



煤矿安全生产最新技术与国家强制性标准推广系列丛书

非接触

隐蔽火源探测技术实用手册

◎ 主编 王明全

中国科技文化出版社

TD7-62
W-528
2

非接触隐蔽火源探测技术 实用手册

主编 王明全 (煤炭科学研究总院研究员)

【 下 卷 】

中国科技文化出版社

目 录

第一篇 煤矿非接触隐蔽火源危险区域判定理论

第一章 绪论	(3)
第一节 煤自燃学说	(4)
第二节 煤的内在自燃性	(8)
第三节 煤自燃危险区域判定理论构成	(10)
第二章 煤氧微观特性及复合机理	(12)
第一节 煤分子结构特点	(12)
第二节 氧分子结构特性	(16)
第三节 自燃煤表面分子活性基团	(21)
第四节 煤氧复合微观机理	(25)
第三章 煤的氧化性	(39)
第一节 煤氧复合类型	(39)
第二节 煤氧化性衡量方法	(54)
第三节 影响煤氧化性的主要因素	(62)
第四章 煤的放热性	(74)
第一节 煤放热性衡量方法	(75)
第二节 影响煤放热性的主要因素	(80)
第五章 煤自然发火实验及数值模拟	(93)
第一节 实验模拟条件	(93)
第二节 煤自然发火实验台	(103)
第三节 煤自然发火实验及结果分析	(109)

目 录

第四节 煤自然发火实验的数值模拟	(125)
第六章 煤自燃环境分析	(136)
第一节 巷道周围煤体自燃环境分析	(136)
第二节 采空区遗煤自燃环境	(165)
第三节 影响地面煤堆自燃的主要因素	(173)
第七章 非接触隐蔽火源危险区域判定	(188)
第一节 采空区自燃危险区域判定	(188)
第二节 巷道周围煤体自燃危险区域判定	(216)
附录 A 兖州矿业集团公司兴隆庄矿煤样自然发火实验报告	(237)
附录 B 主要符号表	(260)

第二篇 非接触隐蔽火源发火模型与危害形成机制

第一章 绪论	(265)
第一节 煤自燃预测技术研究进展	(266)
第二节 煤自然发火预测理论及技术体系结构	(270)
第二章 煤自然发火机理	(272)
第一节 煤氧复合微观机理	(272)
第二节 煤的氧化放热性及衡量指标	(286)
第三节 煤自然发火主要影响因素分析	(296)
第三章 煤炭自然发火数学模型及数值计算	(312)
第一节 松散煤体宏观描述	(312)
第二节 松散煤体漏风及氧气输运规律	(317)
第三节 松散煤体蓄散热过程数学模型	(327)
第四节 松散煤体自然发火数学模型	(332)
第五节 松散煤体自然发火模型数值计算方法	(336)
第四章 实验室测试参数	(341)
第一节 煤自燃特性参数实验测试	(341)

目 录

第二节 煤体粒度与自燃性关系实验测试	(354)
第三节 松散煤体中氧气扩散系数实验测试	(360)
第四节 松散煤体等效参数确定	(364)
第五章 综放面现场观测参数及数据处理	(378)
第一节 现场参数观测方法	(378)
第二节 观测数据处理与分析	(384)
第三节 忻州窑矿 8916 综放面采空区观测实例	(392)
第四节 东滩矿巷道现场观测实例	(407)
第六章 综放面采空区自然发火预测技术及实践	(417)
第一节 综放面采空区自然发火特点	(417)
第二节 采空区自燃危险区域划分理论	(419)
第三节 采空区浮煤自燃危险性预测方法	(428)
第四节 忻州窑矿 8914 综放面采空区自然发火预测	(430)
第七章 综放面巷道周边煤体自然发火预测技术及实践	(458)
第一节 综放面巷道周边煤体自燃特点及巷道类型	(458)
第二节 巷道自燃危险区域划分理论	(461)
第三节 巷道松散煤体自然发火预测方法	(468)
第四节 东滩矿 4308 综放面巷道自然发火预测	(475)

