个人简介

王振平　西安科技大学教授，矿业工程博士，主要从事矿井通风安全研究，拥有32年的现场工作经验。享受国务院“政府特殊津贴”、陕西省百人计划特聘专家、山东省泰山产业创新人才、山东省有突出贡献的中青年专家。获国家科技进步二等奖1项、省部级科技进步奖30余项、国家发明专利20余项、山东省发明专利金奖1项。第五届国家安全生产专家组成员，中国煤炭工业安全科学技术学会矿井降温专业委员会副主任委员。

煤自燃监测预警及主动防控

王振平

西安科技大学

2024.08.28

目 录

1 煤自燃火灾主动防控的背景

2 煤自燃火灾主动防控的思路

3 煤自然发火机理和过程

4 煤自燃危险区域判定技术

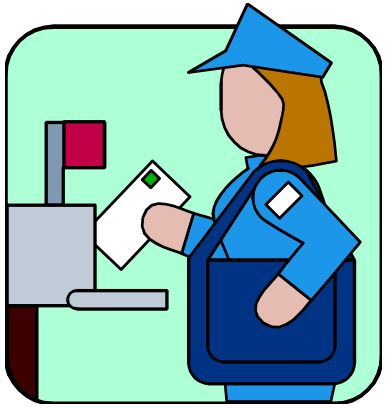
5 煤自燃分级预警和监测

6 煤火灾害主动防控技术和方法

7 典型案例

8 关键技术小结

9 本次规程拟修改的相关条款



1 煤自燃火灾主动防控的背景

矿井火灾的危害

火灾严重威胁着矿井安全生产，烧毁煤炭资源和矿井设备，造成工作面和矿井封闭与停产，还可能引起瓦斯、煤尘、水煤气爆炸或火烟毒化矿井，酿成人员伤亡的重大恶性事故。

- 1996年至98年，阳泉局火灾封闭综放面4个，冻结煤量近400万吨。
- 2002年2月28日，阜新市三道壕煤矿发生火灾事故，21人死亡；
- 2002年5月23日，黑龙江宝清县煤矿发生火灾，17人死亡；
- 2003年10月，白芨沟矿采空区自燃引起瓦斯爆炸，损失2亿多元；
- 2013年3月29日，吉林省八宝煤矿火灾事故，36+17人死亡（4月1日17人）。

1 煤自燃火灾主动防控的背景

煤矿安全生产形势

习近平总书记对安全生产的重要指示

两个至上：人民至上、生命至上

发展决不能以牺牲人的生命为代价，要把“两个至上”作为抓安全生产的根本价值遵循。

两个根本：从根本上消除事故隐患、从根本上解决问题

做好安全生产工作，要从“两个根本” 出发，采取治本措施。

必须杜绝矿井自燃发火，真正做到预防为主，将消除自燃隐患作为工作的出发点，进一步“关口前移”。

2 煤自燃火灾主动防控思路

防治思路

总体思路：由被动治理—主动预防转变

建立预防为主、早期预报、应急处置三道防线

1）位置和范围

2）自燃程度

3）发火时间

4）主动防控措施

3 煤自然发火机理和过程

煤自燃机理和过程

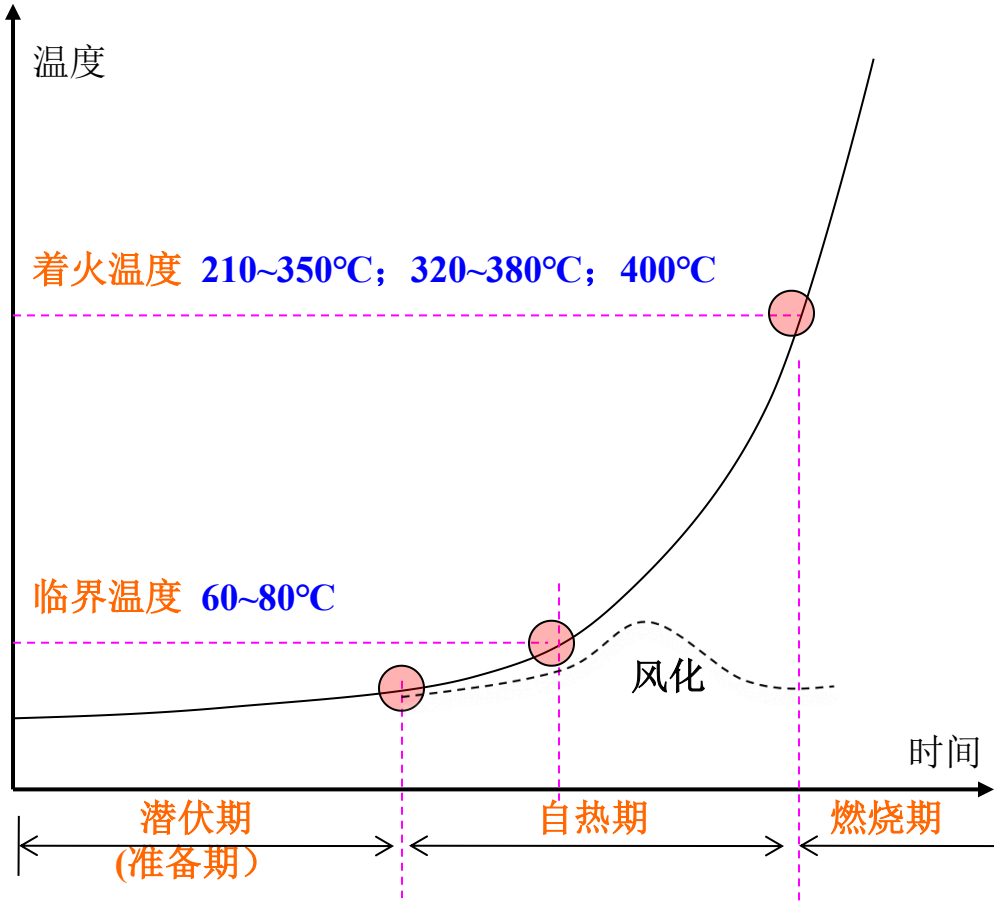
煤自燃是煤和氧自发反应放热所致。

其形成和发展是自发的、缓慢的、动态变化的放热、聚热、升温，最终引起燃烧的过程。

热物理过程；

流体和渗流力学过程；

化学反应过程。



煤氧化自热/自燃过程曲线示意图

3 煤自然发火机理和过程

煤自燃条件

在条件合适时，任何一种煤都会自燃，只是其自燃性强弱不同。

1）松散煤体堆积——煤体；

2）氧气的供给——氧气；

3）存在蓄热环境——温度；

4）达到一定的时间——时间。

一定量的松散煤体、适宜的漏风供氧、良好的蓄热环境，最易发生煤层自燃。

3 煤自然发火机理和过程

煤自燃影响因素

内在因素	外在因素	开采因素
1）变质程度	1）浮煤堆积量	1）煤层地质条件
2）矿物质	2）初始煤温	2）开拓方式
3）水份	3）漏风强度	3）开采方式
4）灰份	4）氧气浓度	4）通风方式
5）煤岩成份	5）粒度	5）采空区管理

容易自燃（中低变质煤）：褐煤、不粘煤、弱粘煤、长焰煤、气煤；发火期<3个月；

自燃（中变质煤）：肥煤、焦煤；发火期<3至6个月；

不易自燃（高变质煤）：瘦煤、贫煤、无烟煤；发火期>6个月。

3 煤自然发火机理和过程

煤自燃影响因素

第二百六十条　煤的自燃倾向性分为容易自燃、自燃、不易自燃３类。新设计矿井应当将所有煤层的自燃倾向性鉴定结果报省级煤炭行业管理部门及省级煤矿安全监察机构。 生产矿井延深新水平时，必须对所有煤层的自燃倾向性进行鉴定。 开采容易自燃和自燃煤层的矿井，必须编制矿井防灭火专项设计，采取综合预防煤层自然发火的措施。

“规程” 没有考虑煤自燃的外在因素和开采因素，没有对开采不易自燃煤层矿井的防灭火措施作出规定。

3 煤自然发火机理和过程

煤火灾害特点

1）火源隐蔽，不易寻找和发现。

2）贫氧、自发氧化放热；与温度和氧浓度成正比。

3）内部燃烧、立体分布、蓄热量大；散热环境差，降低能量难，易复燃。

4）火区呼吸作用和温差热循环供氧；窒息周期长。

5）产生有毒有害气体。

位置隐蔽

贫氧氧化

自发产热

潜伏期长

3 煤自然发火机理和过程

矿井煤火灾害特点

1）密闭墙、风门周边煤体破碎，漏风供氧好，易自燃；

2）巷道顶煤松散最易发生自燃；

3）采空区“两道两线”丢煤量大，漏风通道畅，易自燃；

4）顺槽锚网支护强度大，采空区两端不易跨落，漏风严重；

5）邻近采空区二次/多次氧化，自燃危险性大；

6）采空区瓦斯抽采增大漏风；

7）瓦斯燃烧和爆炸促进煤层火灾的发展。

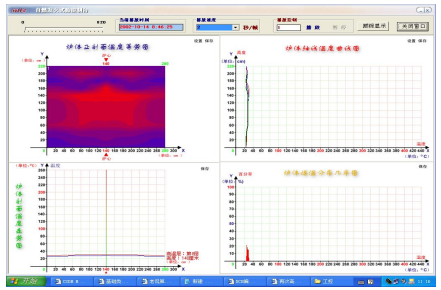
3 煤自然发火机理和过程

煤自然发火全过程实验模拟

研究分析松散煤体自然升温、绝氧降温与供风复燃的特性及规律

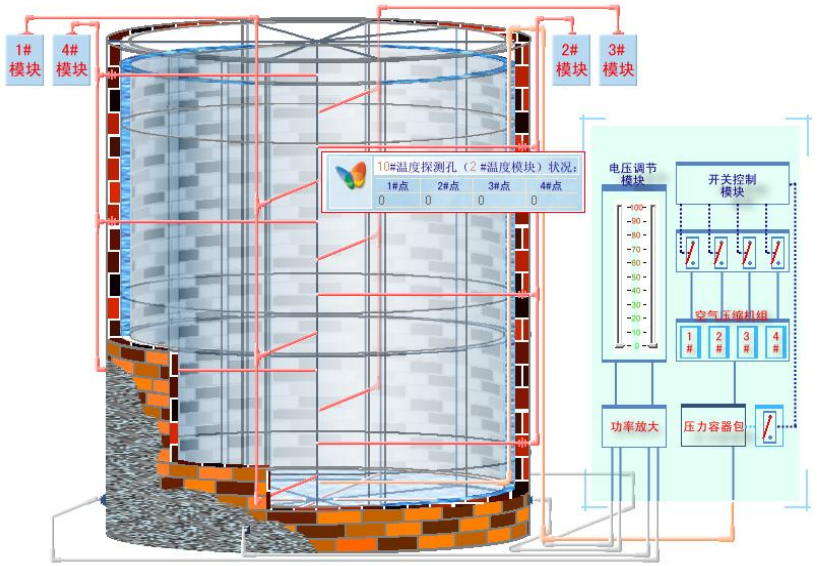
测点分布：层间0.2m，径向0.2m，12层；测温46个；取气24个。

实验炉体



温度巡检系统

气体检测系统



测点分布图

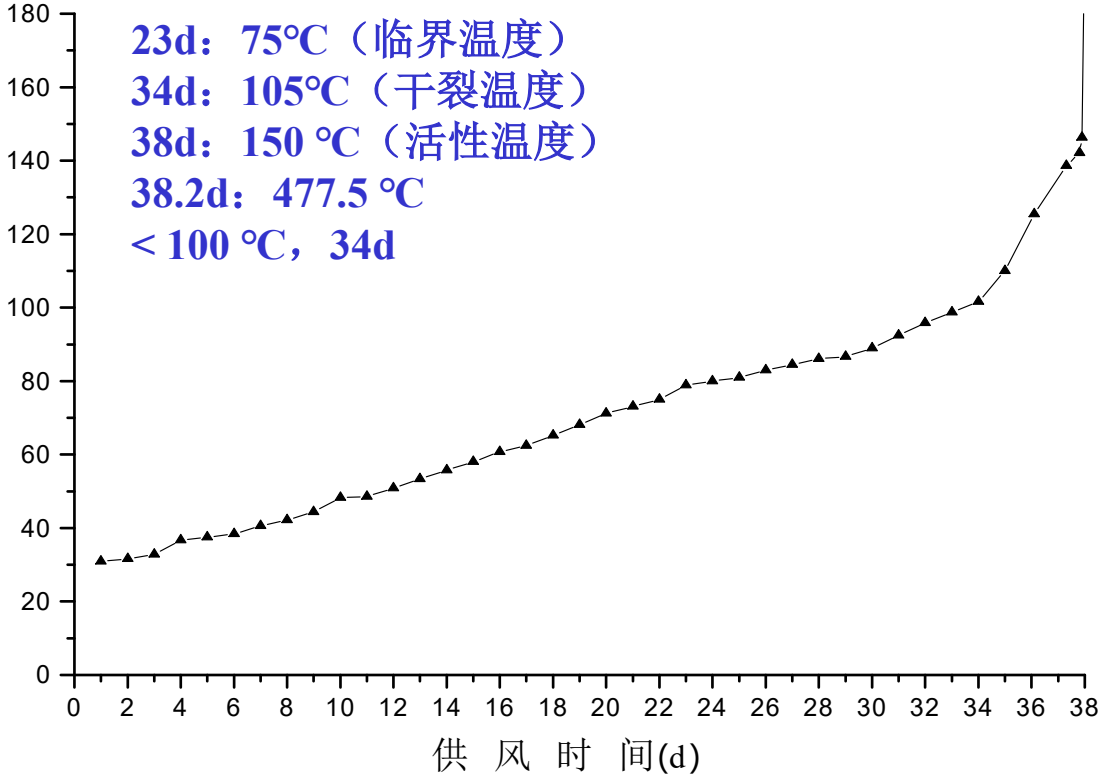
内径2.8m，装煤高度2.2m；外径3.8m，总高度3.3m；最大装煤体积13.5m³，最大装煤量15t。

