

# 煤自燃热效应对采空区瓦斯分布的影响机理

凌紫城<sup>1</sup>, 施式亮<sup>1,2\*</sup>, 鲁义<sup>1</sup>, 李贺<sup>1</sup>, 张巨峰<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 利用自主设计搭建的三维采空区流场模拟试验装置, 开展煤自燃升温模拟试验. 结果表明: (1) 随热源温度升高, 高温范围沿 X 轴, Y 轴向外延伸; 某点温度与距热源距离呈负相关; 同一位置温度随时间呈指数增大; (2) 自燃后发生瓦斯积聚现象, 第 I 层出现在热源处, II, III 层在热源沿倾向偏 10 cm 处; 热源附近瓦斯低体积分区域随升温扩大; 采空区深部瓦斯体积分在竖直方向上从低平面到高平面分别呈下降、持平、升高趋势. 分析得到: 瓦斯积聚是热源产生的升浮力与抽吸力共同作用的结果; 积聚点偏移是向上的升浮力受到了水平漏风风流的影响; 升浮强度与抽吸强度均随温度升高而增大, 但在不同高度平面存在不同关系.

**关键词:** 煤自燃; 热效应; 模拟试验; 瓦斯分布; 影响机理

中图分类号: X936 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2023)02-0058-07

## The Influence Mechanism of Heat Effect of Coal Spontaneous Combustion on Gas Distribution in Goaf

LING Zicheng<sup>1</sup>, SHI Shiliang<sup>1,2</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, LI He<sup>1</sup>, ZHANG Jufeng<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** A three-dimensional goaf flow field simulation test device is designed and built independently to simulate coal spontaneous combustion and temperature rise. The results show that: (1) With the increase of heat source temperature, the high temperature range extends outwards along X axis and Y axis. The temperature at a certain point is negatively correlated with the distance from the heat source. The temperature at the same position increases exponentially with time. (2) Gas accumulation occurs after spontaneous combustion. The first layer appears at the heat source, and the second and third layers are 10 cm away from the heat source. The region of low concentration near the heat source expands with temperature rise. The deep concentration of goaf shows a decreasing, flat and increasing trend from low to high plane. Gas accumulation is the result of lifting force and suction force produced by heat source. The accumulation point deviation is that the upward buoyancy is affected by the horizontal air leakage flow. The buoyancy strength and suction strength both increase with the increase of temperature, but there are different relationships at different heights.

**Keywords:** coal spontaneous combustion. heat effect; simulation test; gas distribution; influence mechanism

近年来, 由于许多浅部矿井逐渐开采完毕, 深部矿井的数量不断增加<sup>[1]</sup>, 随着采煤深度的增加, 煤层瓦斯含量、瓦斯压力、地温等也不断增大, 煤炭更易出现自燃<sup>[2]</sup>, 从而影响瓦斯空间分布, 增大瓦斯爆炸灾害风险. 因此, 研究煤自燃对瓦斯分布的影响机理对有效防治矿井灾害有着重要意义.

丁广友等<sup>[3]</sup>通过现场实验发现煤自燃产生大量可燃气体,且自燃放火会诱发瓦斯爆炸;秦波涛等<sup>[4]</sup>认为煤自燃产生的标志性气体会改变瓦斯爆炸上下限,提高瓦斯爆炸风险;有学者借助气相色谱仪在程序升温实验中开展各气体成分的分析,得到空间气体变化规律<sup>[5-6]</sup>;也有学者借助 MATLAB 计算得到升温实验中可燃性气体体积分数与瓦斯爆炸极限的关系<sup>[7]</sup>.近年来,部分学者在研究自燃点位置、自燃温度对瓦斯分布影响方面也取得一定成果.宋钰<sup>[8]</sup>认为采空区出现高温源后,使瓦斯向采空区顶部积聚;高昂<sup>[9]</sup>实验发现采空区进风侧存在高温点时,瓦斯体积分数等高线会在高温点附近产生向进风巷方向弯曲的现象;李林<sup>[10]</sup>认为采空区煤自燃点会引起局部瓦斯积聚,瓦斯体积分数呈倒“n”形分布.虽然上述研究从不同角度分析煤自燃对瓦斯分布的影响,但只对比有无自燃的情况,未能细化升温过程中的具体温度.鉴于此,笔者将设计并搭建三维采空区流场模拟实验台,开展煤自燃升温模拟试验,研究升温过程中温度场、瓦斯体积分数场随热源温度变化的分布规律,并宏观分析热效应对瓦斯分布的影响机理.

