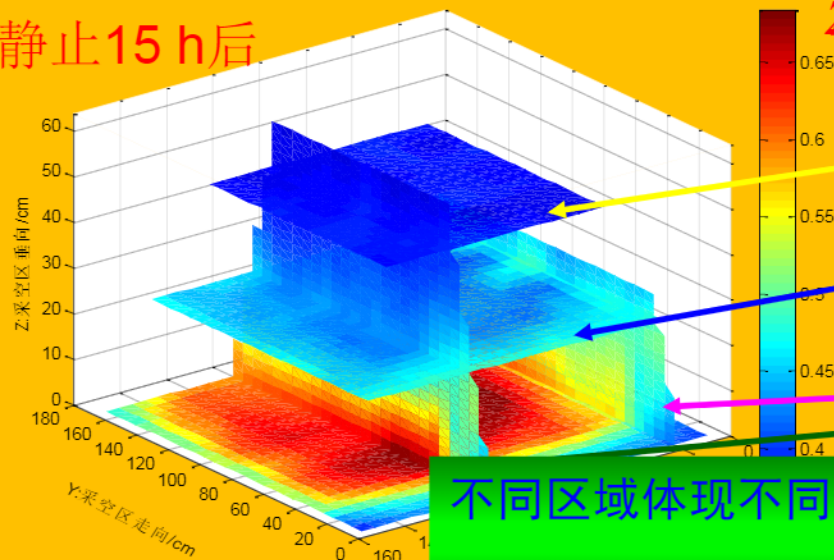
瓦斯升浮力和浓度差 \rightarrow 渗透和扩散

25cm 垂直方向浓度衰减率：“O”圈 < 压实区
瓦斯浓度：分布比较均匀

5cm 渗流率：“O”圈 > 压实区
边界上受冒落带浮瓦斯影响

瓦斯浓度：“O”圈 < 压实区

静止 15 h 后



50cm 瓦斯递增率大致相同

25cm 瓦斯浓度：总体分布比较均匀

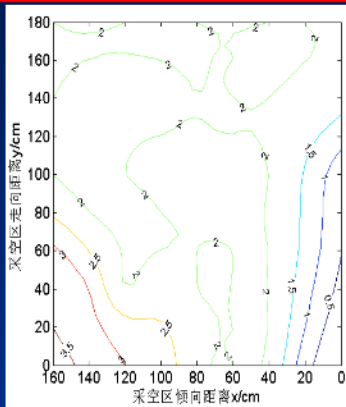
20cm

140cm

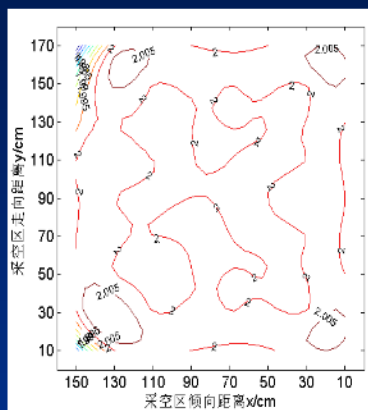
不同区域体现不同特性

各区域渗透特性符合预期规律

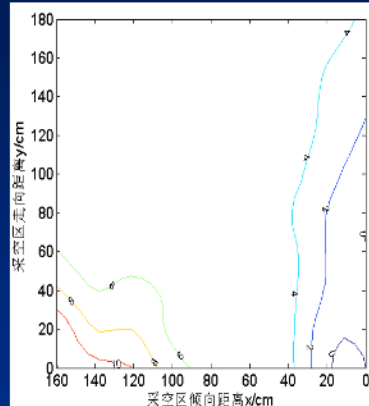
3 采空区流场相似模化及实验研究



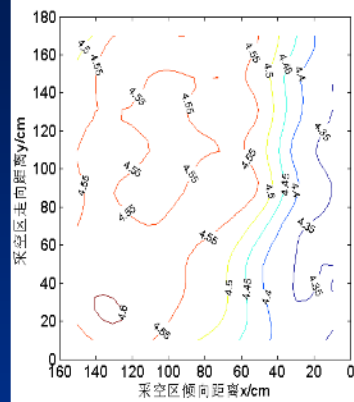
第一分层



第二、三分层



第一分层



第二分层

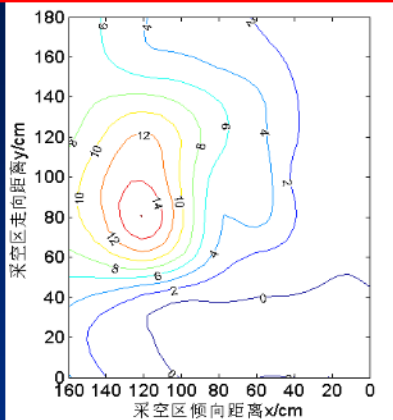
进回风压差40 Pa

U型采空区压力分布

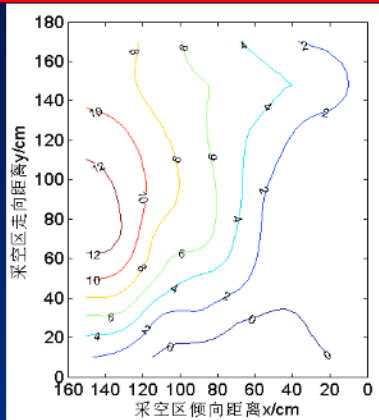
进回风压差100 Pa

- 1) 采空区漏风流进侧和流出侧存在漏风终止点，对流场起决定性作用；
- 2) 相对整个采空区，风流流进动压急剧减小，采空区内分别形成一高压区和低压区；
- 3) 采空区进风侧和回风侧压力梯度明显大于其他区域，与采动覆岩“0”型圈和漏风源与漏风汇的位置有密切联系；
- 4) 进、回风压差超过一定值时，冒落带和裂隙带存在一定程度竖向漏风。