第三篇 煤炭非接触隐蔽火源自燃早期探测技术

第一章 概述	(503)
第一节 煤炭自燃的防治体系	(505)
第二节 煤炭自燃预测预报与火源探测	(509)
第二章 煤的自燃特性与最短发火期预测	(520)
第一节 煤的自燃特性	(520)
第二节 松散煤体自然发火模拟实验	(543)
第三节 松散煤体自然发火期预测	(553)

第三章 煤炭自燃指标气体的预报技术	(563)
第一节 煤炭自燃指标气体的选择	(563)
第二节 煤炭自燃指标气体的吸附与浓缩	(574)
第三节 煤炭自燃指标气体的检测技术	(591)
第四节 煤炭自燃的示踪气体预报技术	(593)
第四章 近距离煤炭自燃火源的红外探测技术	(601)
第一节 红外探测机理及探测仪器	(601)
第二节 红外探测辐射场异常的影响因素	(611)
第三节 近距离煤炭自燃火源的红外探测技术	(618)
第四节 煤巷近距离火源的红外探测实践	(632)
第五章 煤炭自燃区域的氡气探测技术	(645)
第一节 同位素测氡法探测煤层自燃火源位置的机理	(645)
第二节 氡及其子体运移规律	(650)
第三节 氡析出与温度之间的关系	(658)
第四节 同位素测氡法探测煤层自燃火源位置的方法	(663)
第五节 氡气探测法的应用与实践	(666)
第六章 煤炭自燃温度预测预报法	(669)
第一节 便携式测温预测预报法	(669)
第二节 煤炭自燃温度监测系统预测预报法	(676)

第四篇 煤矿非接触隐蔽火源防治与综合治理技术推广

第一章 煤炭自燃综述	(683)
第一节 煤自燃学说	(684)
第二节 煤的自燃性	(687)
第三节 煤低温自燃过程	(689)
第二章 煤自燃环境分析	(716)
第一节 巷道煤层自燃环境分析	(716)

目 录

第二节 采空区遗煤自燃环境	(726)
第三节 现场煤炭自燃的规律	(733)
第三章 煤炭自燃的预测预报	(738)
第一节 煤的自燃倾向性测试	(738)
第二节 巷道自燃危险区域预测	(740)
第三节 采空区遗煤自然发火预测	(742)
第四节 煤层自燃预报及气体监测	(749)
第四章 煤样自然发火实验	(754)
第一节 煤自燃特性参数实验	(754)
第二节 煤体粒度与自燃性关系测试	(770)
第五章 注浆与注砂防灭火技术	(776)
第一节 注浆防灭火系统	(776)
第二节 注浆方式	(781)
第三节 注砂防灭火	(786)
第六章 调节风压防灭火技术	(788)
第一节 调压技术的基本原理及方式	(788)
第二节 采空区全风压调压技术的应用	(794)
第三节 联合调压法防灭火技术的应用	(807)
第七章 堵漏技术	(813)
第一节 灰膏组合材料封堵漏风	(813)
第二节 聚胺脂泡沫塑料喷堵漏风	(815)
第八章 凝胶防灭火技术	(819)
第一节 胶体防灭火材料	(819)
第二节 胶体防灭火工艺及应用	(826)
第九章 氮气防灭火技术	(835)
第一节 氮气防灭火机理及特点	(835)
第二节 注氮防灭火系统	(837)
第三节 注氮防灭火技术的应用	(843)

目 录

第十章 防灭火技术的组织与管理	(850)
第一节 组织保障措施	(850)
第二节 生产管理措施	(853)
第三节 专业管理措施	(857)
第四节 监督检查措施	(861)
第十一章 四处火点的治理方案	(863)
第一节 348 工作面材料道火点处理	(863)
第二节 2336 工作面溜子道西段火点处理	(875)
第三节 2339 通道火点处理	(889)
第四节 2342 综放面停采线火点处理	(898)
第十二章 工作面防火处理实施方案	(911)
第一节 2347 区段防火	(911)
第二节 2334 区段防火	(923)
第三节 2349 综放面防火	(931)
第四节 363-3 高档放顶煤工作面防火	(935)
第五节 340-1 区段防火	(942)
第六节 347-3 高档放顶煤工作面防火	(948)

