

# 论 矽 石 充 填 作 用

南方冶金学院 吕楚峙 叶昌鸿

· 提要 · 本文分两部份：一是矽石充填试验。通过夹壁模拟试验，获得采空矿场充填后夹壁强度提高的具体数据。厚夹壁（厚10米以上）充填满时强度可提高9%，充半满时提高0~1%；薄夹壁（厚10米以下）充满时强度可提高24%，充半满时提高14%。因此，建议厚夹壁的空场可以不充，薄夹壁的空场只需充半满。二是矽石充填作用的讨论。通过模拟试验与现场实际的观察，矽石充填有提高夹壁强度，约制岩体移动，防止冲击地压等作用，但其主要作用是减少空体，约制岩体移动范围，把可能发生的大面积地压转化为局部地压，或者消灭地压。

## 一、矽石充填试验

中国南部（江西、湖南、广东）钨矿多数为急倾斜薄脉群钨矿。矿脉、围岩均较稳固， $f = 8 \sim 12$ ，矿脉厚度一般为0.3~0.4米，倾角一般为70°~90°，矿脉间距一般为

5~20米。根据上述矿脉赋存条件，比较适合于留矿法开采。到目前为止，留矿采矿法仍然是钨矿的主要采矿方法。由于留矿法的特点，在矿石采下放完后，遗留空区，并随着开采时间愈长，空体积累就愈大。在七十年代，一些矿山作过测算，一般100~300万米<sup>3</sup>。空区的分布，随采深而延伸，一般

由边界条件（3）有

$$D_{10}C = H_0 \dots \dots \dots (23)$$

根据 
$$\begin{cases} Cy = \frac{(2m+1)}{2} \pi, \text{ 当} \\ Cy = m\pi \end{cases}$$

$$\begin{cases} y = \frac{(2m+1)s}{2} \text{ 时 (即在极和极间隙对} \\ y = ms \end{cases}$$

称中心)，则有：

$$C = \frac{\pi}{s} \dots \dots \dots (24)$$

因此证得：

$$H = H_0 e^{-\frac{\pi}{s} x} = H_0 e^{-cx}$$

式中，C—磁场非均匀性系数， $C = \frac{\pi}{s}$ 。

## 三、结语

本文从电磁场理论出发，得出了公式  $H = H_0 e^{-cx}$  的边值条件及分离变量推导法，从而说明了该式作为开放型平面多极磁系磁场强度方程式的局限性，完善了原弱磁场磁选理论。

## 参 考 文 献

- (1) 达秋克等：《磁电选矿》，冶金工业出版社，10—20页。
- (2) 梁昆淼：《数学物理方法》，人民教育出版社，1979年版，230页。
- (3) K. G. 宾斯等：《电场及磁场问题分析与计算》，人民教育出版社，1980年版，93页。

为200~500米。由于空区的体积不断增大，分布深度也逐年增大，空区的夹壁、矿柱载荷也不断增大。因此，自六十年代末起，许多矿山曾先后发生大面积地压活动。这种地压危害性很大，不但影响生产，而且威胁井下工人安全。如盘古山镇矿1967年9月的大面积地压活动，损失资源达4000余吨，七大工艺系统全部被破坏，迫使矿山停产一年，减产三年。

为了免除地压灾害，保证矿山安全生产，自七十年代初开始，大专院校、科研单位与矿山组成三结合地压研究队伍，先后在大吉山、铁山垅、盘古山等矿开展了地压研究工作。经过十余年来的艰苦奋斗，花费了大量人力物力，终于探索出几种防止地压灾害的方法，主要是：一为矽石充填，一为夹壁崩落。矽石充填方法，就是在矿石放完后的空场，用废石充填，以消除空区，提高夹壁及矿柱的稳定性。矽石充填法，明确具体，简单易行，已为大多数矿山所采用，到目前为止，充填量最多的矿山，已达到40余万米<sup>3</sup>，耗资近200万元。但正在充填工作进行期间，铁山垅矿黄沙坑口于1976年充填的三、四、五中段，于1979年发生夹壁倒塌。为此，一些矿山充填工作陆续停止，地压研究人员对于矽石充填作用产生怀疑。这些怀疑是：（1）矽石充填的作用究竟如何？（2）采空场要不要充满？为了深入了解矽石充填作用及采空场的合适充填量，既能保证安全生产，又要使充填费用达到最少，我们提出了矽石充填作用的研究课题。