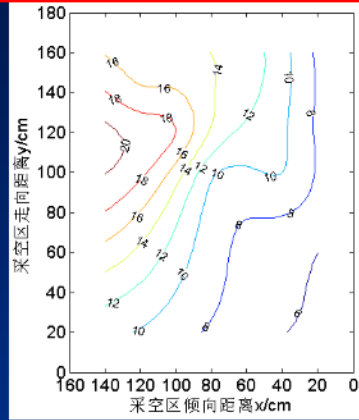
3 采空区流场相似模化及实验研究



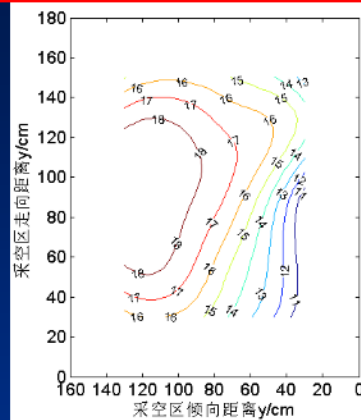
第一分层



第二分层



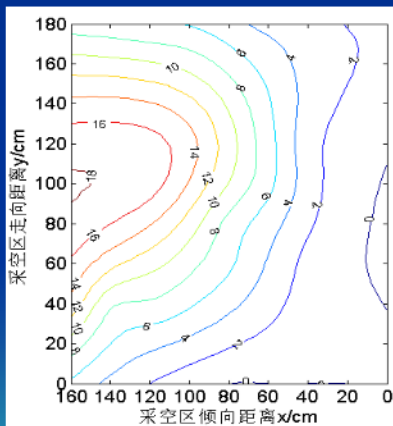
第三分层



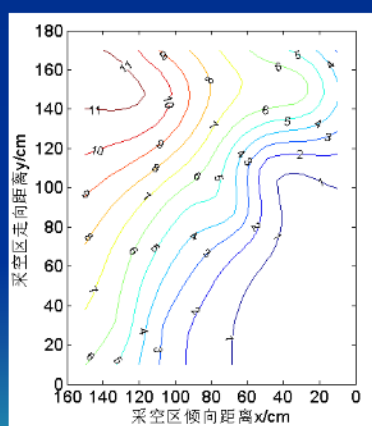
第四分层

进回风压差100 Pa

采空区
瓦斯浓
度分布



第一分层

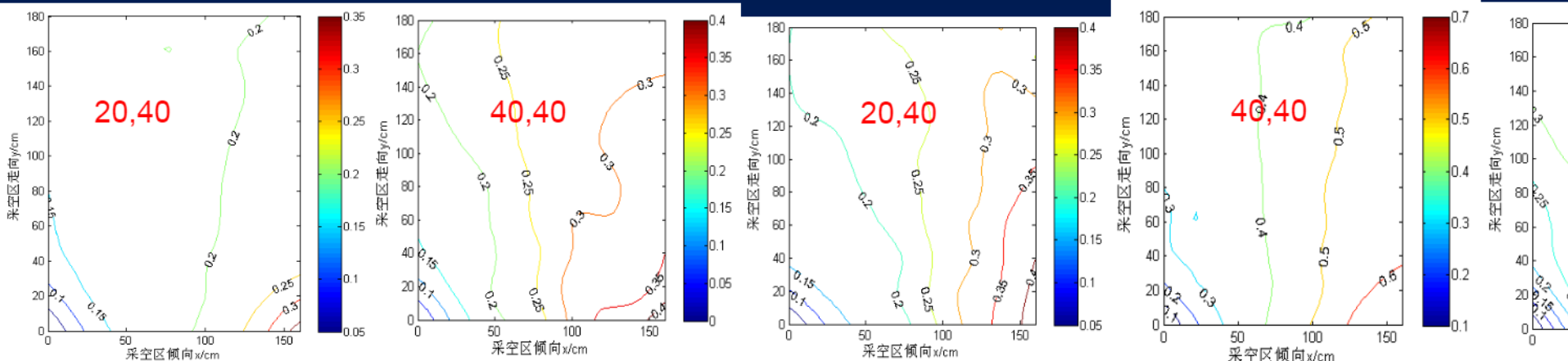


第二分层

进回风压差40 Pa

- 1) 瓦斯浓度梯度与压力梯度一致，漏风形成“漏风自然风压”，进而形成达西渗流和自然风压微循环，瓦斯积聚；
- 2) 压实区内漏风带走瓦斯少于其他区域；
- 3) 氧浓度分布与瓦斯浓度正好相反，高瓦斯易自燃采空区要兼顾瓦斯治理和自燃火灾；
- 4) 邻近层瓦斯涌出使得裂隙带瓦斯浓度较大。

3 采空区流场相似模化及实验研究



U+L步距15 cm

步距35 cm

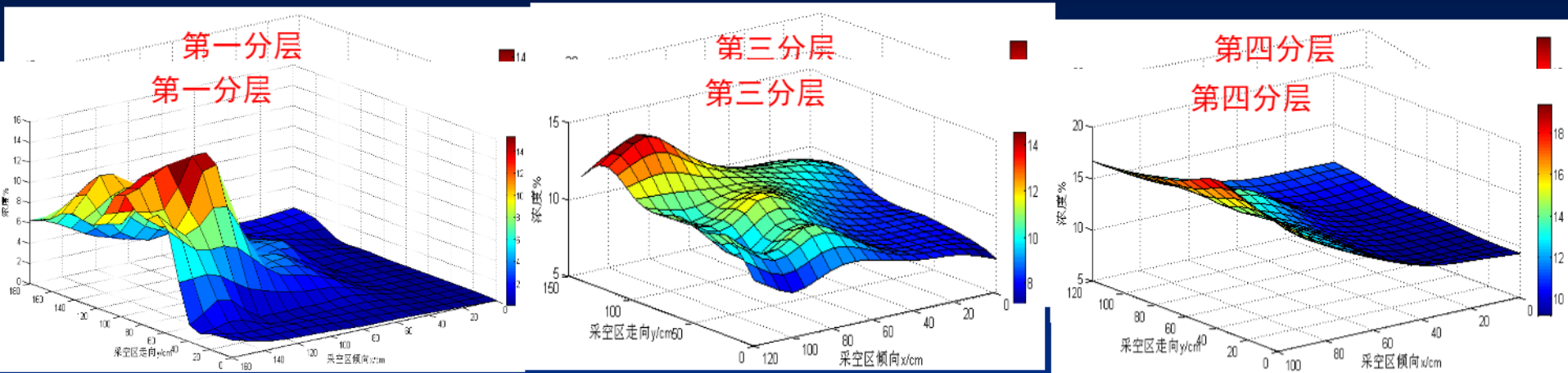
■ 步距相同，压差不同时：

- 压差变化时，对应分层规律几乎是一致的
- 压差增大，压力梯度增大，两侧变项更为明显
- 靠近工作面宽40 cm，高40 cm范围内，压力分布变化较明显
- 在采空区回风侧联络巷处未出现明显低压区，但可以从尾巷较大的瓦斯浓度得以印证

