

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0271-06

# 基于氧气体积分数的高瓦斯采空区 自燃“三带”的划分

宋万新, 杨胜强, 徐全

(中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 用氧气体积分数法划分低瓦斯采空区自燃“三带”是目前在工程实践中应用最为广泛, 也是最有效的方法。但是该方法没有考虑采空区的瓦斯体积分数的影响, 在高瓦斯采空区的应用就受到了局限。根据化学动力学原理, 通过理论推导, 提出了基于氧气体积分数的高瓦斯采空区自燃“三带”的划分标准, 并利用该标准对现场的高瓦斯采空区进行了划分。通过对采空区内遗煤温度的观测分析, 验证了该划分标准的准确性, 为高瓦斯矿井采空区早期自然发火预测及火区治理提供了依据。

**关键词** 氧气体积分数; 物理吸附; 耗氧速度; 高瓦斯采空区; 自燃“三带”

**中图分类号** TD 752 **文献标识码** A

## Division of Spontaneous Combustion “Three-Zone” in High-Gas Goaf Based on Oxygen Concentration

SONG Wan-xin, YANG Sheng-qiang, XU Quan

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** The oxygen concentration method is the most effective and most commonly used method in dividing spontaneous combustion “three zone” in low-gas goaf in engineering practice at present. But this method cannot be directly applied to high-gas goaf, because it neglects gas concentration. Based on the principle of chemical dynamics and theoretical derivation, the division standard of the spontaneous combustion “three zone” in high-gas goaf was proposed, and spontaneous combustion “three zone” in actual high-gas goaf was divided by this standard. The result was tested and verified by measuring and analyzing the temperature of residual coal in goaf. The study provides guidance for prediction and prevention of spontaneous combustion in high-gas goaf.

**Key words** oxygen concentration; physisorption; rate of oxygen consumption; high-gas goaf; spontaneous combustion “three-zone”

矿井瓦斯和煤层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, 对于矿井的生产和人员的安全则构成了

双重威胁。因此, 研究采空区遗煤的自燃规律以便提出针对性的防灭火措施, 对于保障采煤工作面生产的安全具有重要的意义。

收稿日期: 2011-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50834005); 国际合作攻关项目(2008DFB70100)

作者简介: 宋万新(1968-), 男, 山东省济宁市人, 博士, 从事矿井火灾与瓦斯防治方面的研究。

E-mail: songwx2004@yahoo.com.cn

Tel: 18952236176

目前,对于采空区自燃“三带”的划分,通常有 3 种划分指标:采空区漏风风速、采空区氧气体积分数以及采空区温度<sup>[1-3]</sup>。其中,以采空区的氧气体积分数为划分标准的方法是目前在工程实践中应用最为广泛,也是最有效的划分方法<sup>[4]</sup>。但是氧气体积分数法没有考虑采空区的瓦斯体积分数的影响,适用于低瓦斯采空区。

本文在充分考虑采空区瓦斯体积分数的前提下,探讨了利用氧气体积分数法来划分高瓦斯易自燃煤层采空区的自燃“三带”。

## 1 低瓦斯采空区自燃“三带”中的氧气体积分数变化分析

### 1.1 采空区中氧气体积分数逐渐降低的原因分析

采空区的遗煤接触空气后,要经过对氧气的物理吸附、化学吸附和氧化反应 3 个过程<sup>[5]</sup>。由于空气中的主要气体是氮气和氧气,遗煤对氧气进行物理吸附的同时,也对空气中的氮气进行物理吸附,也就是说,遗煤其实是对  $N_2/O_2$  二元气体的物理吸附,文献[6]表明,煤吸附  $N_2$  的能力强于吸附  $O_2$ ,说明遗煤对空气中  $N_2/O_2$  二元气体达到物理吸附平衡时,吸附相中的  $O_2$  体积分数低于空气中的  $O_2$  体积分数,会使空气中的  $O_2$  体积分数稍微升高。文献[7]表明,煤对氧的物理吸附过程非常之快,在数秒时间内物理吸附就能够达饱和和吸氧量的 80% 左右,1 min 左右就基本能够达到吸附平衡。在 1 min 时间内,工作面的推进距离非常小(按工作面日推进距 6 m/d 计算,1 min 平均仅仅推进 0.4 cm),采空区前移的距离和工作面的推进距离相等,故采空区新增遗煤量也非常小。由于靠近工作面的采空区漏风量较大,物理吸附造成的  $O_2$  体积分数的变化量非常小,可忽略不计。可以认为,遗煤对  $O_2$  的物理吸附达到平衡后, $O_2$  体积分数基本上是不变的。

