

# 液态二氧化碳防灭火装备及其工程应用

张春华<sup>1,2</sup>, 王继仁<sup>3</sup>, 张子明<sup>4</sup>, 张亚东<sup>4</sup>

1. 辽宁工程技术大学矿业技术学院, 辽宁葫芦岛 125105
2. 山西焦煤集团博士后科研工作站, 太原 030022
3. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 辽宁阜新 123000
4. 秦皇岛市天羽丰安全科技有限公司, 河北秦皇岛 066004

**摘要** 为有效消除矿井火灾隐患,保障井下作业人员安全,避免煤炭资源的损失扩大,研制了液态二氧化碳 CO<sub>2</sub>(l)的储罐、地面汽化防灭火系统和井下直接防灭火系统。储罐的自增压系统可使 CO<sub>2</sub>在其内保持液态状态而不结冰;CO<sub>2</sub>(l)的地面汽化灭火系统可以将 CO<sub>2</sub>(l)在地面运用电热汽化器和空温汽化器汽化,气态的 CO<sub>2</sub>在稳压罐内稳压达到 1.5MPa 后,以 0.5MPa 的压力通过管道输送至火区进行防灭火;CO<sub>2</sub>(l)防灭火列车可以直接将其运到煤矿井下的高温地点或火区附近,快速降温、灭火。照金煤矿 122 综采工作面防火工程实践表明,CO<sub>2</sub>(l)可以快速有效降低火区环境的温度、氧气和煤自燃指标气体浓度,消除火灾隐患。

**关键词** 液态二氧化碳;矿井火灾;防灭火装备;减排

**中图分类号** TD75+3

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.18.006

## Liquid Carbon Dioxide Fire Extinguishing Equipments and Their Engendering Applications

ZHANG Chunhua<sup>1,2</sup>, WANG Jiren<sup>3</sup>, ZHANG Ziming<sup>4</sup>, ZHANG Yadong<sup>4</sup>

1. Mining Industry Technology College, Liaoning Technical University, Huludao 125105, Liaoning Province, China
2. Postdoctoral Scientific Research Workstation of Shanxi Coking Coal, Taiyuan 030022, China
3. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China
4. Qinhuangdao Tianyufeng Safety Science and Technology Company Limited, Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China

**Abstract** Coal mine fire, as one of the main disasters in the coal mine, not only could burn down coal resource and electromechanical equipment, but also might induce methane or dust explosion. The equipments for Liquid Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>(l)) storage and transportation, the ground vaporous CO<sub>2</sub>(l) fire extinguishing system, and the underground CO<sub>2</sub>(l) direct fire extinguishing system are independently researched and developed. The self—pressurization system of the storage tank is able to make the CO<sub>2</sub> keep a liquid state without icing. For the ground vaporous CO<sub>2</sub>(l) fire extinguishing system, the CO<sub>2</sub>(l) is changed into gaseous CO<sub>2</sub> through the electrothermal vaporization and air temperature vaporization. And then the vaporous gaseous CO<sub>2</sub> is piped into a pressure stabilizing tank at a stable value of 1.5MPa. The gaseous CO<sub>2</sub> from the pressure stabilizing tank is transported at a pressure of 0.5MPa down to the coal mine in order to prevent or to extinguish the coal mine fire. The CO<sub>2</sub>(l) could be directly transported by the fire extinguishing train consisting of a number of single storage tanks near to the underground high temperature zone or the fire zone, which is able to rapidly cool the high temperature zone or extinguish the fire. The CO<sub>2</sub>(l) fire extinguishing equipments are used to extinguish fire in the 122 fully mechanized workface of Zhaojin Coal Mine. The application results show that the scientific equipments are able to rapidly and effectively reduce the temperature, the concentration of oxygen and coal spontaneous combustion index gas in the fire zone, eliminate the hazards of target fire.