3 煤自然发火机理和过程

煤自然发火全过程实验模拟

自然发火

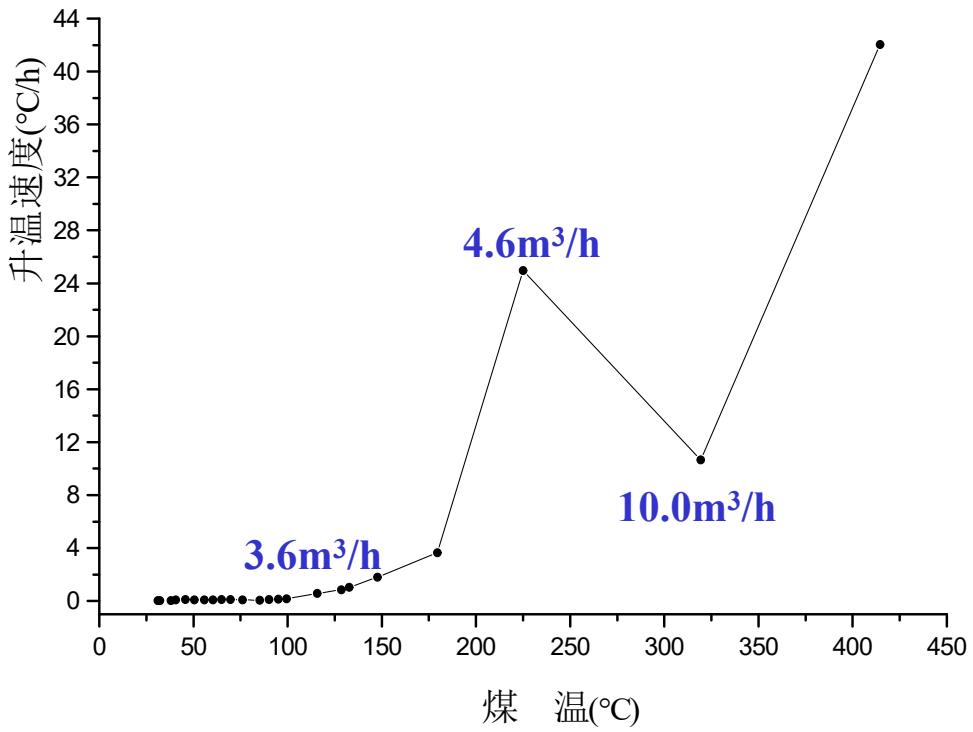
2002年10月14日，采集南屯矿煤样15t装入实验炉，送入空气，煤温从30.9℃自然升至477.5℃，历时38d。