## 1 试验系统

### 1.1 装置结构

根据已授权专利设计并搭建三维采空区流场模拟试验装置,装置箱体的设计尺寸为 1 200 mm × 800 mm × 800 mm,表 1 为各部分具体尺寸.图 1 为试验装置,其主要部分为箱体结构、通风系统、加热系统、温度采集系统、气体注入系统和气体采集检测系统,该装置可模拟采空区煤炭自燃,并得到自燃条件下采空区流场分布.

名称	长度	宽度	高度
工作面	800	40	40
进、回风巷	200	50	40
采空区	1 160	800	750
气体释放间	1 160	800	50

箱体模型为长方体,其骨架由厚 5 mm 的角钢通过螺栓连接制成,箱体 6 面均为厚 10 mm 的亚克力板,箱体两侧的亚克力板各预留 21 个直径为 20 mm 的采气孔和 3 个直径为 10 mm 的穿线孔.装置采用 U 型通风,通风系统由风机、风速计、控制阀和风巷模型组成,以进风巷口风速为通风系统的唯一控制量.加热系统由可编程温控仪、热源、E 型热电偶组成,热源由镍铬电阻丝通电发热的原理设计,功率 500 W,温控仪按提前编好的程序控制电热丝功率,实现程序升温进程.温度采集系统实时监测温度并上传至电脑,由 MT-32X 多路温度记录仪和 K 型铠装热电偶组成,热电偶的测温范围为 -100~1 370 ℃,精度为 (0.6±0.5) ℃.

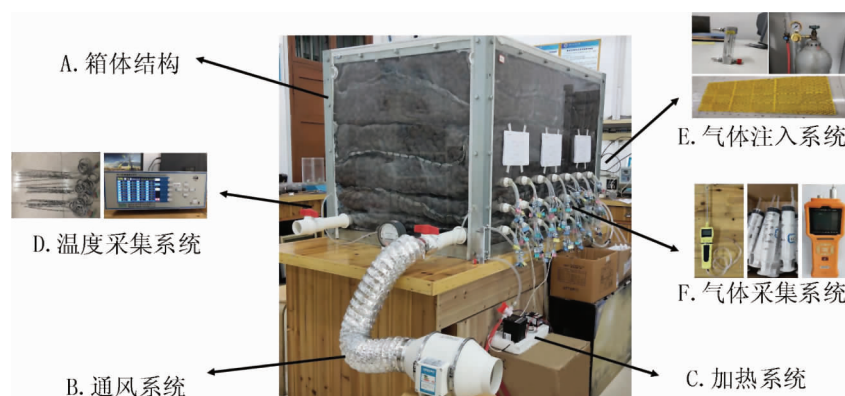


图 1 三维采空区流场模拟试验装置

安全起见,选用密度相近、无害、不燃的惰性气体氦气 (He) 替换瓦斯 (CH<sub>4</sub>) 进行试验(以下分析中仍称作瓦斯).气体注入系统由氦气气瓶、减压阀、转子流量计、输气管路及特制的气体释放间组成,氦气经过

2次分流由4条输气管路进入气体释放间,充分扩散后从下至上涌入采空区.气体采集检测系统由采气软管、负压采样泵、50 mL针筒和氦气检测仪GT903组成,其中氦气检测仪响应时间小于20 s,检测误差在1%内.试验采用人工采气方式,为保证样本的一致性,由6人持6台采样泵从采气软管采集气样,储存至50 mL针筒并密封好,逐个输入氦气检测仪中进行体积分数检测.

### 1.2 预试验分析

为准确设置试验参数,设计2个预试验,以确定热源的温度传递范围和提前注气速率、时间的优选方案.结果显示:(1)热源升至100℃时,其温度传递范围: $15\text{ cm} \leq X \leq 75\text{ cm}$ , $5\text{ cm} \leq Y \leq 55\text{ cm}$ (采空区走向为X轴,倾向为Y轴).(2)在无通风条件下,转子流量计均调至200 mL/min并注气30 min,可认为氦气已充分扩散至整个采空区;当进风巷风速为0.5 m/s时,转子流量计均调至200 mL/min并注气60 min,可认为采空区流场趋于稳定.