**Keywords** liquid carbon dioxide; coal mine fire; fire control equipment; carbon emission reduction

收稿日期: 2013-01-29;修回日期:2013-04-10

基金项目: 国家安全生产监督管理总局重点科技项目(10-124)

作者简介: 张春华, 讲师, 研究方向为煤矿瓦斯和火灾防治, 电子信箱: zch9820@163.com

## 0 引言

矿井火灾是煤矿的主要灾害,而煤炭自燃又是矿井火灾的主要形式,一旦矿井发生煤炭自燃,轻则影响生产,重则可能烧毁井下的全部生产设备和造成重大人员伤亡。随着中国煤矿机械化程度的提高,采空区遗煤增多、面积扩大,瓦斯抽采导致漏风,为煤炭自燃提供了条件<sup>[1-3]</sup>。此外,中国很多矿区的瓦斯和火灾两种灾害并存,且随着采深的增加趋于严重,若火灾诱发瓦斯爆炸,将会造成更大的人员伤亡和财产损失<sup>[4-5]</sup>。

人们普遍采用如灌浆、注水、阻化剂、凝胶、泡沫等作为常规防火措施<sup>[6,7]</sup>,这些措施对保障矿井安全生产起到了非常重要的作用,但是均还存在一些局限性。灌浆技术工艺简单、成本低,但易受地势影响,常形成“拉沟”、跑浆、喷浆,影响煤质,恶化环境。注水可以降低煤体温度,水蒸气可以稀释氧气,但也易受地势影响,一旦跑水会恶化井下环境。阻化剂可以吸热降温、降低煤自燃倾向性,但是喷洒困难,扑灭大面积火灾效果不佳,且腐蚀设备。凝胶技术对局部火源效果明显,但是成本较高,较难大面积使用,有的还会产生有毒、有害气体。惰性泡沫流动性强,对采空区煤炭自燃效果较好,但是成本较高,一旦泡沫破灭,防火效果会受到较大影响。目前,惰性气体防火作为一种简便易行、快速有效的防治技术,在防治煤炭自燃火灾中得到了广泛应用。 $N_2$ 作为目前最普遍的矿井防火惰性气体,在煤矿火灾防治中发挥了重要作用<sup>[8-10]</sup>,但是它仍存在高纯 $N_2$ 成本高,注入的 $N_2$ 温度相对较高等缺陷。

中国已有部分煤矿尝试将液态二氧化碳 $CO_2(l)$ 用于煤矿防火,并取得了较理想效果<sup>[11-13]</sup>,相比其他常规防火技术, $CO_2(l)$ 防火技术存在以下优点:(1)降温降氧效果明显, $CO_2(l)$ 灌注入火区会瞬间汽化、体积膨胀、流动扩散,吸收大量的热量,使火区温度和氧气浓度快速降低;(2)防火防爆效果好, $CO_2(l)$ 灌注入火区后,稀释氧气、覆盖燃烧煤体,能有效降低煤氧复合速度,迅速抑制燃烧,有利于防止瓦斯、煤尘爆炸;(3)适用范围广, $CO_2(l)$ 经过吸热汽化,可扩散充满任何形状的燃烧空间,因而适合对采空区深部、高冒区等地点的防火;(4)不会损坏设备和井巷设施,灭火后恢复工作量少;(5)成本低且输送便利, $CO_2(l)$ 价格600元/t,转化为 $CO_2$ 气体价格仅1元/ $m^3$ ,比 $N_2$ 成本价格4.87元/ $m^3$ 成本节省了3.87元,可通过耐低温高压的储罐充装输送。可见,将 $CO_2(l)$ 用于煤矿防火具有广阔的应用前景,其防火系统装备和相关安全保障措施值得进一步开发和研究。

## 1 $CO_2(l)$ 的防火机理

$CO_2$ 在常温常压下是无毒、无腐蚀、无色略带刺激性酸味的窒息性气体,临界温度为 $31.2^\circ C$ 左右,临界压力为7.38MPa。气态 $CO_2$ 在低温高压下( $-20^\circ C, 2MPa$ )或常温高压( $31.06^\circ C, 7.38MPa$ )下可变为液态,在 $15^\circ C, 0.1MPa$ 条件下,1t  $CO_2(l)$ 可膨胀为 $640m^3$ 的气态 $CO_2$ 。汽化过程中,温度低

于 $-78.5^\circ C$ 时形成固态 $CO_2$ 。

### 1.1 $CO_2(l)$ 的窒息作用

一般认为, $O_2$ 浓度在8%~18%时煤可发生氧化自燃,低于8%时煤基本失燃,低于6%时煤处于窒息状态,而低于3%时,煤的氧化反应彻底终止<sup>[14]</sup>。据此原理向发火区或者具有高温火点的采空区注入 $CO_2(l)$ ,形成的高浓度 $CO_2$ ,可以快速稀释采空区原有氧气,同时由于 $CO_2$ 比空气密度大,且煤对于 $CO_2$ 具有较强的吸附作用(煤对于 $CO_2$ 吸附量为48L/kg,而煤对 $O_2$ 的吸附量仅为8L/kg)等特点,使得 $CO_2$ 很容易覆盖煤体燃烧点表面替代 $O_2$ ,降低 $O_2$ 浓度,最终使采空区 $O_2$ 浓度低于煤自然发火的临界 $O_2$ 浓度,从而防止煤的氧化自燃,或使火灾因缺氧熄灭。此外,大量的 $CO_2$ 注入扩散将提高采空区内气体静压,从而减少或阻止采空区漏风供氧。