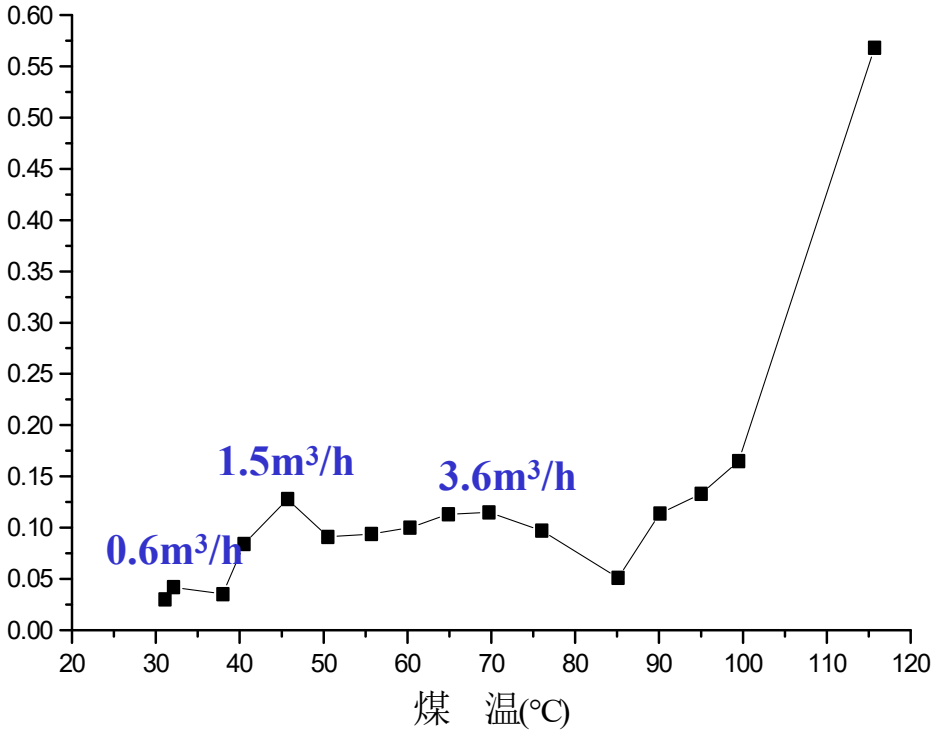


最高煤温与供风时间关系曲线

3 煤自然发火机理和过程

煤自燃发火全过程实验模拟



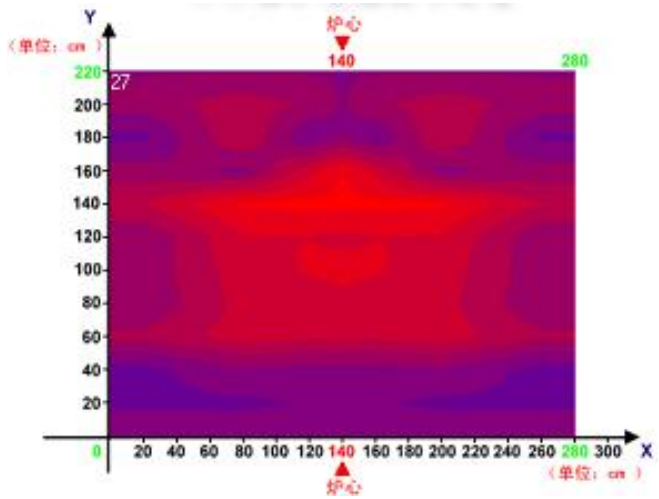


自然升温速度与煤温及供风量的关系曲线

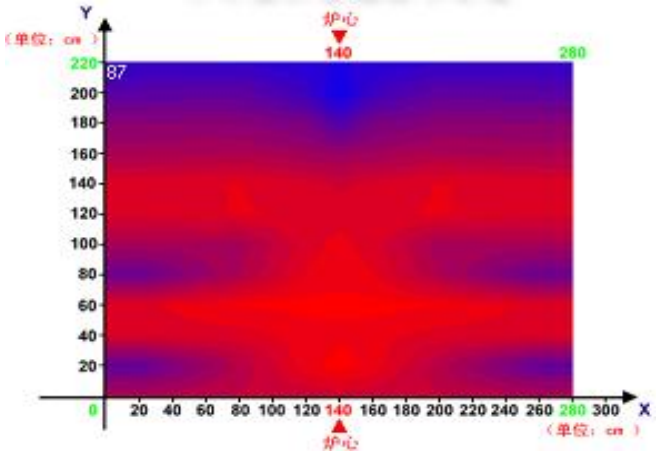
3 煤自然发火机理和过程

炉内煤温分布随时间（煤温和风量）的变化

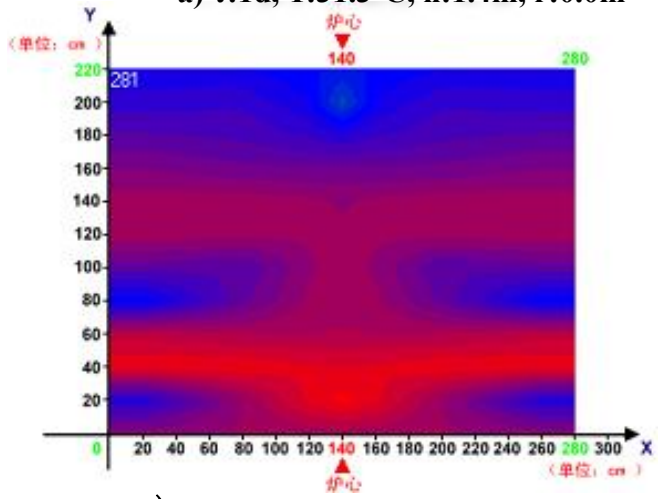
煤自燃发火全过程实验模拟



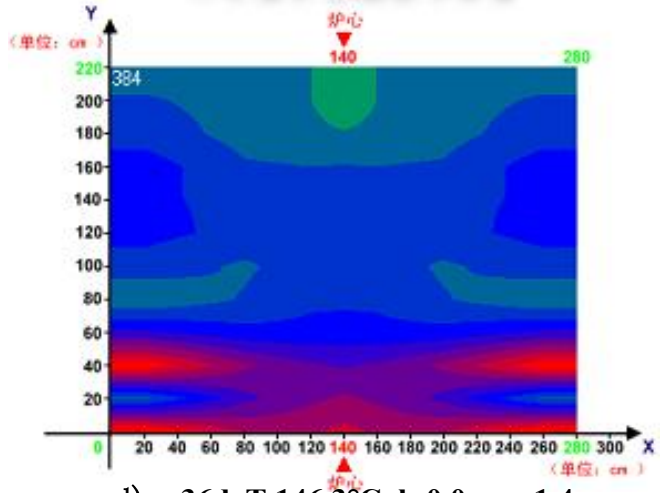
a) τ:1d, T:31.3℃, h:1.4m, r:0.0m



b) τ: 28d, T:86.7℃, h:0.6m, r:0.0m



c) τ: 32d, T:99.9℃, h:0.2m, r:0.0m



d) τ: 36d, T:146.3℃, h:0.0m, r:1.4m

3 煤自然发火机理和过程

煤自燃发火全过程实验模拟

绝氧降温与供风复燃

煤样：龙口，15t；

时间：2003.4.2～6.1；

自然发火（35d)：

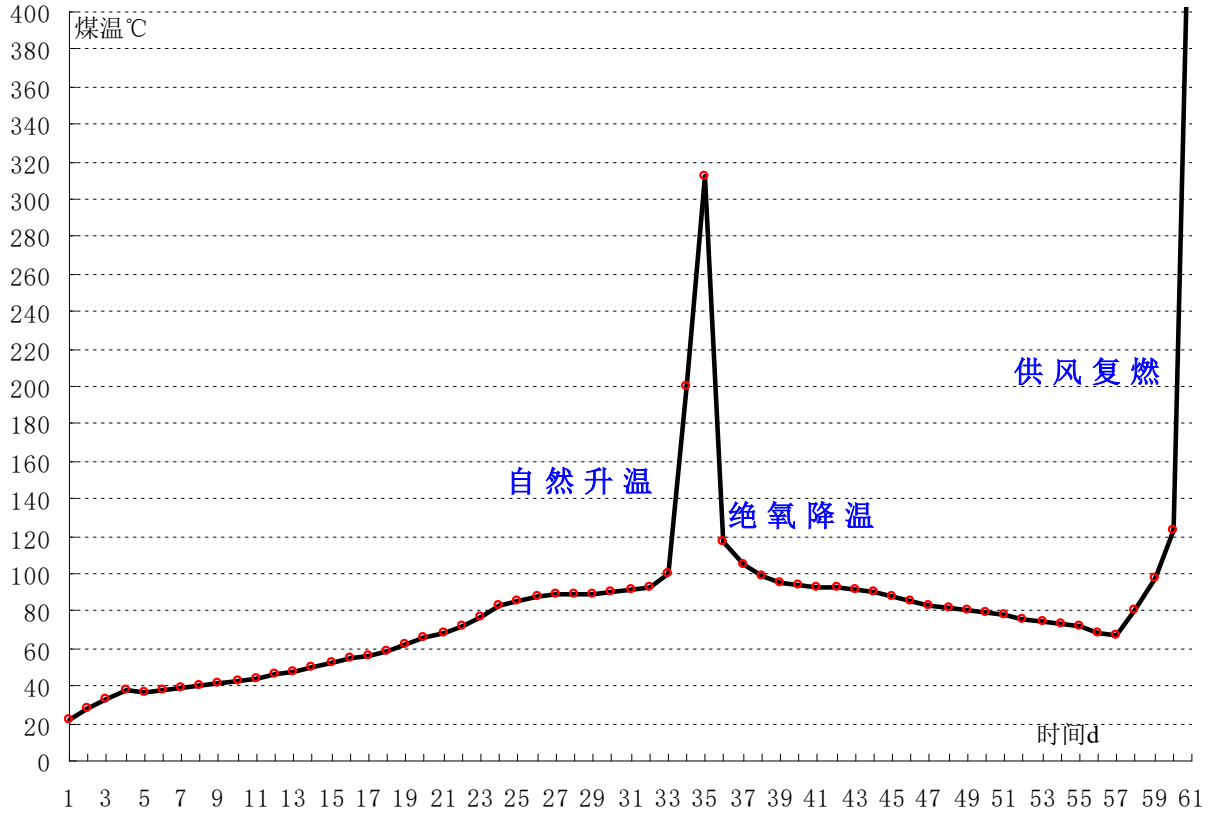
22℃～312℃；

绝氧降温（22d)：

312℃～67℃；

供风复燃（4d)：

67℃～527℃；



自然发火实验炉内最高煤温随时间的变化曲线

4 煤自燃危险区域判定技术

煤自燃特性参数

宏观参数

1）一定厚度的松散煤体；

2）有长期固定的漏风供氧条件。

比如：巷道顶部有一定厚度的松散煤体；

采空区密闭不严，长期漏风；

采空区瓦斯抽采，抽采钻孔、管路O_2浓度高；

采煤工作面推进缓慢；

工作面停采撤架时间长。

4 煤自燃危险区域判定技术

煤自燃特性参数和极限参数

1）煤的自然发火期；

2）煤的放热强度、耗氧速度、气体产生率；

3）煤自燃极限参数：最小浮煤厚度；下限氧浓度；最大漏风强度；

4）特征温度：临界温度(75 ℃) ；干裂温度(105 ℃) ；活性温度(150 ℃);

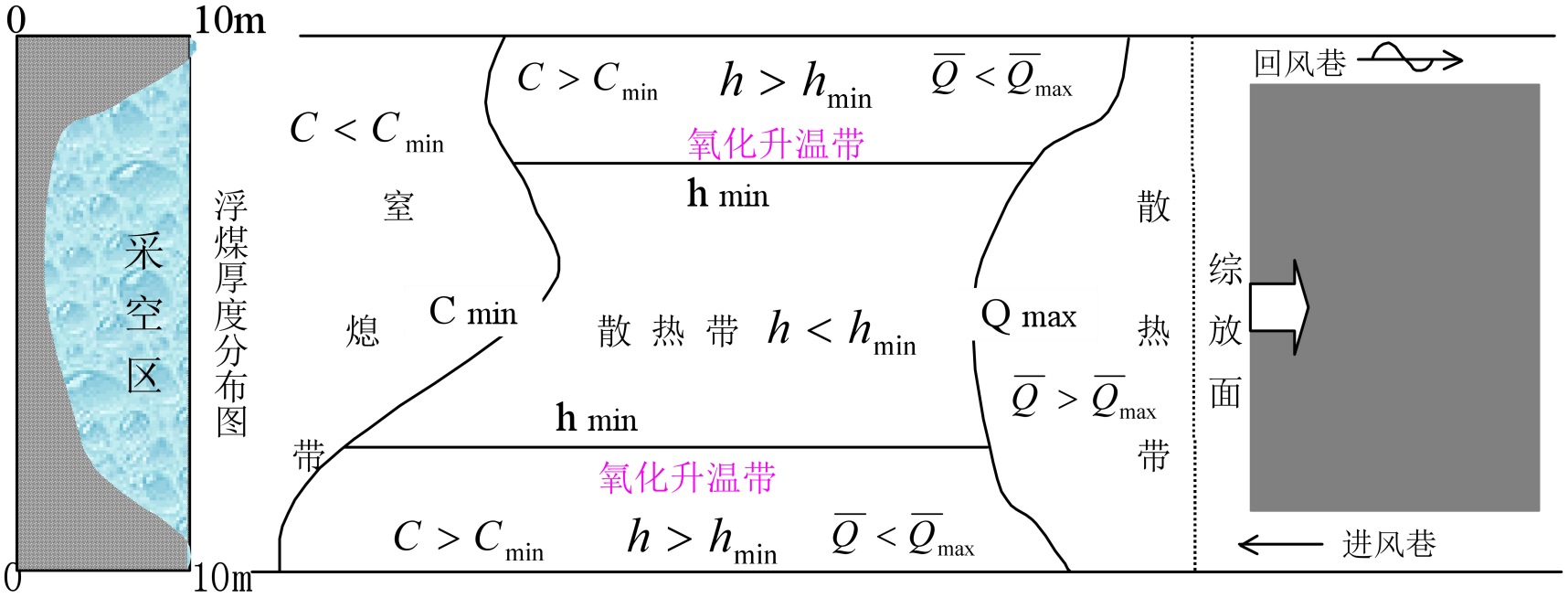
5）煤温与标志气体的关系：出现温度；浓度；浓度变化率；浓度比值

	容易自燃煤层	自燃煤层	不易自燃煤层
下限氧浓度（常温30°C）	10～11%	12～13%	14～15%
下限氧浓度（临界温度）	6～7%	7～8%	8～9%
下限氧浓度（>150°C）	2～3%	3～4%	4～5%
最小浮煤厚度/m	0.5～0.6	0.7～0.8	0.9～1.0

4 煤自燃危险区域判定技术

煤自燃危险区域判定方法

松散煤体自燃须具备能够使散热量小于放热量的环境，即：足够的浮煤厚度、合适的漏风强度、氧浓度和粒度，以及充分的氧化时间。

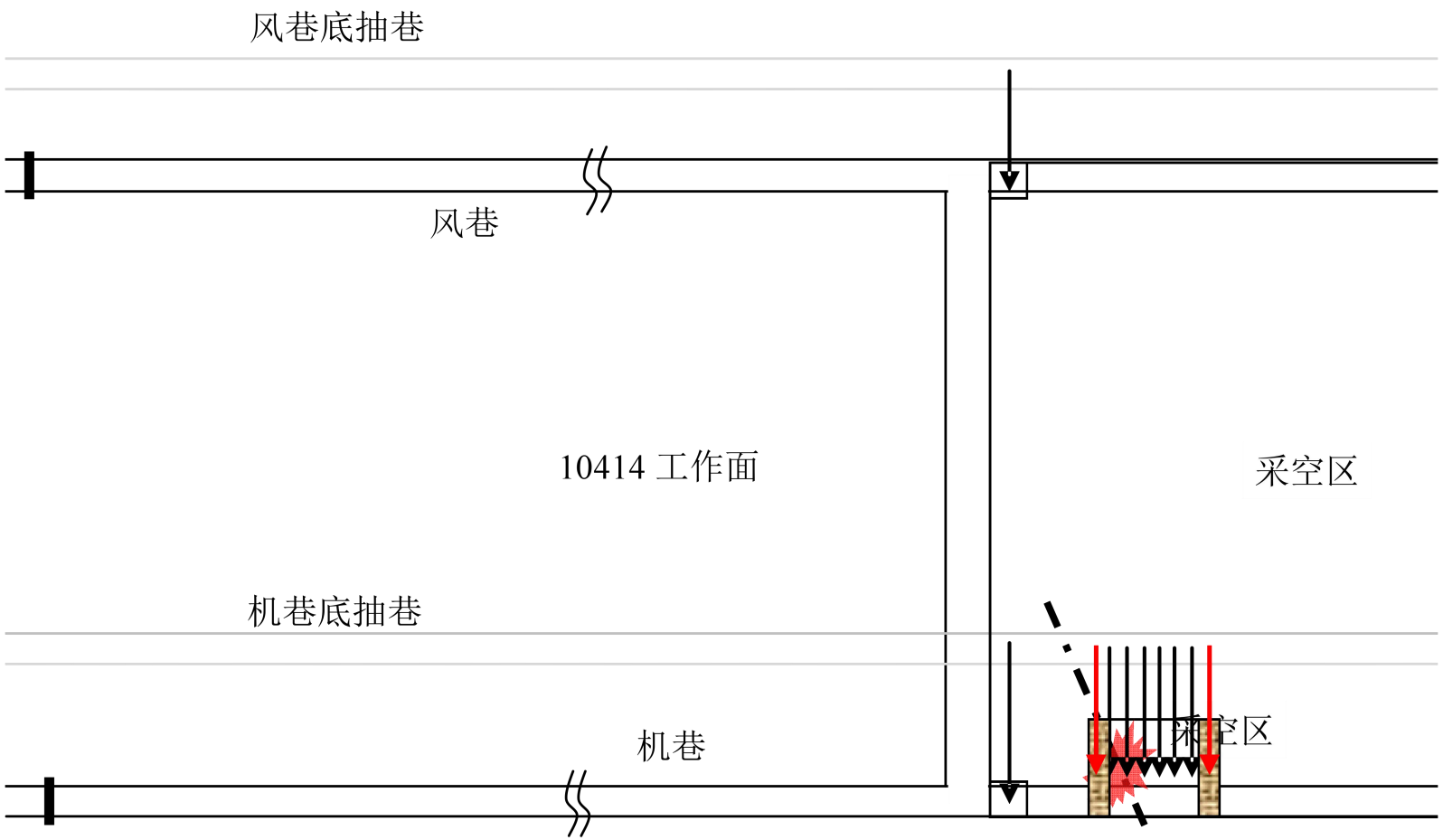


采空区自燃危险区域的静态划分示意图

4 煤自燃危险区域判定技术

煤火源位置判定

10414面火区控制与治理



5 煤自燃分级预警和监测

规程的相关要求

第261条 开采容易自燃和自燃煤层时，必须开展自然发火监测工作，建立自然发火监测系统，确定煤层自然发火标志气体及临界值，健全自然发火预测预报及管理制度。

第265条 当井下发现自然发火征兆时，必须停止作业，立即采取有效措施处理。在发火征兆不能得到有效控制时，必须撤出人员，封闭危险区域。

第275条 任何人发现井下火灾时，应当视火灾性质、灾区通风和瓦斯情况，立即采取一切可能的方法直接灭火，控制火势，并迅速报告矿调度室。

- 根据矿井实际情况，制定预报预警指标。

5 煤自燃分级预警和监测

规程的相关要求

第279条 封闭的火区，只有经取样化验证实火已熄灭后，方可启封或者注销。

火区同时具备下列条件时，方可认为火已熄灭:

(一)火区内的空气温度下降到30℃以下，或者与火灾发生前该区的日常空气温度相同。

(二)火区内空气中的氧气浓度降到5%以下。

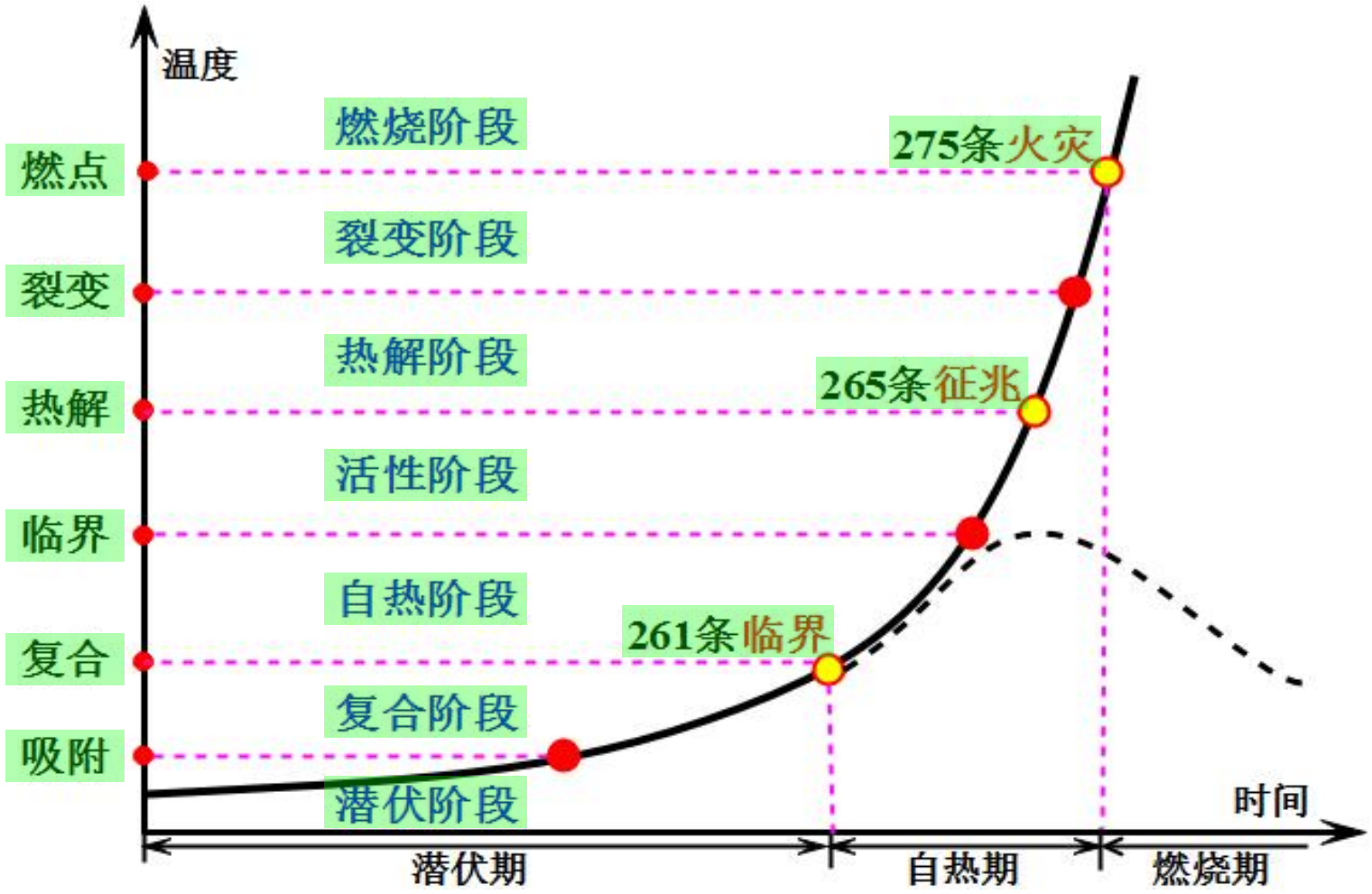
(三)火区内空气中不含有乙烯、乙炔，一氧化碳浓度在封闭期间内逐渐下降，并稳定在0.001%以下。

