

注氮防灭火技术在老石旦煤矿的实践与应用

张得森

国家能源集团乌海能源有限责任公司老石旦煤矿，内蒙古 乌海

收稿日期：2021年8月20日；录用日期：2021年9月22日；发布日期：2021年9月29日

摘 要

本论文针对老石旦煤矿16041综放工作面上隅角出现CO有害气体的事实，并且根据现场实际情况采取了井下注氮技术进行了防灭火工作，阐述了注氮防灭火技术的工作原理，并对使用注氮防灭火技术工艺、制氮机选型和效果进行了认真地分析，分析认为注氮防灭火技术收到了良好的效果，保证了矿井的安全生产。

关键词

注氮防灭火技术，实践，应用

Practice and Application of Nitrogen Injection Fire Fighting Technology in Laoshidan Coal Mine

Desen Zhang

Laoshidan Coal Mine, National Energy Group Wuhai Energy Co., Ltd.,
Wuhai Inner Mongolia

Received: Aug. 20th, 2021; accepted: Sep. 22nd, 2021; published: Sep. 29th, 2021

Abstract

This thesis focuses on the fact that harmful CO gas appears in the upper corners of the 16041 fully mechanized caving face in Laoshidan Coal Mine, and adopts downhole nitrogen injection technology to carry out fire-fighting work according to the actual situation of the site, and elaborates the work of nitrogen injection fire-fighting technology principles; the use of nitrogen injection fire-fighting technology, the selection and effect of nitrogen generators were carefully analyzed, and the analysis concluded that the nitrogen injection fire-fighting technology has received good results, ensuring safe production in the mine.

Keywords

Nitrogen Injection Fire-Fighting Technology, Practice, Application

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

河北冀中能源张矿集团怀来艾家沟矿业有限公司于2013年2月28日19时43分发生了一起非常严重的火灾事故,该火灾事故造成直接的经济损失达到了1425.08万元,同时还造成了13名矿工遇难,给人民群众的生命财产造成了巨大的损失,给煤矿的安全生产造成了很大的负面影响。由此可见,作为影响煤矿安全生产的重大灾害之一的煤矿火灾事故的治理工作仍然任重而道远[1]。据国内外煤矿火灾事故统计发现,在煤矿所有发生的火灾事故中外因火灾仅仅占10%,其余火灾事故均由内因火灾造成的[2]。由此可见,内因火灾的治理是困扰煤矿安全生产的一大难题,我们必须高度重视。煤矿内因火灾事故一种常见的表现形式为采空区自然发火,工作面回采过程中由于回采工艺、地质构造等因素的影响造成一定数量的煤炭遗留在采空区,这些遗留的煤炭在氧气进入的情况下发生缓慢地氧化生热,如果其自身产生的热量无法及时散发出去,就会缓慢地积聚热量,当热量达到一定的程度就会发生煤炭自燃,从而形成煤矿内因火灾事故,这是煤炭自然发火的机理所在[3]。采空区注浆法、均压防灭火法、采空区注液态CO₂法、采空区注氮法等防灭火方法是人们针对煤炭自然发火机理在长期防灭火工程实践中探索出来的一整套行之有效的防灭火方法[4]。其中比较成熟且在国内外煤矿防灭火工程实践中应用较广的一种防灭火方法为采区注氮防灭火技术[5]。通过井下密闭的措施孔或者从井下巷道向采空区打钻孔的方式向采空区注入大量氮气的方式来惰化火区,从而达到防灭火的目的,这就是注氮气防灭火的工作原理[6]。大量惰性气体氮气注入回采工作面采空区后减少、甚至隔绝氧气与遗留煤炭的接触,从而使得遗留煤炭的自燃发火周期得到了延长,达到抑制遗煤自燃、使得火源窒息的效果[7]。

近几年我国开采浅埋藏煤层的神华乌海能源有限责任公司的路天煤矿、公乌素煤矿、苏海图煤矿、五虎山煤矿以及鹤壁煤业公司的苏家沟煤矿均采用注氮防灭火技术取得了成功[8]。这一技术除了应用于抑制非封闭采空区里煤炭的自热或自燃外又应用于加速封闭火区内火源的熄灭,收到了良好的应用效果[9]。