### 1.2 $CO_2(l)$ 的降温作用

煤自然发火经历3个阶段:氧化升温阶段( $110\sim 130^\circ C$ );加速升温阶段( $140\sim 190^\circ C$ )和急速升温阶段( $200^\circ C$ )。 $CO_2(l)$ 注入火区空间后瞬间汽化,体积急剧膨胀,吸收大量的热。当温度急剧下降到 $-78.5^\circ C$ 时,1kg  $CO_2(l)$ 蒸发汽化需要吸收 $577.8\times 10^3 J/kg$ 的热量。加之煤对 $CO_2$ 极易吸附的特点,在吸附过程中将吸附热传递给 $CO_2$ 气体,从而遏止燃烧的连锁反应。同时气体 $CO_2$ 在采空区内流动扩散过程中也会吸热,降低周围介质温度,减缓煤的升温速率,促使煤的氧化反应由于聚热条件的破坏而延缓或终止。

### 1.3 惰化抑爆作用

$CO_2$ 的惰化作用优于其他气体,如 $N_2$ 阻爆的临界 $O_2$ 浓度为12%,火区熄灭临界 $O_2$ 浓度为9.5%,而 $CO_2$ 阻爆的临界 $O_2$ 浓度可达14.6%,火区熄灭的临界 $O_2$ 浓度为11.5%,可见, $CO_2$ 的阻爆、阻燃性能明显优于 $N_2$ 。汽化后的 $CO_2$ 在稀释可燃气与 $O_2$ 含量的同时,也在不断增加火区空间内混合气体的惰性,从而使其失去可燃性。

## 2 $CO_2(l)$ 防火装备

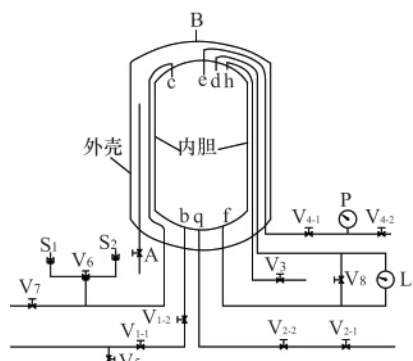
### 2.1 设计依据和关键技术

设计的 $CO_2(l)$ 防火装备主要包括: $CO_2(l)$ 储罐、 $CO_2(l)$ 地面汽化系统和 $CO_2(l)$ 储运列车系统。在各设备设计、制造、检验和验收过程中,均遵循相关行业标准、规程和规定<sup>[15-18]</sup>。

在 $CO_2(l)$ 的充装、储存、运输、灌注4个环节上主要考虑以下几个关键问题:(1)通过对储罐预先配压,确保来自化工厂等的槽罐车 $CO_2(l)$ 以液态形式安全充入储罐中;(2)根据 $CO_2(l)$ 物态特性,合理设计储罐内、外胆材质和温度,确保储罐耐低温高压的能力;(3)通过矿车列车将 $CO_2(l)$ 储罐安全运输到井下火区附近,实现直接快速防火;(4)通过在储罐内设置自增压系统,确保储罐内部不结干冰;(5)通过合理设计灌注管路尺寸参数,保证灌注过程中管路内部不结干冰。 $CO_2(l)$ 经电加热和空温汽化装置汽化成气体 $CO_2$ ,通过管道输送到井下,可实现气体 $CO_2$ 防火。

## 2.2 立式固定型 CO<sub>2</sub>(l) 储罐

如图 1 所示,立式固定式储罐为双层真空粉末绝热壳体结构,内胆材料为 16MnDR 低温压力容器钢板,配管为 0Cr18Ni9/0Cr19Ni10 不锈钢,设计温度 -40℃,设计压力 2.2MPa,容积 21.05m<sup>3</sup>;外壳为 Q235-B/Q345R 碳素结构钢,设计温度为常温,设计压力 0.1MPa,外壳容积 30m<sup>3</sup>。夹层保温材料为 T-60D 型珠光砂,并抽成真空(≤3Pa)。储罐的操作系统,多集中于底部,仪表及组合阀设置在圆筒壁,便于观察和操作,内胆设有 2 个安全阀,开放压力 2.25MPa,外壳设泄压装置。其操作主要包括充液、储存和排液,具体如下。