鉴于此,散热带中氧气体积分数的降低主要是由于化学吸附和氧化反应造成的。

### 1.2 划分自燃“三带”的分析

风速指标和氧气体积分数指标实质上是一致的,2 者都是以采空区内漏风流情况作为划分“三带”的依据。只是在采空区内测量漏风风速较难做到(如采空区内设点困难、测量仪器精度不足、采空区风流方向的不可预见性等因素),按漏风速划分“三带”的标准通常用在数值模拟计算分析中,而

测取采空区内氧气体积分数相对容易,所以在现场实测分析中多采用按氧气体积分数划分“三带”<sup>[8]</sup>。以氧气体积分数 18% 作为界定散热带和自燃带的指标,并不是因为氧气体积分数大于 18% 遗煤不能自然发火,而是由于散热带的漏风风速过大带走了氧化生成的热量所致,它表示采空区漏风流经过散热带过程中,由于和遗煤发生氧化反应,其氧气体积分数由 21.96% 降低了 2.96%,从而氧气体积分数变为 18%。

## 2 基于氧体积分数的低瓦斯采空区自燃“三带”划分标准的确定

对于高瓦斯工作面采空区来说,采空区的气样中氧气体积分数降低的主要原因有 2 个:1) 采空区遗煤和邻近煤层解析出来的瓦斯气体冲淡了氧气体积分数;2) 采空区遗煤的化学吸附和低温氧化消耗掉部分氧气。

鉴于氧气体积分数数值的降低并不仅仅是由于煤的氧化造成的,因此,再按传统的氧气体积分数指标来划分高瓦斯煤层采空区自燃“三带”显然是不准确的。也就是说,划分高瓦斯煤层采空区“三带”的氧气体积分数指标需要进行适当的改进。

### 2.1 自燃带与窒息带分界线氧体积分数的确定

以氧气体积分数 10% 作为界定自燃带与窒息带的指标仍然是合理的,因为瓦斯作为一种窒息性气体,和氮气一样对煤的自燃起抑制作用,这样当氧气体积分数小于 10% 时,由于缺氧,煤的氧化自燃过程将无法进行,也就是说,这时所处的区域属于窒息带。

### 2.2 散热带与自燃带分界线氧体积分数的确定

对于界定散热带与自燃带的氧气体积分数指标,可以采用类比的方法来求得。

对于一个给定的低瓦斯煤层(瓦斯体积分数可忽略不计)工作面采空区,我们分析以下 2 种情况:①当进风巷进入的是新鲜空气( $C_{O_2} = 20.96\%$ )时;②当进风巷进入的气体是同样流量的含瓦斯空气时,其中,瓦斯的体积分数为  $C_{CH_4}$ ,则这时的氧气体积分数为  $C_{O_2} = 20.96\%(1 - C_{CH_4})$ 。作为同一个工作面和采空区,也就是说,工作面的供风量、风压差、采空区内冒落岩石堆放压实状况、遗留浮煤的分布、采空区内漏风源、漏风汇的位置和强度、工

作面的推进速度等完全相同，则在这2种情况下，采空区的流场分布是相同的，即采空区各点的漏风速度是对应相等的，依据采空区漏风风速法，在这两种情况下的“自燃带”和“散热带”的分界线的位置应该是完全相同的。

但在这2种情况下，由于进风流的氧气体积分数是不相等的，则采空区各点所对应的氧气体积分数也是不相等的，“自燃带”和“散热带”的分界线的氧气体积分数也相应地发生了改变。