(四)火区的出水温度低于25℃,或者与火灾发生前该区的日常出水温度相同。

(五)上述４项指标持续稳定１个月以上。

5 煤自燃分级预警和监测

煤自燃过程精细划分



煤自燃七阶段精细划分方法

5 煤自燃分级预警和监测

自燃程度判定指标

直接法：测温法（热传导差）

间接法：指标气体分析法（飘移性好）

指标气体：O_2、CO、CO_2、 CH_4、 C_2H_6、C_2H_4、C_3H_8、C_2H_2和H_2

标志气体：CO 、C_2H_4 、C_2H_2

预警指标：

1）出现温度；

2）气体浓度；

3）浓度变化率；

4）气体浓度比值（不受采样位置和风量影响）。

5 煤自燃分级预警和监测

现场气体监测和分析方法

1）监测手段：人工检测；安全监控；色谱仪；束管监测。

2）监测位置：能够反映自燃危险区域指标气体变化的监测点。

回风流：固定点（安全监控）；

回风隅角和架间：随工作面移动（人工检测）；

采空区：相对固定，采空区O_2<18%的地点（束管监测）。

3）数据分析：监测（仪器）手段可靠性；标志气体指标相关性；根据氧气浓度确定数据有效性，提取有效数据，分析气体成份及浓度变化情况。

6 煤火灾害主动防控技术和方法

指导思想

指导思想：超前预防；高效、适用、经济、便捷。

整体/局部；静态/动态。

主动预防：减氧抑温/固水抑温

降低氧化强度：减漏风、降氧气；

减少固定氧化时间：少静态、多动态；

固水抑温：预防性灌浆。

预防技术：堵漏+降氧/抑温。较轻松、风险低。

控制技术：控风+隔离。有捷径、存风险。

熄灭技术：充填+降温。无捷径、难度大。

6 煤火灾害主动防控技术和方法

控制方向

减氧抑温（减少煤体氧化；控制供氧和减少氧化时间---封、堵、均压、注惰气，加快推进速度、加快采后封闭等）

吸热降温（热容大的煤体向温度低的物质转移能量---注浆、注凝胶、 注液氮、注液态CO_2等）

包裹煤体（隔绝煤氧---注浆、注凝胶等）

6 煤火灾害主动防控技术和方法

控制方向

松散煤体

巷道顶煤、压酥煤柱--喷浆+注凝胶；

采空区浮煤--注浆、注凝胶

漏风供氧

老空区--可靠的密闭+均压+注氮；

工作面后部采空区—加快推进速度+注氮+隔离垛

6 煤火灾害主动防控技术和方法

控制要素和方法

煤火灾害形成要素：煤、氧气、温度、时间

控制遗煤：提高回采率、减少断层丢煤等。

减氧抑温：封闭、喷涂或充填堵漏、均压、注惰气、高分子材料。

控温为主：灌浆、注凝胶、喷洒阻化剂等（处理遗煤）。

减氧控温：液氮、液态CO_2、胶体、惰气泡沫、三相泡沫等。

氧化时间：动态改变漏风供氧环境，阻止煤体长期氧化自热。

防灭火材料的状态：气、液、固或其相互组合。

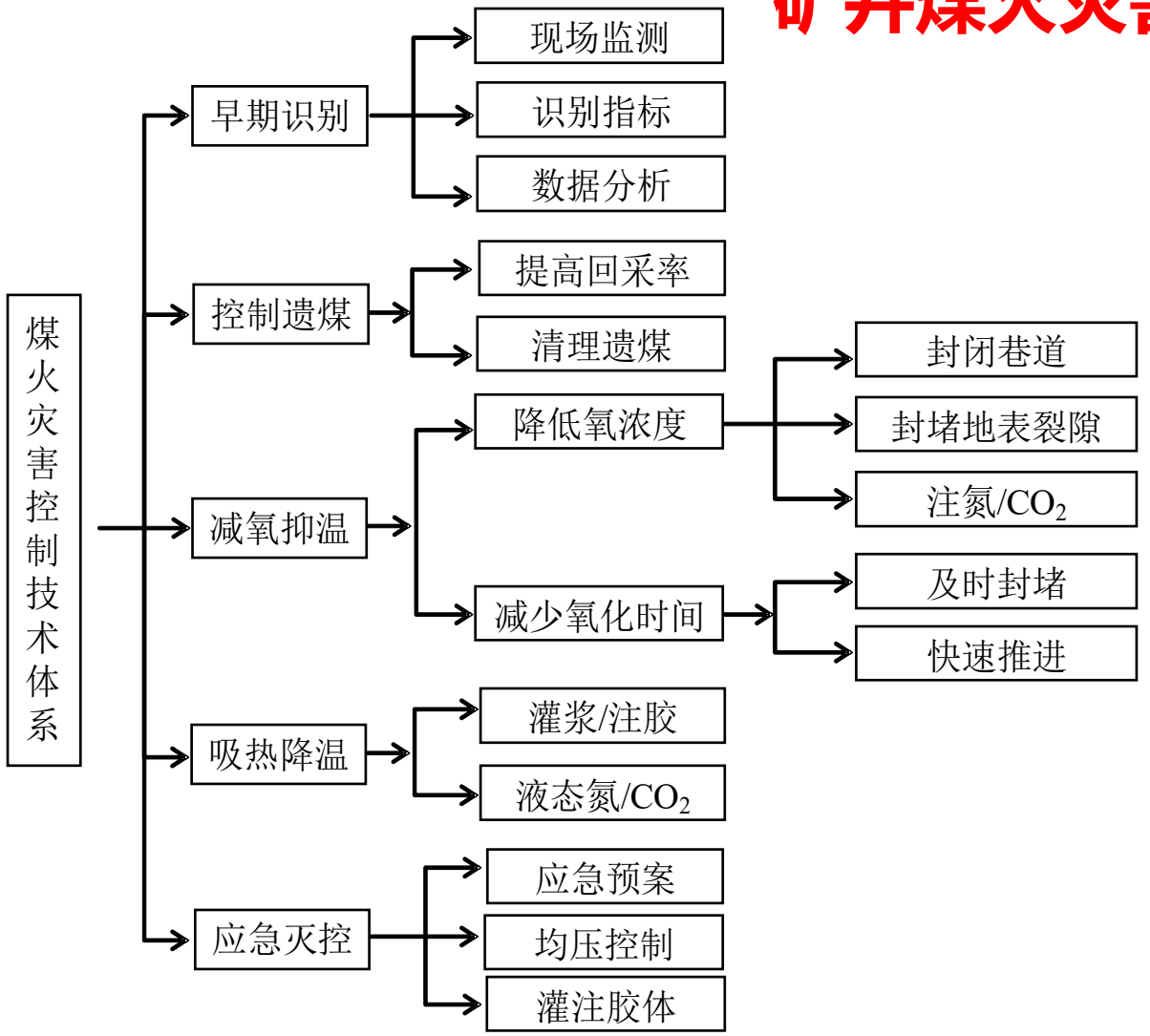
防灭火材料的效用：目的、单孔作用范围、作用时间。

应用工艺：简单、易操作、符合现场实际情况。

现场应用：材料、装备和工艺的完美匹配。

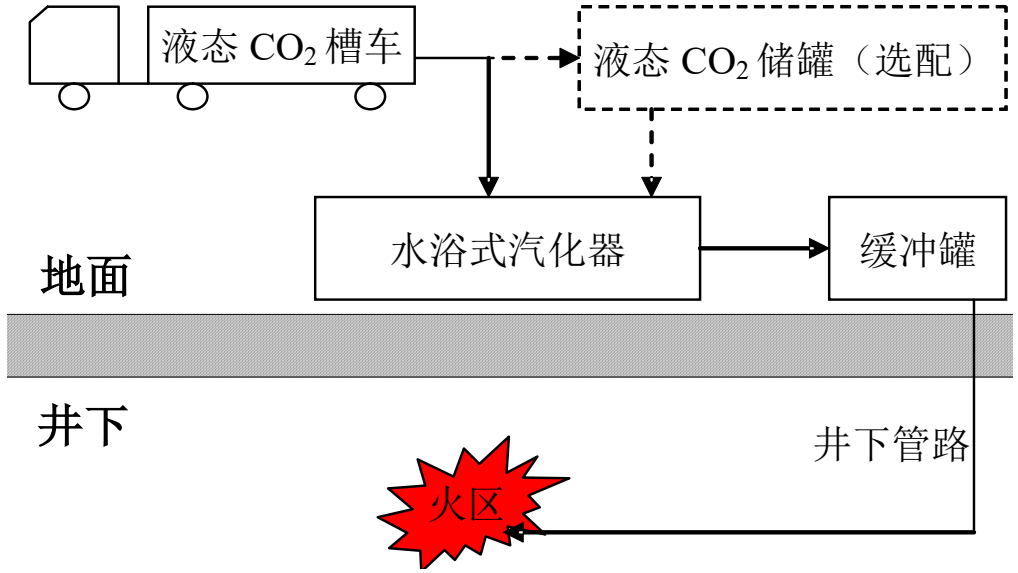
6 煤火灾害主动防控技术和方法

矿井煤火灾害防控技术体系



6 煤火灾害主动防控技术和方法

液态CO_2防灭火技术



地面固定灌注装备

1）降温明显；
2）惰化速度快；
3）灌注流量大；
4）效果易检测；
5）性价比高。

灌注能力：1000-3000m³/h

出口温度：-32℃

出口压力：1.0~2.6MPa

输送距离：>5km

动力：无需动力

井下移动灌注槽车

7 煤火灾害控制技术和协同防控方法

液态CO_2防灭火技术应用

1 南屯煤矿93上12工作面切眼处隐患煤自燃治理应用

2 东滩煤矿14310西轨顺采空区火区治理

3 赵楼矿1302工作面停采线自燃隐患治理

4 兖矿集团国宏化工煤仓火区的治理

5 陕西有色金属集团中村钒矿采空区自燃火区治理

6 陕西韩城小南沟矿井电缆火灾灭火救援

7 王洼二矿大倾角综采面灭火启封

8 淮南潘一和潘三矿综采面灭火启封

9 杨场湾大采高工作面灭火启封

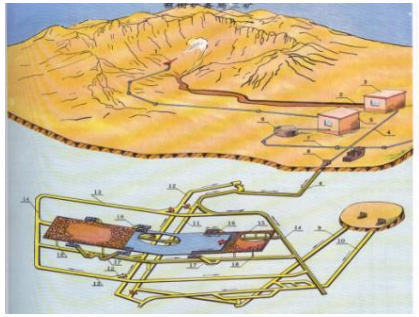
6 煤火灾害主动防控技术和方法

灌浆注胶防灭火技术

灌浆防灭火技术（防火）

优点：灌注流量大、成本低、工艺成熟。

不足：泥浆浓度低；泄漏流失量大。



凝胶防灭火技术（灭火）

优点：充填固水效果好、泄漏流失量小。

不足：胶凝剂用量大12%；成本高120元/m³。

复合胶体防灭火技术（防灭火）

特点：充填固水、作用时间长、受压不开裂。

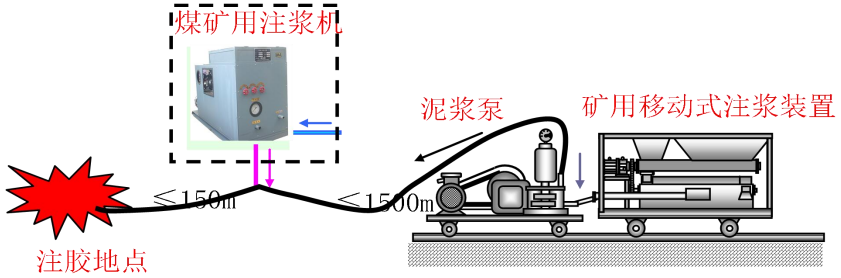
胶凝剂用量0.06%；成本<15元/m³。

6 煤火灾害主动防控技术和方法

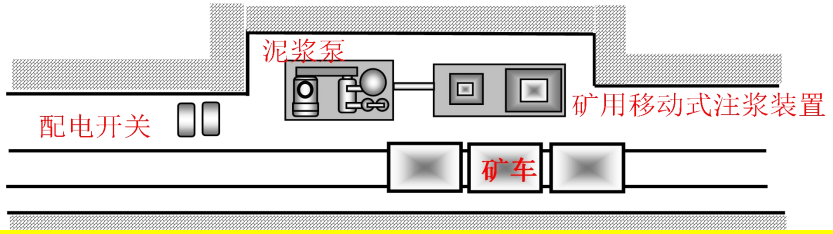
灌浆注胶防灭火技术

MDZ-60/120地面固定式灌浆注胶防灭火系统

	MDZ-60/120	MYZ-30/60	ZMJ-15/30
注土量	40 m³/h	20 m³/h	6 m³/h
优点	流量大	适应性强	反应快
缺点	投资大	效率较低	流量小