2. 矿井及工作面概况

老石旦煤矿隶属于国家能源集团乌海能源有限责任公司,核定生产能力150万吨/年,共有职工755人,该矿坐标为:东经:106°48'45"~106°52'30",北纬:39°20'15"~39°22'00",井田面积9.7764平方公里。斜立井混合式开拓是老石旦煤矿的开拓方式,井下工作面回采标高+1070m~+800m,老石旦煤矿现开拓了缓坡副斜井、主斜井、回风立井3个井筒,采用单一水平采区式开采。16[#]煤层为焦煤(1/3焦煤),是老石旦煤矿目前主要开采煤层。

2020年老石旦煤矿绝对瓦斯涌出量为5.14m³/min,相对瓦斯涌出量为1.48m³/t,绝对二氧化碳涌出量为4.78m³/min,相对二氧化碳涌出量为1.37m³/t,属低瓦斯矿井。2018年12月华北科技学院鉴定老石旦煤矿16[#]煤层煤尘有爆炸性,爆炸指数为21.07%。2018年12月华北科技学院对老石旦煤矿16[#]煤层进行自燃倾向等级鉴定16[#]煤层为II类自燃煤层。最短自然发火期为96天。

16401 工作面位于 16[#]煤层运输大巷左翼, 开采煤层为 16[#]煤层, 该工作面走向长度 1350 m, 倾斜长 213 m, 煤层厚度 8.3~9.3 m, 平均厚度 8.8 m, 可采储量 313.8 万吨, 采用走向长壁后退式综合机械化放顶煤采煤法, 全部垮落法控制顶板。工作面顶板为炭页岩, 底板为砂质页岩。16[#]煤层与上部 12[#]和 9[#]煤层层间距分别为 50 m 和 75 m。该工作面于 2019 年 3 月 1 日开始回采, 预计回采结束时间 2021 年 9 月份, 回采结束后进行搬家倒面至 16402 工作面。

3. 问题的提出及原因分析

3.1. 问题的提出

2019 年 10 月 16 日早班该矿通风队瓦斯检查员在 16041 综放工作面检查有害气体时发现该工作面上隅角的 CO 气体浓度为 19 ppm。

3.2. 原因分析

根据井下现场探查综合分析认为, 造成 16041 综放工作面 CO 气体浓度升高的原因如下:

- 1) 16041 综放工作面回采过程中留有一部分遗留煤炭, 导致采空区存在遗留的一部分残煤;
- 2) 16041 综放工作面推进速度慢, 采空区大量遗留煤炭长时间处于“氧化带”范围内, 遗留煤炭与氧气进行了缓慢氧化, 如果不及时治理会严重威胁工作面的安全生产。

4. 注氮防灭火技术的实践与应用

4.1. 注氮防灭火技术的原理

4.1.1. 注氮防灭火原理

注氮防灭火技术的工作原理是将惰性气体氮气通过密闭的措施孔或者从巷道合适的位置施工到采空区的钻孔注入到采空区, 利用氮气的惰性将遗留的煤炭与氧气进行隔绝从而惰化采空区, 致使由于缺少氧气而使采空区遗留煤炭难以氧化达到延长煤炭的自然发火期, 使氧气浓度小于煤自然发火的临界氧浓度, 从而防止煤氧化自燃, 或使已经形成的火区窒息的防灭火技术[10]。

4.1.2. 氮气防灭火的特点

- 1) 氮气的密度比空气的密度轻, 能够对封闭的采空区所有空间进行填充, 尤其是对巷道高冒区和采空区上部的防灭火效果更好[11]。
- 2) 利用管路向采空区运送, 不需要其他介质, 因此运送手段简单、方便, 便于操作。
- 3) 氮气是一种惰性气体, 一般情况下不会参与化学反应, 因此对井巷设备不会造成损坏[12]。
- 4) 氮气本身无毒, 使用安全。

4.2. 注氮防灭火技术的应用

4.2.1. 注氮系统

老石旦煤矿制氮设备采用井下移动式 PSA 碳分子筛制氮设备 2 台, 型号为 DT-1000/6, 设在北三工业广场注氮机房, 单台制氮机产氮量为 1000 m³/h, 总制氮能力为 2000 m³/h, 氮气浓度不小于 97%; 注氮管路主管径为 $\Phi 108$ mm 钢管, 注氮效果非常好。