煤的耗氧速度  $V$  与温度  $T$  和氧气的体积分数  $C_{O_2}$  等因素有关<sup>[9]</sup>。在散热带，由于漏风风速过大热量不能积聚，温度  $T$  基本不变。由化学动力学知：在温度一定时，耗氧速度  $V$  (反应速度) 可近似认为与氧体积分数成线性关系，

$$\text{即} \quad V = k \cdot C_{O_2} \quad (1)$$

式中： $K$  为反应速率常数，仅与温度有关。

可列出采空区内漏风流任一流线上氧体积分数随时间变化的微分方程

$$dC_{O_2} = V dt \quad (2)$$

式中： $t$  为时间。

把式(1)代入式(2)得

$$dC_{O_2} = k C_{O_2} dt \quad (3)$$

积分，得

$$\ln C_{O_2} = kt + C \quad (4)$$

当进风巷进入的是新鲜空气，在采空区漏风流的入口，即每条流线的起点， $t=0$  时， $C_{O_2}=20.96\%$ ；在散热带与自燃带的分界线， $t=t_0$  时， $C_{O_2}=18\%$

$$\text{可得：} \quad kt_0 = \ln \frac{18}{20.96}$$

当进入采空区的漏风流是含瓦斯空气时，由于采空区的流场分布情况 and 无瓦斯情况完全相同，则采空区流线的分布情况也完全相同，式(4)仍然是每一流线上氧体积分数随时间变化的关系式，根据已知条件，在采空区漏风流的入口， $t=0$  时， $C_{O_2} = 0.2096(1 - C_{CH_4})$

$$\text{则} \quad C = \ln[0.2096(1 - C_{CH_4})]$$

在散热带与自燃带的分界线， $t=t_0$  时，

$$\begin{aligned} \ln C_{O_2} &= kt_0 + C = \\ &= \ln \frac{18}{20.96} + \ln[0.2096(1 - C_{CH_4})] = \\ &= \ln[0.18(1 - C_{CH_4})] \end{aligned}$$

$$\text{所以，} \quad C_{O_2} = 0.18(1 - C_{CH_4}) \quad (5)$$

因此，当进入采空区的漏风流是含瓦斯空气（氧气体积分数  $C_{O_2} = 0.2096(1 - C_{CH_4})$ ）时，经过整个散热带的低温氧化过程后，在散热带与自燃带的分界线处，氧气体积分数变为  $C_{O_2} = 0.18(1 - C_{CH_4})$ 。那么，含瓦斯空气在流经整个散热带的过程中，由于氧化消耗，氧气体积分数降低了  $\Delta C_{O_2} = 0.0296(1 - C_{CH_4})$ 。权且称  $\Delta C_{O_2}$  散热带氧体积分数氧化降低值。

含瓦斯漏风流（瓦斯体积分数为  $C_{CH_4}$ ）在采空区散热带流动过程中，氧和遗煤发生低温氧化，氧受到消耗，氧体积分数氧化降低值  $\Delta C_{O_2} = 0.0296(1 - C_{CH_4}) < 2.96\%$ ，但氧化反应同时会产生  $CO$ 、 $CO_2$  等气体，即使不考虑低温氧化产生的气体，瓦斯体积分数也最多仅仅升高为原值的 1.03 倍，因此在整个散热带，瓦斯的体积分数变化很小。那么，可以认为，在整个散热带的瓦斯体积分数是近似相等的。

通过以上分析可看出，当高瓦斯采空区散热带的瓦斯体积分数为  $C_{CH_4}$  且分布均匀时，从工作面进入的新鲜空气，由于氧化消耗，散热带和自燃带的分界线处的散热带氧体积分数氧化降低值  $\Delta C_{O_2} = 0.0296(1 - C_{CH_4})$ 。