(四) 输出结果及处理

- 1) 每天各节点温度、氧浓度值。
- 2) 计算终止时间时的温度及氧浓度分布等值线图。
- 3) 自然发火时间。
- 4) 可能发火区域。

表 7-9 预测软件输入参数一览表

类型	参数名称	标志符	单 位	取值范围	取值依据
计算参数	网格节点数	L1 × M1		< 200 × 200	内存容量
	松弛因子	RELAX		0 ~ 1	收敛性
	方程迭代次数	NTIMES	次	3 ~ 10	内存及精度
	初始氧浓度迭代次数	IT02	次	1 ~ 100	内存及精度
	时间步长	DT	S	≤ 86400	稳定性
	计算时间	LAST	天/2	> 1	自选
计算区域几何参数	计算区域长度	XL	cm	> 1000	实际条件
	计算区域宽度	YL	cm	> 1000	实际条件
	煤层厚度	CMH	cm	3 > 280	实验条件
	沿空侧采空区计算宽度	GOBW	cm	> 100	实际条件
	沿空侧采空区浮煤厚度	GOBH	cm	> 100	实际条件
	巷道顶宽	GATEW	cm	200 ~ 500	实际条件
	巷道高度	GATEH	cm	200 ~ 400	实际条件
	顶煤实体煤厚度 (即子区域Ⅱ)	TOPC	cm	0 ~ 1000	实际条件
	沿空侧煤柱宽度	SIDEC	cm	0 ~ 1000	实际条件
子区域参数	子区域Ⅰ空隙率	POROUS1	-	0 ~ 0.8	现场观测
	子区域Ⅱ空隙率	POROUS2	-	0 ~ 1	现场观测
	子区域Ⅲ空隙率	POROUS3	-	0 ~ 1	现场观测
	子区域Ⅳ空隙率	FOROUS4	-	0 ~ 1	现场观测
	子区域Ⅴ空隙率	POROUS5	-	0 ~ 1	现场观测
	子区域Ⅵ空隙率	POROUS6	-	0 ~ 1	现场观测

第二篇 非接触隐蔽火源发火模型与危害形成机制

续表

类型	参数名称	标志符	单 位	取值范围	取值依据
子 区 域 参 数	子区域Ⅵ空隙率	POROUS7	-	0~1	现场观测
	子区域Ⅶ空隙率	POROUS8	-	0~1	现场观测
	子区域Ⅷ空隙率	PO4OUS9	-	0~1	现场观测
	子区域Ⅸ空隙率	POROUS11	-	0~1	现场观测
	子区域Ⅰ粒度系数	SIZE1	-	0~2	实验及观测
	子区域Ⅱ粒度系数	SIZE2	-	0~2	实验及观测
	子区域Ⅲ粒度系数	SIZE3	-	0~2	实验及观测
	子区域Ⅳ粒度系数	SIZE4	-	0~2	实验及观测
	子区域Ⅴ粒度系数	SIZE5	-	0~2	实验及观测
	子区域Ⅵ粒度系数	SIZE6	-	0~2	实验及观测
	子区域Ⅶ粒度系数	SIZE7	-	0~2	实验及观测
	子区域Ⅷ粒度系数	SIZE8	-	0~2	实验及观测
	实体煤侧漏风因子	AIR1	-	0或1	现场观测
	顶煤漏风因子	AIR2	-	0或1	现场观测
	沿空侧漏风因子	AIR3	-	0或1	现场观测
基 本 物 性 参 数	实体煤密度	RHOM	g/cm ³	1~2	实验测定
	空气密度	GHOG	g/cm ³	1.29×10^{-3}	文献
	岩层密度	GHOB	g/cm ³	1~4	实验测定
	实体煤比热容	CHM	J/(g·℃)	1.2~1.8	实验测定
	空气比热容	CHG	J/(g·℃)	1.01	文献
	岩层比热容	CHB	J/(g·℃)	1~2	实验测定
	实体煤导热系数	KEM	J/(cms℃)	$1 \sim 4 \times 10^{-3}$	实验测定
	空气导热系数	KEG	J/(cms℃)	$2 \sim 3 \times 10^{-4}$	文献
	岩层导热系数	KEB	J/(cms℃)	$2 \sim 6 \times 10^{-3}$	实验测定
	氧气扩散系数	DISP	cm ² /s	0.2~0.4	文献