### 1.3 测点布置

以箱体底面进风巷与工作面交点为原点建立空间坐标系,定义采空区走向为X轴,倾向为Y轴,高度为Z轴.按高度铺设3层测点网络,命名为第I层( $Z=4\text{ cm}$ )、第II层( $Z=13\text{ cm}$ )、第III层( $Z=23\text{ cm}$ ).图2为测点平面布置图,每层均布置8行7列共56个测点,测点沿Y轴间距为10 cm,沿X轴间距为15 cm,编号依次为1#~56#.根据预试验结果,在第I层布置30个温度测点,具体布置如图2虚线框所示;第II和第III层仅在44#处布置1个温度测点,以研究不同高度、同一位置的温度随时间变化规律.图2a中圆形区域与图2b中圆盘均表示装置的热源,其几何中心距工作面30 cm,距进风侧15 cm,高4 cm;虚线“D-Line”为倾向监测线,虚线“S-Line1”“S-Line2”为走向监测线.

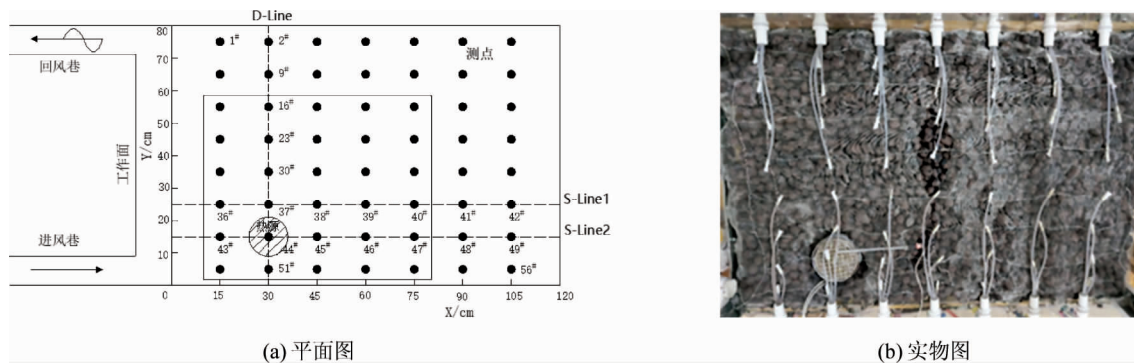


图2 测点平面布置与实物对照

## 2 试验过程

确认装置的密封性和连接情况无误后,根据预试验结果,采空区流场趋于稳定后开始试验.试验共设计1组常温对照试验、7组自燃升温试验.不加热情况下,对168个测点进行采气,加热开始后,每升高10℃进行1次采气处理,并分别密封储存至对应针筒,试验结束后将所有气样逐一输入到氦气检测仪中进行体积分数检测,每组采气同时记录该时刻各测点温度,整理至ORIGIN软件进行数据分析.

## 3 结果与讨论

### 3.1 煤自燃升温过程中温度场分布规律

图3为热源升至不同温度时,第I层的温度分布情况.由图3可以看出:高温点(即图中温度最高的部分)形状基本与热源一致,其面积随温度的升高而扩大;走向上,高温范围从15~45 cm增大到15~60 cm;倾向上,高温范围从5~35 cm增大至5~45 cm.总的来看,随着温度上升,高温范围沿X轴和Y轴向外延伸约10 cm.

