

1 岩粉喷撒在美国等主要采煤国家的应用历史

在过去的 100 多年中,美国煤矿发生了超过 500 次大的瓦斯和煤尘爆炸。据统计,美国等西方国家从 20 世纪初期,煤矿爆炸的频率和严重性已显著降低。在导致其降低的安全措施中,巷道表面喷撒岩粉列在第一位。另外,矿用炸药与电气设备的发展、通风系统的改进、检测灾害方法和手段的提高也是煤矿爆炸频率和严重性降低的重要因素。

1.1 岩粉的概念

顾名思义,岩粉是将岩块通过机械粉碎成一定粒度的岩石或矿物细粉。通过将岩粉喷撒在巷道表面,使得巷道中非燃物的比例提高。在井下爆炸发生时,由于气压的作用,岩粉会和煤尘混合在一起,同时发生一定的化学分解作用,起到抑制热量和降低火焰温度以及阻碍爆炸传播等作用。在本书中,岩粉的主要成分是石灰岩、大理石、白云山等。

1.2 对煤尘爆炸的认知过程

如 Nagy 在 1981 年所述,发生在矿井巷道里的瓦斯煤尘爆炸能形成两种破坏性的压力——静压和动压。热的燃烧物品会膨胀并向各个方向施加相同的力,这是静压,是指在一个封闭容积内的压力。在一个煤矿中,热的瓦斯也膨胀,沿井下巷道流动,并挤压前面的空气。这个高速瓦斯流会产生方向性的风压或动压。在爆炸过程中,无论是静压还是动压都会产生破坏。静压的增加会破坏与瓦斯气流方向垂直的巷道中的风墙。动压的增加会使风压升高,从而使得煤尘扬起扩散且能移动物体。当煤尘被引燃时,会对矿井造成很大的破坏。图 1-1 所示为 1913 年发生在英国南威尔士的一个煤矿煤尘爆

炸传播到地面时的情景，在此次爆炸中有 439 人死亡。



图 1-1 煤尘爆炸（南威尔士，英国，1913）

英国的 John Buddle 于 1803 年意识到了煤尘在井下爆炸中的可能作用。随后，当时著名的科学家 Charles Lyell 和 Michael Faraday 教授根据 1844 年发生在 Haswell 矿的井下爆炸（有 95 人死于此次事故）确认了煤尘与爆炸的关联。在 1847 年，Faraday 教授通过试验向皇家学院证明煤尘在井下爆炸中起了很大作用。不幸的是，当时大多数的采矿界人士还是没有意识到这个问题。南非直到 1998 年才通过立法将煤尘作为井下煤矿爆炸的一种可燃物，澳大利亚也是在 20 世纪末才通过煤尘爆炸抑制系统的立法。1906 年，发生在法国的一起导致 1230 人死亡的井下爆炸引起了欧洲和北美洲国家的震动和注意，这次事故促使各国建立实验室进行进一步实验和研究。在美国，1907 年 12 月共发生 5 次井下爆炸，它们分别发生在宾西法尼亚州的 Naomi 矿（34 人死亡）、西弗吉尼亚州的 Monongah 的 6 号和 8 号矿（500 多人死亡）、阿拉巴马州的 Yolande 矿（57 人死亡）、宾西法尼亚州的 Darr 矿（239 人死亡）、新墨西哥州的 Bernal 矿（11 人死亡）。由于在短时间内多州发生了井下爆炸，美国国会在 1908 年开始行动并提供基金来调查这些爆炸的原因，并在宾西法尼亚州的匹兹堡成立了试验站，主要由美国的地质测量部资助，直到 1910 年矿山管理局（Bureau of Mines）成立。

1.3 岩粉在美国煤矿的使用过程

美国矿山管理局的首席工程师 George Rice 在 1913 年指出，煤尘是导致爆炸席卷整个矿井的媒介。Rice 收集编撰的资料、文章和研究结果都显示出

使煤尘变惰性的必要性。当时, Rice 就阻止煤尘爆炸方面推荐了很多措施, 让人印象深刻的是他提出使用岩粉来使煤尘变成惰性。尽管英国的 William Garforth 早在 1891 年就建议利用岩粉来阻止或限制煤尘的爆炸, 但是美国的 Rice 根据试验结果确认了当煤尘和岩粉的混合物中非燃烧物含量 TIC (Total Incombustible Content) 的含量达到 64% 时, 煤尘的自燃 (燃烧) 就能被阻止。尽管 Rice 和美国矿山管理局早在 1910 年就开始倡议利用岩粉来抑制煤尘爆炸, 但是除科罗拉多州由联邦政府经营的一个矿井外, 大多数美国的煤矿直到 20 世纪 20 年代才开始使用。