V<sub>1-1</sub>, V<sub>1-2</sub>—进液阀; V<sub>2-1</sub>, V<sub>2-2</sub>—排液阀; V<sub>3</sub>—增压阀; V<sub>4-1</sub>, V<sub>4-2</sub>—满液阀; V<sub>5</sub>—残液阀; V<sub>6</sub>—三通阀; V<sub>7</sub>—排气阀; V<sub>8</sub>—液位计组合; S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>—安全阀; A—真空阀; B—泄压阀; L—液位计; P—压力表; b—下进液口; c—排气口; d—液位计上口; e—充满指示口; f—液位计下口; g—液位计下口; h—增压口; q—排液口

图 1 固定型 CO<sub>2</sub>(l) 储罐结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of fix—typed CO<sub>2</sub>(l) tank

(1) 充液。首次充液时,将充液管线与储罐的充液接头连接,液位计组合阀 V<sub>8</sub> 处于平衡状态准备充液;充入与 CO<sub>2</sub>(l) 纯度相同的气体,使罐内压力达到 0.8MPa 以上方可进行充液;将充液管线接通槽罐车,先开启残液阀 V<sub>5</sub>,排出管内的杂质气体后,再开启进液阀 V<sub>1</sub> 和排气阀 V<sub>7</sub>,液位计组合阀 V<sub>8</sub> 处于全开状态显示液位计读数,进行充液;在充液过程中,当液位计指示液位接近目标值时,可间断开启满液阀 V<sub>4</sub>,如有液体喷出,应立即停止充液,关闭 V<sub>4</sub>;最后,关闭进液阀 V<sub>1</sub> 和排气阀 V<sub>7</sub>,打开 V<sub>5</sub> 残液阀,拆下充液管线,充液结束。补充充液的操作与首次充液的操作方法相似,不同点是补充充液时一开始就大流量的充液。

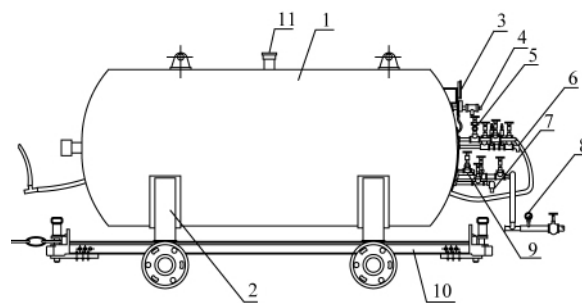
(2) 储存。CO<sub>2</sub>(l) 的储存属于承压储存,储存期间,除压力表、液位计、安全阀投入使用外,其他阀门应处于关闭状态。当储罐压力超过 2.1MPa 时,应开启排气阀 V<sub>7</sub> 降压,但应注意内罐的压力不得低于 0.8MPa,否则引起 CO<sub>2</sub>(l) 转变为干冰。

(3) 排液。当储罐向外供液又需要稳定排液时,可利用配备的汽化器对其进行汽化增压,其操作过程如下:开启排液阀 V<sub>2</sub>,使 CO<sub>2</sub>(l) 进入汽化器汽化,开启增压阀 V<sub>3</sub>,从汽化器分流出来的气体返回储罐上部 h 点,使储罐内增压。当储罐内压力达到 2.1MPa,可暂时关闭 V<sub>3</sub>,排液过程中,可通过控制

V<sub>3</sub> 的开度控制增压的稳定。排出的 CO<sub>2</sub>(l) 经过汽化器变成气态 CO<sub>2</sub> 直接使用或经过稳压罐稳压后再使用。

## 2.3 矿车型 CO<sub>2</sub>(l) 储罐

如图 2 所示, LCO<sub>2</sub> 单罐同样为双层真空粉末绝热壳体结构,内胆材质为 16MnDR,设计温度 -40℃,压力 2.31MPa,容积 2.6m<sup>3</sup>。外胆材质为 Q325-B,设计温度常温,体积为 3.6m<sup>3</sup>。夹层填充 T-60D 型珠光砂,并抽成真空。储罐的操作系统、压力表 8、液位计 3 及操作阀等集中于罐体尾部,便于观察,安全装置设有内胆安全阀 4 及泄压阀 11,通过支座 2 与矿车底盘 10 构成单元储运罐车,将单元储运罐车首尾连接,则形成储罐列车,可以把大量的 LCO<sub>2</sub> 安全地到运输目标地点,进行防灭火。