而在高瓦斯煤层工作面后部的采空区，瓦斯不仅来源于遗煤，而且来源于邻近层（往往邻近层涌出的瓦斯占大多数），瓦斯体积分数场的分布较复杂，分布规律很难确定，确定散热带和自燃带分界线处的氧气体积分数就更加困难，因此进行简化处理，用采空区散热带的平均瓦斯体积分数  $\overline{C_{CH_4}}$  来代表整个散热带的瓦斯体积分数，并把散热带的瓦斯体积分数看做是分布均匀的。根据上面的结论，由于漏风流流经整个散热带的过程中的氧化消耗，在散热带和自燃带分界线处，散热带氧体积分数氧化降低值

$$\Delta C_{O_2} = 0.0296(1 - C_{CH_4}) \quad (6)$$

式中： $\overline{C_{CH_4}}$  为采空区散热带的平均瓦斯体积分数。

若把散热带和自燃带分界线处的瓦斯体积分数设为  $C_{CH_4}$ ，则仅由于瓦斯的冲淡，分界线处没有经过氧化消耗时的氧体积分数为  $C_{O_2} = 0.2096(1 - C_{CH_4})$ ，根据前面的结论，当采空区散热带

带的平均瓦斯体积分数为  $\overline{C_{CH_4}}$  时, 由于氧化消耗, 氧气体积分数降低了  $\Delta C_{O_2} = 0.0296\%(1 - \overline{C_{CH_4}})$ 。因此, 在散热带与自燃带的分界线处, 氧气体积分数为

$$C_{O_2} = 0.2096(1 - C_{CH_4}) - 0.0296\%(1 - \overline{C_{CH_4}}) \quad (7)$$

式中:  $C_{O_2}$  为在散热带与自燃带的分界线处的氧气体积分数;  $C_{CH_4}$  为在散热带与自燃带的分界线处的瓦斯体积分;  $\overline{C_{CH_4}}$  为采空区散热带的平均瓦斯体积分。

### 3 综放面采空区自燃“三带”的划分

#### 3.1 工作面概况

山西某矿 15101 综放工作面正开采的 15<sup>#</sup>煤层为高瓦斯易自燃煤层, 埋藏深度为 423~517 m。工作面走向可采长度约 1300 m。倾斜长 152 m, 煤层厚 4.68~5.35 m, 平均厚度 5.02m, 煤层倾角 5°~14°, 平均倾角 9°。经测试, 该矿 15<sup>#</sup>煤瓦斯含量平均为 15.29 m<sup>3</sup>/t, 煤层瓦斯压力为 0.66 MPa, 接近于瓦斯突出界限 0.74 MPa。15101 工作面内错尾巷布置于 15<sup>#</sup>煤层上方 6 m 左右的 14<sup>#</sup>煤层中, 工作面进、回风巷布置钻场, 沿 15<sup>#</sup>煤层布置了大直径平行钻孔进行本煤层抽采, 并同时在内错尾巷中布置小直径钻孔预抽 14<sup>#</sup>煤层瓦斯。15101 综放面高抽巷沿 9<sup>#</sup>煤层布置, 距 15<sup>#</sup>煤层顶板距离为 53.9 m, 距离回风巷的水平距离为 60 m 左右。

#### 3.2 测点布置

如图 1 所示, 15101 工作面测点分别布置在进风巷和回风巷, 每个测点设置一个温度探头和取样束管, 并将其放入钢管中加以保护, 随着工作面的推进, 传感器和束管都将埋入采空区, 通过每天的传感器读数和束管系统的气体分析数据来掌握采空区内的氧化情况。观测数据包括风流温度, O<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> 的体积分数及工作面进度等。

