

# 二氧化碳与氮气耦合气体防灭火技术应用

马桂军<sup>1</sup> 杨德清<sup>1</sup> 王庆义<sup>2</sup>

1. 铁法能源集团公司大兴煤矿救护中队；
2. 辽宁煤监局救援指指挥中心)

**摘要** 大兴煤矿采空区自然发火是综采工作面安全回采的主要隐患之一，向采空区注入氮气惰化，降低采空区氧气浓度是采空区防火的重要措施，但存在氮气密度比空气小，惰化空间有限，流量小，不能迅速惰化采空区等问题。液态二氧化碳具有纯度高，气化流量大等优点，与氮气耦合注入采空区，惰性气体流量迅速增加，通过在大兴矿南五709火区、南二905综采工作面和南五902综采工作面进行应用，验证了二氧化碳与氮气耦合气体注入采空区工艺和效果。

**关键词** 液态二氧化碳 耦合 采空区

铁法能源集团公司大兴煤矿矿井设计生产能力3.00 Mt/a，2012年核定生产能力3.9 Mt/a，为煤与瓦斯突出矿井，火成岩侵入情况及地质构造极为复杂，对煤层破坏程度严重。受火成岩影响，煤层瓦斯含量大幅增加，渗透性能差，力学强度低，煤的水分降低，自然发火期远低于国内同类煤体，自然发火期最短仅为10天。大兴煤矿从1990年投产至今，矿井共发生各类火灾52次，虽未造成人员伤亡，但财产及煤炭资源遭受大量损失。经过多年的防灭火系统建设、经验积累，在综采工作面防治自然发火方面形成了两注、两堵等综合防火技术，即采空区注浆、注氮和两顺三角点封堵，但存在处理过程长等缺点。2016年引进了二氧化碳与氮气耦合气体新技术进行防灭火，避免了采空区注入氮气存在的流量小，惰化空间有限，以及只注入液态二氧化碳受运输条件限制，不能连续惰化采空区等缺点。经过南五709火区、南二905综采工作面和南五902综采工作面的实际应用，能迅速将采空区指标性气体CO控制，验证了二氧化碳与氮气耦合气体注入采空区工艺和应用效果，为矿井应急处置火灾灾情提供了有效措施。

## 1 氮气和二氧化碳气体防灭火性能

氮气和二氧化碳气体作为惰性气体都可以用于防灭火，二者的防火性能略有不同。在纯度方面，无论采用膜分离还是吸附分离技术制出的氮气，都不可能把氧气全部分离出去，纯度大约为97%，而液态二氧化碳纯度接近100%；在吸附量方面，在相同温度和压力条件下，煤对二氧化碳和氮气的吸附能力分别为48 L/kg和8 L/kg，即煤对二氧化碳的吸附能力是氮气的6倍；由于氮气的密度小于空气密度，二氧化碳的密度大于空气密度，因此二氧化碳和氮气气体在采空区留存的空间位置不同，对采空区不同部位发火点的作用不同（表1）。

表1 氮气和二氧化碳防火性能表

气体名称	气体纯度	煤的吸附量	适用空间
二氧化碳	100%	48 L/kg	中、底部自然发火点
氮气	97%	8 L/kg	上部自然发火点

## 2 二氧化碳与氮气耦合气体注入采空区工艺

### 2.1 地面耦合气体注入系统

在大兴煤矿地面制氮厂房安设自热式转换器和强热式转换器各一台，用于液态二氧化碳气化作业，将液态二氧化碳罐车与自热式转化器连接，连接使用耐低温软管，自热式转换器与强热式辅助转换器连接后再通过6 in 管路直接与立孔管路连接。制氮机正常运行，通过注氮立孔、井下管路及采空区预埋管路进入采空区。