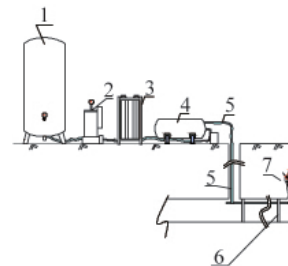
1—LCO<sub>2</sub> 储罐; 2—支座; 3—液位计; 4—安全阀; 5—加液阀; 6—出液阀; 7—排气阀; 8—压力表; 9—增压阀; 10—矿车底盘; 11—泄压阀

图 2 矿车型 CO<sub>2</sub>(l) 储罐的结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of the tub-typed CO<sub>2</sub>(l) tank

## 2.4 LCO<sub>2</sub> 地面防灭火系统装备

如图 3 所示,地面防灭火系统中的固定型 CO<sub>2</sub>(l) 储罐配有超压和欠压自动报警装置,长期监控立式固定型储罐的压力,自动泄压和自动加压,超过 2.1MPa 时,自动开启排气阀降压,低于 0.8MPa 时自动开启加压阀增压,防止储罐欠压形成干冰。CO<sub>2</sub>(l) 通过卧式固定型 CO<sub>2</sub>(l) 储罐 1 的管线排出,经电加热汽化器 2 和空温汽化器 3,汽化成气态 CO<sub>2</sub>,进入卧式罐稳压罐 4,稳压保持在 1.5MPa,慢慢开启出阀门,半开启状态,经井下输送管道 5 以 0.5MPa 的压力输送至火区附近防灭火。卧式固定型 CO<sub>2</sub> 储气稳压罐由 12mm 厚的锅炉钢板制成,储罐装有压力表、安全阀和操作阀门,一般安装在储罐上侧和左右两侧以便操作和观察。



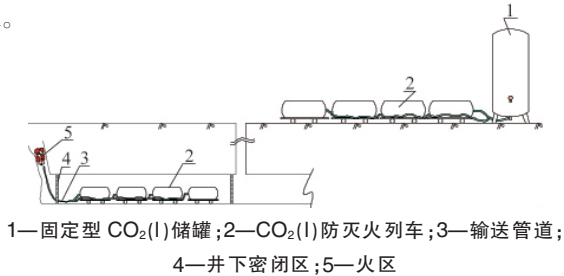
1—固定型 CO<sub>2</sub>(l) 储罐; 2—电热汽化器; 3—空温汽化器; 4—卧式固定型稳压罐; 5—输送管道; 6—井下密闭区; 7—火区

图 3 CO<sub>2</sub>(l) 地面防灭火装备示意图

Fig. 3 Diagram of CO<sub>2</sub>(l) ground fire extinguishing equipment

### 2.5 CO<sub>2</sub>(l)井下防灭火系统装备

如图4所示,由立式固定型储罐1向防灭火列车2充装CO<sub>2</sub>(l),由防灭火列车输送至井下火区附近,通过输送管道3,进入火区密闭4内,对火区5直接灌注大量的CO<sub>2</sub>(l),实现快速降温 and 灭火。由于灌注的CO<sub>2</sub>(l)在流动过程中极易形成干冰,管路直径不易过细,故选用管路直径45mm,管壁厚3mm。



1—固定型CO<sub>2</sub>(l)储罐;2—CO<sub>2</sub>(l)防灭火列车;3—输送管道;  
4—井下密闭区;5—火区

Fig. 4 Diagram of CO<sub>2</sub>(l) underground unitized equipment for fire extinguishing

向火区灌注CO<sub>2</sub>(l)前必须进行以下检查事项。

- (1) 灌注CO<sub>2</sub>(l)前必须检查输液管路的牢固性,避免因高压扰动灌注口,误伤操作人员。
- (2) 灌注CO<sub>2</sub>(l)前须两次检查各阀门、仪表、管路连接处于正常状态,确保无泄漏。

