

郭志国, 吴兵. N_2 和 CO_2 对煤明火燃烧灭火性能的对比实验研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(2):150-157.

Guo Zhiguo, Wu Bing. Comparative study on the fire-extinguishing effectiveness of N_2 and CO_2 on coal flame combustion[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(2):150-157.

N_2 和 CO_2 对煤明火燃烧灭火性能的对比实验研究

郭志国, 吴兵

中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083

摘要:为掌握 N_2 和 CO_2 对煤明火燃烧过程的不同灭火效果,采用自主研发的煤明火燃烧实验装置,对平煤八矿煤样进行了通入相同流量 N_2 和 CO_2 气体灭火剂的煤明火燃烧灭火实验,测定了在煤有焰燃烧和阴燃熄灭阶段的温度场温度、标志性气体(O_2 、 CO 和 CH_4)组分、热释放速率以及火焰图像面积的变化规律。结果表明:相比于煤自由燃烧,在煤有焰燃烧阶段,通入 CO_2 时明火火焰熄灭时间、煤温上升速度、耗氧量、热释放速率以及 CO 和 CH_4 浓度的下降速度比通入 N_2 时更低;同时,通入 CO_2 时火焰图像面积呈指数下降,而通入 N_2 时呈线性下降;在煤阴燃熄灭阶段,通入 CO_2 时煤温、 CO 和 CH_4 浓度下降速度比通入 N_2 时的更高,而通入 CO_2 时的耗氧量和热释放速率比通入 N_2 时的更低;说明 CO_2 比 N_2 具有更好的熄灭煤明火燃烧的能力。

关键词: N_2 ; CO_2 ; 煤明火燃烧; 标志性气体; 火焰图像; 灭火性能

中图分类号: TD 75

文献标志码: A

文章编号: 2096-2193(2017)04-150-8

Comparative study on the fire-extinguishing effectiveness of N_2 and CO_2 on coal flame combustion

Guo Zhiguo, Wu Bing

College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: In order to master thoroughly the different fire-extinguishing effects of N_2 and CO_2 on coal flame combustion, the self-developed experiment device of coal flame combustion was used to conduct the fire-extinguishing experiment on coal flame combustion under the condition of importing same flux N_2 and CO_2 gas fire-extinguishing agent for coal samples in Eight mine of Ping Dingshan coal mine, and the change laws of temperature of temperature field, index gas formation (O_2 , CO and CH_4), heat release rate and flame image area obtained from the experimental stages of the coal flame combustion and smoldering extinguished were measured. The results show that: compared to the free combustion of coal, in coal flame combustion stage, flame out time, coal temperature rise rate, oxygen consumption, heat release rate as well as the speed of CO and CH_4 concentration decline in coal combustion with CO_2 much lower than that of coal combustion with N_2 ; meanwhile, the flame image area exponentially decline in coal combustion with CO_2 , but the flame image area linearly decreases in coal combustion with N_2 . In the coal smoldering extinguishes stage, the coal temperature, the speed of CO and CH_4 concentration decline in the coal combustion with CO_2 much higher than that of coal combustion with N_2 , but the oxygen consumption and heat release rate are lower. It follows that CO_2 has greater capacity of ex-

收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274205)

作者简介: 郭志国(1988—), 男, 江西九江人, 博士研究生, 主要从事矿井火灾与瓦斯灾害防治方面的研究。Tel: 15117937107, E-mail: guozhiguo2012@126.com

tinguishing coal combustion compared to N₂.

Key words: N₂; CO₂; coal flame combustion; index gas; flame image; fire-extinguishing effectiveness

近年来,随着矿井特厚煤层综采放顶煤开采技术的不断发展和推广应用,煤层自然发火更为严重^[1]。尽管学者们先后提出了多种解释煤自燃机理的假说,但由于煤的物理化学结构和自燃过程极为复杂,至今还不能完全阐述清楚煤的自燃机理,导致目前还没有一个能够根治煤层自燃火灾的方法^[2-3]。此外,矿井外因火灾也频繁发生^[4]。因此,注惰防火技术^[5-6]是现今防治矿井火灾关键而有效的措施,其中惰性气体(N₂ 和 CO₂)凭借具有惰化、降温、抑爆、扩散范围大以及可绕过障碍物到达隐蔽的自燃区域等优点,被广泛应用于矿井火灾防治中^[7-8]。