### 2.2 注入氮气和二氧化碳耦合气体路线

(1) 液态二氧化碳槽车→金属高压软管→自热式转换器→强热式辅助转换器→6 in 管路→充填立孔→井下管路→综采工作面运输巷预埋管路→采空区。

(2) 氮气通过制氮设备→6 in 管路→充填立孔→井下管路→综采工作面运输巷预埋管路→采空区。

### 2.3 操作方法

制氮机正常运行，需要操作液态二氧化碳气化装置（自热式转化器），打开监视窗保险门，顺时针旋转电源总开关，然后逐渐开启水温加热阀门电源（共计3组），将水位警示灯下方开关调整至自动位置后设备电气开关启动完成。通过监视窗口内的温度指示表，观察温度。当温度达到70℃后，通知罐车司机开启装有液态CO<sub>2</sub>的容器阀门。储液罐阀门开启后，开启注液态CO<sub>2</sub>设备输出端4 in 截止阀门。初次开启阀门顺时针开启一圈后，观察温度指示表变化，当温度由70℃逐渐下降至稳定范围（20~25℃）为最佳效果，当温度超过上限时，增大阀门开度；低于下限时，减小阀门开度。注液态CO<sub>2</sub>完成后，首先由运输司机关闭储液罐阀门，然后关闭设备输出端4 in 截止阀门。储液罐阀门、设备输出阀门均关闭完成后，进行卸压工作，打开储液罐卸压阀门、设备卸压阀门对注二氧化碳设备进行卸压。卸压结束后关闭设备卸压阀门（图1）。

### 2.4 井下耦合气体注入系统

在地面将槽车中的液态二氧化碳换装进6~8套矿用移动式防灭火装置，并通过矿井运输系统运输至使用地点附近，直接接入注入采空区氮气管路，将液态二氧化碳注入防火区域。每3~4套液态二氧化碳矿用移动式防灭火装置为一组，第一组液态二氧化碳输送完毕后另一组接替注入，第一组返回至地面换装液态二氧化碳，两组液态二氧化碳矿用移动式防灭火装置循环作业直至自燃隐患点或火点消除（图2）。