4.2.2. 注氮需要量的计算

注氮量可按如下公式进行计算。

- 1) 按产量计算

在单位时间内注氮充满采煤所形成的空间, 使氧气浓度降低到防灭火惰化指标以下, 其经验公式为[13]:

$$\begin{aligned}
 Q_n &= [A/(1440\rho\times t\times n_1)\times n_2]\times [C_1/(C_2-1\%)] \\
 &= [730000/(1440\times 1.55\times 276\times 0.9)\times 0.8]\times [0.208/(0.07-0.01)] \\
 &= 3.65 \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}
 \tag{式 1}$$

式中:

- Q_n —注氮流量, m^3/min ;
 A —年产量, t;
 ρ —煤的密度, t/m^3 ;
 t —年工作日, 取 276d;
 n_1 —管路输氮效率, 取 90%;
 n_2 —采空区注氮效率, 取 80%;
 C_1 —空气中的氧气浓度, 取 20.8%;
 C_2 —采空区防火惰化指标, 可取 7%。

2) 按瓦斯量计算[14]

$$\begin{aligned}
 Q_n &= Q_C \times [C/(10-C)] \\
 &= 1022 \times [0.12\%/(10-0.12\%)] \\
 &= 0.12 \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}
 \tag{式 2}$$

式中:

- Q_n —注氮流量, m^3/min ;
 Q_C —综放面通风量, m^3/min ;
 C —综采面回风流中瓦斯浓度, %。

3) 按采空区氧化带内的氧浓度计算

$$\begin{aligned}
 Q_n &= \{(Q_1 - Q_2)Q_v\}/(C_n + C_2 - 1) \\
 &= \{(0.09 - 0.07)\times 11\}/(0.97 + 0.07 - 1) \\
 &= 5.5 \text{ m}^3/\text{min}
 \end{aligned}
 \tag{式 3}$$

式中:

- Q_n —注氮流量, m^3/min ;
 Q_v —采空区氧化带漏风量, 取工作面风量的 1/100;
 Q_1 —采空区氧化带内的原始氧浓度, 取 9%;
 Q_2 —注氮防火惰化指标, 取 7%;
 C_n —注入氮气中的氮气纯度, 取 97%;
 C_2 —采空区防火惰化指标, 可取 7%。

综合以上计算结果, 按产量计算公式计算的注氮流量值最大, 结合矿井具体情况考虑取 1.2 的安全备用系数。

$$Q_n = 5.5 \times 1.2 = 6.6 \text{ m}^3/\text{min}$$

所以注氮流量取整值 $Q_n = 6 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

根据以往国内外注氮防灭火经验, 原则上最初的注氮强度要大, 然后逐渐降低注氮强度。矿井现有

的制氮机，能够满足 16401 工作面防灭火的需要。在具体开采过程中，注氮量要随工作面漏风量及采空区“三带”监测数据及时调整，以达到注氮惰化指标为准。

4.2.3. 设备选型

老石旦煤矿安装有两套 DT-1000/6 碳分子筛制氮装置，单台制氮机产氮量为 1000 m³/h，总制氮能力为 2000 m³/h，氮气浓度不小于 97%；注氮管路主管径为 Φ108 mm 钢管，满足上述施工要求。

4.2.4. 注氮防灭火惰化指标

- 1) 采空区惰化氧浓度指标不大于煤自然临界氧浓度。
- 2) 惰化灭火氧浓度指标不大于 3%。
- 3) 惰化抑制瓦斯爆炸氧浓度指标小于 7%。

4.2.5. 注氮管选型

- 1) 管材选取：钢丝骨架聚乙烯管和巷用耐磨、耐腐、耐压复合钢管。
- 2) 确定管路直径和供氮压力是否满足要求：供氮压力管路末端的绝对压力应不低于 0.2 MPa，输氮管路直径应满足最大输氮流量和压力的要求，按式 4 进行计算(表 1) [15]。

$$P_1 = \left[0.0056 \left(\frac{Q_{\max}}{1000} \right)^2 \left(\frac{D_0}{D_i} \right)^5 \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right) L_i + P_2^2 \right]^{1/2} \quad (\text{式 4})$$