在矿井火灾中,煤的燃烧过程按照燃烧状态分为有焰燃烧(明火燃烧)和无焰燃烧,而无焰燃烧又分为有焰燃烧前期的热解预热阶段和有焰燃烧后期的阴燃熄灭阶段两种情况。其中,煤低温氧化阶段的相关实验属于煤有焰燃烧前期热解预热阶段的研究。目前,众多学者对惰性气体(N₂ 和 CO₂)抑制煤明火燃烧前的低温氧化特性进行了大量实验研究^[9-10],并且普遍认为 CO₂ 对煤炭氧化自燃的抑制效果比 N₂ 好。在煤的有焰燃烧和阴燃熄灭阶段,煤温会从几十摄氏度上升到几百摄氏度,甚至可达到上千摄氏度。同时,由于矿井火灾属于受限空间的燃烧,从而导致煤有焰燃烧熄灭全过程中的燃烧特征参数(气体产物浓度和温度等)变化规律,与开放空间煤燃烧及煤低温氧化阶段的程序升温实验结果有很大不同,所以非常有必要对矿井受限空间煤有焰燃烧熄灭全过程进行灭火实验研究。此外,由于 N₂ 和 CO₂ 二者具有不同的理化性质(如 CO₂ 密度、吸附性和溶水性能都比 N₂ 大),向矿井火区注入相同体积的 N₂ 或 CO₂,对矿井火区煤明火燃烧熄灭过程的灭火效果应有所差别,但当前关于 N₂ 和 CO₂ 对受限空间内煤明火燃烧熄灭全过程不同灭火效果的研究鲜见报道。

鉴于此,选取平煤八矿煤样,并针对现有实验装置只能对煤自然低温氧化阶段的特性参数进行测定,无法满足煤燃烧熄灭全过程的模拟,本研究自主研制了一种实验用煤量小、测试准确、重复性好、实验周期短,实验温度可达 1 000 ℃ 的受限空间煤明火燃烧特性参数测试装置。利用该实验装置进行煤明火燃烧熄灭全过程灭火实验,测定

和分析受限空间内煤明火燃烧熄灭全过程中的燃烧特征参数随时间的变化规律,对比研究相同流量的 N₂ 和 CO₂ 对煤明火燃烧熄灭全过程的灭火效果。

1 实验原理及系统

1.1 实验原理

模拟受限空间内煤明火燃烧熄灭全过程的升温条件和环境,当煤开始出现明火时,通入相同流量的 N₂ 和 CO₂,测定并对比分析煤样在纯空气与通入相同流量的 N₂ 和 CO₂ 条件下燃烧特征参数(如标志性气体浓度、温度等)随时间的变化规律,以此全面评价 N₂ 和 CO₂ 对煤明火燃烧熄灭全过程的灭火特性和灭火效果。

为了深入掌握煤明火燃烧熄灭全过程的燃烧特性,以及为有效对比评价 N₂ 和 CO₂ 气体灭火剂对受限空间煤明火燃烧熄灭全过程的灭火效果,实验除选取能够反映煤燃烧氧化反应剧烈程度及火焰蔓延特性的标志性气体(如 O₂、CO 和 CH₄)浓度、煤温和火焰温度以及火焰表面积等煤燃烧特征参数之外,还选取能够反映火灾危害程度的热释放速率作为煤燃烧的特征参数。其中,根据 Orloff 的“圆柱体法”原理,论证了火焰表面积与火焰图像面积成 π 倍关系^[11],因此可以使用火焰图像面积值代替火焰表面积值研究其变化趋势。

基于氧消耗原理,热释放速率计算公式为^[12]

$$q = 1.10Em_e \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \quad (1)$$

式中, E 为燃烧每消耗 1 kg 氧气所释放出的热量,通常取值为 13.1 MJ/kg; m_e 为出气口气体质量流量,kg/s,本次实验过程中该值可通过气体状态方程和元素守恒原理计算得出; $X_{O_2}^0$ 为实验前 O₂ 体积分数; X_{O_2} 为出气口 O₂ 的体积分数。

1.2 实验系统

基于耗氧法自主研制的矿井受限空间煤明火燃烧实验系统,主要包括实验燃烧反应系统、供气系统、温度监测采集系统、红外气体分析系统以及火焰图像记录系统,如图 1 所示。该实验系统可对煤燃烧灭火实验过程中的标志性气体(O₂、CO 和 CH₄)浓度、煤温和火焰温度以及火焰图像面积进行连续监测。