（一）试验目的 研究钨矿山薄脉群矿，用留矿法开采后，对遗留空区采用矽石充填时，矽石对采场夹壁的稳定作用及其合理的充填量。

（二）试验方法 用混凝土模拟采场夹壁的铸块，经养护、加工后，放入夹模中，用拉杆固定模块，两端楔紧，分充填与不充

填两种状态，在150吨单轴压力机下进行加载试验，直至模块压碎为止。加载时按加载集度用数字自动记录仪记录应力、应变，如图1所示。

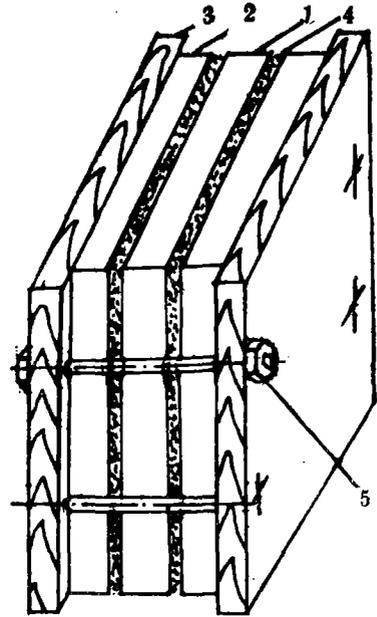


图1 模块试验装置图

1.试块；2.水泥板；3.木板；4.充填料；  
5.拉杆（模夹）。

1.模夹结构。模夹由木块、水泥块、加压板及拉杆组成。木块（夹板）有三种规格，75（厚）×350（长）×250（200、150）（高）毫米<sup>3</sup>，板上钻有 $\phi 12$ 毫米的两个小孔，水泥块（夹板）也分三种，75（厚）×250（长）×250（200、150）（高）毫米<sup>3</sup>，拉杆为直径 $\phi = 10$ 毫米的元铁，长为400毫米。

2.模拟尺寸。采场尺寸为，50米（长）×1.5米（采幅）×50（40、30）米（高），模块尺寸采用1/200缩尺。

3.加载集度。根据模块厚度分，1吨（25毫米），2吨（50毫米），3吨（75毫米）。

4.充填碎石规格。为石灰岩碎块，直径为 $\phi \leq 0.5$ 毫米。

(三) 混凝模块种类、数量及贴片

1. 混凝土配比。第一次：灰：砂：碎石：水=1：3.5：4.5：0.5，第二次：灰：砂：碎石：水=1：2：3：0.5，第三次：灰：砂：碎石：水=1：0：2.5：0.4。

2. 混凝土试块规格。混凝土试块尺寸，根据采场夹壁尺寸，以1/200缩尺铸模，分三类，每类又分三种。试块尺寸（单位毫米）：

A类，200（长）×250（高）×25（厚）（50、75）；

B类，250（长）×200（高）×25（厚）（50、75）；

C类，250（长）×150（高）×25（厚）（50、75）。

试块数量，共计82块。其中，第一次：A+B+C=18+18+18=54（块）；第二次：A=14（块）；第三次，A=14（块）。

3. 贴片方法。模块受力状态，实际是平面应变问题。开始试验时，只考虑到应力与弹模成比例，所以第一次贴片，只是测量y方向的应变；通过第一次试验数据分析后，已认识是平面应变问题，所以，第二、第三次贴片作了修改，即在x、y、z三个方向都贴片，以便检测模拟程度及力学参数的一致性。贴片方式如图2所示。