式中：

P_1 —供氮压力，MPa；

Q_{\max} —最大输氮流量，m³/h；

D_0 —基准管径，150mm；

D_i —实际输氮管径，mm；

λ_i —实际输氮管径的阻力损失系数，对于不同的钢管直径，则有如表 1 的关系；

λ_0 —基准管径的阻力损失系数，0.026；

L_i —管路的长度，Km；

P_2 —管路末端的绝对压力，MPa。

Table 1. Resistance loss coefficient of nitrogen injection pipe

表 1. 注氮管阻力损失系数

D_i (mm)	70	80	100	150	200	250	300	400
λ_i	0.032	0.031	0.029	0.026	0.024	0.023	0.022	0.020

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \left[0.0056 \left(\frac{Q_{\max}}{1000} \right)^2 \sum \left(\frac{D_0}{D_i} \right)^5 \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right) L_i + P_2^2 \right]^{1/2} \\
 &= \left[0.0056 \times (900 \div 1000)^2 \times ((150 \div 100) 5 \times (0.029 \div 0.026) \times 1.3 \right. \\
 &\quad \left. + (150 \div 80) 5 \times (0.031 \div 0.026) \times 1.7) + (0.2)^2 \right]^{1/2} \\
 &= 0.52 \text{ Mpa} < 0.6 \text{ Mpa}
 \end{aligned} \quad (\text{式 5})$$

根据上述计算得知,大巷采用 $\Phi 108$ 钢管,顺槽采用 $\Phi 89$ 的钢丝骨架聚乙烯管能够满足最大输氮流量和压力的要求。

4.2.6. 注氮管路系统布置

1) 管路布置路线:

注氮机房 - 主斜井 - 主运输皮带巷 - 16401 运输顺槽 - 16401 采空区

2) 管路布置要求:

① 注氮管路由地面注氮机接出,主管路采用 $\Phi 108$ mm 的注氮管,支管路采用 $\Phi 89$ mm 的注氮管。

② 管路的铺设应尽量减少拐弯,要求平、直、稳、接头不漏气。注氮管每隔 3 m 用管箍吊挂一次,吊挂在原风水管路下方。两根钢管连接所用的法兰盘上的螺丝全部上全。不允许在管路上堆放他物。低洼处可设置放水阀。

③ 注氮管路的分岔处应设置三通和阀门及压力表。除每个三通出风处安装两个阀门外,管路每 200 m 设置一个阀门。

④ 在需要设置龙门架的地方设置龙门架,贴巷道顶板布置,不得影响巷道的运料、行人。

⑤ 定期对输氮管路进行试压检漏。

4.2.7. 矿井注氮工艺及其流程和方法

1) 注氮工艺

① 埋管注氮。在运输顺槽距工作面 200 m 处用三通沿巷道向采空区埋设两趟 $\Phi 50$ mm PE 管,两趟管路每隔 80 m 设一个三通,三通位置互相错开,两趟管路三通间距为 40 m,工作面每回采 40 m,更换三通进行注氮,使氮气出口始终保持在采空区内 40 m 处,向采空区连续注入氮气。如此循环,直到回采结束。为防止注氮管路被埋压,注氮管路应沿运输顺槽和回风顺槽下帮底部铺设。

② 采煤工作面注氮要求

注氮口的位置及间距依据“氧化带”的位置及宽度、工作面的推进度以及每次开启的注氮量及氮气扩散半径等确定,目的使注入的氮气尽可能覆盖整个采空区“氧化带”,有效抑制综放工作面采空区“氧化带”浮煤的氧化自燃。