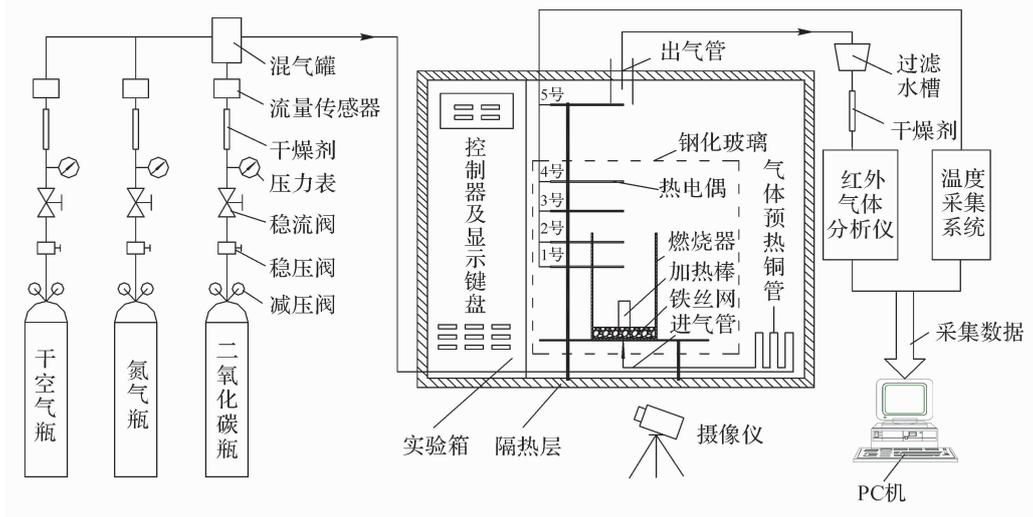


图1 煤明火燃烧实验系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of coal flame combustion experimental system

1.2.1 实验燃烧反应系统

实验燃烧反应系统主要由实验箱、燃烧器和加热棒组成。

实验箱箱壁为两层薄铁板夹一层厚 40 mm 的隔热石棉,可有效阻止实验箱内部向环境散热。箱体正面的箱门与箱壁之间有橡胶密封垫圈用于密封和保温。箱门上有一方形钢化玻璃观察窗。

燃烧器为一圆柱形容器,选用耐火温度 1 710 ℃ 的耐火砖加工而成。燃烧器分为三层:最底层用于放置供气管路;中间层填充铁丝网,加热棒部分包裹在铁丝网中;最上层用于盛装燃烧煤样。

加热棒的加热功率由上位机程序控制。

1.2.2 供气系统

供气系统主要由高压气体瓶、减压阀、稳压阀、稳流阀、压力表、干燥剂、流量传感器、混气罐和供气管路等组成。实验所需气体流量采用具有相应量程的玻璃转子气体流量计作为进气流量控制装置。同时,为了减少外部输入气体对实验结果的影响,在气体进入实验装置前由预热铜管对其进行预加热,使进气温度与燃烧器内部温度相同。

1.2.3 温度监测采集系统

温度测量系统由 K 形热电偶和温度采集系统构成。在实验箱内燃烧器中轴线方向上共布置 5 根传感器用于实验箱温度场的测量,具体布置位置如图 1 所示。1 号和 2 号热电偶以 25 mm 的间距布置在煤样中,用于测量煤体温度变化,3 号和 4

号热电偶以 25 mm 的间距布置在燃烧器中轴线正上方,用于测量煤燃烧火焰温度分布情况;5 号传感器用于测量出气口烟气的温度变化情况。热电偶和传感器的温度测量均由自行研制的温度采集系统进行控制。

1.2.4 红外气体分析系统

在线连续气体分析仪主要采用红外气体分析技术和电化学技术,对实验过程中的 O_2 、 CO_2 、 CO 和 CH_4 这 4 种气体组分浓度进行实时测量,具有响应速度快,响应时间可以达到 1s。

1.2.5 火焰图像记录系统

火焰表面积是燃烧状态的直观表现,也是一个不断变化的值。本文通过在实验箱前观察窗正前方架设有 CMOS 传感器的数码摄像机对火焰图像进行实时记录。

2 实验方法

2.1 煤样采集及分析

选取平煤八矿 21030 工作面煤样,该煤样工业分析见表 1。将采集到的煤样用密封袋密封后运回实验室,使用颚式破碎机将煤样磨碎,然后用分样筛筛出 0 ~ 0.9 mm、0.9 ~ 3 mm、3 ~ 5 mm、5 ~ 7 mm、7 ~ 10 mm 的 5 种粒径煤样进行等比例均匀混合组成混合煤样,并用密封袋密封,以备实验使用。

表 1 煤样工业分析

Tab. 1 The industrial analysis of coal sample

$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$
0.81	24.60	32.68	41.91

2.2 实验条件

通入空气流量的大小与火焰最终形态特征有着密切联系。为了维持火焰形态稳定,减小气流流速对煤明火燃烧实验过程的影响,将燃烧实验中的火焰特征控制为层流火焰。火焰的变化特征可以使用雷诺数(Re)进行表征,当雷诺数小于2 000时为层流燃烧,其计算见式(2)^[13]。

$$Re = \frac{\rho u d^*}{\mu} \quad (2)$$

式中, ρ 为气体燃料的密度,kg/m³; u 为射流速度,m/s; μ 为气体燃料的黏性,kg/(m·s); d^* 为喷口的特征尺寸,m。

通过公式(2)进行反算推理,同时结合煤自燃实验中流量确定方法,最终将实验供气流量确定为10 L/min。

为了增强实验的对比效果,实验中通入相同流量的N₂和CO₂气体灭火剂,以保证混合气体中氧气体积分数一致。本次实验供气条件见表2。

表2 实验供气条件

Tab. 2 The experiment supply conditions

序号	灭火剂	流量/(L·min ⁻¹)	空气流量/(L·min ⁻¹)
1	N ₂	2.50	10
2	CO ₂	2.50	10

2.3 实验步骤

(1) 实验前首先使用标准气体对在线式红外气体分析系统进行校准,然后检测气路气密性;再使用电子天平称量等比例混合均匀的混合煤样104 g放入燃烧器中,关闭实验箱门,同时打开气体分析仪的气泵和温度监控系统,对实验箱内标志性气体浓度、温度数据进行实时监测。