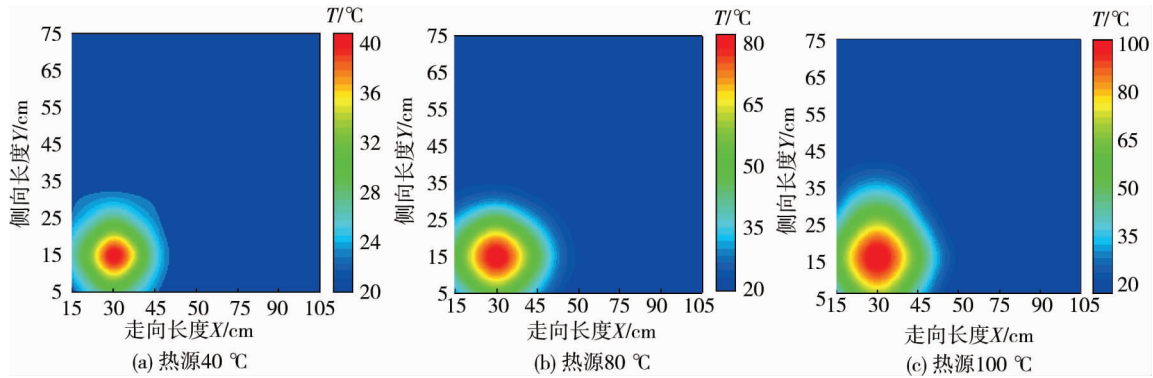


图 3 不同热源温度下第 I 层的温度分布

选择不同时刻下第 III 层 44# 位置的温度, 绘制温度  $T$  随时间  $t$  变化曲线图(图 4)。需要说明的是, 热源与第 I 层测点同高, 第 I 层中 44# 位置的温度即为热源自身温度, 故第 I 层为均匀增长的直线段。从图 4 可知: 竖直上与热源距离更远的点, 其温度上升越缓慢, 能达到的最高温度也越小, 表明某点温度与距热源距离呈负相关。拟合第 II、第 III 层  $T-t$  曲线发现, 同一位置的温度随时间的增加呈指数规律增大, 这与文献 [11] 的结论一致。

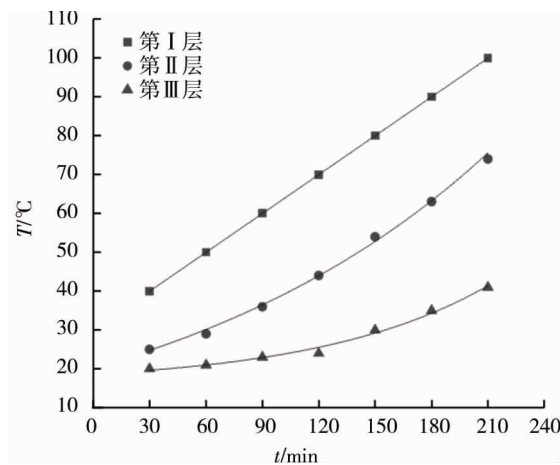


图 4 各层热源点的温度随时间变化曲线

### 3.2 煤自燃升温过程中瓦斯体积分数场随温度分布规律

图 5a 为煤自燃升温过程中第 I 层 ( $Z=4$  cm) 测点随温度变化的瓦斯体积分数分布。在常温条件下, 近工作面的瓦斯体积分数比采空区深部低, 回风侧的瓦斯体积分数比进风侧高, 符合实际采空区的瓦斯分布规律, 说明本装置可较好模拟采空区环境。当温度升至  $40$  °C 时, 在热源位置出现一个局部瓦斯体积分数较高的区域, 且随温度升高, 该区域始终存在, 表明在该区域形成了由自燃升温引起的瓦斯积聚现象; 同时在热源附近始终存在一个瓦斯体积分数较低的区域, 且该区域的范围随温度升高不断扩大; 整个升温过程中, 图 5 中右上方区域由回风侧向进风侧移动, 其最高瓦斯体积分数由  $25.8\%$  降低至  $22.3\%$ , 范围由块状变成长条状。

为方便分析, 做如下定义: (1) 将热源附近体积分数较高的区域定义为“瓦斯积聚点”; (2) 将热源附近随温度变化的、体积分数较低的区域定义为“低体积分数区域”; (3) 将图 2 中  $X$  走向长度为  $75\sim 120$  cm 的高体积分数区域定义为“采空区深部”。

图 5b 为第 II 层 ( $Z=13$  cm) 的瓦斯分布规律, 当温度升至  $40$  °C 时形成瓦斯积聚, 积聚点位置与图 3a 相比更靠近回风侧, 表明第 II 层的瓦斯积聚点出现沿  $Y$  轴的偏移, 具体偏移距离为  $10$  cm。整个升温过程中, 积聚点体积分数出现“先减小, 后增大, 再减小”趋势, 低体积分数区域与采空区深部范围变化与第 I 层基本一致, 深部瓦斯最高体积分数由  $27.7\%$  略增至  $27.9\%$ , 基本保持不变。

图 5c 为第 III 层 ( $Z=23$  cm) 的瓦斯分布规律, 当温度达到  $50$  °C 时, 出现低体积分数区域, 直到  $80$  °C 才形



成瓦斯积聚点,且积聚点位置与第Ⅱ层相同,继续升温至 100 ℃ 过程中,积聚点体积分数保持递减.整个过程中,低体积分数区域、采空区深部范围变化与第Ⅰ层基本一致,深部瓦斯最高体积分数由 33.8% 升高至 37.6%.