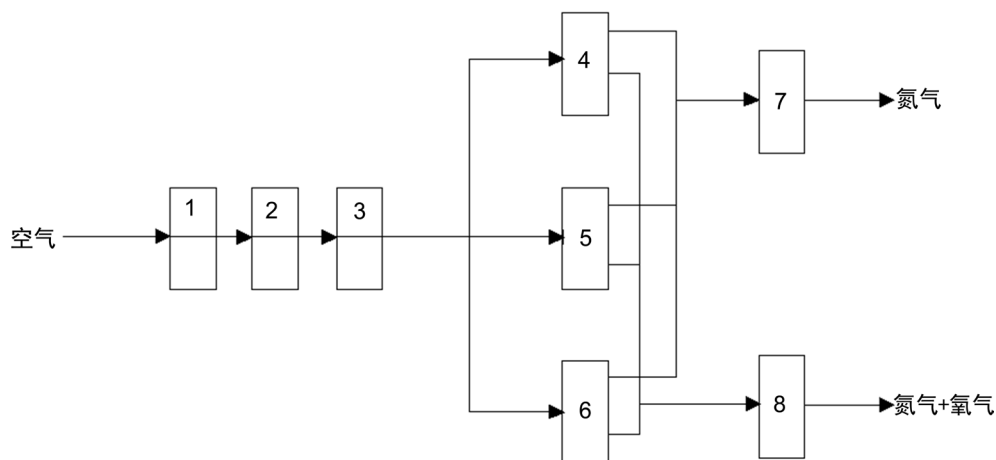
以其他有实践经验的矿井的注氮防灭火实践为例,注氮口氮气的扩散半径取 15~20 m,根据对采空区“三带”的观测结果,为使氮气注入区域覆盖整个采空区“氧化带”范围,考虑到氮气的泄漏,采空区侧两趟注氮管氮气释放口间距取 50 m,氮气释放口距工作面的最小距离为 50 m,最大距离为 100 m。

2) 注氮工艺流程

DT-1000/6 碳分子筛制氮装置注氮工艺流程如图 1 所示,由此流程图可以看出该注氮机与中空膜分离制氮装置相比具有结构简单、操作方便、原理明了等技术优点,是煤矿注氮防灭火技术首选注氮设备之一,在煤矿应用的比较广泛。

3) 注氮方法

首先沿着回采面进风顺槽铺设两趟注氮管路,采用迈步式推进方式,即当一个注氮管路即将进入窒息带时便将另外一趟注氮管路打开,并使之随着工作面的回采进入采空区,如此往复循环使得氮气源源不断地注入自热带和自燃带从而达到隔绝和窒息遗留煤炭的目的。具体在老石旦煤矿 16041 综放工作面时,当第一趟注氮管进入采空区 100 m 时,第二趟注氮管进入采空区 50 m,此时关闭第一趟注氮管,打开第二趟注氮管。按此注氮口交替的方法循环往复进行注氮。如图 2 所示。



1-空气滤清器；2-空压机；3-过滤器；4，5，6-碳分子吸附塔；7-氮压机；8-真空泵

Figure 1. Schematic diagram of nitrogen injection process

图 1. 注氮工艺流程示意图

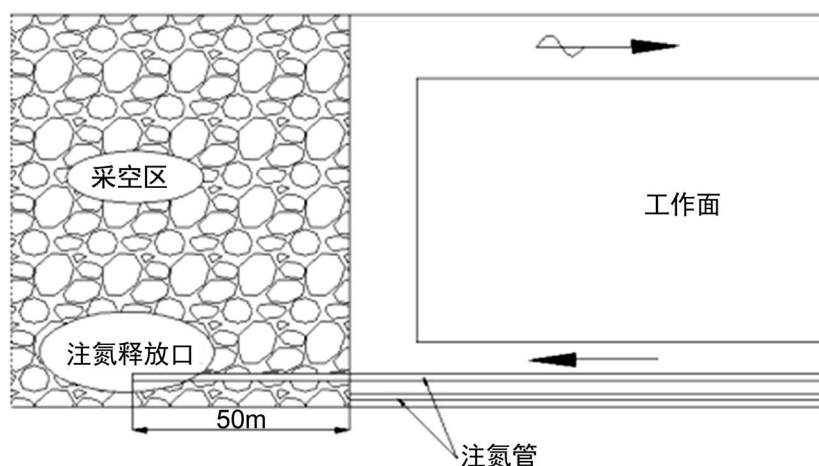


Figure 2. Schematic diagram of fire extinguishing nitrogen injection process

图 2. 灭火注氮工艺示意图

4) 注氮方式

回采工作面采空区注氮方式有连续式注氮和间歇式注氮两种方式，其中当回采工作面处于初采初放、过地质构造带、未采推进至停采线附近时推进速度缓慢，采空区遗留煤炭较多时适用于连续式注氮方式；当工作面正常回采时，工作面推进速度比较快，采空区遗留煤炭在很短时间内就会进入窒息带，这个时候适用于间歇式注氮方式。但是由于 16401 工作面正常开采时，每月平均推进速度应在 40 m 左右，推进速度非常缓慢，因此采用连续式注氮方式。