## 3 二氧化碳与氮气耦合气体防灭火技术应用情况

### 3.1 南五709封闭火区应用情况

2016年6月29日，南五709综采工作面发现采空区出现响声，并有热气浪从机尾支

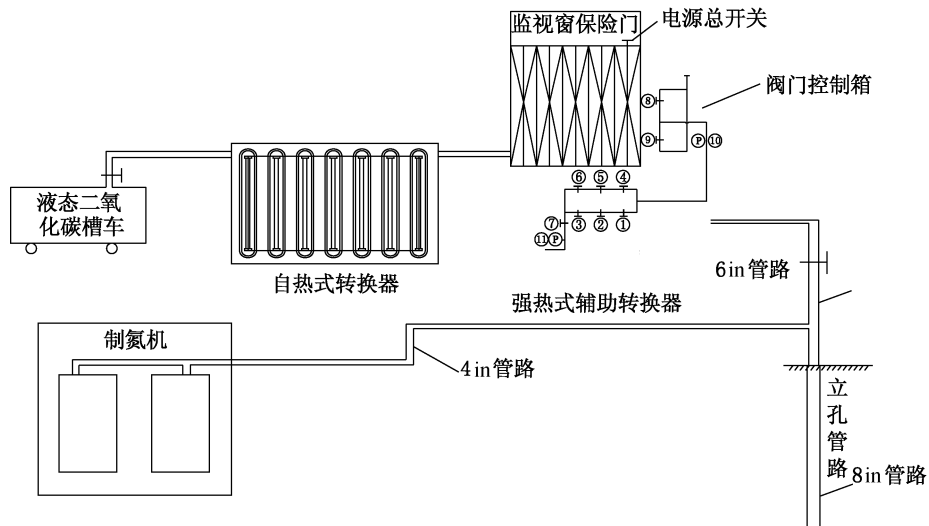


图 1 地面注耦合惰气体示意图

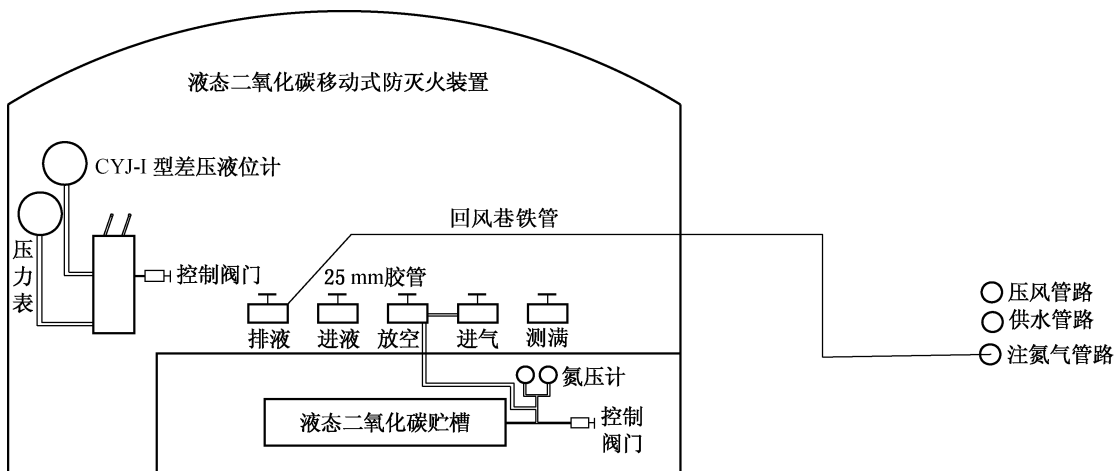


图 2 井下注耦合惰气体示意图

架向外涌出，103 号支架上帮梁头附近出现明火。在用水直接灭火无效情况下，实施两顺砌筑密闭封闭火区。封闭后火区内温度一直在 30℃ 以上。7 月 12 日，在回风巷使用移动式防灭火装置通过注氮管路注入二氧化碳和氮气耦合气体，注入后温度下降，一氧化碳等自然发火指标性气体迅速下降。

### 3.2 南二 905 综采工作面应用情况

2016 年 7 月，南二 905 综采工作面回风流一氧化碳浓度逐渐升高，最大值达到了  $93.12 \times 10^{-6}$ ，工作面停止生产。经过充填，注氮效果并不明显。7 月 7 日，在井下二氧化碳与氮气耦合气体系统通过南二 905 综采工作面运输巷采空区预埋管路，向采空区注入了以二氧化碳为主的二氧化碳与氮气耦合气体，采空区及工作面充满耦合气体，回风流二

氧化碳最大值达到 1.26%。

### 3.3 南五 902 综采工作面

2017 年 1 月 22—23 日，进行了二氧化碳与氮气耦合气体注入采空区实践，在地面二氧化碳与氮气耦合气体系统通过南五 902 综采工作面运输巷 1 月 18 日和 1 月 22 日的采空区预埋管路，向采空区注入二氧化碳与氮气耦合气体。注入前，对氮气流量进行了观测，两趟埋管注入氮气流量为 1200 m<sup>3</sup>/h，注入二氧化碳与氮气耦合气体期间测定结果为 2500 m<sup>3</sup>/h，惰性气体流量增加一倍。

## 4 二氧化碳与氮气耦合气体注入采空区工艺及效果验证

### 4.1 工艺验证

通过一个火区和两个综采工作面应用，证明该工艺可以将二氧化碳与氮气耦合气体迅速注入采空区，降低采空区氧气浓度和温度，消灭自然发火隐患。但是在注入气体过程中发现如下问题：

(1) 由于液态二氧化碳气化过程不易控制，导致流量过大，造成原有注氮管路不能承受流量压力，部分管路有漏气现象，因此，气化二氧化碳过程控制是控制流量的关键。

(2) 采空区预埋管路距离短会造成大量惰性气体涌入采煤作业空间，因此，注入前应根据管路出口位置、工作面推进度及流失量计算采空区可留存惰性气体容量，作为注入惰性气体流量控制依据。