至 1926 年 5 月 20 日, 美国矿山管理局已完成了一系列的试验。Paul 和 Herbert 根据在矿山管理局试验矿井的重复试验结果发表的文章中强调, 在矿山管理局的重复试验证明, 如果正确喷撒岩粉可以有效地抑制煤尘爆炸传播。如果在烟煤矿井中日常喷撒岩粉, 矿井中就不会发生煤尘爆炸事故。

1927 年 4 月 7 日, 美国矿山管理局发布了一个决定, 推荐所有煤矿喷撒岩粉, 并强调了喷撒岩粉前清理煤尘的重要性。尽管喷撒岩粉的标准很完善, 但当时的联邦法律并没有批准美国矿山管理局根据此标准来检查煤矿, 导致喷撒岩粉只在一些比较先进的煤矿使用, 而其他煤矿根本不用。美国矿山管理局经过 9 年的调研和记录, 在 1939 年的总结报告中指出, 在过去发生爆炸的 60 个喷撒岩粉的矿中, 26 个矿得益于喷撒岩粉使得爆炸停止或危害规模减小。1968 年 11 月 20 日发生在 Consol 公司 9 号煤矿的井下爆炸 (死亡 78 人), 使得美国国会在 1969 年通过了授权美国矿山管理局对采矿业的管理。在 1969 年的关于喷撒岩粉的联邦法律中规定, 美国的烟煤矿井 (无烟煤除外) 必须将进风巷风流中的非燃物含量至少保持在 65%, 回风巷中至少保持在 80% (注: 此标准建立于 1927 年, 但形成法律文件是 1969 年)。由于回风巷容易导致细岩粉的累积, 所以它需要更多的惰性材料。美国的法律同时要求, 对于进风巷, 在通风气流里每 0.1% 的瓦斯, 需要增加另外 1% 的非燃烧物 (按质量算); 对于回风巷, 则增加 0.4%。此标准一直沿用到 2010 年 9 月, 但煤尘颗粒的直径随着现代采掘机械的发展变得越来越细 (表 1-1), 这也意味着发生煤尘爆炸的可能性加大。在 2010 年 4 月, 一直沿用上述标准的西弗吉尼亚州的 Upper Big Branch 矿发生了井下爆炸, 导致 29 名矿工死亡, 是近 40 年来最大的一次井下灾难 (注: 此矿在爆

炸前的几个月里,收到了几百个违规通知,包括未喷撒岩粉,且大多没有及时改正)。此灾难发生后的5个月,即2010年9月,美国矿山安全健康管理局(MSHA)发布了一个紧急临时标准,即将进风巷中风流中的非燃烧物含量从上述的65%增加到80%。

表1-1 煤矿巷道煤尘粒度的变化

年 份	通过 74 μm (筛子) 的通过率 (%)	
	帮 - 顶板	底 板
1918	25	20
1954	49	28
1963	50	40
1964	N/A	83
1982	N/A	72 ~ 100

1.4 美国煤矿与煤尘爆炸有关的调研

美国国家职业安全卫生研究所在2009年发表了一篇过去煤矿爆炸的调研文章,目的是识别发生在进风巷导致爆炸的起始位置和起始源头。MSHA则评审了从1976年到2001年的被美国国家职业安全健康研究院(NIOSH)确认的所有事故报告。根据评审结果,MSHA认定的导致多人死亡的6个爆炸事故中,进风巷中岩粉喷撒得不合适增加了这些爆炸的严重性。基本情况分别如下:

(1) Scotia 矿。Scotia 矿在1976年3月9日和11日经历了2次爆炸。第一次爆炸,15人死亡,起因于大量的瓦斯积聚。在第一次爆炸中,有少量煤尘参加了爆炸。第二次爆炸,11人死亡,此爆炸开始是瓦斯爆炸,接着煤尘加入了爆炸并加速了爆炸的传播。

(2) Adkins 煤矿公司11号矿。1981年12月7日发生的井下爆炸导致8人死亡。工作面进行炮采时,一个瞎炮引燃了其他(孔)的煤尘并发生爆

炸。事后调研发现,工作面附近没有喷撒足够的岩粉,前面回采过的区段中,沉积在顶、底板和两帮的煤尘在工作面引燃并爆炸。

(3) RFH 煤矿公司 1 号矿。1982 年 1 月 20 日,RFH 煤矿公司 1 号矿发生了一次爆炸,导致 7 人死亡。开始时,爆炸引起的火焰没有被限制在爆破采煤的范围内,使得 2 人死亡。随后,火焰引燃了前面爆破采煤形成的煤尘,导致煤尘爆炸。事后调研发现,岩粉喷撒不足,使得煤尘爆炸传播到整个矿井又致 5 人死亡。

(4) South Mountain 煤矿公司 3 号矿。1992 年 12 月 7 日,3 号矿的爆炸导致 8 人死亡。此次爆炸是由有限的瓦斯引起的爆炸,足够的爆炸力使得煤尘位于火焰前段。由于没有足够的非燃烧的岩粉来惰化煤尘,煤尘引燃后迅速将爆炸传播出去,直到矿井地面。