向火区灌注CO<sub>2</sub>(l)时应遵守以下操作方法。

- (1) 打开图2所示的出液阀6,先半开启前端阀门,等待管内缓慢充满CO<sub>2</sub>(l),再打开管道末端的阀门进行灌注灭火。
- (2) 同时打开图2中所示的增压阀9及增压回路阀门,使部分CO<sub>2</sub>(l)绕行于增压系统进行汽化,然后通过回流阀回到储气罐内,增加储罐压力至1.8MPa为止。
- (3) 当第1台储液罐压力降到1.3MPa时,打开第2台储液罐,步骤同上灌注灭火。同时关闭第1台储液罐进行增压操作,待图2中储罐内压力表8增至1.8MPa以上时,再重新使用,如此交替使用。

### 3 CO<sub>2</sub>(l)防火工程实践

#### 3.1 照金煤矿122工作面情况

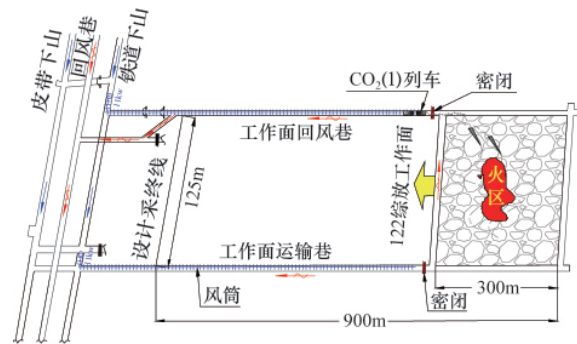
铜川市耀州区照金煤矿年产量90万t,生产的工作面为122综采工作面,工作面煤层厚9m,一次采全高。工作面走向长900m,工作面倾向长125m,倾角小于1°,由于采后浮煤较多,自然发火期为30~60d,其煤质为低灰低硫,富油,高中发热量的长焰煤,加之该矿为高瓦斯矿井,瓦斯抽采造成一定程度的漏风加剧了煤的自然,以上多重不利因素造成工作面停采时间稍长,易出现CO浓度超标现象。工作面回采300m时,采空区内出现了煤自然发火险情,为了快速有效灭火,决定向采空区灌注大量的CO<sub>2</sub>(l)。

#### 3.2 防灭火方案

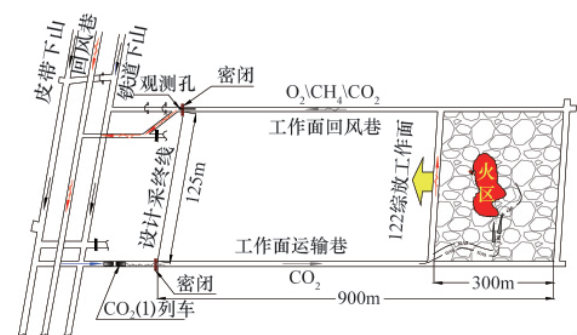
(1) 第1方案。若在工作面附近封闭,将使600m长的回风巷和运输巷形成盲巷,需在工作面回风巷和运输巷入口处各安装1台11kW的局部风机,待工作面密闭后,向2条盲巷端头送风,以保证注入CO<sub>2</sub>(l)时的人员安全和防止灌注CO<sub>2</sub>(l)

后巷道内瓦斯积聚。但考虑工作面运输巷兼做皮带运输巷道,CO<sub>2</sub>(l)灭火列车无法进入,因此只能从回风巷灌注,见图5(a)。

(2) 第2方案。在122工作面的回风巷和运输巷的入口处各打一道密闭,从运输巷入口灌注CO<sub>2</sub>(l),在回风巷密闭墙上预留一个直径4寸的排气孔管,阀门控制,使得在灌注CO<sub>2</sub>(l)时采空区内的O<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>可以从该孔管中排出,有助于减少空气中的氧含量,见图5(b)。



(a) 第1方案:封闭工作面  
(a) First solution: Sealing the workface



(b) 第2方案:封闭两巷  
(b) Second solution: Sealing both alleys

图5 122综采工作面防火方案示意图

Fig. 5 Scheme of fire prevention plan for 122 fully mechanized mining workface

与第1方案相比,第2方案只是增加了回风巷和运输巷的灌注空间,从安全、省时、方便等考虑,选择了第2方案。方案实施过程中,密闭墙应确保坚固严密,可承受CO<sub>2</sub>(l)汽化后采空区压力的增加。封闭前应布置好监测束管,上下巷各埋2条,待工作面封闭后可随时监测工作面内的气体成份和变化情况,为CO<sub>2</sub>(l)灌注操作和启封时间提供可靠即时数据。回风巷密闭墙预留的观测孔,可以用于测定CO<sub>2</sub>(l)灌注期间和结束后闭内气压变化和气体成分,以检验密闭的密封性。