(2) 为了缩短实验时间,实验过程中使用加热棒对煤样进行预热。首先向实验箱燃烧器内通入10 L/min的空气,同时打开加热棒开关,设置加热棒在20 min内均匀上升到600℃,然后维持加热棒温度恒定,持续加热20 min。

(3) 开启数码摄像机,点燃引燃棒,将引燃棒从实验箱通风口深入实验箱的燃烧器上方,待其引燃煤明火后迅速抽出,同时关闭加热系统和打开气体灭火剂供气系统,并按表2设置流量值后,将空气分别与N₂和CO₂气体灭火剂经过混气罐均匀混合后供入燃烧器内。

(4) 当明火火焰熄灭后,关闭数码摄像机,记录熄灭时间,继续通入N₂和CO₂气体灭火剂直至实验箱内的CO浓度(体积分数)降到 25×10^{-6}

时,关闭N₂和CO₂气体灭火剂供气系统和其他实验系统,实验结束;保存实验数据。

3 实验结果与分析

3.1 温度场温度变化规律

在第I阶段(热解预热阶段)、第II阶段(有焰燃烧阶段)和第III阶段(阴燃熄灭阶段)这三个阶段通入相同流量N₂和CO₂条件下,由温度监测采集系统得到温度场中测温点上温度随时间的变化规律,并分别选取最高热电偶温度作为煤温和火焰温度进行研究,如图2和图3所示。

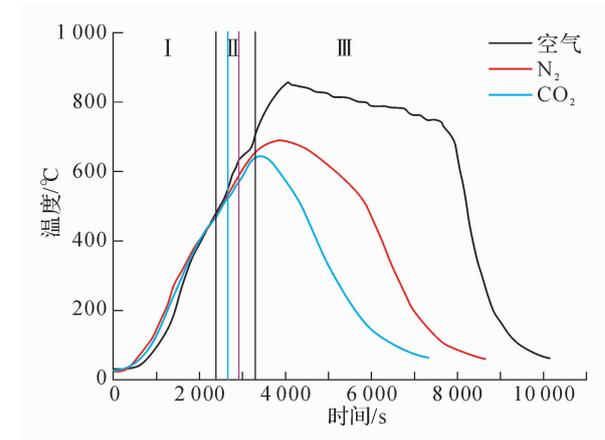


图2 煤温变化对比图

Fig. 2 The comparative chart of coal temperature changing

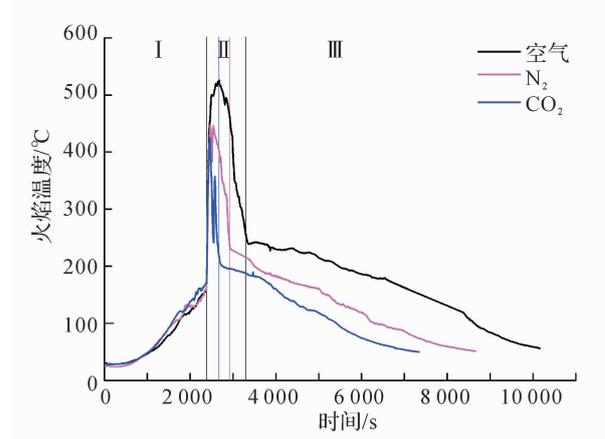


图3 火焰温度变化对比图

Fig. 3 The comparative chart of flame temperature changing

(1) 由图2看出,在煤自由燃烧的第I阶段,由于加热棒对煤温的预热作用,煤体温度逐渐升高;在第II阶段,由于煤氧复合作用、煤固相燃烧作用以及火焰热反馈作用,煤体温度也逐渐上升;在第III阶段,由于煤氧复合作用和煤固相燃烧作用的持续,使得放热速度继续增大,但随着煤逐渐被燃

烧消耗,又使得放热速度减小,即在第Ⅲ阶段初期煤体温度继续升高,当达到最大值后则开始下降。在通入相同流量 N_2 和 CO_2 的实验中,相比于煤自由燃烧,在第Ⅱ阶段,通入 CO_2 时的煤温上升速度小于通入 N_2 时的对应值;而在第Ⅲ阶段,煤温下降速度则大于通入 N_2 时的对应值。这主要是由于煤对 CO_2 的吸附量比 N_2 更大,脱附温度也更高^[14],因此 CO_2 对煤氧复合和煤固相燃烧的抑制作用更强,使得放热量更低。