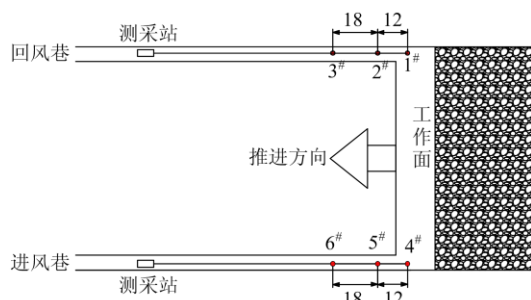


图 1 测温取样观测系统

Fig.1 Temperature measuring and gas sampling system

### 3.3 用氧气体积分数法对高瓦斯煤层采空区自燃“三带”的划分

#### 3.3.1 氧气体积分数指标的确定

经测算, 15101 工作面近部采空区瓦斯体积分平均在 6% 左右, 散热带的平均瓦斯体积分取  $\overline{C_{CH_4}} = 6\%$ , 由于在没有明确散热带与自燃带的分界线位置之前无法确定分界线上的瓦斯体积分  $C_{CH_4}$  的大小, 故散热带与自燃带分界线处的氧体积分  $C_{O_2} = 20.96\% - (C_{CH_4} - \overline{C_{CH_4}}) \times 2.96\%$  仍然未知。因此不能直接用氧体积分来找出散热带与自燃带的分界线。

但根据公式 (6), 可知分界线上点的氧体积分氧化降低值 (纯粹由于低温氧化)  $\Delta C_{O_2} = 2.96\%(1 - \overline{C_{CH_4}}) = 2.78\%$ , 而且能容易求出各测点距工作面不同位置的氧体积分氧化降低值

$$\Delta C'_{O_2} = 20.96\%(1 - C_{CH_4}) - C_{O_2} \quad (8)$$

式中:  $\Delta C'_{O_2}$  为测点的氧体积分氧化降低值;  $C_{CH_4}$  为测点的实测瓦斯体积分;  $C_{O_2}$  为测点的实测氧体积分。

当测点的氧体积分氧化降低值  $\Delta C'_{O_2}$  (由于低温氧化) 等于 2.78% 时, 我们认为测点开始进入自燃带。故可以用氧体积分降低值  $\Delta C_{O_2}$  来找出散热带与自燃带的分界线。

#### 3.3.2 高瓦斯煤层采空区自燃“三带”的划分

由图 1 可知, 在工作面的进风侧和回风侧分别布置了 3 个测点, 但在实测过程中, 由于现场情况较复杂, 其中 1<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>测点损坏, 根据实测, 2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>测点, 5<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>测点的监测数据都能较好地反映氧体积分和温度的变化规律, 由于数据繁多, 占用大量篇幅, 所以在此只用测点 2<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>的温度和氧体积分变化规律比较典型地代表采空区进风巷、回风巷的遗煤氧化升温过程, 实测数据及处理见表 1, 通过图表可见, 随着工作面的推进, 各测点逐渐进入采空区的深部, 采空区的遗煤被逐渐压实, 其孔隙度降低, 风阻增大, 漏风强度减小, 使采空区遗煤处于宜于自燃氧化状态。根据上面的分析可知, 分界线的氧体积分氧化降低值为 2.78%, 再分析表中数据可得出: 2<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup>测点进入可能自燃带的深度分别为 48, 36 m 左右, 可见, 随着工作面进一步推进, 采空区遗煤逐渐压实进入压实区, 由于漏

风的大量减少、瓦斯体积分数的升高，氧气体积分数难以维持浮煤自燃，即使原处于自燃状态的浮煤，也由于缺氧而窒息。实测表明，2<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>测点进入窒息带的深度分别为 140，126 m，可见进风巷可能自燃带较深，而回风巷则较早地进入到窒息带。