(5) Day Branch 煤矿公司 9 号井。在 1994 年 5 月 11 日,发生的井下爆炸导致 2 人死亡。少量的瓦斯被引燃后,瓦斯和煤尘的积聚使得初始的爆炸火焰得以传播。当爆炸传播到盘区时,瓦斯燃尽,但是,悬浮在空气中的煤尘将爆炸传播到离工作面约 715 英尺(约 218 m, 1 英尺 = 0.3048 m)以外。

(6) Jims Walter 资源公司 5 号矿。2001 年 9 月 23 日,发生在 5 号矿的 2 次爆炸导致 13 人死亡。当顶板冒落后,损坏了一个连接着电池充电器的转载机电池,导致了第一次瓦斯爆炸。MSHA 的调研结论是第二次爆炸也是瓦斯爆炸在先,当遇到另外的瓦斯和煤尘时,爆炸得到加强。此次爆炸的主要燃烧物是煤尘,传播到工作面外围,并导致 12 人死亡。

另外,MSHA 意识到从 1985 至 2008 年间发生的爆炸中,至少有 4 次发生在烟煤井下,且认为岩粉喷撒不合格是引起爆炸的原因之一。

1.5 各国对非燃烧物含量(TIC)的规定

喷撒岩粉作为一种抑制煤尘爆炸的预防措施已经被用了一百多年。大多数生产量大的产煤国家都有类似规定,跟美国相比,有些国家的规定严厉,有些较宽松一些。部分国家关于喷撒岩粉(或非燃烧物含量)的规定见表 1-2。需注意的是,规定中美国的数据是 2011 年 6 月发布的数据。

表 1-2 部分国家非燃烧物含量规定

国 家	TIC 含量 (%)	挥发物含量 (%)	瓦斯含量 (%)	备 注
澳大利亚 (昆士兰州)	85 ~ 80 (回风巷)			85% TIC 离工作面 ≤ 200 m, 80% TIC 离工作面 > 200 m
	85 ~ 70 (进风巷)			85% TIC 离工作面 ≤ 200 m, 70% TIC 离工作面 > 200 m, 有辅助保护
澳大利亚 (新南威尔士州)	85 ~ 70 (回风巷)			85% TIC 离工作面 ≤ 200 m, 70% TIC 离工作面 > 200 m
	80 ~ 70 (进风巷)			80% TIC 离工作面 ≤ 200 m, 70% TIC 离工作面 > 200 m, 有辅助保护
加拿大 (新斯科舍)	75 (回风巷)		< 1	
	80 (进风巷)		> 1	
捷克 共和国	80 (进风巷/ 回风巷)		< 1	有辅助保护
	85 (进风巷/ 回风巷)		> 1	
斯洛伐克	80 (进风巷/ 回风巷)		< 1	有辅助保护
	85 (进风巷/ 回风巷)		> 1	
德国	80 (进风巷/ 回风巷)			有辅助保护
日本	78 (进风巷/ 回风巷)	< 1		依据灰分、湿度、挥发分含量、 煤层瓦斯和岩粉粒度决定
	83 (进风巷/ 回风巷)	> 1		
波兰	70 (进风巷/ 回风巷)	> 10		70%, 在非瓦斯巷道 80%, 在瓦斯巷道有辅助保护

表 1-2 (续)

国 家	TIC 含量 (%)	挥发物含量 (%)	瓦斯含量 (%)	备 注
南非	80 (进风巷)			80% TIC 离工作面 ≤ 200 m, 65% TIC 离工作面 > 200 m
	80 (回风巷)			80% TIC 离工作面 > 1000 m, 有辅助保护
英国	50 (进风巷/ 回风巷)	20		有辅助保护
	65 (进风巷/ 回风巷)	27		
	72 (进风巷/ 回风巷)	35		
	75 (进风巷/ 回风巷)	> 35		
美国	80 (回风巷)		1.0/0.1	TIC 增加 1% /0.1% 瓦斯
	80 (进风巷)		0.4/0.1	TIC 增加 0.4% /0.1% 瓦斯

2 岩粉抑制煤尘爆炸和传播的基本原理

2.1 煤尘爆炸的基本条件和过程

瓦斯和煤尘是井下采煤引起和释放的两种可燃物。众所周知, 瓦斯空气混合物的引爆浓度范围在 5% ~ 15% (瓦斯在混合物中的含量), 在 9.5% 时反应最充分, 且爆炸最剧烈。当瓦斯浓度为 9.5% 的混合物体积达到 4 m^3 时, 就足以引起煤尘爆炸。开采时, 工作面附近的煤炭及围岩中含的瓦斯会释放出来并和空气混合在一起。如果瓦斯释放量较高或者通风不足, 就会产生有爆炸可能的瓦斯和空气的混合体。多数煤尘爆炸是由瓦斯爆炸引起的, 但仍然有近 10% 的煤尘爆炸仅仅与煤尘有关。