续表

类型	参数名称	标志符	单 位	取值范围	取值依据
初始及边界条件参数	巷道风流温度	T0	℃	10 ~ 30	现场实测
	煤岩原始温度	T1	℃	10 ~ 30	现场实测
	煤岩初始高温	T2	℃	> 10	现场观测
	巷道表面氧气浓度	OX0	%	21	现场实测
	计算区域外边界氧气浓度	OX1	%	0 ~ 21	观测及推算
	观测钻孔深度	XXorYY	cm	100 ~ 1000	现场测定
	观测钻孔角度	THTAGD	度	0 ~ 90	现测测定
	观测钻孔底氧气浓度	OXCL	%	0 ~ 21	现测测定
	观测钻孔底温度	TCL	℃	> 10	现测测定
	风流对流换热系数	HCT	J/(cm ² s℃)	1 ~ 6 × 10 ⁻⁴	现场实测
	巷道供风量	AIRFLOW	cm ³ /min	100 ~ 1000	现场实测
	初始高温点距巷道表面垂直距离	THIGHH	cm	> 1000	现测测定
	初始高温点距巷道表面水平距离	THIGHW	cm	> 1000	现测测定
	初始高温点温度	T3	℃	> 10	现测测定
	巷道冒顶范围系数	XD	-	- 3 ~ 3	现场观测
	防灭火处理前火区范围最低温度	TMCL	℃	30 ~ 200	实测或假定
	防灭火处理后火区平均温度	TCOOL	℃	20 ~ 100	实测或假定
	防灭火处理后火区氧气浓度	OXCOOL	%	0 ~ 21	实测或假定

第四节 东滩矿 4308 综放面巷道自然发火预测

一、4308 综放面概况

4308 综采放顶煤工作面位于东滩矿四采区上部（如图 7-4），东接 4307 综放面（未采），面临 4309 综放面采空区，北起 4 采区北边界线，南至设计停采线（四采区回风上山中心线南 10m），一次开采煤层厚度 5.89m，工作面

倾斜长度 202.8m, 工作面走向长度 2162.6m。轨顺(南)于 98 年 4 月 6 日沿 4309 采空区掘进, 掘进速度为 350 (米/月), 采用局扇通风掘进头供风量 $200 \sim 300 \text{ m}^3/\text{min}$ 。4308 轨顺与 4309 运顺中, S 线间距 7m, 煤柱平均厚度 2.5 ~ 3m, 6 月 10 日与 2[#] 提贯通轨顺沿空掘进巷道长度 1125m, 沿实体煤掘进长度为 1037m, 轨顺南段地质剖面如图 7-5。4308 轨顺地质剖面图如图 5-18。