#### 3.3 CO<sub>2</sub>(l)用量计算

(1) CO<sub>2</sub>(l)灌注量的计算方法

煤矿防灭火工程所需CO<sub>2</sub>(l)的质量计算式为

$$m = \frac{kV(1+\eta)}{0.55} \quad (1)$$

式中, $m$ 为灌注的CO<sub>2</sub>(l)的质量,kg; $V$ 为冒落后采空区体积,m<sup>3</sup>; $\eta$ 为CO<sub>2</sub>(l)损失率,%; $k$ 为采空区冒落后与冒落前的体积

比;0.55 为在温度 15℃和标准大气压力下由 1kg CO<sub>2</sub>(l)中得到的气体 CO<sub>2</sub>的体积,m<sup>3</sup>。

#### (2) 采空区 CO<sub>2</sub>(l)灌注量分析

参照公式(1),该工作面的  $k=0.6, V_{\text{采空区}}=300\text{m(长)}\times 125\text{m(宽)}\times 9\text{m(高)}=33.75\text{万 m}^3$ , 则有效注入采空区空间体积为  $33.75\text{万 m}^3\times 0.6=20.25\text{万 m}^3$ 。考虑到,当运用 CO<sub>2</sub>防火防爆时,瓦斯停止爆炸的最低含 O<sub>2</sub>浓度为 14.6%,火区熄灭的最低含 O<sub>2</sub>浓度为 11.5%。据此保守计算,灌注 10 万 m<sup>3</sup> 气态 CO<sub>2</sub>时,便可使采空区内氧含量降到 10%以下,使空区内的浮煤失燃。结合前述 CO<sub>2</sub>(l)防火机理中的 CO<sub>2</sub>(l)物态变化知识,采空区需要注入 CO<sub>2</sub>(l)的质量  $m_{\text{采空区}}=10\text{万 m}^3\div (640\text{m}^3/\text{t})=156.25\text{t}$ 。

#### (3) 两巷空间灌注量计算

方案 2 中,只是需要多灌注运输巷和回风巷的空间,总长度  $L=600\text{m}\times 2=1200\text{m}$ ,巷道断面 12m<sup>2</sup>,则多注的空间体积为  $V_{\text{巷道}}=1200\text{m}\times 12\text{m}^2=14400\text{m}^3$ ,需多注入的 CO<sub>2</sub>(l)为  $m_{\text{巷道}}=V_{\text{巷道}}\div (640\text{m}^3/\text{t})=14400\text{m}^3\div (640\text{m}^3/\text{t})=22.5\text{t}$ 。

累计所需灌注 CO<sub>2</sub>(l)的质量  $m=156.25\text{t}+22.5\text{t}=178.75\text{t}$ 。

### 3.4 效果分析

从运输巷向 122 工作面自燃危险区域注入了 180t CO<sub>2</sub>(l),工作面采空区内温度迅速降低至 20℃以下,火区内空气中的 O<sub>2</sub>浓度下降到 5.0%以下,原火区空气中无 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、CO 浓度在 0.001%以下,CO<sub>2</sub>(l)的注入可有效预防 122 工作面采空区自燃危险。

## 4 结论

通过分析物理特性和防灭火机理,据依据相关行业标准、规程和规定,研制了 CO<sub>2</sub>(l)的储罐、地面汽化防灭火系统和井下直接防灭火系统,主要结论如下。

(1) 研制的 CO<sub>2</sub>(l)储罐具备自动增压系统,可有效调控储罐内的压力,从而防止储罐充液和排液过程中 CO<sub>2</sub>(l)的汽化、结冰现象。

(2) 研制的 CO<sub>2</sub>(l)地面汽化防灭火系统,配有超压和欠压自动报警装置,可以自动泄压和自动加压,并可将 CO<sub>2</sub>(l)汽化成气体 CO<sub>2</sub>,注入罐稳达到稳压状态,然后经管道系统运送至井下高温或火区施行防灭火作业。

(3) 研制的 CO<sub>2</sub>(l)井下直接防灭火系统,可以将充装 CO<sub>2</sub>(l)的矿车型储罐以列车形式,直接运送到井下高温或火区附近,实施防灭火作业。