### 4.2 效果验证

#### 1. 南五 709 火区

2016 年 7 月 12 日，向火区内注入二氧化碳和氮气耦合气体，从火区数据统计表（表 2）可以看到温度及其他指标气体均有下降。

表 2 南五 709 火区数据统计表

日期	密闭温度/℃	出水温度/℃	CO/%	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /%	O <sub>2</sub> /%	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /%
2016-07-06	34	封闭区 无流水	0.0021	0	6.1	0
2016-07-07	35		0.0011	0	6.26	0
2016-07-08	34		0.0011	0	6.76	0
2016-07-09	34		0.0011	0	6.94	0
2016-07-10	33		0.0011	0	6.15	0
2016-07-11	35		0.0012	0	1.87	0
2016-07-12	27		0.0011	0	1.53	0
2016-07-13	28		0.0006	0	2.81	0
2016-07-14	24		0.0002	0	2.54	0
2016-07-15	28		0.0007	0	1.92	0

#### 2. 南二 905 综采工作面

根据南二 905 综采工作面一氧化碳涌出量统计（表 3），7 月 6 日的回风流一氧化碳浓

表3 南二905综采工作面一氧化碳涌出量统计表

日期	时间/时	浓度/ $10^{-6}$	风排系统 风量/ $(m^3 \cdot min^{-1})$	风排纯度/ $(L \cdot min^{-1})$	抽采系统(高浓)			抽采系统(低浓)			采场合计/ $(L \cdot h^{-1})$	采场合计/ $(L \cdot 2h^{-1})$	采场合计/ $(L \cdot d^{-1})$	采场合计/ $(10^4 L \cdot d^{-1})$	
					真实浓度/ $10^{-6}$	抽放量/ $(m^3 \cdot min^{-1})$	高浓纯度/ $(L \cdot min^{-1})$	真实浓度/ $10^{-6}$	抽放量/ $(m^3 \cdot min^{-1})$	低浓纯度/ $(L \cdot min^{-1})$					
07-06	0-2	17.36	882	15.31	500.00	54	27.00	155.63	120	18.68	57.84	3470.16	6940.31	115153.46	115.15
	2-4	41.71	882	36.79	500.00	54	27.00	154.38	120	18.53	80.29	4817.29	9634.59		
	4-6	39.29	882	34.65	500.00	54	27.00	121.25	120	14.55	75.83	4549.69	9099.38		
	6-8	34.72	882	30.62	500.00	54	27.00	129.37	120	15.52	71.95	4316.85	8633.69		
	8-10	76.63	882	67.59	500.00	54	27.00	137.50	120	16.50	113.11	6786.80	13573.59		
	10-12	53.38	882	47.08	489.38	54	26.43	118.12	120	14.17	90.46	5427.46	10854.92		
	12-14	46.30	882	40.84	343.75	54	18.56	119.37	120	14.32	71.47	4288.41	8576.82		
	14-16	68.67	882	60.57	408.13	54	22.04	154.38	120	18.53	97.53	5851.89	11703.79		
	16-18	66.74	882	58.86	500.00	54	27.00	141.25	120	16.95	101.16	6069.88	12139.76		
	18-20	43.52	882	38.38	363.13	54	19.61	100.62	120	12.07	69.62	4177.01	8354.02		
	20-22	36.04	882	31.79	355.01	54	19.17	124.38	120	14.93	61.46	3687.47	7374.94		
	22-0	46.13	882	40.69	329.37	54	17.79	127.50	120	15.30	68.90	4133.82	8267.64		
07-07	0-2	27.13	882	23.93	260.63	54	14.07	96.86	120	11.62	48.43	2905.62	5811.25	46199.80	46.20
	2-4	25.74	882	22.70	241.87	54	13.06	87.50	120	10.50	46.26	2775.82	5551.64		
	4-6	16.82	882	14.84	220.61	54	11.91	86.87	120	10.42	37.02	2221.35	4442.71		
	6-8	11.04	882	9.74	186.25	54	10.06	86.87	120	10.42	30.07	1804.15	3608.30		
	8-10	16.94	882	14.94	167.50	54	9.05	87.50	120	10.50	32.46	1947.63	3895.26		
	10-12	16.85	882	14.86	157.50	54	8.51	85.62	120	10.27	30.64	1838.47	3676.93		
	12-14	17.68	882	15.59	162.49	54	8.77	85.62	120	10.27	31.42	1885.09	3770.19		
	14-16	20.61	882	18.18	140.63	54	7.59	70.62	120	8.47	32.67	1960.32	3920.64		
	16-18	15.28	882	13.48	131.24	54	7.09	60.62	120	7.27	26.64	1598.37	3196.74		
	18-20	10.55	882	9.31	119.37	54	6.45	58.75	120	7.05	22.09	1325.31	2650.63		
	20-22	15.43	882	13.61	102.49	54	5.53	57.50	120	6.90	25.89	1553.29	3106.57		
	22-0	11.23	882	9.90	88.12	54	4.76	50.63	120	6.08	21.41	1284.46	2568.93		
07-08	0-2	7.67	1056	8.10	78.75	54	4.25	48.75	130	6.34	18.85	1131.12	2262.24	19148.02	19.15
	2-4	8.06	1056	8.51	80.00	54	4.32	51.88	130	6.74	18.93	1135.55	2271.09		
	4-6	11.62	1056	12.27	73.75	54	3.98	51.88	130	6.74	22.43	1345.69	2691.39		
	6-8	6.98	1056	7.37	63.75	54	3.44	50.00	130	6.50	16.99	1019.30	2038.61		
	8-10	5.27	1056	5.57	56.24	54	3.04	46.88	130	6.09	14.45	867.12	1734.25		
	10-12	6.59	1056	6.96	56.24	54	3.04	47.50	130	6.18	15.68	941.01	1882.02		
	12-14	6.79	1056	7.17	50.00	54	2.70	47.50	130	6.18	15.56	933.46	1866.93		
	14-16	3.91	1056	4.13	45.62	54	2.46	45.00	130	5.85	12.28	736.80	1473.59		
	16-18	3.08	1056	3.25	38.12	54	2.06	43.75	130	5.69	11.00	659.91	1319.82		
	18-20	3.03	1056	3.20	35.00	54	1.89	43.75	130	5.69	5.09	305.38	610.76		
	20-22	2.59	1056	2.74	31.25	54	1.69	43.75	130	5.69	4.42	265.35	530.70		
	22-0	2.34	1056	2.47	26.25	54	1.42	43.75	130	5.69	3.89	233.31	466.62		