MYZ-30/60地面移动式灌浆注胶防灭火系统



ZMJ-15/30井下移动式灌浆注胶防灭火系统

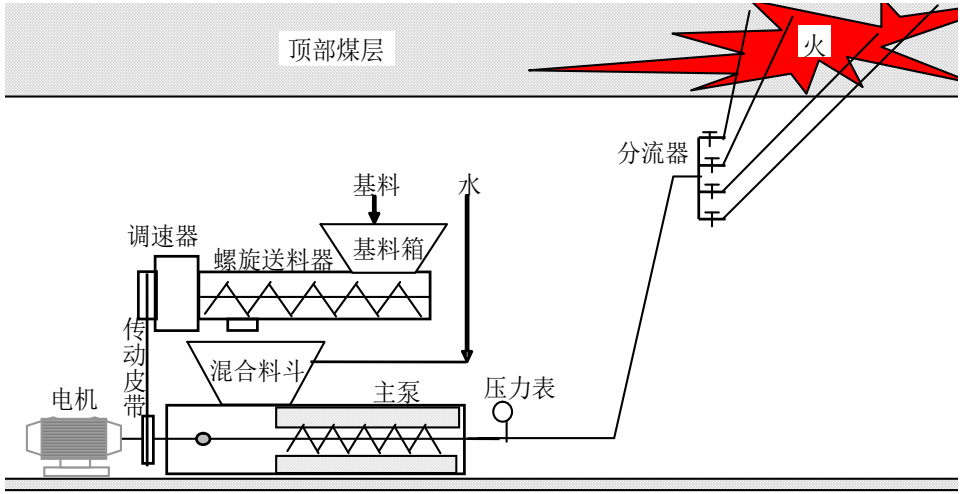
6 煤火灾害主动防控技术和方法

巷道顶煤防灭火技术

高分子胶体：水+高分子胶体灭火剂（MCJ12，>0.8%）

高分子胶体

ZHJ- 3/0.8G;150kg；
ZHJ- 5/1.8G；450kg；
ZHJ-10/1.8G；600kg；



重点位置或范围：
距巷道表面1-4m。
方法（孔间距<5m）
喷浆；
打钻，下套管；
封孔；压注。

6 煤火灾害主动防控技术和方法

其他防灭火技术和材料

1）均压技术（技术要求较高，慎用）；

2）阻化剂防灭火技术（可用洒浆替代）；

3）聚氨脂类材料：罗克休、马丽散、固瑞特、威尔浮、浮士德、瑞米加固材料；慎用/禁用于防灭火。

4）无机发泡材料；

5）泡沫防灭火技术。

注：选用的防灭火材料不应污染井下空气、危害人体健康、反应温度不应超过60℃。

应杜绝负面作用明显的防灭火技术和材料的应用。

6 煤火灾害主动防控技术和方法

采空区煤火灾害预防关键技术

1）正常推进（减少氧化时间/降低氧化强度）

2）工作面处于静态的时间尽量短（容易自燃煤层超过10天的要封闭）

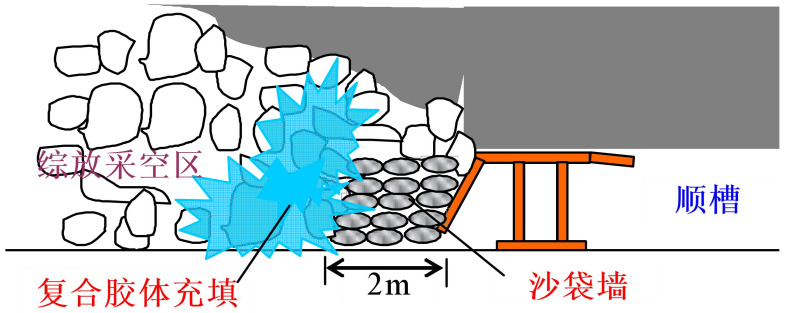
3）开切眼预埋管路注浆

注土量不小于切眼空间的20%。

4）采空区端头封堵减少漏风供氧（联巷封闭）

正常情况：每隔30-50m一道；

停采50m前：每隔10-20m一道。



5）采空区两道分段预防性灌浆/注胶。

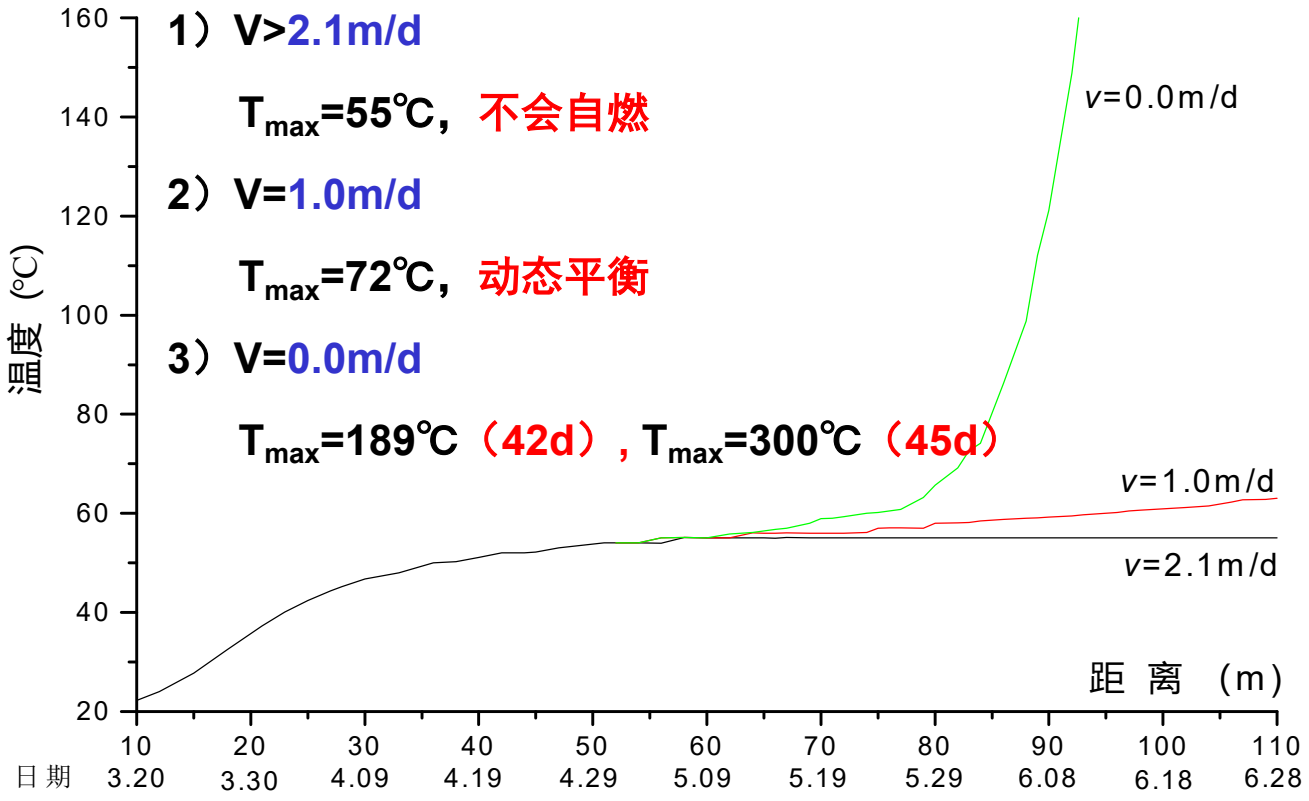
6）停采前采空区预埋管路灌浆/注胶：灌浆口位置距架后约20-40m。

7）自然发火指标气体异常时：

加强采空区端头封堵并注胶体；采空区注氮气/CO_2；加快推进速度。

6 煤火灾害主动防控技术和方法

煤自燃预防最小推进度



采煤工作面不同推进速度时的采空区最高温度变化图

易自燃煤层

80m/月

自燃煤层

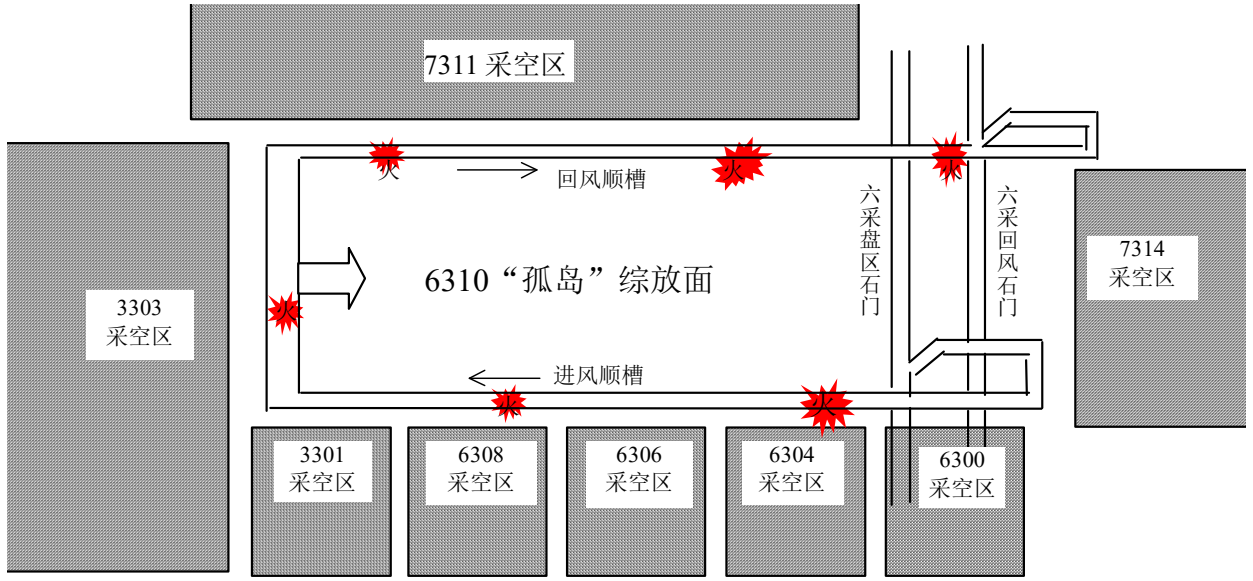
60m/月

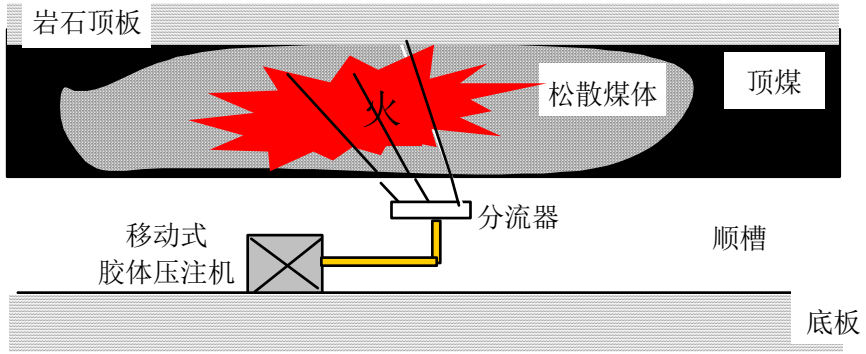
不易自燃煤层

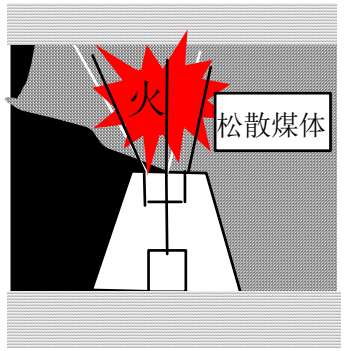
30m/月

7 典型实例

1）综放面巷道松散顶煤自燃

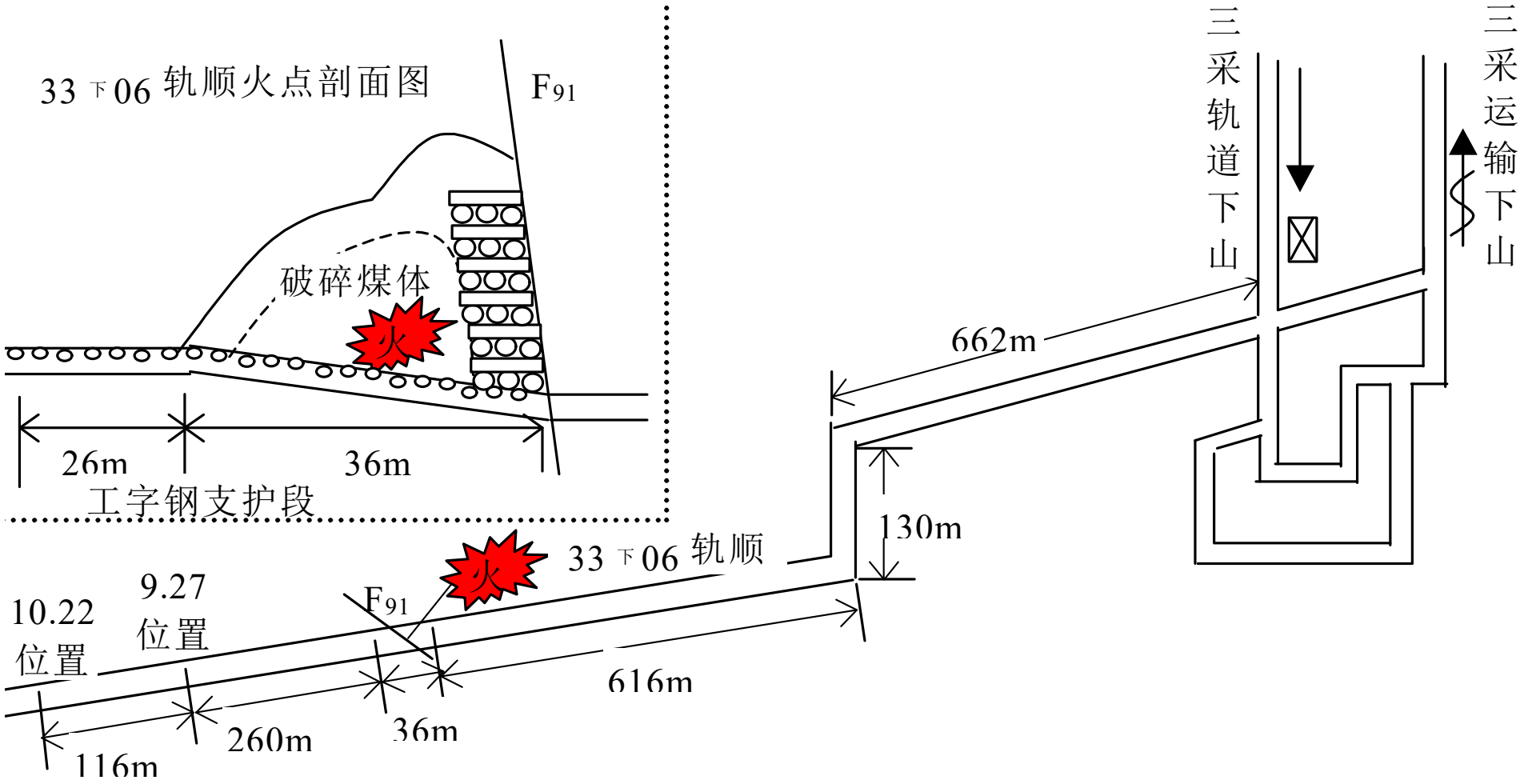






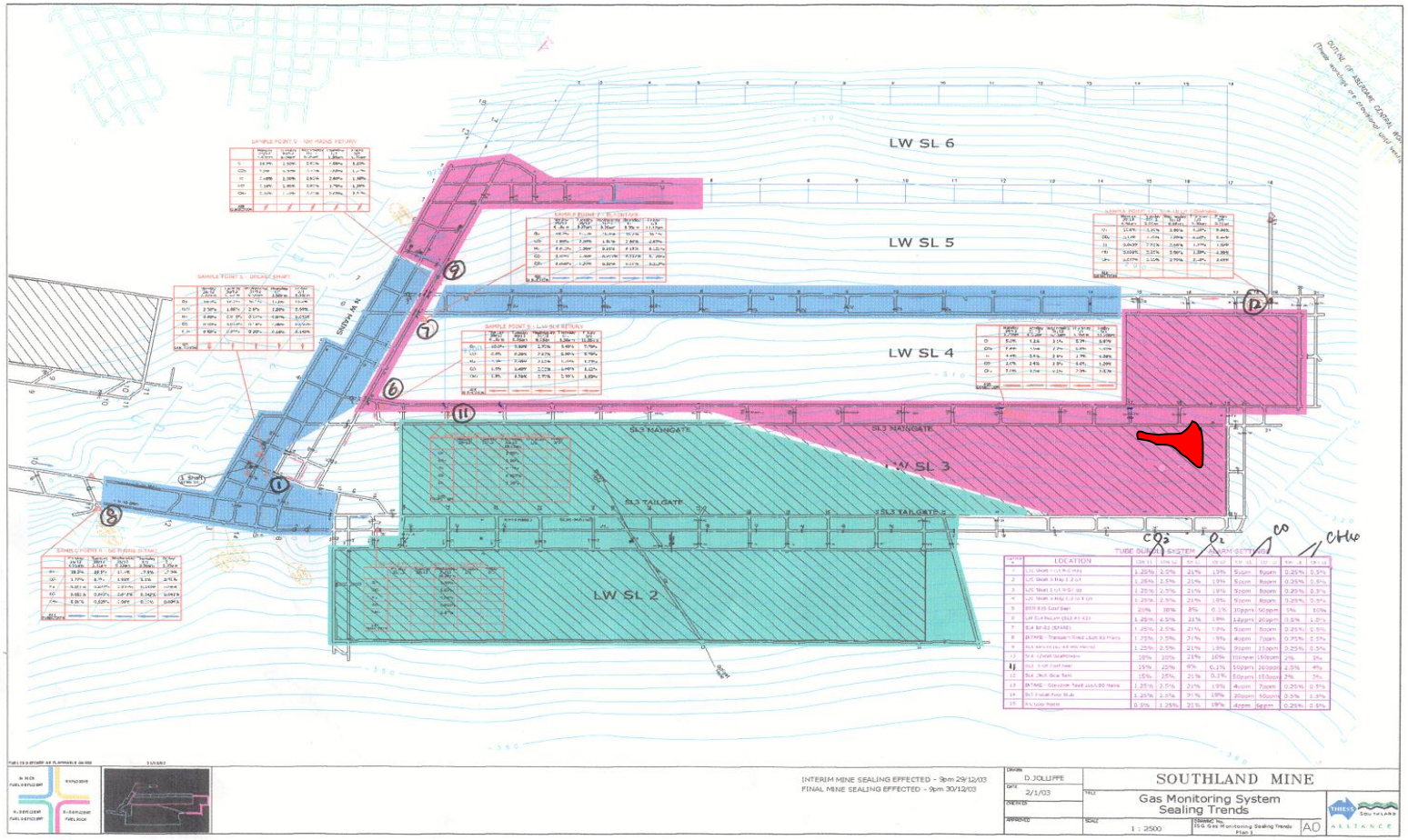
7 典型实例