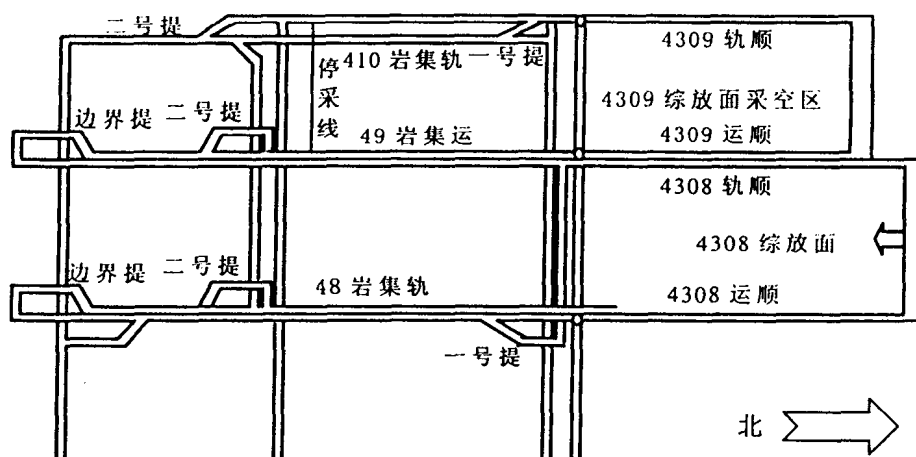


图 7-4 4308 综放面位置示意图

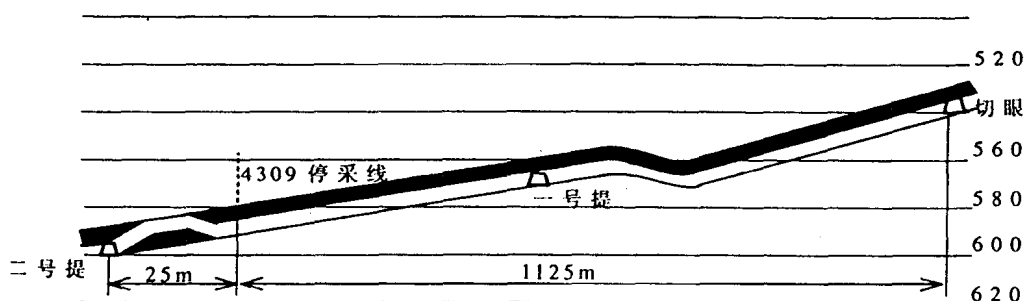


图 7-5 4308 轨顺南段地质剖面图

由于工作面通风路线长, 与相邻采空区相联, 漏风通道多, 因此, 沿空巷道掘进和回采期间松散煤体存在自燃危险性。为此, 结合 4303 综放面的

观测结果对其自然发火危险程度、可能发火地点进行预测,并根据预测结果制定防灭火技术方案,以保障综放面安全正常生产。

二、煤样及空气基本物性参数

东滩矿煤样及空气的基本物性参数取值如表 7-10。

表 7-10 基本物性参数取值表

参 数	取 值	参 数	取 值	参 数	取 值
ρ_g	$1.196 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$	D	$0.08 \text{ cm}^2/\text{s}$	λ_m	$1.2 \times 10^{-3} \text{ W/(cm}^\circ\text{C)}$
ρ_m	1.4 g/cm^3	D_{O_2}	$0.35 \text{ cm}^2/\text{s}$	λ_g	$0.25 \times 10^{-3} \text{ W/(cm}^\circ\text{C)}$
C_g	$1.01 \text{ J/(g}^\circ\text{C)}$	c_m	$1.53 \text{ J/(g}^\circ\text{C)}$		

三、东滩矿 3 号煤自燃特性参数及极限参数

(一) 东滩矿 3 号煤层自燃特性参数

根据 XK-Ⅲ型煤低温自然发火实验台测试及分析,根据东滩矿 3 层煤(平均粒度为 4.74mm)的实验测试和理论分析得知,东滩煤矿煤样自燃特性参数如表 7-11 和图 7-12。

表 7-11 东滩矿煤样自燃特性参数表 (平均粒度: 4.74mm)

时间 (天)	煤温 ($^\circ\text{C}$)	$\Delta T/\Delta \tau$ ($^\circ\text{C/h}$)	$q_0(T) \times 10^5 \text{ J/(s} \cdot \text{cm}^3)$	$V_{O_2}^A(T) \times 10^{-1} \text{ molJ/(s} \cdot \text{cm}^3)$
1	21.48	0.057	3.55	24.97
3	24.21	0.057	2.82	27.58
5	26.86	0.055	3.60	28.68
7	29.69	0.059	4.24	30.98
9	32.86	0.066	4.48	31.81
11	36.65	0.079	3.78	33.69