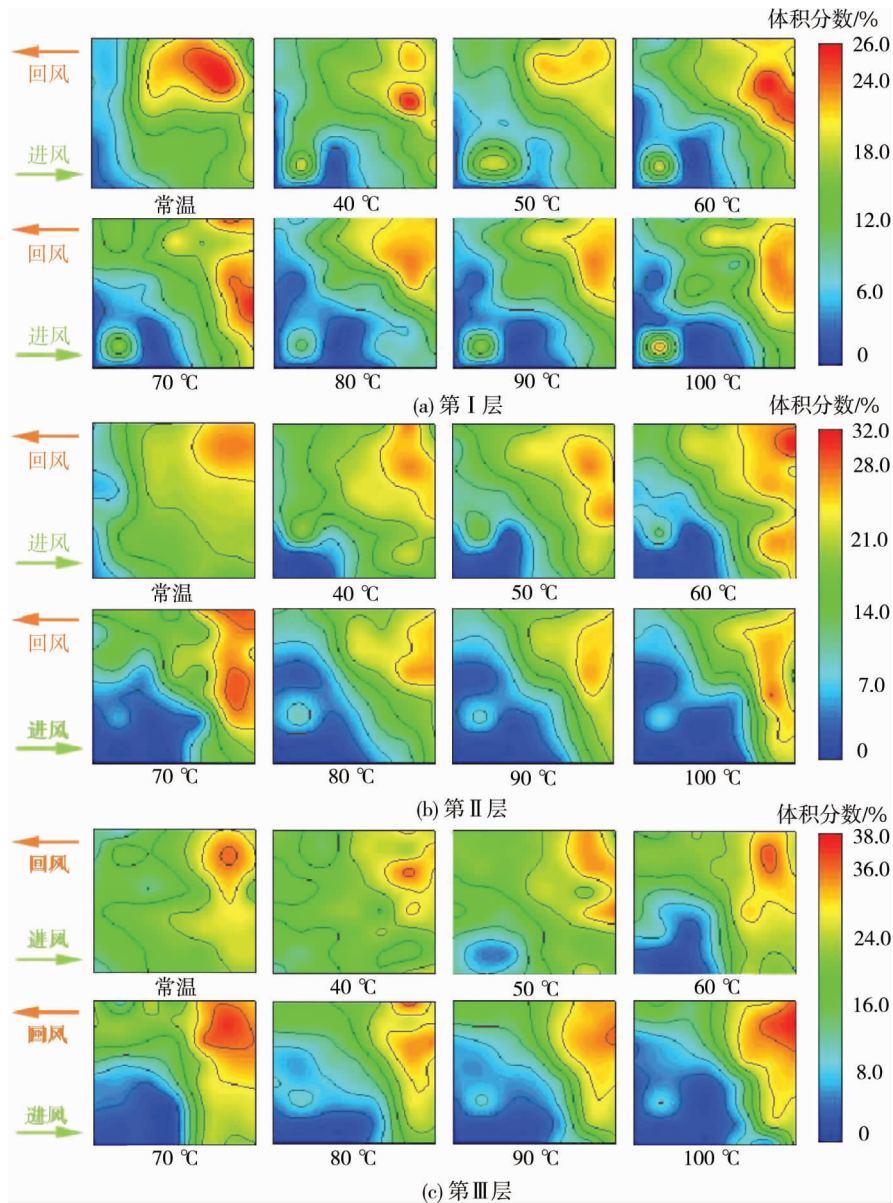


图5 煤自燃升温过程中瓦斯体积分数随温度分布情况

由图5可以看出:第Ⅲ层中积聚点的位置与第Ⅱ层相同,但直到80 ℃才形成瓦斯积聚点,明显晚于第Ⅰ层、第Ⅱ层,如果只从第Ⅲ层来看,表明温度越高,越易形成瓦斯积聚点,但这一结论显然不适用第Ⅰ层、第Ⅱ层.从图4中分别选取40 ℃和80 ℃下各层的瓦斯体积分数分布进行分析:40 ℃时第Ⅰ层形成瓦斯积聚,第Ⅱ层有积聚趋势,第Ⅲ层无明显变化,表明热源位置热效应对周围气体的作用存在高度上的差异,即“高度越高,受到热效应的作用越小”;80 ℃时第Ⅲ层才形成瓦斯积聚,由此看出随着温度升高,热效应的作用范围也逐渐扩大.结合整个升温过程中采空区深部瓦斯体积分数的变化,即第Ⅰ层下降、第Ⅱ层持平、第Ⅲ层升高,表明热效应的作用范围是立体的,且同一温度下某点受到的作用大小与该点同热源的相对高度有关.