2）综放面顺槽掘进顶板冒顶区煤自燃



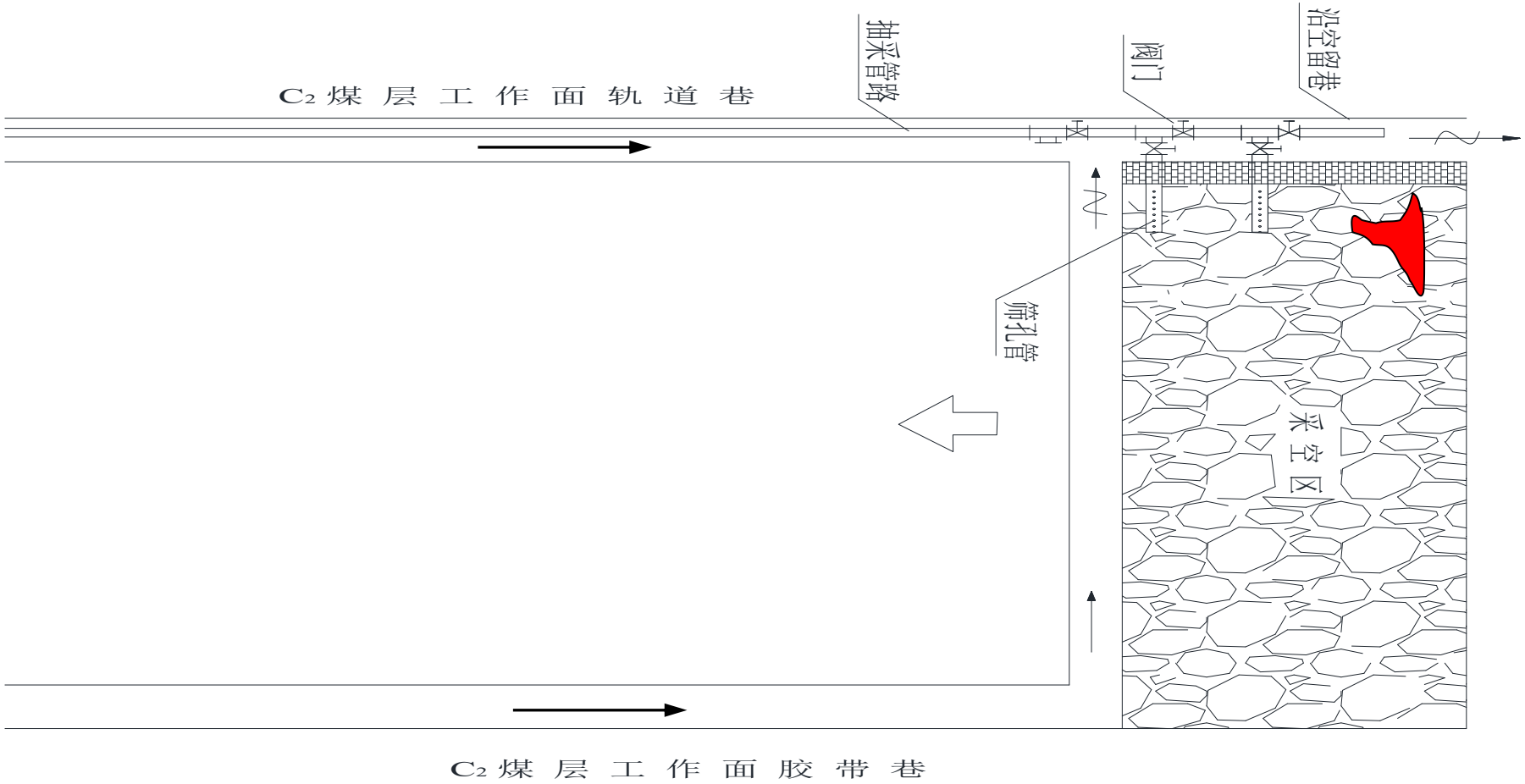
7 典型实例

3）工作面联络巷密闭漏风采空区遗煤自燃



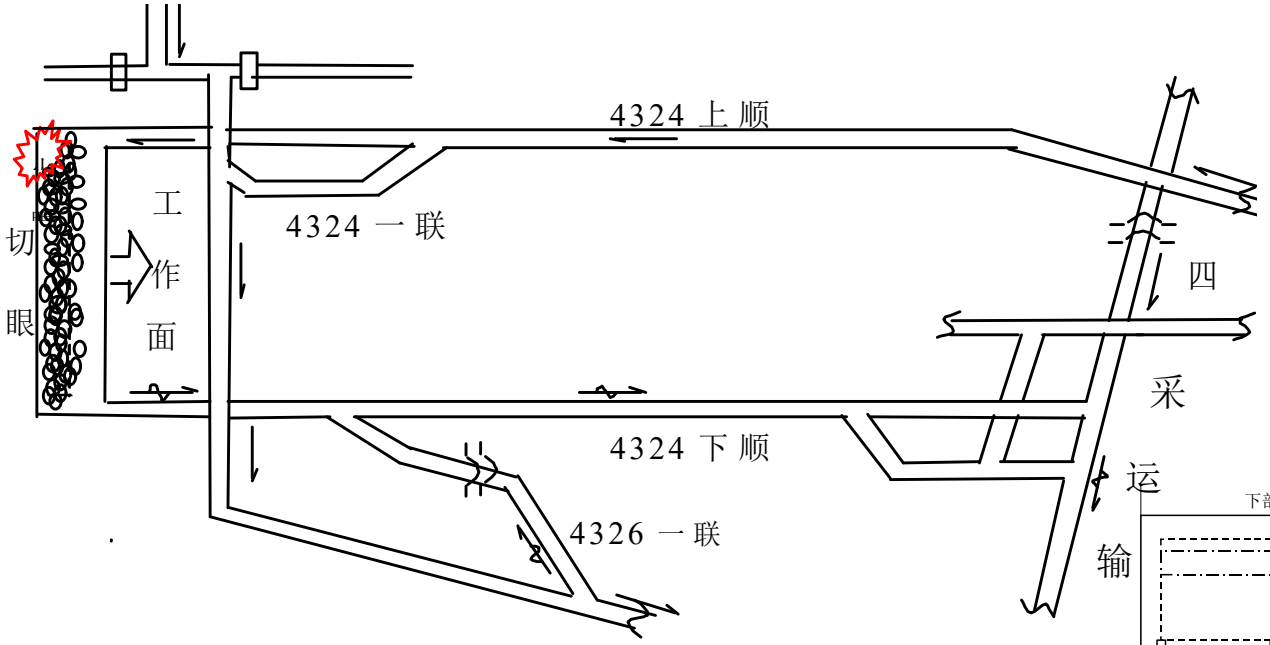
7 典型实例

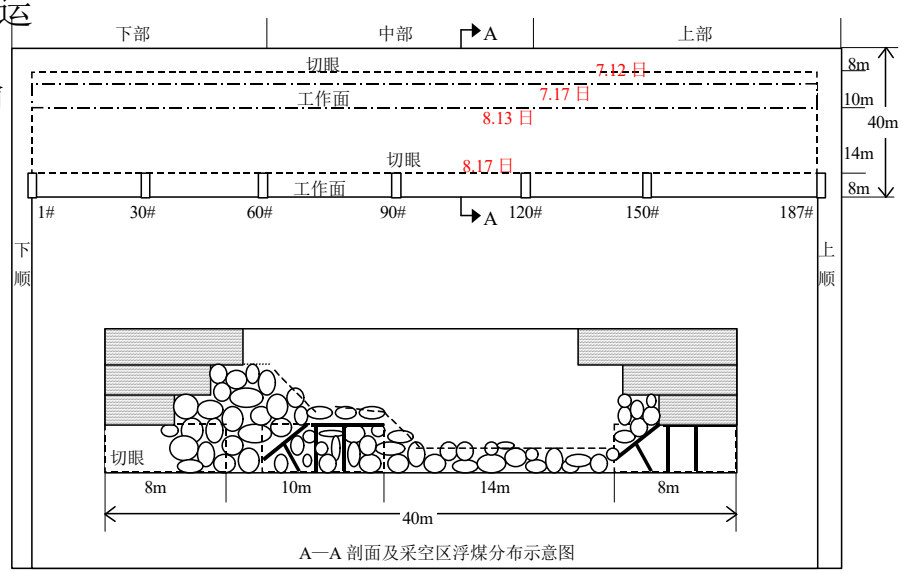
4）沿空留巷Y型通风工作面采空区断层丢煤自燃



7 典型实例

5）综放面初采期间开切眼煤自燃

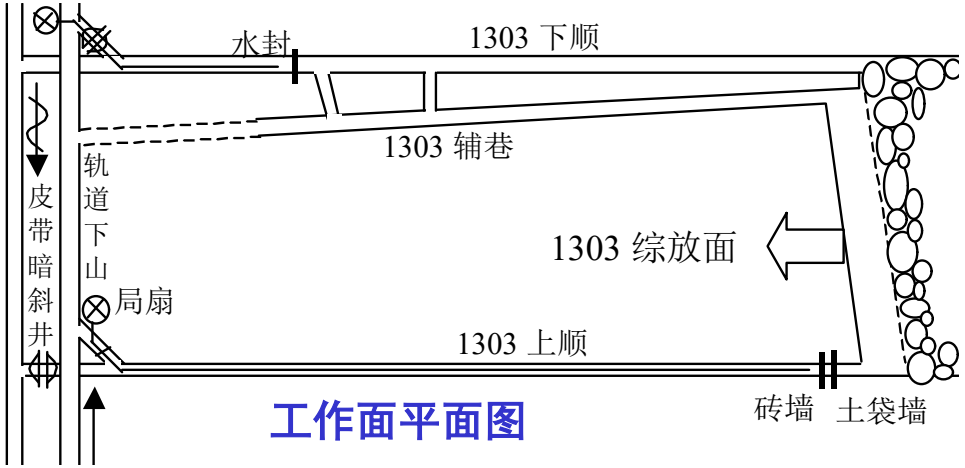




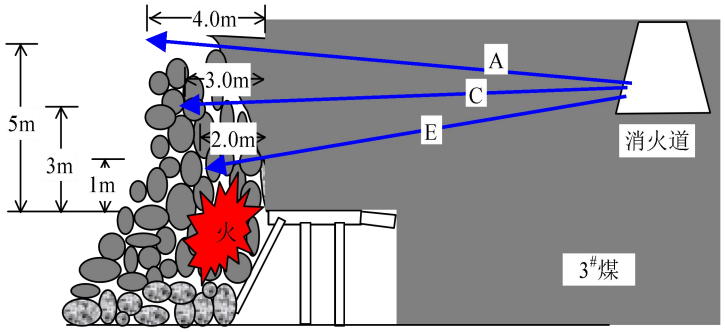
A—A 剖面及采空区浮煤分布示意图

7 典型实例

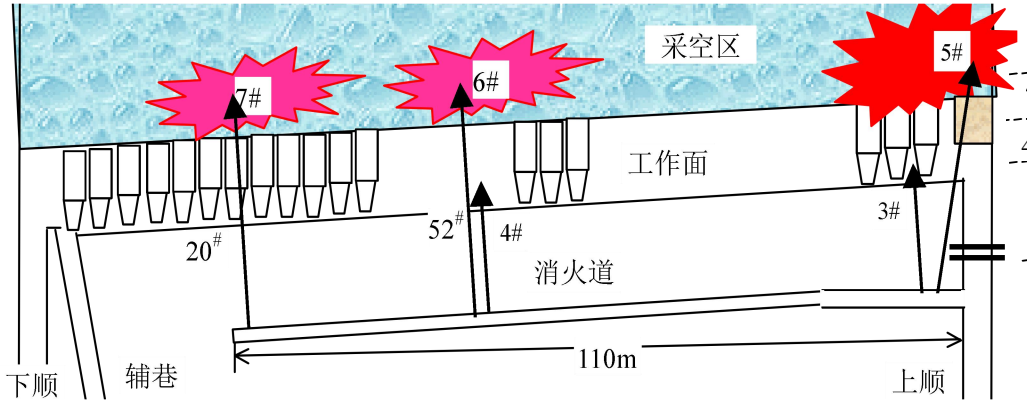
6）综放面临时停采后部采空区煤自燃



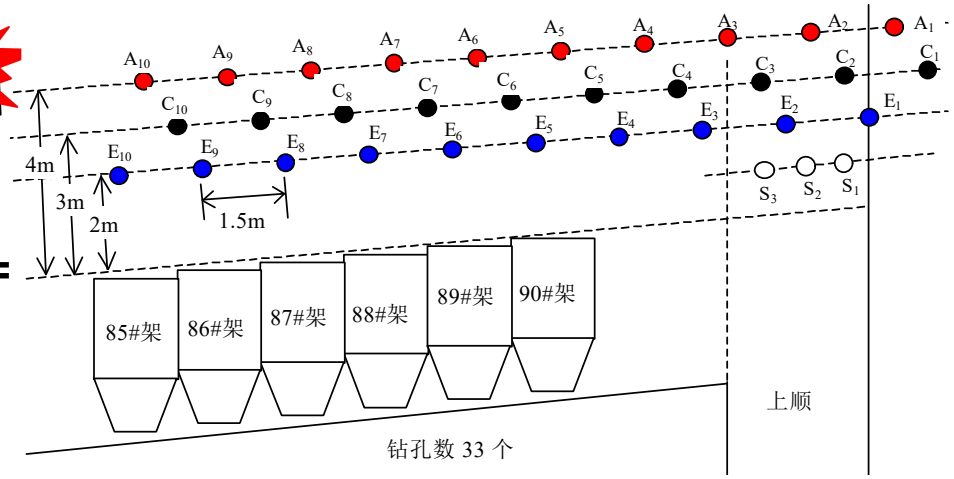
工作面平面图



注胶钻孔布置图

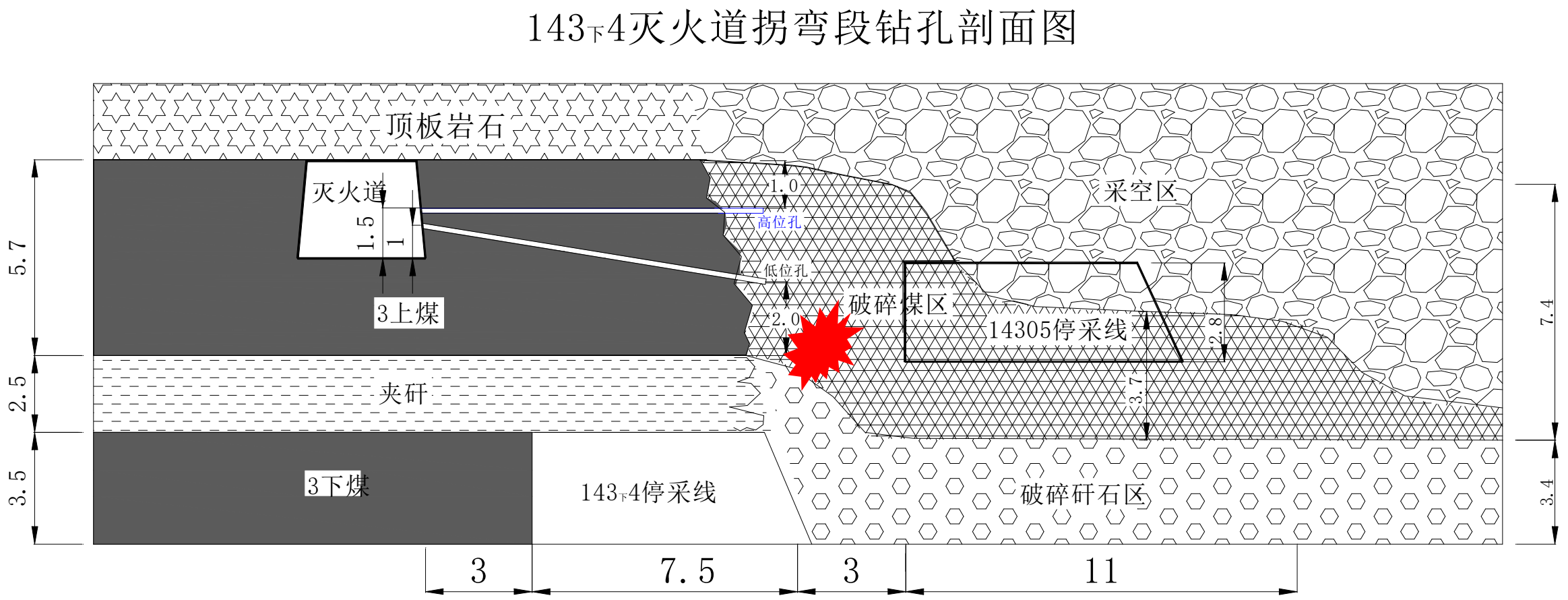


观测孔布置图



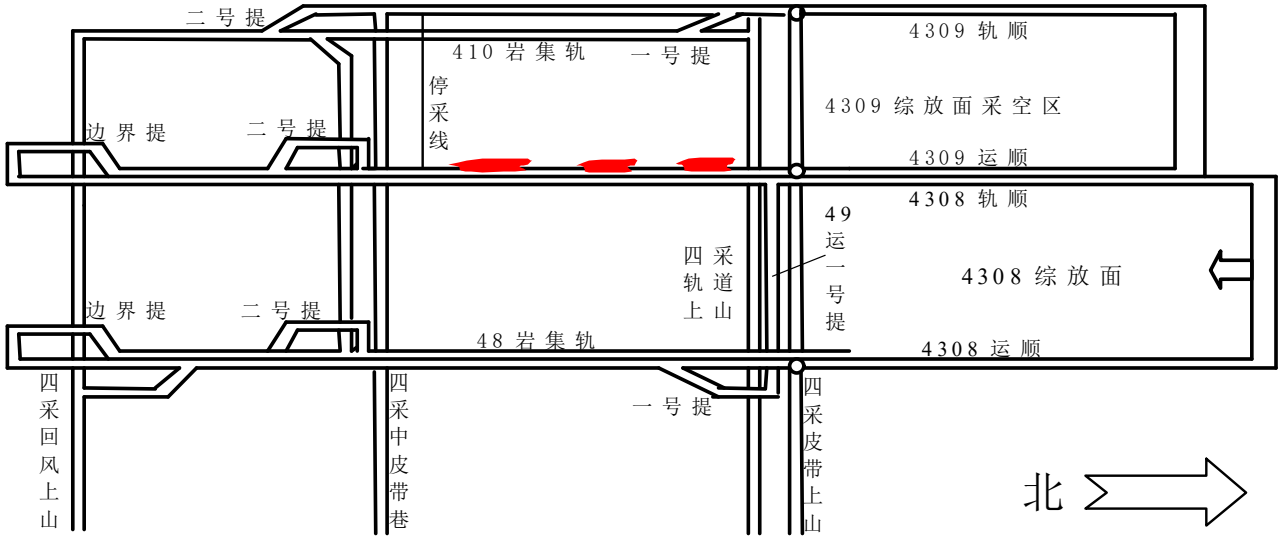
7 典型实例

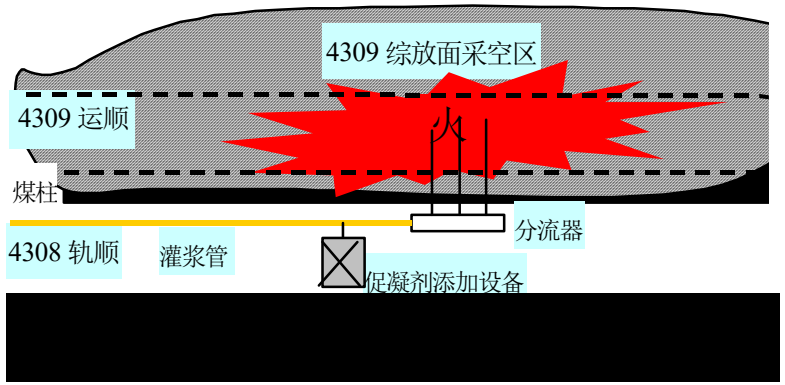
7）工作面停采煤自燃

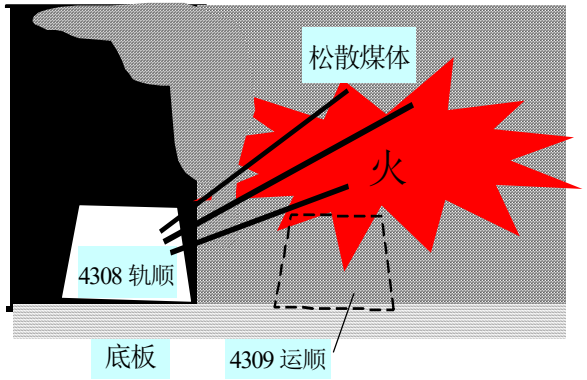


7 典型实例

8）相邻采空区煤柱测煤自燃

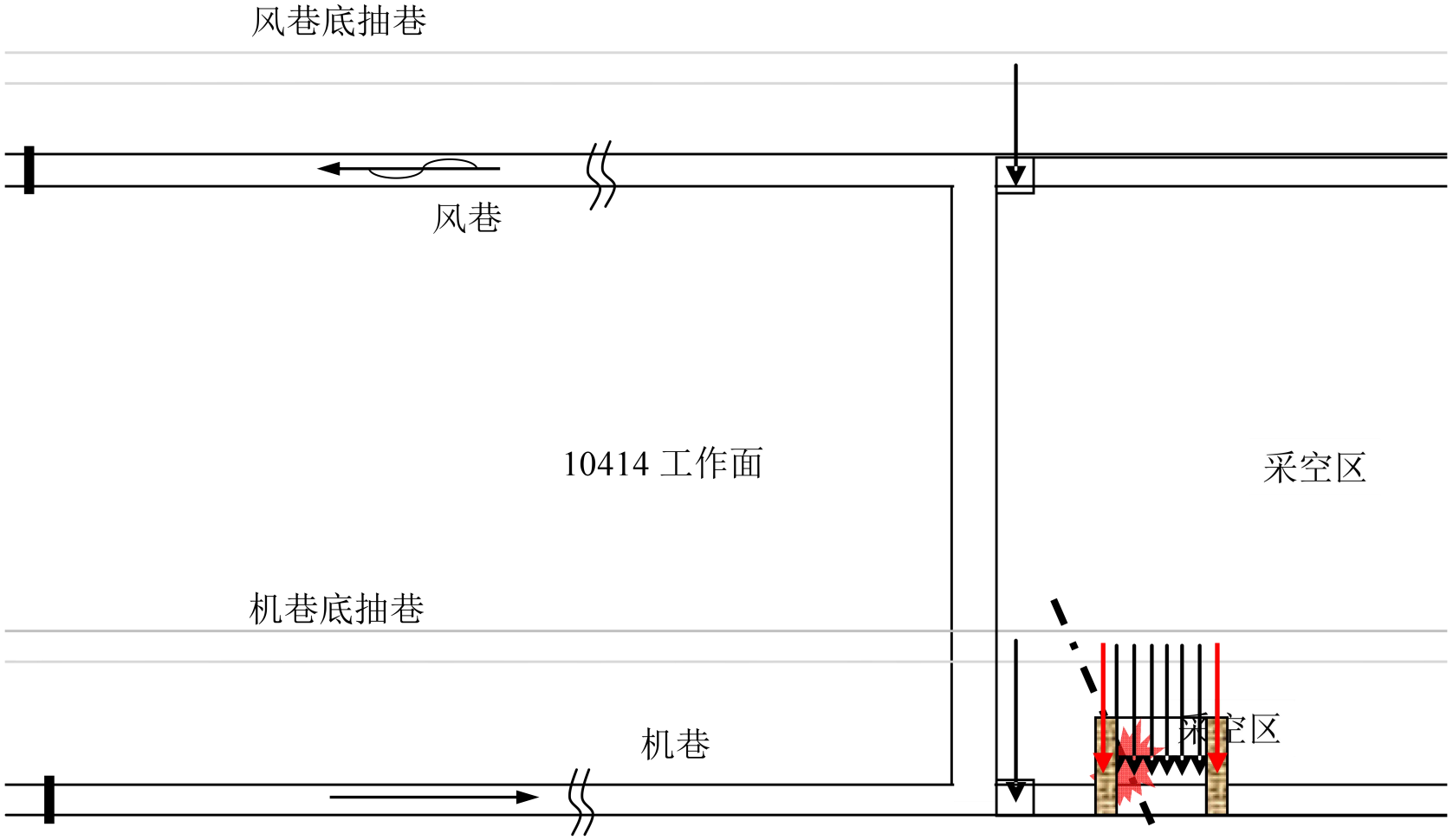






7 典型实例

9）工作面底板抽采钻孔漏风引起后部采空区煤自燃



控漏风、降氧气、消高温、防复燃

7 典型实例

10）煤自燃引起瓦斯爆炸（相邻采空区瓦斯抽采)

8 关键技术小结

煤自燃预测

1）一定厚度的松散煤体；

2）持续一定时间的漏风供氧。

8 关键技术小结

火灾隐患识别

1）位置：煤自燃危险区域判定技术。

2）程度：煤自然发火指标气体监测预警技术。

3）时间：发火时间动态量化识别技术。

8 关键技术小结

煤自燃监测预警

1）监测：测点位置、监测技术。

2）预警：预警指标和临界值、分级预警技术。

3）方法：高密度网络化的温度监测系统（位置、温度）；

基于气体指标的煤自燃程度判定技术（程度）。

8 关键技术小结

防控灭技术（协同防控方法）

1）防火：封堵漏风、包裹松散煤体、惰化降氧技术。

2）控火：高温隔离、惰化与有害气体控制技术。

3）灭火：充填降温灭火技术。

9 本次规程拟修改的相关条款