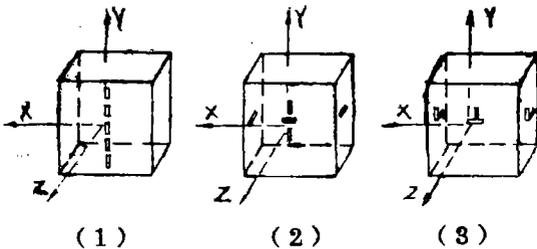


图2 应变片贴片方式

(1)一第一次贴片；(2)一第二次贴片；  
(3)一第三次贴片。

(四) 试验结果

第一次、第三次试验结果分别见表1、表2。

表1 第一次试验结果 (1986,7)

试件编号	弹模( $E_y$ ) 10 <sup>5</sup>	应力( $\sigma_y$ ) (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	破坏情况		
			全部 破碎	上部 破碎	下部 破碎
'A <sub>11</sub> <sup>O</sup>	0.87	139	全		
'A <sub>12</sub> <sup>O</sup>	0.78	140	全		
'A <sub>13</sub> <sup>W</sup>	1.02	165		上	
※'A <sub>14</sub> <sup>W</sup>	1.20	169	全		
'A <sub>21</sub> <sup>O</sup>	0.87	180		上	
'A <sub>22</sub> <sup>O</sup>	0.68	144		上	
'A <sub>23</sub> <sup>W</sup>	1.22	176		上	
'A <sub>24</sub> <sup>W</sup>	1.23	136		上	
'A <sub>31</sub> <sup>O</sup>	1.14	160			下
'A <sub>33</sub> <sup>O</sup>	0.97	123(156)		上	
'A <sub>31</sub> <sup>W</sup>	1.06	176		上	
'A <sub>34</sub> <sup>W</sup>	1.14	141			下
'A <sub>35</sub> <sup>H</sup>	1.32	184			下
※'A <sub>36</sub> <sup>H</sup>	1.35	160		上	
'B <sub>12</sub> <sup>O</sup>	0.87	96			下
'B <sub>14</sub> <sup>O</sup>	0.30	99			下
※'B <sub>11</sub> <sup>W</sup>	1.10	94		上	
'B <sub>13</sub> <sup>W</sup>	1.01	98			下
'B <sub>21</sub> <sup>O</sup>	0.82	106			下
'B <sub>24</sub> <sup>O</sup>	0.52	128		上	
'B <sub>22</sub> <sup>W</sup>	1.43	131		上	
'B <sub>23</sub> <sup>W</sup>	1.28	138		上	
'B <sub>32</sub> <sup>O</sup>	0.90	110		上	
'B <sub>33</sub> <sup>O</sup>	0.82	118			下
'B <sub>31</sub> <sup>W</sup>	1.28	160		上	
'B <sub>34</sub> <sup>W</sup>	1.22	128		上	
'C <sub>11</sub> <sup>O</sup>	0.59	112	全		
'C <sub>12</sub> <sup>O</sup>	0.58	122	全		
'C <sub>13</sub> <sup>W</sup>	0.76	108			下
'C <sub>14</sub> <sup>W</sup>	0.46	133			下

续表 1

试件编号	弹模(Ey) 10 <sup>8</sup>	应力(σy) (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	破坏情况		
			全部 破碎	上部 破碎	下部 破碎
'C <sub>21</sub> <sup>O</sup>	0.61	128			下
'C <sub>22</sub> <sup>O</sup>	0.64	126	全		
'C <sub>23</sub> <sup>W</sup>	0.65	125		上	
'C <sub>24</sub> <sup>W</sup>	1.47	113		上	
'C <sub>33</sub> <sup>O</sup>	1.45	206		上	
'C <sub>34</sub> <sup>O</sup>	1.46	195		上	
'C <sub>31</sub> <sup>W</sup>	1.10	136			下
'C <sub>32</sub> <sup>W</sup>	2.20	243		上	
合计			6	18	12