### 3.3 热效应对气体分布影响机理

#### 3.3.1 瓦斯积聚产生机理

煤自燃的热效应改变周围气体的热物理性质,使气体密度随温度升高而降低,在重力作用下,表现为热源位置产生竖直向上的升浮力,升浮力与热源温度呈正相关,导致气体随温度升高而不断向上运动;由于气体上移导致原位置形成负压区,在压力作用下,原位置周围的气体不断向负压区移动,表现为热源对

周围气体产生由外向内的抽吸力,并导致在热源附近出现低体积分数区域,而低体积分数区域随升温不断扩大,说明抽吸力随升温不断增大.

### 3.3.2 瓦斯积聚点偏移发生机理

从工作面进入采空区的漏风风流在进风侧具有较高的动能,产生较强的风流冲击作用和瓦斯稀释作用,当漏风风流运动到采空区进风侧——煤的自燃高温点附近时,漏风风流在水平方向上的冲击作用较容易影响垂直方向的浮力作用.水平方向漏风风流的水平冲击作用和垂直方向的热浮力作用叠加导致上升气流沿漏风风流运动路线方向倾斜,最终造成瓦斯积聚位置的漂移现象.

### 3.3.3 热效应对气体分布的影响机理

从图 5 中提取第 I 层走向监测线 S-Line1 和第 II 层、第 III 层走向监测线 S-Line2 上最靠近瓦斯积聚点的测点(即 44#,37#)的体积分数,绘制如图 6 所示的各层瓦斯积聚点体积分数  $c(\text{CH}_4)$  随温度  $T$  变化的趋势图.由图 6 可看出:在 40~70 °C,70~80 °C,80~100 °C,这 3 个温度阶段,第 I 层先波动、后降低、再升高,第 II 层先降低、后升高、再降低,第 III 层除升降速率不同外与第 II 层基本一致,瓦斯积聚点的体积分数升降与该点受到热源热效应(即升浮力与抽吸力)作用大小相关,而 3 层呈现了不一致的体积分数升降规律,表明 3 层在升浮力和抽吸力关系上存在差异性.

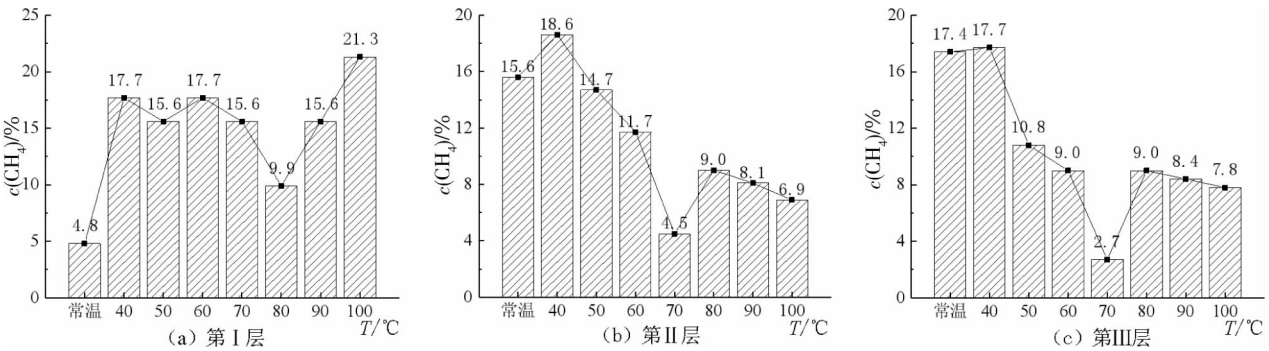


图 6 各层瓦斯积聚点随温度的体积分数变化

定义:(1)升浮力的作用强度为  $I_s$ ,对气体原位置影响表现为体积分数减小;(2)抽吸力的作用强度为  $I_c$ ,对气体原位置影响表现为体积分数增大;(3)强度差量  $\Delta I$ ,表示升浮强度与抽吸强度之差,即  $\Delta I = I_s - I_c$ .