第二百六十条 煤的自燃倾向性分为容易自燃、自燃、 不易自燃 3 类。 新设计矿井应当将所有煤层的自燃倾向性鉴定结果报 省级煤炭行业管理部门及省级煤矿安全监察机构。生产矿井 延深新水平时，必须对所有煤层新揭露煤层的自燃倾向性进行鉴定。 开采容易自燃和自燃煤层的矿井，以及开采不易自燃煤层出现自然发火征兆的矿井，必须编制矿井防灭火专项设计，采取综合预防煤层自然发火的措施，建立综合预防煤层自然发火的系统。

9 本次规程拟修改的相关条款

第二百六十五条 开采容易自燃和自燃煤层时，必须制 定防治采空区（特别是工作面始采线、终采线、进回风巷煤 柱线）、巷道高冒区、煤柱破坏区自然发火的技术措施。

发现自然发火预兆时，必须停止作业，必须立即采取有效措施处理。出现自然发火征兆且不能得到有效控制时，必须立即撤出人员，封闭危险区域。进行封闭施工作业时，其他区域所有人员必须全部撤出。

9 本次规程拟修改的相关条款

第二百七十五条 任何人发现井下火灾时，视火灾性 质、灾区通风和瓦斯情况，立即采取一切可能的方法直接灭火，控制火势，尽可能采取措施灭火或控制火势， 并迅速报告矿调度室。矿调度室在接到井下火灾报告后，应当立即按灾害预防和处理计划通知有关人员组织抢救灾区人员和实施灭火工作。

9 本次规程拟修改的相关条款

第二百七十六条 封闭有爆炸性危险火区时，应当遵守下列规定：（一）优先采用地面钻孔注浆封闭或者井下远距离控 制设备封闭的措施。（二）严禁在火区附近的进回风巷内封闭，封闭地点应选择在距离火区位置较远的巷道，实现大范围封闭。（三）封闭火区前，封闭所需要的设备设施材料提前准备到位，撤出全部与封闭施工无关的人员。（四）封闭火区时，首先建造临时密闭，撤出人员， 远距离监测风向、风量、烟雾和气体组分等参数，稳定 24 小时后，确认无爆炸危险再建造永久密闭或者防爆密闭。

9 本次规程拟修改的相关条款

第二百七十六条 （五）火区密闭被爆炸破坏的，严禁探查或者恢复密闭，必须扩大封闭范围确保封闭安全。

（六）只有在采取惰化火区等措施，稳定24小时后， 经评估确认无爆炸危险后方可恢复井下作业。

9 本次规程拟修改的相关条款

新增条款： 煤矿企业必须制定永久密闭设计施工标准，并报省级煤炭行业管理部门和属地矿山安全监察部门备案。永久密 闭墙设计、施工和验收，应遵守下列规定：（一）密闭墙的位置选择在围岩稳定、无破碎带、无裂隙和巷道断面较小的地点；密闭前后 5m内必须支护牢固。（二）拆除或者断开密闭墙处的管路、金属网、电缆 和轨道等；（三）密闭墙要严格按要求留设观测孔、措施孔和放水孔。（四）密闭墙采用掏槽结构或者锚杆注浆结构，墙体 结构稳定严密、材料经久耐用，墙基与巷壁必须紧密结合， 连成一体。（五）密闭墙施工完成后，必须进行验收。验收时需进行现场检查和测试，确保密闭墙的各项指标符合要求。

谢 谢

敬请批评指正