(2) 由图3看出,在煤自由燃烧的第Ⅱ阶段明火火焰出现后,火焰温度迅速上升,说明煤氧化燃烧反应产生了明火热效应,使得放热速度增大;同时,由于固体火焰存在“游离”现象,导致火焰温度曲线波动很剧烈。在通入相同流量 N_2 和 CO_2 的实验中,相比于煤自由燃烧,通入 CO_2 时熄灭明火火焰所用的时间更少,主要是由于煤对 CO_2 的吸附量比 N_2 更大,煤在 N_2 -空气混合气体中的吸氧能力大于在 CO_2 -空气混合气体中的,从而使得放热速度和可燃气体产生量更小;再加上 CO_2 对煤热解可燃气体燃烧链式反应的抑制作用更强,因此明火熄灭更快。

3.2 标志性气体浓度变化规律

在通入相同流量 N_2 和 CO_2 条件下,利用在线式红外气体分析仪测定得到煤明火燃烧熄灭全过程三个阶段的标志性气体 O_2 、 CO 和 CH_4 浓度随时间的变化规律,如图4至图6所示。

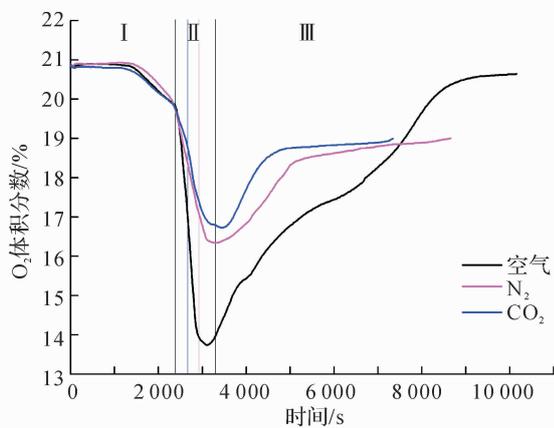


图4 O_2 体积分数变化对比图

Fig. 4 The comparative chart of O_2 concentration changing

(1) 由图4看出,在煤自由燃烧的第Ⅰ阶段,随着实验时间的增长(煤体温度的升高),煤的氧化反应逐渐加剧,耗氧量逐渐增大。在第Ⅱ阶段,由于发生剧烈煤明火燃烧, O_2 体积分数迅速下降。当进入第Ⅲ阶段,由于主要是进行阴燃燃烧,并且

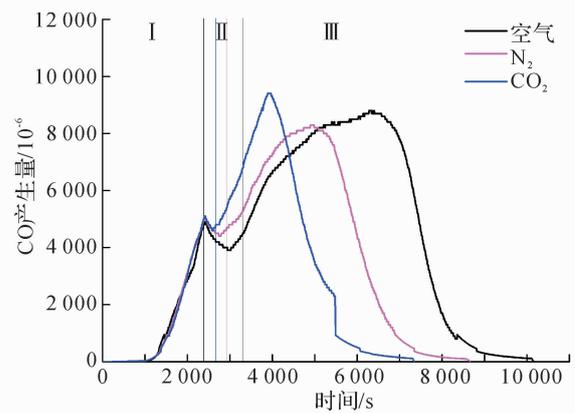


图5 CO 产生量对比图

Fig. 5 The comparative chart of CO quantity

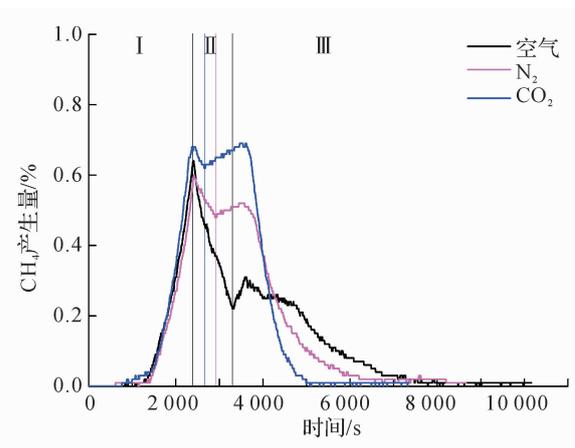


图6 CH_4 产生量对比图

Fig. 6 The comparative chart of CH_4 quantity

煤逐渐被燃烧消耗,因此燃烧反应的耗氧量逐渐减小, O_2 体积分数又开始出现回升。在通入相同流量 N_2 和 CO_2 的实验中,相比于煤自由燃烧,在第Ⅱ阶段和第Ⅲ阶段,通入 CO_2 时的耗氧量比通入 N_2 时的更小,主要是由于煤对 CO_2 的吸附量比 N_2 更大,对氧的吸附能力更弱,吸氧量就更少;同时,通入 CO_2 使得煤与 O_2 氧化燃烧链式反应中自由基的生成速率减小,从而导致 O_2 的消耗减少。