表 4 南五 902 综采工作面一氧化碳涌出量统计表

日期	时间/ 时	风排系统			高浓系统			低浓系统			采场合计/ (L·min <sup>-1</sup> )	采场合计/ (L·d <sup>-1</sup> )		
		浓度/10 <sup>-6</sup>	风量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	风排纯量/ (L·min <sup>-1</sup> )	浓度/10 <sup>-6</sup>	抽采量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	高浓纯量/ (L·min <sup>-1</sup> )	浓度/10 <sup>-6</sup>	抽采量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	低浓纯量/ (L·min <sup>-1</sup> )				
2017 - 01 -23	0—2	7.96	1330	10.59	112.49	111.34	12.52	31.88	108.17	3.45	26.56	40267.41		
	2—4	7.40	1330	9.84	112.49	111.34	12.52	72.50	108.17	7.84	30.21			
	4—6	6.49	1330	8.63	109.99	111.34	12.25	39.99	108.17	4.33	25.20			
	6—8	7.06	1330	9.39	111.24	111.34	12.39	39.99	108.17	4.33	26.10			
	8—10	7.57	1330	10.07	112.49	111.34	12.52	44.37	108.17	4.80	27.39			
	10—12	8.47	1330	11.27	114.99	111.34	12.80	48.13	108.17	5.21	29.27			
	12—14	7.01	1330	9.32	103.76	111.34	11.55	43.12	108.17	4.66	25.54			
	14—16	7.03	1330	9.35	113.74	111.34	12.66	60.00	108.17	6.49	28.50			
	16—18	5.76	1330	7.66	111.24	111.34	12.39	86.24	108.17	9.33	29.37			
	18—20	7.30	1330	9.71	96.25	111.34	10.72	56.87	108.17	6.15	26.58			
	20—22	7.08	1330	9.42	95.00	111.34	10.58	59.37	108.17	6.42	26.42			
	22—0	7.35	1330	9.78	93.75	111.34	10.44	131.24	108.17	14.20	34.41			
	2017 - 01 -24	0—2	5.71	1330	7.59	95.00	108.9	10.35	74.37	105.55	7.85		25.79	39453.28
		2—4	7.06	1330	9.39	96.25	108.9	10.48	66.25	105.55	6.99		26.86	
4—6		6.01	1330	7.99	100.01	108.9	10.89	56.87	105.55	6.00	24.89			
6—8		6.74	1330	8.96	103.76	108.9	11.30	121.25	105.55	12.80	33.06			
8—10		5.20	1330	6.92	120.00	108.9	13.07	58.12	105.55	6.13	26.12			
10—12		5.30	1330	7.05	125.00	108.9	13.61	67.51	105.55	7.13	27.79			
12—14		5.27	1330	7.01	116.24	108.9	12.66	72.50	105.55	7.65	27.32			
14—16		5.54	1330	7.37	116.24	108.9	12.66	72.50	105.55	7.65	27.68			
16—18		5.27	1330	7.01	108.74	108.9	11.84	81.25	105.55	8.58	27.43			
18—20		7.59	1330	10.09	79.99	108.9	8.71	89.37	105.55	9.43	28.24			
20—22		8.40	1330	11.17	71.26	108.9	7.76	87.50	105.55	9.24	28.17			