4.2.8. 注氮时机的选择

在遇到下列情形时，应考虑增加注氮时间：

1) 当工作面在回采过程中，出于某种原因导致工作面推进速度变的较慢时，必须及时增大注氮量，直至恢复正常的推进速度为止。

2) 工作面进、回风流温度差达到 10℃，或放煤温度高于 35℃，必须及时增大注氮量，同时应搭配采取其他治理措施。

3) 两巷高温破碎煤体放入到采空区时应注氮直至甩入室熄带为止。

注氮时须结合上下端头堵漏风措施,使氮气泄漏量控制在最低限度内,以便达到最佳的注氮效果。可采用砂袋装填碎煤或矸石等材料构筑堵漏风墙或悬挂风布。

5. 注氮防灭火效果分析

老石旦煤矿 16041 综放工作面上隅角 2019 年 10 月份出现 CO 以来矿技术部门高度重视,多次召开技术研讨会制定专项的防灭火技术方案,并且邀请西北防灭火研究院的专家多次深入现场进行调研,最后采取了注氮防灭火技术方案来进行实施防灭火工作收到了良好的使用效果。该工作面 2020 年 11 月份开始实施注氮防灭火技术后,累计向采空区注入氮气量达到了 137.5 万 m³,工作面上隅角 CO 气体浓度从 23 ppm 左右降到 0 ppm,保证了工作面的安全生产。

6. 结论

注氮防灭火技术是一种成本低廉、操作简单、安全高效的防灭火技术,不仅仅在老石旦煤矿应用效果非常明显,而且在鹤壁煤业公司四矿、九矿的综采工作面应用效果也非常好。因此具有非常好的理论和现实意义,具有很好的推广应用价值,需要注意的是必须结合煤矿现场实际情况采取注氮防灭火技术,并且该技术与其它防灭火技术有机结合使用效果会更好。

参考文献

- [1] 胡建勋. 煤矿井下巷道防灭火新技术的研究与实践[J]. 能源与节能, 2016(4): 179-180.
- [2] 杨培森. 煤矿井下防灭火技术浅谈[J]. 内蒙古煤炭经济, 2013(5): 56-57.
- [3] 段瑞. 综放工作面采空区注氮防灭火技术工艺研究[J]. 山西煤炭, 2011(2): 89-91.
- [4] 王宏山, 闫石, 靳辉. 矿井综合防灭火技术研究[J]. 科技创新导报, 2012(14): 61-62.
- [5] 肖雪峰. 注氮技术在采空区防灭火技术在平顶山矿区的应用[J]. 煤矿开采, 2010(1): 72-73.
- [6] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004: 229.
- [7] 徐精彩, 薛韩玲, 文虎, 李莉. 煤氧复合热效应的影响因素分析[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(2): 31-35.
- [8] 岑可法, 姚强, 骆仲浚, 高翔. 燃烧理论与污染控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] 史波波. 煤矿液氮防灭火技术应用及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2014, 45(10): 154-157.
- [10] 常鸿, 周连春, 等. 采煤工作面回撤期间防治有害气体超限技术研究[J]. 煤矿机电, 2011(8): 19-21.
- [11] 何勇. 浅谈注氮防灭火技术[J]. 淮南职业技术学院学报, 2014(2): 10-14.
- [12] 房江华, 李书军. 超前注氮防灭火技术在六道湾煤矿的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2008(13): 20-24.
- [13] 刘玉泉, 林树山, 等. 小距离煤层注氮防火抑爆技术[J]. 煤炭技术, 2004(4): 66-69.
- [14] 赵永飞. 吉新煤矿注氮防灭火技术应用[J]. 现代矿业, 2019(10): 278-281.
- [15] 刘志强. 高效注氮防灭火技术的研究与应用[J]. 煤矿开采, 2014(8): 133-136.