(2) 由图5看出,在煤自由燃烧的第Ⅰ阶段,随着煤体温度的升高, CO 产生量逐渐升高,主要是因为随温度不断升高,煤样发生热解反应,而且在高温状态下醚键、羟基和部分较稳定的含氧杂环裂解也会产生 CO ^[15]。在第Ⅱ阶段,由于产生的 CO 有一部分会参与燃烧反应,并且煤的氧化反应过程会更加完全,使得 CO 相对 CO_2 的生成量减小, CO 浓度下降。在第Ⅲ阶段,由于明火熄灭后,煤的燃烧以不完全氧化反应为主,而且随着煤逐渐被燃烧消耗;使得 CO 生成量先增加,然后逐渐减小。在通入相同流量 N_2 和 CO_2 的实验中,相比于

煤自由燃烧,在第Ⅱ阶段,通入 CO₂ 时的 CO 浓度的下降速度比通入 N₂ 时的对应值更低,同时,在第Ⅲ阶段前期的上升速度更高,主要是由于 CO₂ 对 CO 燃烧反应的正向反应速率起到了抑制作用;而 CO 浓度在第Ⅲ阶段的下降速度则更大,主要是由于煤对 CO₂ 的吸附量比 N₂ 更大,脱附温度也更高^[14],因此 CO₂ 对煤氧复合的抑制作用比 N₂ 的抑制作用更强,使得煤样的热解反应更弱,最终导致煤燃烧的不完全氧化反应更弱。

(3) 由图 6 看出,在煤自由燃烧的第Ⅰ阶段, CH₄ 产生量随着煤温的升高而逐渐增加,并且在进行点火之前达到最大,这是因为在低温阶段, CH₄ 主要来源于煤中 CH₄ 的脱附作用;随温度不断升高,煤样开始热解,煤分子中的甲基侧链(—CH₃) 脂肪侧链等裂解生成 CH₄^[15],使其产生量不断增加。在第Ⅱ阶段,由于可燃气体 CH₄ 参与燃烧反应,因此 CH₄ 产生量迅速下降。而在第Ⅲ阶段,由于热解反应的持续以及随着煤逐渐被燃烧消耗,因此,在第Ⅲ阶段前期 CH₄ 产生量继续增加,达到一定值后, CH₄ 产生量则开始下降。在通入相同流量 N₂ 和 CO₂ 的实验中,相比于煤自由燃烧,通入 CO₂ 时的 CH₄ 浓度在第Ⅱ阶段下降速度更低,同时,在第Ⅲ阶段前期的上升速度更高,主要是由于 CO₂ 使得 CH₄ 燃烧链式反应中自由基的生成速率减小,从而导致 CH₄ 的消耗减少;而在第Ⅲ阶段的下降速度则更大,主要是由于 CO₂ 对煤氧复合的抑制作用比 N₂ 的抑制作用更强,从而使得煤样的热解反应更弱,煤燃烧的不完全氧化反应也就更弱。

3.3 热释放速率变化规律

在通入相同流量 N₂ 和 CO₂ 条件下,根据公式(1)计算得到的煤明火燃烧熄灭全过程三个阶段的热释放速率变化曲线如图 7 所示。

由图 7 看出,在煤自由燃烧的第Ⅰ阶段,由于氧化反应逐渐加剧,热释放速率逐渐升高;在第Ⅱ阶段,由于明火燃烧是燃烧程度最剧烈的时段,因此该阶段的热释放速率达到最大;而在明火燃烧后期及第Ⅲ阶段阴燃熄灭燃烧阶段,由于煤燃烧的不完全氧化反应比重增加致使热释放速率减小。在通入相同流量 N₂ 和 CO₂ 的实验中,相比于煤自由燃烧,在第Ⅱ阶段和第Ⅲ阶段煤氧复合作用和煤固相燃烧作用都减弱,并且 CO₂ 对煤明火燃烧反应的抑制作用更强,耗氧量更小,从而使得热释放速率更低。

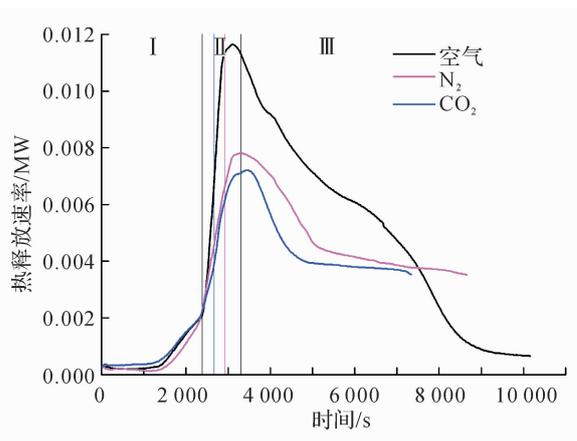


图 7 热释放速率变化对比图

Fig.7 The comparative chart of heat release rate changing

3.4 火焰图像面积变化规律

使用 Matlab 软件对由数码摄像机记录的实验中煤明火燃烧阶段的火焰视频进行图片截取,其中以火焰开始出现作为始点,然后每隔 5 s 进行一次图片截取。为了有效地排除实验背景及光晕现象的干扰,方便计算火焰图像面积,运用 Matlab 图像对比度增强算法^[16]对截取的火焰图像进行预处理,其中部分火焰预处理结果如图 8 至图 10 所示。