续表

时间 (天)	煤温 (°C)	$\Delta T/\Delta \tau$ (°C/h)	$q_0 (T) \times 10^5 \text{ J/ (s} \cdot \text{cm}^3)$	$V_{O_2}^0 (T) \times 10^{-1} \text{ molJ/ (s} \cdot \text{cm}^3)$
12	38.40	0.073	5.25	38.28
13	40.58	0.091	4.63	43.76
14	43.03	0.102	4.97	45.55
15	45.31	0.095	6.24	49.07
16	48.36	0.127	6.96	52.96
17	51.79	0.143	6.82	56.930
18	54.93	0.131	7.97	61.69
19	58.74	0.159	8.82	59.62
20	62.89	0.173	9.85	64.16
21	67.76	0.162	10.90	71.55
22	72.63	0.203	11.25	81.94
23	78.32	0.237	14.63	115.99
24	85.06	0.281	25.25	143.54
25	94.61	0.398	42.22	186.01
26	107.25	0.527	64.37	234.93
27	124.87	0.734	177.24	458.86
28	150.14	1.053	287.49	747.52
29	195.87	1.905	546.00	1463.42

(二) 4308 面巷道自燃极限参数

4308 综放面巷道掘进时, 供风量为 $250 \sim 300 \text{ m}^3/\text{min}$, 地层温度在 32°C , 巷道风流温度在 $26 \sim 29^\circ\text{C}$ 。巷道断面为 12 m^2 , 梯形支护, 顶煤最大厚度为 3 m 。工作面生产期间供风量为 $820 \sim 930 \text{ m}^3/\text{min}$, 风流温度 $23 \sim 29^\circ\text{C}$, 工作面温度 $26 \sim 28^\circ\text{C}$, 巷道最小风量段供风量为 $150 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

巷道不同风量与巷道对流换热系数的关系如表 7-12。

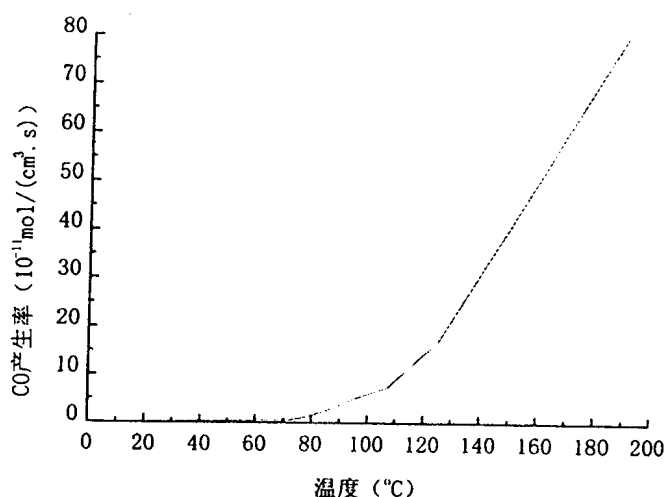


图 7-6 东滩煤样 CO 产生率与煤温关系曲线

表 7-12 巷道不同风量与巷道对流换热系数的关系

$Q \text{ m}^3 / \text{min}$	150	200	250	300	350	800	850	900	950
$\alpha 10^{-4} \text{ J} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$	1.026	1.185	1.325	1.451	1.568	4.696	4.930	5.160	5.388

根据公式 (7-4)、(7-8) 和 (7-11) 可分别计算出巷道松散顶煤自燃的最小浮煤厚度、下限氧浓度和最大煤体粒度, 分别见表 7-13、表 7-14 和表 7-15。

表 7-13 巷道不同供风量与不同温度时顶煤的极限浮煤厚度 (cm)

极 限 煤 厚 供风量 Q	温度 T									
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
150	16.0	26.6	28.2	32.7	34.7	35.3	36.9	39.0	38.1	30.9
200	18.4	30.8	32.6	37.8	40.1	40.7	42.6	45.0	44.0	35.7
250	20.6	34.4	36.4	42.2	44.8	45.5	47.6	50.4	49.2	39.9
300	22.6	37.7	39.9	46.3	49.1	49.9	52.1	55.2	53.9	43.7
350	24.4	41.8	43.1	50.0	53.1	53.9	56.3	59.6	58.3	47.2
800	71.5	122.0	129.2	150.0	158.9	161.4	168.7	178.5	174.5	141.3
850	76.7	128.1	135.6	157.2	166.8	169.4	177.1	187.4	183.2	148.4