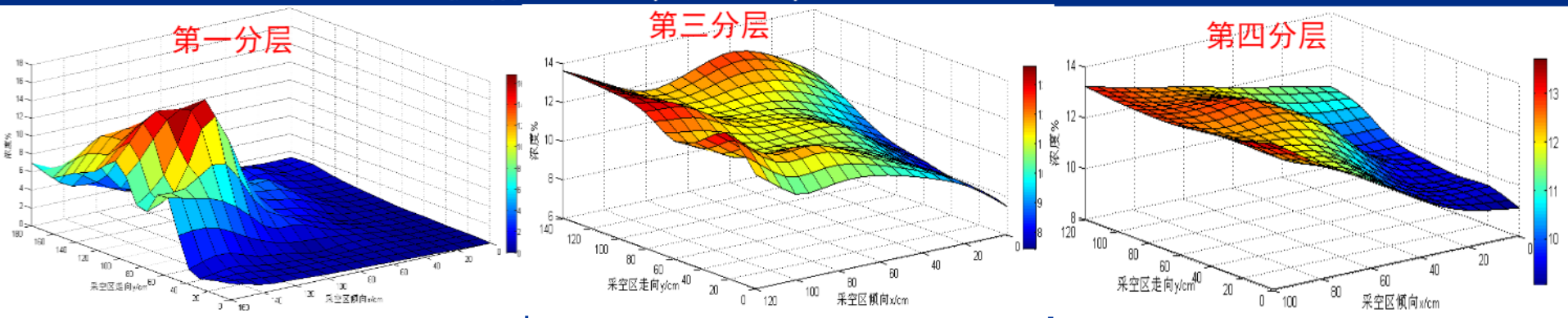
■ 压差相同，步距不同时：

- 步距改变压力分布改变，回风侧影响较进风侧明显；
- 步距越小，漏风流场影响范围越小，步距增大，对上隅角影响能力减弱，中后部影响加强

3 采空区流场相似模化及实验研究



联络步距55cm, 压差20, 40 Pa



联络步距35 cm, 压差20, 40 Pa
联络步距75 cm, 压差20, 40 Pa

结果表明：沿工作面方向从进风侧至回风侧逐渐增大，进风到采空区中部变化不大，中部到上隅角浓度增加较快，沿采空区走向，进风侧瓦斯浓度逐渐升高，回风侧出现高一低一高，在竖直方向逐渐增大，平面上看，采空区中部靠回风侧出现高浓度瓦斯区，采空区四周出现了浓度较低的“0”型分布。

3 采空区流场相似模化及实验研究

■ 步距和压差变化对瓦斯分布的影响

- 步距相同、进回风压差增大时靠近工作面的低浓度瓦斯区有所扩大，上隅角瓦斯浓度略有降低
- 在压差相同、联络巷越靠近上隅角，上隅角瓦斯浓度越大

■ 步距和压差变化对采空区自燃的影响

- 压差相同、步距不同时，联络巷距工作面距离增大，自燃带宽度增大，靠近回风侧，宽度增加越快
- 在步距相同、压差不同时，压差增大对采空区氧化带影响较大，对散热带影响有限



4 立体抽采条件下 高瓦斯采空区煤自燃危险性的预测



4.1 立体抽采体系下工作面采空区漏风规律

采空区漏风分为两部分：

- 1) 浅部漏风：由于进风巷和回风巷、尾巷之间的压差导致的，主要影响的是采空区靠近工作面附近的区域。
 - 2) 深部漏风：由于高抽巷和工作面之间的压差导致的，风流从工作面漏入采空区，到达采空区中深部，进而进入高抽巷抽采系统中，这部分风量随高抽巷抽采负压和进风巷风压之间的压差的增大而增大。
- 浅部漏风的影响，随着采空区深度的加深，采空区内的风流会越来越弱，遗煤低温氧化和物理吸附会使得采空区气体成分中的氧气不断消耗，遗煤的瓦斯涌出也会使氧气浓度会逐渐降低，从而进入窒息带。
- 深部漏风高抽巷抽采瓦斯引起的，不断补充中深部采空区气体中的氧气含量，使得中深部采空区氧气浓度维持在相对较高而且稳定的水平，从而不能形成窒息带。这样高抽巷抽采瓦斯量越大，采空区的窒息带就被高抽巷向采空区深部“抽”得越远。



4.2 高抽巷及尾巷气体成分分析预报工作面采空区自然发火可行性

在以前的现场和科研中，大部分人都将本煤层采空区CO的含量作为对采空区自然发火危险的一个重要指标，能够及时的反映出采空区的自燃情况和危险，但是，在工作面正常回采过程中，采空区的气样难于获取，利用采空区气样成分的变化用于指导现场的采空区自燃防治很困难。

通过分析高抽巷的气体成份来代替本煤层采空区CO分析来预测采空区自然发火。同时由于这部分漏入高抽巷的采空区气体主要来自采空区深部，因此这种方法主要用来预测采空区深部的自然发火危险。

由于尾巷的实际风量来自于采空区，在尾巷中最容易出现一氧化碳升高。因此利用尾巷的气样分析一氧化碳来预测采空区浅部自燃是非常方便而有行之有效的办法。



4.3 高抽巷气体成分分析预报工作面采空区自然发火数学模型

高抽巷内的气体有两部分组成，分别为本煤层采空区瓦斯和邻近层原始瓦斯气体。设高抽巷中单位体积气体中本煤层采空区气体体积为 x ，高抽巷中来自上邻近层原始瓦斯气体体积为 y ，注入氮气遗留下的氮气体积为 z ，因此可得出以下方程。

氧气质量守恒得出

$$x \cdot C_{\text{采空区O}_2} = C_{\text{高抽巷O}_2}$$

瓦斯质量守恒得出

$$x \cdot C_{\text{采空区CH}_4} + y \cdot C_{\text{原始CH}_4} = C_{\text{高抽巷CH}_4}$$

氮气质量守恒得出

$$x \times C_{\text{采空区N}_2} + y \times C_{\text{原始N}_2} + z \times C_{\text{注氮N}_2} = C_{\text{高抽巷N}_2}$$