(4) 利用所研制的系统装备向自然发火区域大量灌注 CO<sub>2</sub>(l),可以快速有效地降低工作面的温度、O<sub>2</sub>浓度和自燃指标气体浓度,防灭火效果非常明显。

### 参考文献 (References)

- [1] 秦波涛,王德明. 矿井防灭火技术现状及研究进展 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(12): 80-85.  
Qin Botao, Wang Deming. China Safety Science Journal, 2007, 17(12): 80-85.
- [2] 张建国. 掘进巷道穿采空区煤自燃火灾的治理 [J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(3): 63-65.  
Zhang Jianguo. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, 39(3): 63-65.

- [3] 李法刚,张明亮,王文庭. 综采放顶煤工作面自燃火灾综合防治[J]. 中州煤炭, 2010(3): 86-87.  
Li Fagang, Zhang Mingliang, Wang Wenting. Zhongzhou Coal, 2010(3): 86-87.
- [4] 焦宇,段玉龙,周心权,等. 煤矿火区密闭过程自燃诱发瓦斯爆炸的规律研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 850-856.  
Jiao Yu, Duan Yulong, Zhou Xinquan, et al. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 850-856.
- [5] 周福宝. 瓦斯与煤自燃共存研究 (I): 致灾机理[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 843-849.  
Zhou Fubao. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 843-849.
- [6] 梁运涛,罗海珠. 中国煤矿火灾防治技术现状与趋势 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 126-130.  
Liang Yuntao, Luo Haizhu. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 126-130.
- [7] 张国枢. 通风安全学[M]. 2 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011: 260-276.  
Zhang Guoshu. Mine Ventilation and safety [M]. 2nd ed. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2011: 260-276.
- [8] 高广伟. 中国煤矿氮气防灭火的现状与未来[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 48-51.  
Gao Guangwei. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 48-51.
- [9] 王洪义,宋艳苹. 氮气防灭火技术在平顶山矿区的应用 [J]. 矿业安全与环保, 2009, 36(3): 49-51.  
Wang Hongyi, Song Yanping. Mining Safety & Environmental Protection, 2009, 36(3): 49-51.
- [10] 李井坤,陈志平,龚邦军. 综采放顶煤工作面封闭注氮防火技术探索 [J]. 煤炭技术, 2011, 30(1): 222-224.  
Li Jingkun, Chen Zhiping, Gong Bangjun. Coal Technology, 2011, 30(1): 222-224.
- [11] 齐更亮,路拴成. 浅谈液态二氧化碳在防治采空区煤炭自燃中的应用[J]. 煤矿现代化, 2009(6): 42-43.  
Qi Gengliang, Lu Shuancheng. Coal Mine Modernization, 2009(6): 42-43.
- [12] 姚宏章,刘贵成,董旗,等. 液态 CO<sub>2</sub> 惰性灭火装置的研制与应用[J]. 中州煤炭, 2010(3): 17-18.  
Yao Hongzhang, Liu Guicheng, Dong Qi, et al. Zhongzhou Coal, 2010(3): 17-18.
- [13] 焦根善. 液态二氧化碳灭火技术在矿井灭火中的应用 [J]. 陕西煤炭, 2011(3): 85-87.  
Jiao Genshan. Shaanxi Coal, 2011(3): 85-87.
- [14] 徐瑞,李增华,刘震,等. 许疃煤矿采空区自燃"三带"范围的确定[J]. 煤矿安全, 2011, 42(8): 115-118.  
Xu Rui, Li Zenghua, Liu Zhen, et al. Safety in Coal Mines, 2011, 42(8): 115-118.
- [15] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. GB150-2011 压力容器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. GB 150-2011 steel pressure vessels[S]. Beijing Standards Press of China, 2011.
- [16] 国家标准化管理委员会. GB18442-2011 固定式真空绝热深冷压力容器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB18442-2011 stationary vacuum thermal-insulating cryogenic pressure vessel[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [17] 中国石油和化学工业联合会. HGT20585-2011 钢制低温压力容器技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
China Petroleum and Chemical Industry Federation. HGT20585-2011 technical specification for steel low temperature pressure vessels[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局. TSG R0004-2009 固定式压力容器安全技术监察规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. TSG R0004-2009 supervision regulation on safety technology for stationary pressure vessel [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

(责任编辑 吴晓丽)