瓦斯爆炸后, 通常会产生一压力波, 此压力波将巷道表面的煤尘等粉尘冲击到巷道中, 成悬浮状态。悬浮状态下的煤尘在很小的浓度下 (最小为 50 g/m^3) 就可被引燃。尽管研究者们声称有浓度上限, 但在实际中没有。对于一个 6 m 宽、2.5 m 高的巷道, 上述浓度只需 900 g/m^3 的煤尘即可。如果将煤尘均匀撒到底板上, 其厚度大约为 0.15 mm。如果将煤尘均匀地撒到顶板和两帮, 其厚度只需 $800 \mu\text{m}$ 就可达到最小 50 g/m^3 的要求。

引燃一堆煤尘需要的最小能量是 0.03 J, 约为引燃瓦斯空气混合物需要能量的 100 倍, 同时也相当于两个人在干燥天气下走路积累的静电荷。

Nagy 于 1965 年指出, 悬浮在空中的煤尘在温度达到 440°C 时就可引爆, 当然, 对于不同的煤种而言, 温度有所不同。

2.2 抑制煤尘爆炸传播的几种方式

燃烧需要 3 个缺一不可的条件: 热源、可燃物和氧气 (注: 在本节中主

要讨论可燃物)。需要注意的一点是,热源不一定是由瓦斯引起的,如采空区顶板垮落可引起通风的突然改变,将一堆煤尘激起在空中,此时如有合适的热源(如采煤机切割引起的火花),仍然可以引起爆炸。在控制井下爆炸时,只要将可燃物瓦斯和煤尘清理干净,那爆炸的隐患就没有了(注:以下主要讨论煤尘的控制)。理想状态下,控制煤尘爆炸最有效的方法是减少初始引燃,但这种可能性很小。到现在为止,有两种控制煤尘爆炸传播的方式:

(1) 爆炸屏障(通常指水棚或岩粉棚)。美国用的是矿用密闭墙,根据位置可分为采区密闭墙和大巷密闭墙。

(2) 喷撒岩粉。岩粉使累积的煤尘惰性增加,使之变成非燃烧媒介。

2.2.1 被动式爆炸屏障(水棚/岩粉棚)

爆炸屏障分为被动式和主动式,水棚/岩粉棚为被动式,水棚/岩粉棚在欧洲、澳大利亚和南非是最常用的被动式爆炸屏障(编者:中国也用)。当爆炸冲击波先于爆炸火焰到达水棚/岩粉棚时,冲击波使水棚/岩粉棚中的水/岩粉撒喷出来,从而将火焰减弱,达到抑制爆炸传播的目的。一些采煤国家被动式爆炸屏障水或岩粉的装载量要求见表2-1。

表2-1 被动式爆炸屏障水或岩粉的装载量要求

国 家	水 或 岩 粉 装 载 量			
	岩 粉 (kg/m^2)		水 (L/m^2)	
	非瓦斯矿	瓦斯矿	非瓦斯矿	瓦斯矿
澳大利亚	200	200	200	200
比利时	—	400	—	200
加拿大	—	200	—	200
捷克共和国	200	400	—	—
德国	—	400	—	200
法国	—	400	—	200
南非	—	200 - 轻 400 - 重	—	200
罗马尼亚	—	400	—	200
英国	—	200 - 轻 400 - 重	—	最少 200
苏联	200	400		

1) Cybulski 试验 (岩粉棚)

很多国家,包括德国、波兰、英国和美国,都已做了大量的关于岩粉棚设计的研究工作。用得最多的是由 Cybulski 试验设计的波兰岩粉棚(超过 1700 次的试验,且试验结果发表在 13 个科技简报中)。设计岩粉棚架子时,要将其悬挂,目的是爆炸力能容易地将其翻倒,从而产生岩粉“云”来抑制火焰的传播。图 2-1 所示为波兰岩粉棚设计示意图。

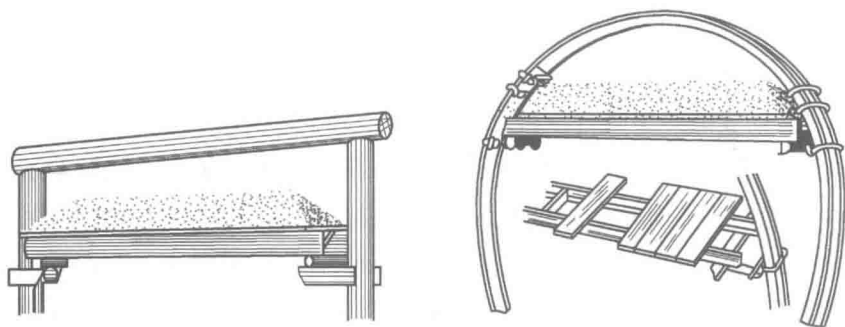


图 2-1 波兰岩粉棚设计示意图 (2002 年)