一氧化碳质量守恒得出

$$x \cdot C_{\text{采空区CO}} = C_{\text{高抽巷CO}}$$



$$x = \frac{C_{\text{高抽巷O}_2}}{C_{\text{采空区O}_2}}$$



$$C_{\text{采空区CO}} = \frac{C_{\text{高抽巷CO}}}{x} = \frac{C_{\text{高抽巷CO}} \cdot C_{\text{采空区O}_2}}{C_{\text{高抽巷O}_2}}$$

4.4 尾巷气体成分分析预报工作面采空区自然发火数学模型

进入尾巷的瓦斯流主要通过破碎煤岩的裂隙及联络巷，这部分进入尾巷的风流也称为尾巷漏风量。尾巷中一般采用风筒送新鲜风稀释尾巷内的瓦斯：

$$C_{\text{尾巷端头CH}_4} \times Q_{\text{尾巷漏风}} = C_{\text{尾巷平均CH}_4} \times Q_{\text{尾巷风量}}$$

对于尾巷一氧化碳来作为采空区浅部自燃的指标，满足以下方程：

$$C_{\text{尾巷端头CO}} \times Q_{\text{尾巷漏风}} = C_{\text{尾巷平均CO}} \times Q_{\text{尾巷风量}}$$

$$C_{\text{尾巷端头CO}} = (C_{\text{尾巷平均CO}} \cdot C_{\text{尾巷端头CH}_4}) / C_{\text{尾巷平均CH}_4}$$

$$C_{\text{尾巷端头C}_2\text{H}_4} = (C_{\text{尾巷平均C}_2\text{H}_4} \cdot C_{\text{尾巷端头CH}_4}) / C_{\text{尾巷平均CH}_4}$$

$$C_{\text{尾巷端头C}_2\text{H}_2} = (C_{\text{尾巷平均C}_2\text{H}_2} \cdot C_{\text{尾巷端头CH}_4}) / C_{\text{尾巷平均CH}_4}$$

$$C_{\text{尾巷端头C}_2\text{H}_6} = (C_{\text{尾巷平均C}_2\text{H}_6} \cdot C_{\text{尾巷端头CH}_4}) / C_{\text{尾巷平均CH}_4}$$

$$C_{\text{尾巷端头C}_3\text{H}_8} = (C_{\text{尾巷平均C}_3\text{H}_8} \cdot C_{\text{尾巷端头CH}_4}) / C_{\text{尾巷平均CH}_4}$$