续表

极限煤厚 $h_{\min}$	温度 T									
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
供风量 Q										
900	80.3	134.0	141.9	164.5	174.6	177.4	185.4	196.1	191.7	155.3
950	83.8	140.0	148.2	171.8	182.3	185.2	193.6	204.8	200.2	162.1

表 7-14 巷道不同供风量与不同温度时顶煤的下限氧浓度 (%) (h 取 300cm)

下限氧 $C_{\min}$	温度 T									
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
供风量 Q										
150	1.11	1.87	1.98	2.29	2.43	2.47	2.58	2.73	2.67	2.16
200	1.29	2.16	2.28	2.65	2.81	2.85	2.98	3.16	3.08	2.50
250	1.44	2.41	2.55	2.96	3.14	3.19	3.33	3.53	3.45	2.79
300	1.58	2.64	2.80	3.24	3.44	3.49	3.65	3.86	3.78	3.06
350	1.71	2.85	3.02	3.50	3.72	3.77	3.94	4.17	4.08	3.30
800	5.11	8.55	9.05	10.50	11.13	11.31	11.82	12.51	12.22	9.90
850	5.37	8.96	9.49	11.00	11.70	11.86	12.39	13.11	12.82	10.38
900	5.62	9.38	9.94	11.52	12.22	12.42	12.98	13.73	13.42	10.87
950	5.87	9.80	10.38	12.03	12.76	12.97	13.55	14.34	14.02	11.35

表 7-15 巷道不同供风量与不同浮煤厚度时的顶煤极限煤体粒度 (cm)

极限粒度 d	供风量 Q								
	150	200	250	300	350	800	850	900	950
厚度 h									
0.5	8.50	8.44	8.39	8.34	8.30	7.24	7.17	7.05	6.98
0.75	8.63	8.59	8.55	8.52	8.49	7.75	7.70	7.24	7.15
1.0	8.69	8.66	8.64	8.61	8.59	8.02	7.98	7.37	7.22
1.25	8.73	8.71	8.69	8.67	8.65	8.19	8.16	7.69	7.43

续表

极限 厚度 h	供风量 Q 粒 度 d	150	200	250	300	350	800	850	900	950
1.50		8.76	8.74	8.72	8.70	8.69	8.30	8.30	7.88	7.64
2.0		8.79	8.78	8.76	8.75	8.74	8.45	8.45	7.97	7.71
2.5		8.81	8.80	8.79	8.78	8.77	8.53	8.53	8.10	7.94
3.0		8.82	8.81	8.81	8.80	8.79	8.59	8.59	8.21	8.14

四、4308 沿空巷道自燃危险区域划分

根据巷道煤层所处位置、松散煤体堆积形态、漏风动力、散热条件等自燃环境特点,结合煤自燃极限参数,若以 4308 综放面巷道煤体温度为 35°C 、掘进和回采时的供风量分别为 $300\text{m}^3/\text{min}$ 和 $800\text{m}^3/\text{min}$ 、松散顶煤厚度为 3m 考虑,则可得巷道自燃危险区域划分的极限参数如表 7-16。

表 7-16 不同风量条件下巷道煤体自燃极限参数

$Q\text{m}^3/\text{min}$	150	200	250	300	350	800	850	900	950
$h_{\min}$ (cm)	39.0	45.0	50.4	55.2	59.6	178.5	187.4	196.1	204.8
C (%)	2.73	3.16	3.53	3.86	4.17	12.51	13.11	13.73	14.34
$d_{\max}$ (cm)	8.82	8.81	8.81	8.80	8.79	8.59	8.59	8.21	8.14

根据巷道实际条件和极限参数,巷道煤层自燃危险区域等级可分为极易自燃区域、易自燃区域和可能自燃区域三类。

(一) 极易自然区域

1) 实际判定条件

掘进期间: $[h (110.4 \sim 138.0) \text{ cm} \cap (C_{O_2} > 3.86\%) \cap (d < 8.8\text{cm})]$

回采期间: $[h > (357.0 \sim 446.25) \text{ cm} \cap (C_{O_2} > 12.51) \cap (d < 8.59\text{cm})]$