在设计被动式爆炸屏障时, Cybulski 于 1975 年提出了影响岩粉量和在岩粉棚上分布的 3 个设计参数和准则:

(1) Q_A 。 Q_A 是巷道断面每平方米岩粉棚上岩粉的总质量 (kg/m^2), 常用来作为设计岩粉棚的参数。对于一个集中式屏障来说, 典型的岩粉量是 $400 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。

(2) Q_1 。 Q_1 是巷道断面每平方米的单个架子上的岩粉总质量 (kg/m^2)。

(3) Q_v 。 Q_v 是岩粉棚所在区域的岩粉浓度, 即相对于火焰占据的工作区体积的整个岩粉棚上的岩粉质量 (kg/m^3)。此参数对于分布式岩粉棚的设计非常重要。

集中式岩粉棚分为轻型和重型两种。在设计集中式岩粉棚时, 岩粉要求量是根据巷道断面积大小来确定的。轻型岩粉棚安装在距离工作面 $80 \sim 180 \text{ m}$ 之间, 隔板尺寸为 $350 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 巷道断面每平方米岩粉棚上

岩粉的总量 Q_A 是 100 kg/m^2 。重型棚的隔板尺寸为 $450 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ，安装在距离工作面 $80 \sim 380 \text{ m}$ 的位置，巷道断面每平方米岩粉棚上岩粉的总量 Q_A 为 400 kg/m^2 。

另外，煤尘爆炸产生的压力随着传播距离的增加而增加。如果将岩粉棚安装在距离工作面较近的位置，一个轻型棚就足够，但较远时，需要一个重型棚。如果岩粉棚安装的位置距离潜在的爆炸区太近，则是无效的，因为距离短，形成的爆炸压力不足以推倒岩粉棚。

在设计分布式岩粉棚时，所需岩粉量是基于单位体积的质量。Cybulski 在 1975 年指出，分布式岩粉棚上的隔板的安放距离应满足以下基本条件：

- (1) Q_v 不少于 1 kg/m^3 ；
- (2) Q_l 不低于 0.5 kg/m^2 。

在澳大利亚，分布式岩粉棚的隔板上的岩粉量是基于 200 kg/m^2 的最小量。

当用分布式岩粉棚时，阻止岩粉的凝固或结块是非常重要的，这对于湿度较大的矿井而言是非常困难的。同时，为防止结块，岩粉类型的选择必须非常谨慎。

2) NIOSH 试验（岩粉袋）

图 2-2 所示为 NIOSH 试验矿井中爆炸试验的 35 kg 岩粉袋的布置。在随后的时间里，为适应现代的采矿活动，有关学者做了大量的关于发展岩粉袋设计的研究。带有隔板的岩粉棚和水棚的设计在过去的 60 年中基本没

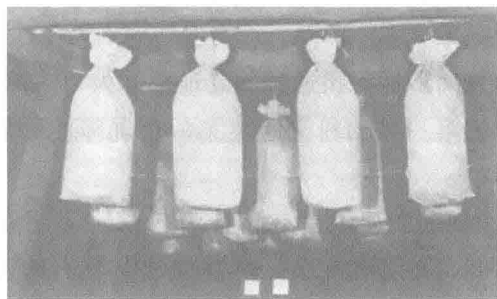


图 2-2 NIOSH 试验矿井中爆炸试验的岩粉袋的布置（1998 年）

变, 适合单条长巷道的采矿, 但不适合房柱式开采。在岩粉袋屏障里的岩粉是装在一个密闭的, 但爆炸压力波到达时很容易打破的薄塑料袋里。在南非、德国和美国的试验巷道中, 岩粉袋在抑制爆炸时被证明是有效的。在这些试验中, 对岩粉袋屏障的要求如下。

(1) 装载量。推荐的岩粉量为巷道断面每平方米的装载量 (kg/m^2)。

(2) 岩粉袋间距。岩粉袋间距必须符合以下最小标准:

① 每排岩粉袋中, 袋间距为 $0.4 \sim 1.0 \text{ m}$;

② 岩粉袋排间距为 $1.5 \sim 3.0 \text{ m}$;

③ 两边的袋子距两帮 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$;

④ 巷道高度大于 3.5 m 时, 岩粉袋与顶板的距离不超过 0.5 m 。

(3) 高度限制。如果矿井在其他要求满足的情况下可以安装多排岩粉袋, 以下是最小要求:

① 当巷道高度小于 3.0 m 时, 单排岩粉袋悬挂于顶板下。

② 当巷道高度为 $3.0 \sim 3.5 \text{ m}$ 时, 单排岩粉袋悬挂在高度为 3.0 m 的位置。

③ 当巷道高度为 $3.5 \sim 4.5 \text{ m}$ 时, 双排岩粉袋分别悬挂在距离底板 3.0 m 和 4.0 m 的位置。

④ 当巷道高度为 $4.5 \sim 6.0 \text{ m}$ 时, 三排岩粉袋分别悬挂在距离底板 3.0 m 、 4.0 m 和 4.0 m 的位置。

(4) 屏障间隔。屏障间隔应符合规定的单个设计的最低标准。

岩粉袋屏障分为集中式和分布式两种。集中式屏障, 推荐的岩粉量是 $100 \text{ kg}/\text{m}^2$, 屏障的最小、最大长度分别为 20 m 和 40 m 。集中式岩粉袋屏障必须服从以下准则:

① 第一排岩粉袋离最后一条通过的巷道范围为 $70 \sim 120 \text{ m}$ 。

② 第二个屏障的第一排岩粉袋距离第一个屏障的最后一排岩粉袋不能超过 120 m 。

分布式屏障岩粉的装载要求是不低于 $100 \text{ kg}/\text{m}^2$ 或者是 $1 \text{ kg}/\text{m}^3$, 但必须是两者中取大。分布式屏障有 4 个子屏障组成, 它们的安装要符合下列要求:

① 距离工作面最近的子屏障离最后一条通过的巷道 $60 \sim 120 \text{ m}$ 。

② 距离工作面最远的第四个子屏障安装在距离第一个子屏障的第一排岩粉袋不超过 120 m 的位置。

③ 在第一个和第四个子屏障之间应有两个子岩粉袋屏障。

④ 分布式岩粉棚适合大多数采矿方式,特别适用于长壁开采。安装屏障的最小岩粉装载量必须确保大于 60 kg/m^2 和 0.6 kg/m^3 。离工作面最近的第一个子屏障,距离最后一条通过的巷道 $60 \sim 120 \text{ m}$ 。为确保安全限度,推荐岩粉量不低于 100 kg/m^2 。

集中式或分布式岩粉袋屏障中的单个岩粉袋应该按如下要求布置:

① 每排中的袋间距为 $0.1 \sim 0.4 \text{ m}$ 。

② 排间距为 $1.5 \sim 3.0 \text{ m}$ 。

③ 巷道高度超过 3.5 m 时,离顶板距离最近的岩粉袋离顶板不超过 0.5 m 。

④ 边上的岩粉袋离巷道两帮 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 。

⑤ 巷道高度达到 3.5 m 时,采用单层岩粉袋;巷道高度达到 4.5 m 时,采用双层岩粉袋;巷道高度达到 6.0 m 时,采用三层岩粉袋。

3) 水槽屏障

水槽屏障是岩粉棚或岩粉袋屏障外的另一种被动式爆炸屏障,其概念与岩粉屏障类似。当水释放在爆炸火焰前面时,熄灭爆炸的原理为高温水汽降低火焰温度,同时当水汽化时,氧气也会减少从而阻止进一步的爆炸。水槽屏障中的单个水槽主要是由聚氯乙烯或聚苯乙烯制成,典型的含水量为 $40 \sim 80 \text{ L}$ 。图 2-3 和图 2-4 所示分别为南非单层和多层水槽的设计示意图。

对于单层水槽可应用以下准则(图 2-3):