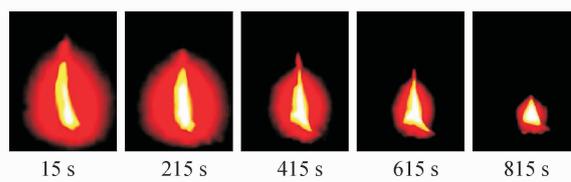


图 8 通入纯空气时的火焰面积变化

Fig.8 The flame area changes of injecting pure air

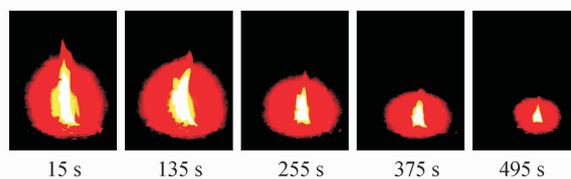


图 9 通入 N₂ 时的火焰面积变化

Fig.9 The flame area changes of injecting N₂

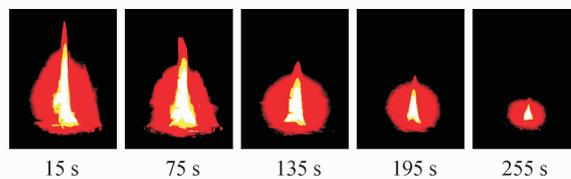


图 10 通入 CO₂ 时的火焰面积变化

Fig.10 The flame area changes of injecting CO₂

使用 Image - pro plus 软件对以上预处理后的火焰图像进行火焰面积的分割提取,然后采用设置阈值的方法自动计算火焰图像面积(图7至图9中的黄色部分)。同时,为了对通入 N_2 和 CO_2 条件下的火焰图像面积值进行有效对比分析,将计算得到的火焰图像面积值进行无量纲化处理,其变化规律如图11所示。

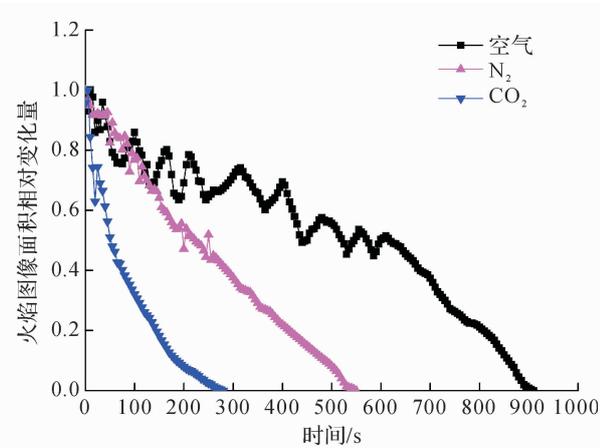


图11 火焰图像面积对比图

Fig. 11 The comparative chart of flame image area

由图8至图10看出,不管是煤自由燃烧实验,还是通入相同流量的 N_2 和 CO_2 条件下对受限空间煤明火燃烧的灭火实验,其火焰的形体特征基本都呈现锥形,而且基本都呈现减小趋势。由图11的变化曲线可以看出:通入 CO_2 时熄灭明火火焰所用的时间比通入 N_2 时的更少;煤自由燃烧实验过程中的火焰图像面积变化曲线可分为两个阶段,在火焰燃烧的前600s为燃烧的剧烈反应阶段,在该阶段火焰面积虽然呈现下降趋势,但是火焰的震荡特性比较明显,该震荡特性主要是由于燃烧过程中临近热源的气体受热膨胀导致的空气对流所致;而在火焰燃烧的后300s,随着火焰的逐渐熄灭,其震荡特性减弱,火焰图像面积呈线性下降变化。从通入相同流量 N_2 和 CO_2 熄灭煤明火燃烧实验中的火焰图像面积变化曲线及其拟合方程式(3)和式(4)结果可得到: CO_2 对火焰图像面积的影响基本上是呈指数型下降, N_2 对火焰图像面积的影响基本上是呈线性下降,且其拟合误差都在0.98以上。

$$y = -0.0018x + 0.9240$$

$$R^2 = 0.9859 \quad (3)$$

$$y = -0.0475 + 0.9817e^{-0.0101x}$$

$$R^2 = 0.9882 \quad (4)$$

4 结论

(1) 在只通入空气条件下,煤自由燃烧热解预热阶段,煤温、耗氧量、 CO 和 CH_4 产生量以及热释放速率都逐渐增大;在煤有焰燃烧阶段,煤体温度继续增大, CO 和 CH_4 产生量则下降,同时耗氧量、火焰温度和热释放速率都达到最大值;在阴燃熄灭阶段,煤温、 CO 和 CH_4 产生量在达到最大值后都开始下降,而耗氧量和热释放速率则持续下降。