高抽巷现场实测与理论计算CO浓度值比较

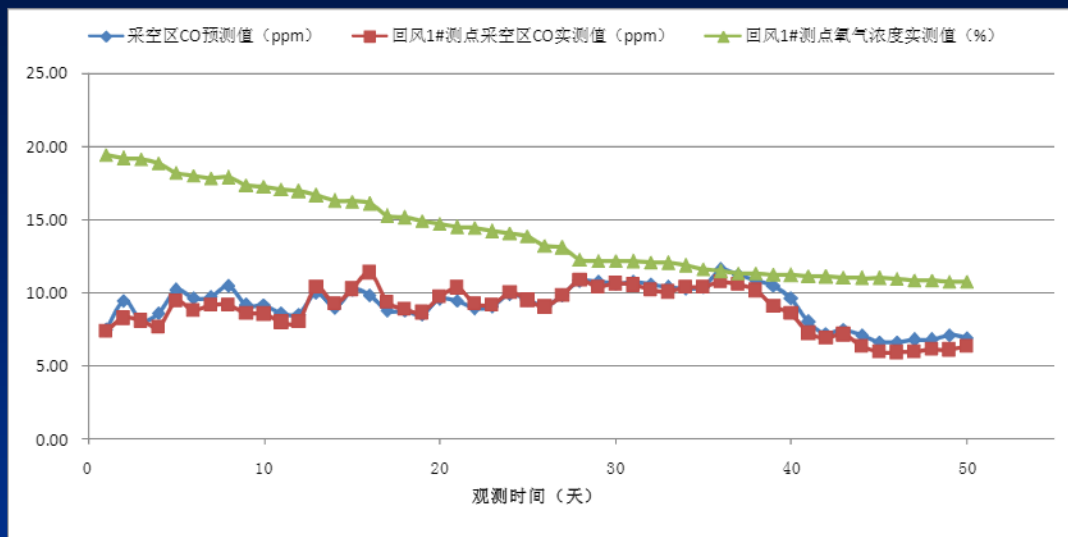


图 4-3 1#测点现场观测和高抽巷理论计算的采空区CO浓度

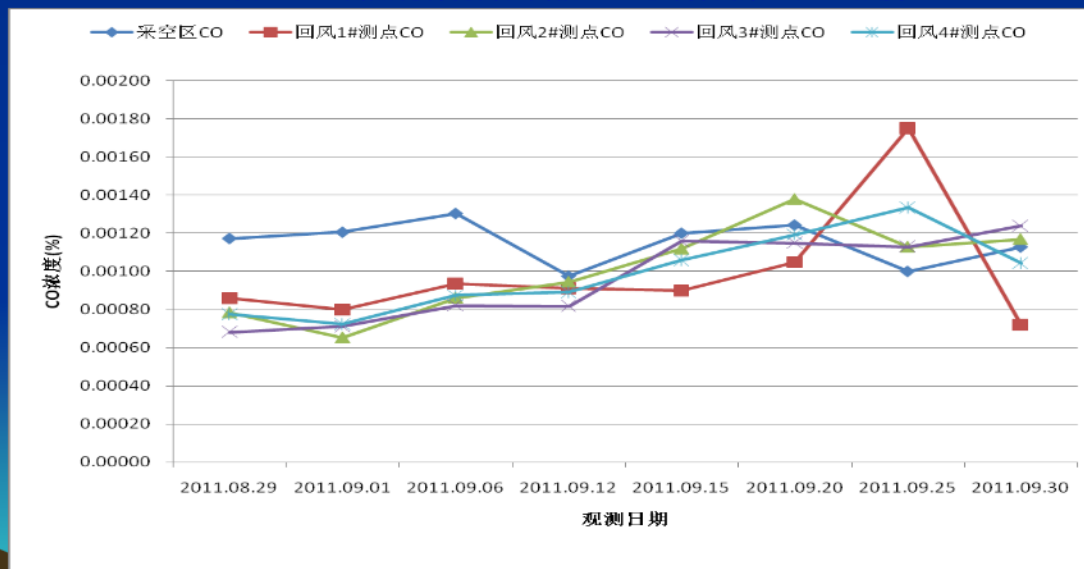


图 4-4 天池煤矿401工作面现场观测和高抽巷理论计算的采空区CO浓度

尾巷现场实测与理论计算CO浓度值比较

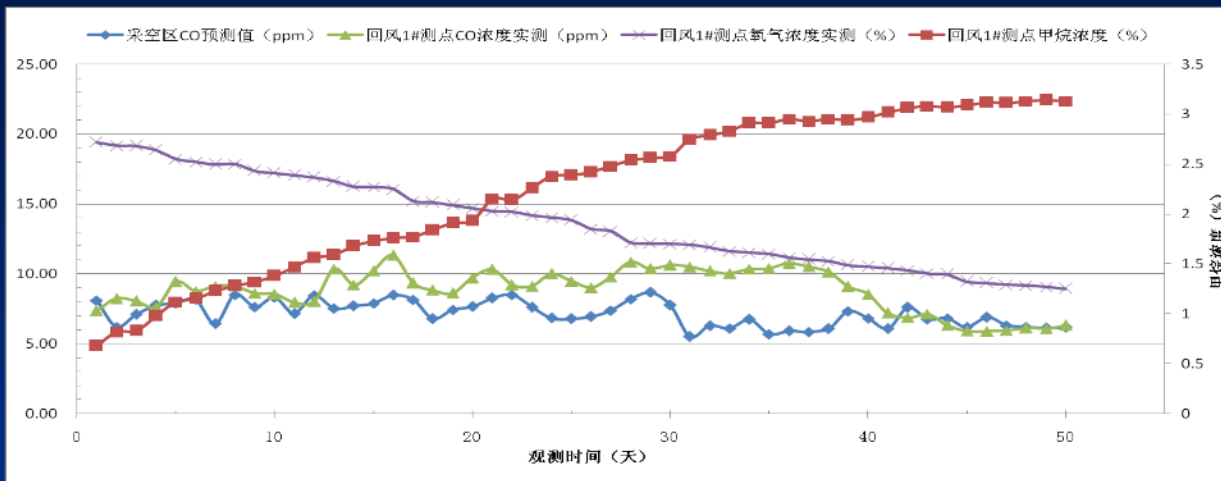


图 4-5 天地煤矿 401 工作面现场观测和尾巷理论计算的采空区 CO 浓度