(1) 对于断面积达到 10 m^2 的巷道, $X + Y + Z$ (水槽宽度之和) 必须覆盖至少 35% 的巷宽。

(2) 对于断面积达到 15 m^2 的巷道, $X + Y + Z$ (水槽宽度之和) 必须覆盖至少 50% 的巷宽。

(3) 对于断面积超过 15 m^2 的巷道, $X + Y + Z$ (水槽宽度之和) 必须覆盖至少 65% 的巷宽。

(4) A 、 B 、 C 、 D 的宽度不能超过 1.2 m 。

(5) A 、 B 、 C 、 D 的宽度之和不能超过 1.5 m 。

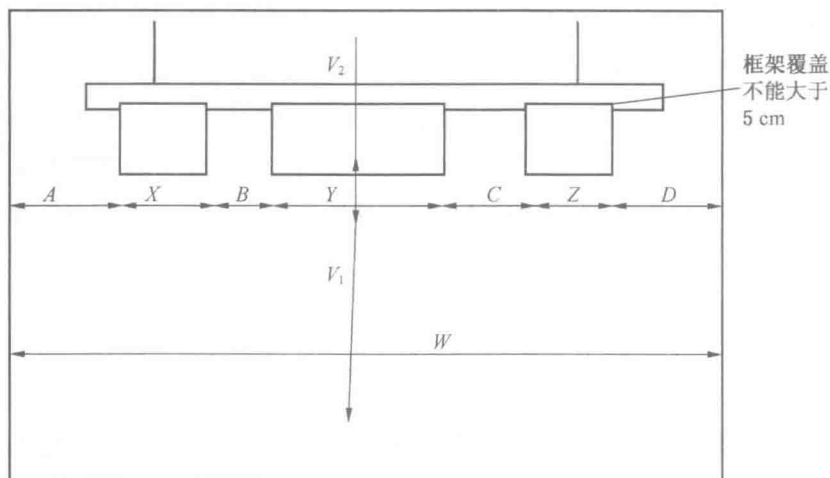


图 2-3 南非单层水槽示意图

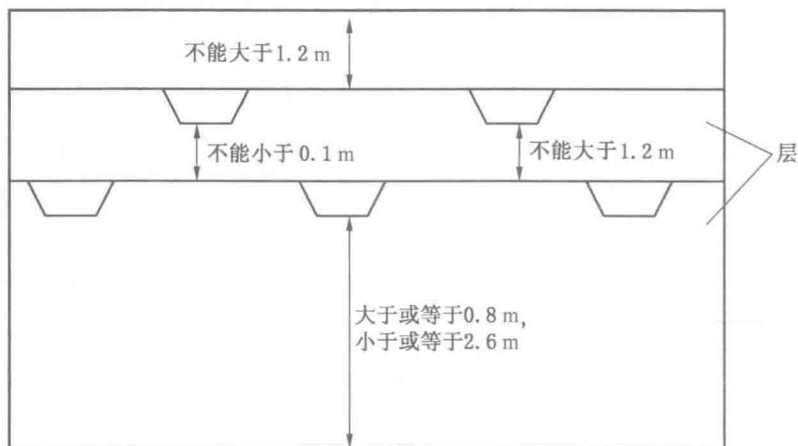


图 2-4 南非多层水槽示意图

(6) V_1 必须在 0.8 ~ 2.6 m 范围之内。

(7) V_2 不能超过 1.2 m。无论何时超过，必须安装额外的水槽，它们可以放在距离底板 2.6 m 处，但是不同层次的水槽底部间距不能超过 1.2 m。

对于多层水槽应用以下准则（图 2-4）：

（1）当一排水槽的水槽间距小于 1.2 m 时（沿巷道测量），此排中的水槽一定不能从爆炸效果上来掩盖邻近排的水槽。

（2）水槽一定要刚性安装，以免爆炸波影响部件。

（3）被设备挡住时，必须安装额外的水槽以提高水的扩散。

另外，相比于岩粉棚，水槽的安装位置更关键。岩粉在空气中悬浮的时间比在水中悬浮的时间要长，因此，必须在正确的时间来释放水，以有效地熄灭爆炸。

通过大量的实验室实验和矿用密闭墙试验，已经总结出了用水和岩粉棚作为爆炸屏障的使用经验。图 2-5 所示为岩粉棚的有效范围，从图中可以看出，当屏障距离引爆点越远时，需要抑制住爆炸所需要的岩粉量越大。必须指出，在试验巷道中，爆炸屏障可以有效地抑制爆炸，但是爆炸还可以越过屏障 10 m，甚至几百米。在此情况下，穿过屏障的爆炸气体完全有可能引起另外一次爆炸。