(2) 相比于煤的自由燃烧熄灭全过程,实验验证了从明火开始全程通入相同流量 N_2 和 CO_2 对煤明火燃烧熄灭全过程中的煤体温度、火焰温度和标志性气体(O_2 、 CO 和 CH_4)浓度的变化规律产生了不同影响。在煤有焰燃烧阶段,通入 CO_2 时煤温上升速度、耗氧量、热释放速率以及 CO 和 CH_4 浓度下降速度均小于通入 N_2 时的对应值;在阴燃熄灭阶段,通入 CO_2 煤燃烧的煤温、 CO 和 CH_4 浓度下降速度比通入 N_2 煤燃烧的更高,而耗氧量和热释放速率则比通入 N_2 煤燃烧的更低。

(3) 不管是煤自由燃烧实验,还是相同流量的 N_2 和 CO_2 条件下的灭火实验,其火焰的形体均呈锥形减小。其中,煤自由燃烧的火焰图像面积先震荡波动再呈线性下降;通入 CO_2 后,火焰图像面积呈指数型下降;通入 N_2 后,火焰图像面积呈线性下降,同时通入 CO_2 时明火火焰熄灭时间更短。

综上可知: N_2 主要是通过稀释和窒息作用进行灭火;而 CO_2 除了具有稀释和窒息作用外,还可作为燃烧产物抑制煤燃烧链式反应的正向反应速率,从而能够更有效地抑制煤燃烧,说明 CO_2 对煤明火燃烧熄灭全过程的灭火效果比 N_2 更好。

参考文献

- [1] 曹凯, 司卫彬, 王德明. 急倾斜特厚煤层采空区煤自燃治理关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11): 64-67.
Cao Kai, Si Weibin, Wang Deming. Study on key technology of coal spontaneous combustion control in steeply inclined ultra thick seam goaf[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 64-67.
- [2] 王德明. 煤氧化动力学理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] Hu Xincheng, Yang Shengqiang, Zhou Xiuhong, et al. Coal spontaneous combustion prediction in gob using chaos analysis on gas indicators from upper tunnel[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26(2):

- 461 - 469.
- [4] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- [5] Wang Deming, Dou Guolan, Zhong Xiaoxing. An experimental approach to selecting chemical inhibitors to retard the spontaneous combustion of coal[J]. Fuel, 2014, 117(1): 218 - 223.
- [6] 张进军, 咎军才. 惰性液态 CO_2 防灭火工艺及实践[J]. 煤矿安全, 2011, 42(3): 88 - 90.
Zhang Jinjun, Zan Juncai. Technology and practice of fire prevention and control of inert liquid CO_2 [J]. Coal Mine Safety, 2011, 42(3): 88 - 90.
- [7] 刘少南. CO_2 浓度对煤低温氧化影响的实验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(S1): 149 - 151.
Liu Shaonan. Experimental study on CO_2 concentration affected to low temperature coal oxidation[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(S1): 149 - 151.
- [8] 鲍庆国. 煤自燃理论及防治技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2002.
- [9] 王振平, 马砺, 文虎, 等. CO_2 与 N_2 抑制煤炭氧化自燃对比实验研究[J]. 煤矿安全, 2010, 40(2): 10 - 13.
Wang Zhenping, Ma Li, Wen Hu, et al. A experiment contrast study of CO_2 and N_2 inhibited oxidation of spontaneous combustion of coal[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 40(2): 10 - 13.
- [10] 邵昊, 蒋曙光, 吴征艳, 等. 二氧化碳和氮气对煤自燃性能影响的对比实验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2244 - 2249.
- Shao Hao, Jiang Shuguang, Wu Zhengyan, et al. Comparative research on the influence of dioxide carbon and nitrogen on performance of coal spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2244 - 2249.
- [11] Orloff L. Simplified radiation modeling of pool fires [J]. Symposium on Combustion, 1981, 18(1): 549 - 561.
- [12] Janssens M L. Measuring rate of heat release by oxygen consumption [J]. Fire Technology, 1991, 27(3): 234 - 249.
- [13] 孙金华, 王青松, 纪杰, 等. 火焰精细结构及其传播动力学[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [14] Battistutta E, Hemert P V, Marcini L, et al. Swelling and sorption experiments on methane, nitrogen and carbon dioxide on dry selar cornish coal[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84(1): 39 - 48.
- [15] 吴仕生, 曾玺, 任明威, 等. 含氧/蒸汽气氛中煤高温分解产物分布及反应性[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(6): 660 - 665.
Wu Shisheng, Zeng Xi, Ren Mingwei, et al. Product distribution and reactivity of coal pyrolysis at high temperature and in atmospheres containing O_2 /steam [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(6): 660 - 665.
- [16] 张德丰. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

(责任编辑:王晓玲)