表 1 实测数据及处理  
Table 1 The measured values and calculations

测点埋进采空区的深度/m	2 <sup>#</sup> 测点 $C_{O_2}$ / %	2 <sup>#</sup> 测点 $C_{CH_4}$ / %	2 <sup>#</sup> 测点氧体积分数氧化降低值 $\Delta C'_{O_2}$ / %	5 <sup>#</sup> 测点 $C_{O_2}$ / %	5 <sup>#</sup> 测点 $C_{CH_4}$ / %	5 <sup>#</sup> 测点氧体积分数氧化降低值 $\Delta C'_{O_2}$ / %
0	20.7071	0.4235	0.1641	20.96	0	0
12	19.0323	6.894	0.4827	20.0914	1.2942	0.5973
23.9	17.0796	10.0257	1.779	19.4971	2.8257	0.8706
30.7	16.5863	10.1653	2.243	18.6968	4.6653	1.2853
36.2	15.9692	10.4445	2.8016	18.3241	5.2445	1.5366
42.5	15.5522	10.5305	3.2006	17.2659	6.5305	2.3253
48.3	15.3561	10.7908		16.5512	7.5459	2.8271
54.5	15.1236	10.9877		16.1185	8.0772	3.1485
60.1	14.7156	11.6684		15.3574	9.8478	
71.7	14.1464	12.8879		14.7105	11.8879	
83.7	12.7146	18.8018		13.9563	14.8018	
90.1	12.4286	19.8833		13.5556	15.8833	
102	11.5373	22.0876		12.2134	18.3223	
114	11.1398	22.3223		11.0543	19.3286	
126	10.0639	22.1376		10.5796	19.8866	
132.3	9.884	22.8866		10.3235	19.3286	
138.1	9.7078	23.3286		10.1786	19.3375	
144	9.5975	23.3375		9.6555	19.7755	
150.2	9.3434	23.7755		9.5436	20.08	

3.4 用温度指标法对高瓦斯煤层采空区自燃“三带”的划分

依据采空区温升率划分自燃“三带”的标准，当温升率  $k \geq 1^\circ\text{C}/\text{d}$  时，采空区就进入了自燃带，通过测点的温度实测数据（见表 2）及温度变化曲线（见图 2）可看出，在进风侧自工作面向采空区方

向 48~140 m 之间是自燃带，0~48 m 之间是散热带，而大于 140 m 的深部范围则属于窒息带；在回风侧自工作面向采空区方向 36~126 m 之间是自燃带，0~36 m 之间是散热带，而大于 126 m 的深部范围则属于窒息带。

表 2 温度实测值  
Table 2 The measured values of temperature

深度/m		5.8	12	18.4	23.9	30.7	36.2	42.5	48.3	54.5	60.1
温度/ $^\circ\text{C}$	5 <sup>#</sup> 测点	20.3	20.4	20.3	20.4	20.3	20.5	20.3	21.5	23.9	25.5
	2 <sup>#</sup> 测点	21.0	20.9	21.1	21.0	21.1	22.1	23.5	25.0	26.6	27.7
深度/m		66.3	71.7	78	83.7	90.1	96.4	102	107.9	114	119.7
温度/ $^\circ\text{C}$	5 <sup>#</sup> 测点	28.1	29.7	31.9	33.6	35.8	38.3	40.5	43.2	45	46.2
	2 <sup>#</sup> 测点	29.1	30.6	31.9	33.3	35.8	38.9	42.1	45.9	48.5	49.8
深度/m		126	132.3	138.1	144	150.2	156.2	162.4	168.5	174	180
温度/ $^\circ\text{C}$	5 <sup>#</sup> 测点	47.3	48.4	49.4	48.1	46.2	44.8	43.5	42.4	41.3	40.3
	2 <sup>#</sup> 测点	51.5	50.3	49.1	47.9	47.1	46.0	45.2	43.9	43.4	42.9

可见，用温度指标法和氧气体积分数指标法划分的自燃“三带”范围相吻合，具有很好的一致性，验证了研究结果的准确性。

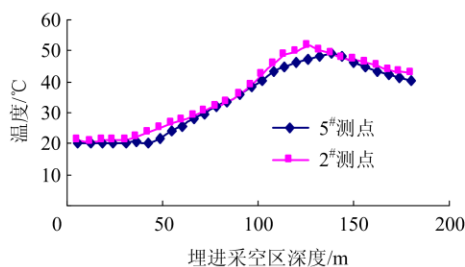


图 2 测点温度与埋进采空区距离关系曲线

Fig.2 The relational curve of temperature & distance submerged the goaf

## 4 结 论

1) 在高瓦斯易自燃煤层采空区, 划分散热带和自燃带的氧气体积分数指标应为散热带氧体积分数氧化降低值(纯粹由于低温氧化而造成的氧体积分数的减小量)  $\Delta C_{O_2} = 2.96\%(1 - \overline{C_{CH_4}})$ , 而不应当是传统的  $C_{O_2} = 18\%$ ; 而界定自燃带和窒息带的氧气体积分数指标仍然是临界氧体积分数  $C_{O_2} = 10\%$ 。