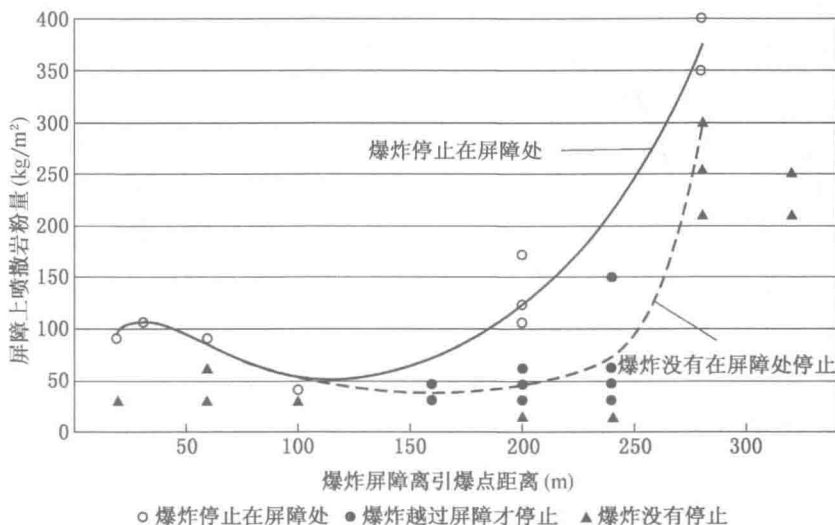


图 2-5 非连续的爆炸屏障的有效性

尽管被动式爆炸屏障采用比较多，但它有以下几个缺点：

（1）它不能对火焰或爆炸起始点内或附近的人员提供保护。

(2) 它不能对工作面的瓦斯爆炸、强度弱的煤尘爆炸(冲击波压力小不能推翻水或岩粉棚)、瓦斯和煤尘混合爆炸及强度很大的爆炸进行有效抑制。

(3) 由于爆炸屏障内喷撒的岩粉会在一定程度上弱化爆炸的传播,等到达屏障时,其冲击波压力也许不能推翻水槽或岩粉棚,从而降低爆炸屏障的有效性。

2.2.2 主动式爆炸屏障

相比于被动式爆炸屏障,主动式爆炸屏障是近年来发展起来的。主动式爆炸屏障有安装在设备上的和固定位置上的两种,通过爆炸火焰产生的电子信号或者压力传感器来触发。主动式爆炸屏障通常包含一簇6~8个压力容器,里面充满灭火粉末、岩粉或水和氮气。每个压力容器有一个装有快速排出喷嘴的手动灭火器,由一个小炸药来激活,炸药由火焰传感器发出的信号触发。Lunn于1988年给触发式爆炸屏障的不同组件做了如下说明:

(1) 检测爆炸到来的传感器。安装在主动式爆炸屏障的传感器包括爆炸压力传感器、热电偶、紫外线或红外线火焰探测器。

(2) 检测到火焰时,快速喷射火焰抑制剂的分散器。主动式爆炸屏障可以用水、岩粉或灭火剂(如磷酸二铵或类似材料),灭火剂通常比水或岩粉更有效。

(3) 在检测到火焰和当火焰到达屏障时喷射抑制剂之间的触发延迟时间一定要认真选择,以确保当火焰到达时,抑制剂能全部喷射到整个活动断面以形成一个均匀分布“云”。如果延迟太长,喷射抑制剂前火焰就会穿过;如果延迟太短,在火焰到达时抑制剂“云”会变得稀薄。

图2-6所示为主动式爆炸屏障的工作原理图。传感器显示爆炸的接近,当火焰到达时,触发机构释放抑制剂。

用于主动式爆炸屏障的各种类型的传感器及其特点见表2-2。太阳能电池检测器具有特殊的意义,因为它允许爆炸屏障不需要电池或者外部电源。对于依靠爆炸火焰的辐射或光来触发的传感器来说,传感器表面不能有尘土,否则传感器产生的信号会太弱,以至于不能激活喷射抑制剂的分散器。

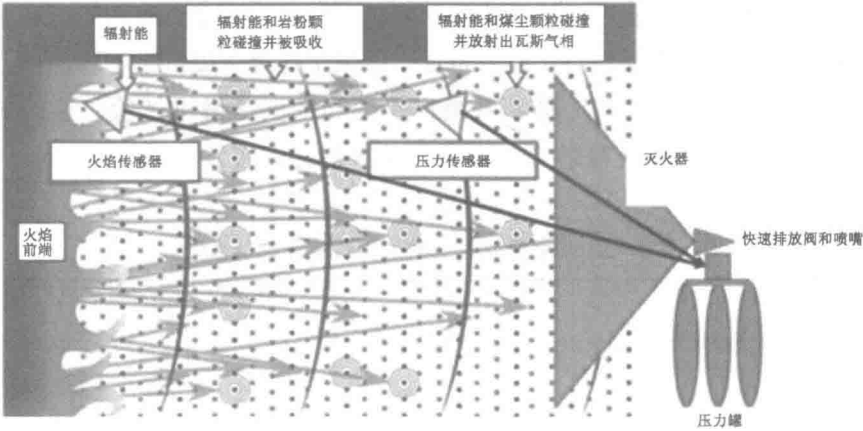


图 2-6 主动式爆炸屏障工作原理图

表 2-2 用于主动式爆炸屏障的各种类型的传感器及其特点

传感器类型	感应特点
热电偶	燃烧反应产生的热
红外线	火焰的红外线辐射
紫外线	火焰的紫外线辐射
太阳能电池	火焰的辐射能
热-机械	火焰产生的热和动压

表 2-3 总结了德国、英国和美国的主要设备安装的主动式爆炸抑制系统。Furno 等于 1985 年总结出，用紫外线火焰传感器的三种抑制系统都能区别瓦斯和煤尘产生的火焰，但对人工光源产生的触发并不敏感。安装有主动式爆炸抑制系统的设备由检测传感器、电子控制和自检系统等组成。当着火时，被传感器检测到，同时一个电子信号被传到抑制系统。当抑制系统被触发时，含有火焰抑制材料的爆炸屏障会阻止火焰的传播，并将它遏制在火焰发源地。这些主动式爆炸抑制系统大多应用在掘进机上，但是安装在长壁设备、连续采煤机和其他工作面附近的采煤机器上的研究也做了一些。应该注