注:  $\bar{\sigma}_y (\Sigma'A' + \Sigma'B' + \Sigma'C') / 18 = 133$ ;

$$\bar{E}_y (\Sigma'A' + \Sigma'B' + \Sigma'C') / 18 = 0.79 \times 10^8$$

符号说明:

A、B、C—三种不同高度试样(50米、40米、30米);

A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>(B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>...C<sub>1</sub>...)—三种不同厚度(75毫米、50毫米、25毫米);

左上角标('、''')—第几次试验;

右上角标(O、H、W)—不充、半充、全充满;

右下角标(i)—夹壁三种厚度(75毫米、50毫米、25毫米);

右下角标(j)—试样编号(1、2...n);

△—奇异数,需更换。

### (五) 试验结果分析

#### 1. 试验模块空挡充填后强度提高程度。

先将表1、表2的同种模块,求出其平均强度,并计算出平均强度提高程度,然后将两次的同种模块的平均强度提高程度再行平均,即得到总平均值(见表3):

$$\text{强度提高程度} = \frac{\text{充填后强度} - \text{不充填强度}}{\text{不充填时强度}} \times 100\%$$

2. 试验模块空挡,充填后破坏部位的变化。根据表1、表2模块破坏部位统计分析,模块空挡充填后,全部破坏次数将降低

表 2 第三次试验结果 (1986,12)

试样编号	弹模Ey ×10 <sup>8</sup>	应力σy (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	破坏情况		
			全部 破碎	上部 破碎	下部 破碎
'''A <sub>11</sub> <sup>H</sup>	0.42	44		上	
'''A <sub>12</sub> <sup>W</sup>	0.63	49	全		
'''A <sub>13</sub> <sup>O</sup>	0.36	53		上	
△'''A <sub>14</sub> <sup>O</sup>	0.50	(48)44		上	
'''A <sub>21</sub> <sup>H</sup>	0.88	78		上	
'''A <sub>22</sub> <sup>H</sup>	0.63	83		上	
'''A <sub>23</sub> <sup>W</sup>	0.96	106		上	
△'''A <sub>24</sub> <sup>O</sup>	0.85	(102)78			下
'''A <sub>31</sub> <sup>H</sup>	1.25	104			下
'''A <sub>32</sub> <sup>H</sup>	1.13	112		上	
'''A <sub>33</sub> <sup>O</sup>	1.05	88		上	
'''A <sub>34</sub> <sup>O</sup>	1.00	88		上	
'''A <sub>35</sub> <sup>W</sup>	1.00	119		上	
'''A <sub>36</sub> <sup>W</sup>	0.93	96		上	
合计			1	11	2

注:  $\bar{\sigma}_y (\Sigma A') = 76$ ;

$$\bar{E}_y (\Sigma A') = 0.81.$$

15%, 下部破坏次数将降低14%, 说明充填使夹壁体强度提高, 参见表4及图3、图4、图5。充填后, 全部破坏次数的降低率为:

$$K_1 = \frac{5}{5+10+8} - \frac{2}{2+21+6} = 14.84\%$$

充填后, 上部破坏次数的增加率为:

$$K_2 = \frac{21}{2+21+6} - \frac{10}{5+10+8} = 28.93\%$$

充填后, 下部破坏次数的降低率为:

$$K_3 = \frac{8}{5+10+8} - \frac{6}{2+21+6} = 14.09\%$$

表3

充填强度提高程度

(1986, 12)