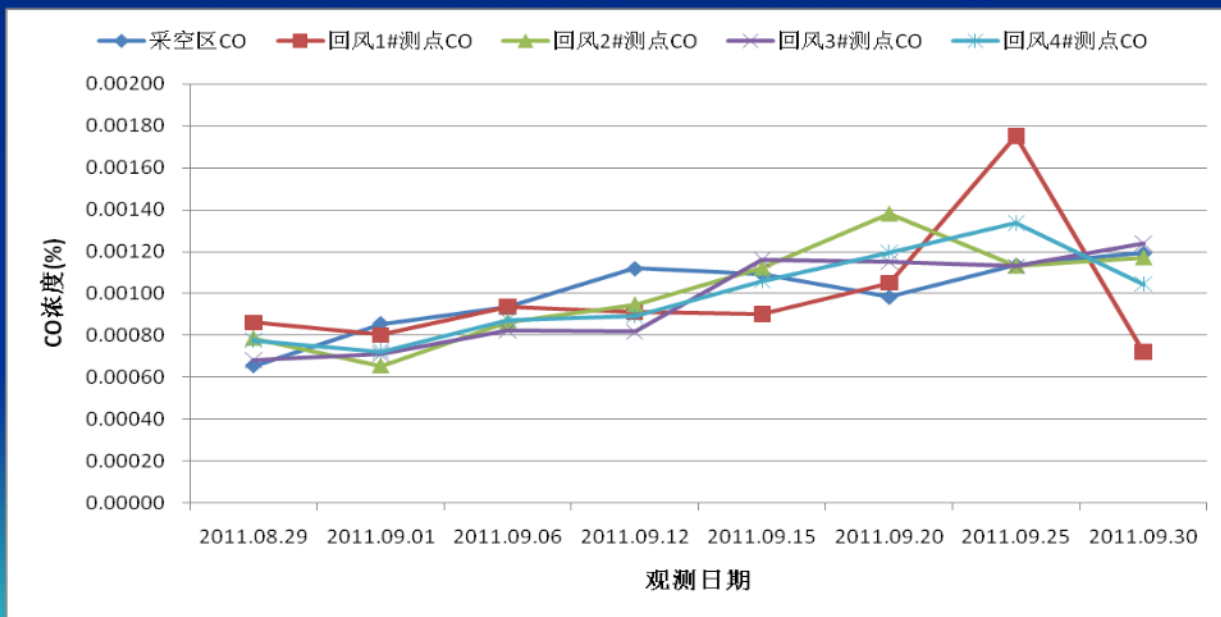


图 4-6 天地煤矿 401 工作面现场观测和尾巷理论计算的采空区 CO 浓度

4.5 现场观测深部采空区遗煤自燃危险性的预测

1) 通过高抽巷CO体积分数预测采空区煤自燃的危险性

根据研究，高温点的临界温度为100 °C

自燃带的平均温度为70 °C

当自燃带的平均温度为70 °C时，此时CO浓度为59.62 ppm，也就是说，当自燃带CO的平均浓度低于59.62 ppm时，采空区高温点处于低温氧化阶段，此时，整个采空区较为安全。