2) 在试验工作面采空区现场取样测定了推进过程中采空区气体氧含量分布规律, 分析得出工作面采空区自燃三带分布为: 工作面进风巷采空区 0~48m 为散热带, 48~140 m 范围为氧化升温带, 140 m 以外区域为窒息带; 工作面回风巷采空区 0~36 m 为散热带, 36~126 m 范围为氧化升温带, 126 m 以外区域为窒息带。

3) 在试验工作面采空区现场实测了推进过程中采空区测点温度的变化规律, 分析得出工作面采空区自燃三带分布为: 工作面进风巷采空区 0~48 m 为散热带, 48~140 m 范围为氧化升温带, 140 m 以外区域为窒息带; 工作面回风巷采空区 0~36 m 为散热带, 36~126 m 范围为氧化升温带, 126 m 以外区域为窒息带。可见, 用温度指标法和氧气体积分数指标法划分的自燃“三带”范围相吻合, 具有很好的一致性, 验证了研究结果的准确性。

## 参考文献:

[1] 邸志乾, 丁广骧, 左树勋, 等. 放顶煤综采采空区“三带”的理论计算与观测分析[J]. 中国矿业大学学报, 1993, 22(1): 8-16.  
DI Zhi-qian, DING Guang-xiang, ZHUO Shu-xun, et al. The theoretical calculation and observation analysis of the “three zones” in the goaf of fully mechanized face

with top coal drawing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1993, 22(1): 8-16.  
[2] 杨胜强, 张人伟, 邸志乾, 等. 综采面采空区自燃“三带”的分布规律[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 93-96.  
YANG Sheng-qiang, ZHANG Ren-wei, DI Zhi-qian, et al. Distribution regularity of spontaneous combustion “three-zone” in goaf of fully-mechanized coal faces [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 93-96.  
[3] 李宗翔, 吴强, 王志清. 自燃采空区耗氧-升温的区域分布特征[J]. 煤炭学报, 2009, 34(5): 667-672.  
LI Zong-xiang, WU Qiang, WANG Zhi-qing. Distribution characteristic of remaining coal oxygen consumption and spontaneous combustion heating-up in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 667-672.  
[4] 余明高, 常绪华, 贾海林, 等. 基于 Matlab 采空区“自燃”三带的分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 600-604.  
YU Ming-gao, CHANG Xu-hua, JIA Hai-lin, et al. Analysis of spontaneous combustion “three-zone” in goaf based on Matlab[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 600-604.  
[5] 徐精彩. 煤自燃危险区域判定理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.  
[6] 王兰云, 蒋曙光, 吴征艳, 等. CO<sub>2</sub> 对低温煤物理吸附氧过程的实验研究[J]. 矿业快报, 2008(2): 29-31.  
WANG Lan-yun, JIANG Shu-guang, WU Zheng-yan, et al. Experimental research on effects of CO<sub>2</sub> on oxygen physisorption process of coal at low temperature [J]. Express Information of Mining Industry, 2008(2): 29-31.  
[7] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 62-63.  
[8] 陈全. 采空区“三带”划分指标的研究[J]. 煤炭工程师, 1997(3): 12-16.  
CHEN Quan. Research on indexes for division of “three-zones” in gobs[J]. Coal Engineer, 1997(3): 12-16.  
[9] 徐精彩, 王军. 综采面供风量与采空区遗煤自燃危险性关系分析[J]. 西安矿业学院学报, 1994(3): 195-199.  
XU Jing-cai, WANG Jun. Analysis of the relationship between the air quantity in coal wall and the ignition danger degree of losing coal [J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1994(3): 195-199.