22—0		6.81	1330	9.06	65.00	108.9	7.08	88.12	105.55	9.30	25.44			

表 4 (续)

日期	时间/ 时	风排系统			高浓系统			低浓系统			采场合计/ (L·min <sup>-1</sup> )	采场合计/ (L·d <sup>-1</sup> )		
		浓度/10 <sup>-6</sup>	风量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	风排纯量/ (L·min <sup>-1</sup> )	浓度/10 <sup>-6</sup>	抽采量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	高浓纯量/ (L·min <sup>-1</sup> )	浓度/10 <sup>-6</sup>	抽采量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	低浓纯量/ (L·min <sup>-1</sup> )				
2017-01-25	0—2	7.89	1330	10.49	53.74	59.48	3.20	113.74	48.52	5.52	19.21	35719.49		
	2—4	8.55	1330	11.37	49.99	59.48	2.97	87.50	148.24	12.97	27.32			
	4—6	6.93	1330	9.22	46.23	59.48	2.75	82.51	148.24	12.23	24.20			
	6—8	6.49	1330	8.63	49.99	59.48	2.97	103.12	148.24	15.29	26.89			
	8—10	6.91	1330	9.19	49.99	59.48	2.97	93.13	148.24	13.81	25.97			
	10—12	7.98	1330	10.61	49.99	59.48	2.97	86.24	148.24	12.78	26.37			
	12—14	5.59	1330	7.43	49.99	59.48	2.97	93.13	148.24	13.81	24.21			
	14—16	6.08	1330	8.09	49.99	59.48	2.97	90	148.24	13.34	24.40			
	16—18	4.93	1330	6.56	52.49	59.48	3.12	90	148.24	13.34	23.02			
	18—20	6.01	1330	7.99	54.99	59.48	3.27	107.5	148.24	15.94	27.20			
	20—22	5.1	1330	6.78	56.24	59.48	3.35	83.13	148.24	12.32	22.45			
	22—0	5.13	1330	6.82	60	59.48	3.57	108.13	148.24	16.03	26.42			
	2017-01-26	0—2	5.40	1330	7.18	60	7.43	0.45	106.25	62.01	6.59		14.22	14885.58
		2—4	6.15	1330	8.18	54.99	7.43	0.41	88.12	62.01	5.46		14.05	
4—6		5.79	1330	7.70	52.49	7.43	0.39	92.50	62.01	5.74	13.83			
6—8		6.2	1330	8.25	58.75	7.43	0.44	84.99	62.01	5.27	13.95			
8—10		5.64	1330	7.50	58.75	7.43	0.44	89.37	62.01	5.54	13.48			
10—12		6.18	1330	8.22	45.01	7.43	0.33	88.12	62.01	5.46	14.02			
12—14		6.81	1330	9.06	51.24	7.43	0.38	82.51	62.01	5.12	14.55			
14—16		5.64	1330	7.50	58.75	7.43	0.44	54.99	62.01	3.41	11.35			
16—18		1.95	1330	2.59	75.01	7.43	0.56	6.26	62.01	0.39	3.54			
18—20		3	1330	3.99	167.48	7.43	1.24	1.25	62.01	0.08	5.31			
20—22		0.46	1330	0.61	204.99	7.43	1.52	1.25	62.01	0.08	2.21			
22—0		0	1330	0.00	215	7.43	1.60	31.25	62.01	1.94	3.54			