$$C_{\text{goafCO}} = 30\%$$

此时高抽巷中CO体积分数应为18 ppm



作为高瓦斯易自燃矿井，根据该矿井多年开采的教训和经验，将采空区煤自燃的危险性划分为2个阶段：

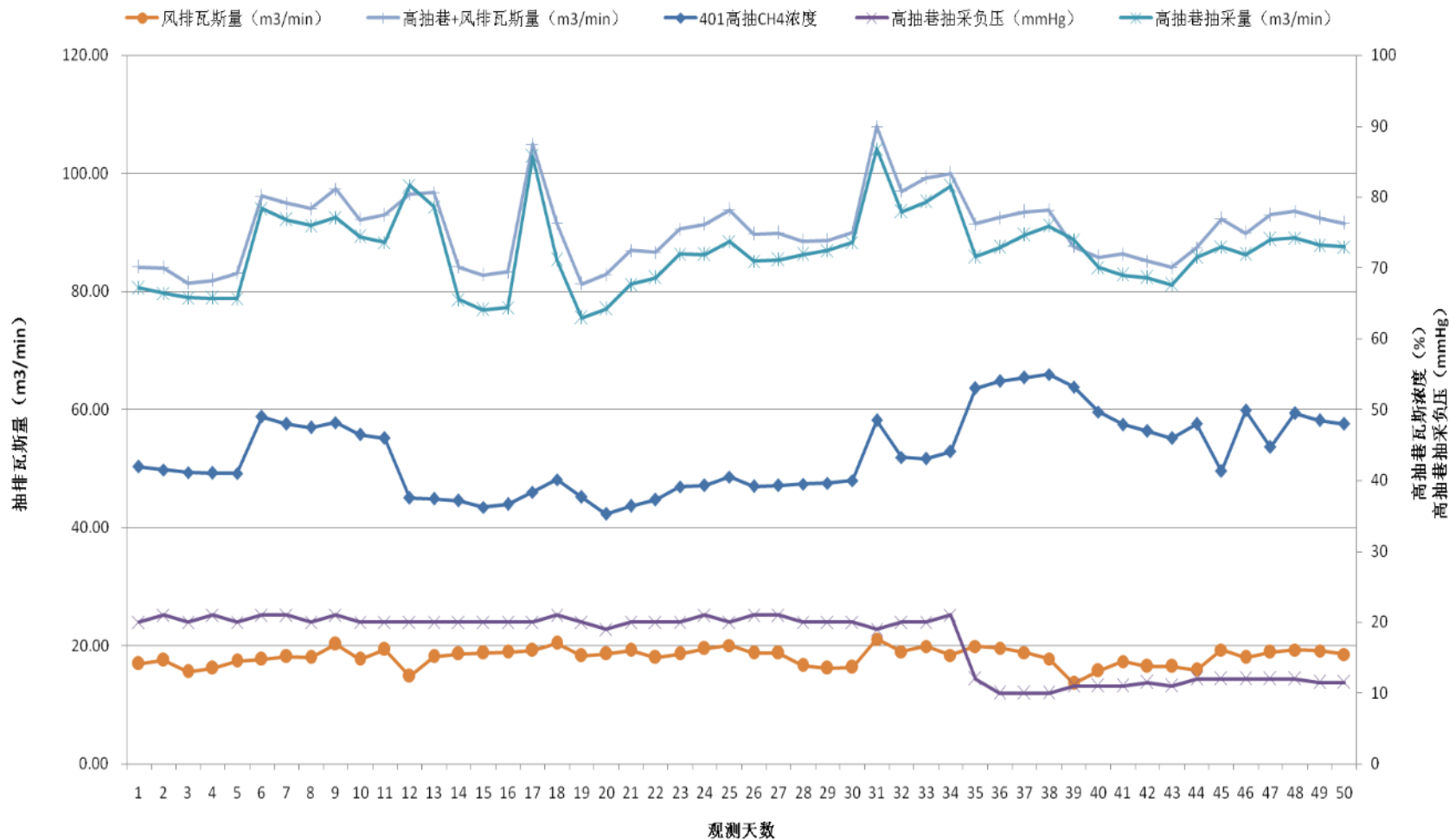
- 1) 低温氧化阶段。当高抽巷中CO体积分数为 <18 ppm时，采空区的遗煤处于低温氧化阶段，在此阶段，整个采空区较为安全。
- 2) 自然发火危险阶段。当高抽巷中CO体积分数为 >18 ppm时，采空区的遗煤处于自然发火危险阶段。