用强度差量  $\Delta I$  来表示瓦斯积聚点上的体积分数升降关系,如式(1)所示,其物理意义为当升浮强度小于抽吸强度时体积分数升高,反之体积分数降低.

$$\begin{cases} \Delta I = I_s - I_c < 0, \text{体积分数升高;} \\ \Delta I = I_s - I_c > 0, \text{体积分数降低.} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_s$  为升浮强度;  $I_c$  为抽吸强度.

根据式(1)和图 6 可以画出瓦斯积聚点处升浮强度和抽吸强度的关系示意图,如图 7 所示.图 7 中  $I$  表示强度,为无量纲单位,  $T$  为热源温度,这里用来表示升温进程;前文分析得到抽吸力导致低体积分数区域形成,而低体积分数区域随温升不断扩大,则可认为抽吸强度与温升呈正相关,图 7 中用定值斜率的直线来表示.根据式(1),体积分数升高与降低用强度差量  $\Delta I$  的正负,即升浮强度  $I_s$  和抽吸强度  $I_c$  的大小关系来表示.

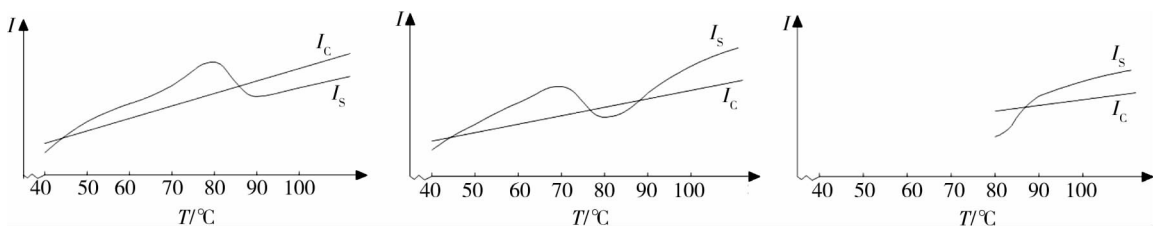


图 7 瓦斯积聚点升浮强度与抽吸强度关系

## 4 结论

1) 随着热源温度升高,高温范围沿  $X$  轴和  $Y$  轴向外延伸约 10 cm,某点温度与距热源距离呈负相关;同一位置温度随时间呈指数增大。

2) 自燃升温后,出现瓦斯积聚现象,第 I 层积聚点在热源处,第 II 层、第 III 层在热源沿倾向偏 10 cm 位置;热源附近出现随温度升高而扩大的低体积分数区域;采空区深部体积分数从低到高分别出现下降、持平、升高趋势。

3) 瓦斯积聚是热源处升浮力和抽吸力共同作用的结果;积聚点偏移是由于向上的升浮力受到水平漏风风流的影响;升浮强度与抽吸强度均随温度升高而增大,但在不同高度平面存在不同关系。

### 参考文献:

- [1] 蓝航,陈东科,毛德兵.我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J].煤炭科学技术,2016,44(1):39-46.
- [2] 白云波.深部开采理论在煤矿生产中的应用[J].山东煤炭科技,2011,141(1):28-29.
- [3] 丁广友,陈舸,陈孟伯.煤自然发火对瓦斯爆炸的影响[J].煤矿安全,2012,43(9):183-186.
- [4] 秦波涛,张雷林,王德明,等.采空区煤自燃引爆瓦斯的机理及控制技术[J].煤炭学报,2009,34(12):1655-1659.
- [5] 周西华,白刚,聂荣山,等.褐煤燃烧阶段烃生成规律研究[J].中国安全科学学报,2016,26(1):58-63.
- [6] 肖旸,李青蔚,鲁军辉.空气相对湿度对煤自燃特性的影响研究[J].中国安全科学学报,2015,25(3):34-40.
- [7] 常绪华,杜学胜,贾海林.受限升温煤体空间气体变化规律试验研究[J].中国安全科学学报,2016,26(6):87-91.
- [8] 宋钰.采空区瓦斯运移规律实验与数值模拟研究[D].西安:西安科技大学,2014.
- [9] 高昂.采空区煤自燃环境瓦斯运移规律实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [10] 李林.采空区煤自燃环境瓦斯运移积聚规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [11] 张瑞新,谢和平.煤堆自然发火的试验研究[J].煤炭学报,2001,26(2):168-171.