度最大值达到了  $76.63 \times 10^{-6}$ ，工作面涌出量为  $115.15 \times 10^4$  L/d，7月7日通过采空区注入氮气和二氧化碳耦合气体后，回风流一氧化碳浓度降至安全值以下，工作面涌出量明显下降，消除了采场自然发火隐患。

### 3. 南五 902 综采工作面

通过对采空区注入氮气和二氧化碳耦合气体后南五 902 综采工作面一氧化碳涌出量进行统计（表 4），1月23日的一氧化碳涌出量为  $4.0267 \times 10^4$  L/d，到1月26日已经下降至  $1.4885 \times 10^4$  L/d，一氧化碳涌出量明显下降，起到了防治采空区自然发火作用。

## 5 结论

与采空区注氮气比较，使用二氧化碳与氮气耦合气体防治采空区自然发火有以下优点。

### 1. 迅速增加注入惰性气体流量

惰性气体灭明火时，氧气含量应小于 15%；防止采空区自然发火，氧气含量应小于 7%~10%。实践证明，二氧化碳与氮气耦合气体流量是单纯注入氮气的一倍以上，能够迅速惰化采空区气体，降低采空区氧气含量，防治采空区自然发火，这也是二氧化碳与氮气耦合气体防灭火最大的优点，反应迅速，能够快速灭火，防止灾情扩大，为营救人员应急救援赢得时间。

### 2. 降低隐患区域温度

液态二氧化碳气化后，气体温度较低，与氮气混合的低温耦合气体，能够吸收采空区热量，降低浮煤的聚热环境，从而抑制浮煤从剧烈氧化发展为自燃。

### 3. 全方位立体惰化采空区空间

氮气和二氧化碳气体密度不同，惰化范围立体分布留存在采空区空间不同，对采空区不同位置自然发火点起到抑制作用。

### 4. 增加惰性气体纯度

氮气的纯度一般为 97%~98%，二氧化碳与氮气耦合惰性气体的纯度接近 100%，注入采空区后具有更好的降氧效果。

## 参 考 文 献

- [1] 宋宜猛. 采空区液态二氧化碳惰化降温防灭火技术研究[J]. 中国煤炭, 2014: 40 - 42.
- [2] 王省身, 张国枢. 矿井火灾防治[M]. 北京: 中国矿业大学出版社.