3 通过高抽巷CO体积分数预测采空区煤自燃危险性的参考价值

容易受到高抽巷中气体流量波动变化的影响

具有一定的参考价值，应和其它预测方法联合使用

4.6 高抽巷的抽采准



401工作面瓦斯抽采纯量及高抽巷瓦斯抽采浓度

抽采总量增加，则抽采浓度降低，反之亦然。当抽采量在180m³/min，瓦斯浓度在35%左右，抽采量总量减小，抽采瓦斯浓度增加，在50%左右，抽采瓦斯纯量并没有减少，反而有增加的趋势。

高抽巷的抽采准则

1) 在保证工作面瓦斯浓度不超限的情况下，尽量降低高抽巷的抽放负压从而降低瓦斯抽采量；

2) 高抽巷最优抽采量的确定应该根据当前抽采情况下高抽巷气样的瓦斯浓度和CO浓度的值确定，即：采空区和邻近层瓦斯的涌入使混合气体中氧气浓度不大于10%，即瓦斯抽采浓度不小于50%为标准，高抽巷CO浓度不超过18 ppm。当高抽巷中的瓦斯浓度较高时，说明高抽巷抽采的瓦斯主要来自上邻近层的卸压瓦斯；当高抽巷的瓦斯浓度较低时，说明高抽巷已经抽到来自下部采空区的气体，下部采空区的气体进入高抽巷稀释上邻近层瓦斯，使得瓦斯浓度下降。

5. 本项目的特色与创新之处

- 1) 建立瓦斯与煤自燃耦合实验台，尤其是作为瓦斯和空气混合气体安全输出的易燃易爆气体恒压输出器的设计制造；
- 2) 建立瓦斯抽采条件下采空区漏风的模拟实验系统；
- 3) 含不同瓦斯浓度的风流对煤的低温氧化特性的作用规律；
- 4) 抑制采空区遗煤自燃的瓦斯抽采参数的实验及理论分析；
- 5) 结合高瓦斯易自燃矿井的实际情况，提出既有利于进行瓦斯抽采又能有效地预防采空区遗煤自燃的相关参数和综合技术体系。

6 研究成果

- 1) 申请一项“易燃易爆气体的恒压输出器”的国家发明专利
- 2) 通过瓦斯与煤自燃耦合实验，归纳出含不同瓦斯浓度的风流改变高瓦斯易自燃煤层自燃氧化特性的规律,通过瓦斯抽采条件下的采空区漏风流场模拟实验，通过分别改变抽采方式和抽采参数，研究采空区的漏风流速度场和瓦斯浓度场的分布情况。发表论文20篇以上，其中10篇论文被EI或SCI收录。
- 3) 根据以上实验结果，通过理论分析，研究在瓦斯抽采情况下，抑制采空区遗煤氧化自燃的工作面通风参数及瓦斯抽采参数；提出既有利于进行瓦斯抽采又能有效地预防采空区遗煤自燃的相关参数和综合技术措施；发表论文20篇以上，其中6篇论文被EI或SCI收录。

• 谢 谢！

欢迎提出宝贵意见