模 型 编 号	不充填强度 $\sigma_y$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> ) (1)	充填后强度 $\sigma_y$ (公斤/厘米 <sup>2</sup> ) (2)	强度提高程度(%) (2)/(1)	平均强度提高程度 (%)
'A <sub>1</sub> <sup>W</sup> (3, 4)/'A <sub>1</sub> <sup>O</sup> (1, 2)	144	155	+7%	A <sub>1</sub> 类全充: +9%
'''A <sub>12</sub> <sup>W</sup> /'A <sub>14</sub> <sup>O</sup>	44	49	+11%	
'''A <sub>11</sub> <sup>H</sup> /'A <sub>1</sub> <sup>O</sup> (3, 4)	44	44	0%	A <sub>1</sub> 类半充: 0%
'A <sub>2</sub> <sup>W</sup> (3, 4)/'A <sub>2</sub> <sup>O</sup> (1, 2)	137	156	+13%	A <sub>2</sub> 类全充: +24%
'''A <sub>23</sub> <sup>W</sup> /'A <sub>24</sub> <sup>O</sup>	78	106	+35%	
'''A <sub>2</sub> <sup>H</sup> (1, 2)/'A <sub>24</sub> <sup>O</sup>	78	88	+6%	A <sub>2</sub> 类半充: +6%
'A <sub>3</sub> <sup>W</sup> (1, 4)/'A <sub>3</sub> <sup>O</sup> (2, 3)	141	158	+12%	A <sub>3</sub> 类全充: +24%
'''A <sub>3</sub> <sup>W</sup> (5, 6)/'A <sub>1</sub> <sup>O</sup> (3, 4)	88	119	+36%	
'A <sub>3</sub> <sup>H</sup> (5, 6)/'A <sub>3</sub> <sup>O</sup> (2, 3)	142	172	+21%	A <sub>3</sub> 类半充: +22%
'''A <sub>3</sub> <sup>H</sup> (2, 1)/'A <sub>3</sub> <sup>O</sup> (3, 4)	88	108	+23%	
'B <sub>1</sub> <sup>W</sup> (1, 2)/'B <sub>1</sub> <sup>O</sup> (2, 4)	97	98	+1%	B <sub>1</sub> 类全充: +1%
'B <sub>2</sub> <sup>W</sup> (2, 3)/'B <sub>2</sub> <sup>O</sup> (1, 4, )	117	134	+15%	B <sub>2</sub> 、B <sub>3</sub> 类半充: +20%
'B <sub>3</sub> <sup>W</sup> (1, 4)/'B <sub>3</sub> <sup>O</sup> (2, 3)	114	144	+26%	
'C <sub>1</sub> <sup>W</sup> (3, 4)/'C <sub>1</sub> <sup>O</sup> (1, 2)	117	121	+3%	C <sub>1</sub> 类全充: +3%
'C <sub>2</sub> <sup>W</sup> (3, 4)/'C <sub>2</sub> <sup>O</sup> (1, 2)	127	126	0%	C <sub>2</sub> 、C <sub>3</sub> 类半充: +10%
'C <sub>3</sub> <sup>W</sup> (1, 2)/'C <sub>3</sub> <sup>O</sup> (3, 4)	201	243	+20%	

表4 试样破坏情况

试验序次	不充填(次数)			充填(次数)		
	全部破坏	上部破坏	下部破坏	全部破坏	上部破坏	下部破坏
'A	2	3	1	1	5	2
'B		2	4		5	1
'C	3	1	2		4	2
''A		2		1	1	
''B			1		3	
''C		2			3	1
合 计	5	10	8	2	21	6

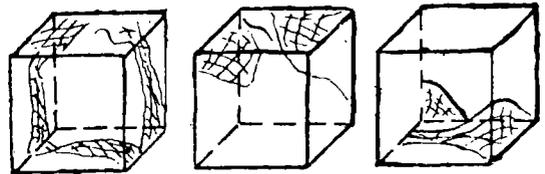


图3 全部破坏图4 上部破坏图5 下部破坏

3. 模拟的检测。采场夹壁的受力状态，就一个采场而言，上下有顶、底柱，两端有间柱。此种夹壁的受力状态，不充填时，为两向受力，充填后，为三向受力。由于夹壁长度很大，四周又为矿柱所支撑，即固定不动。因此，可作为平面应变处理。为模拟夹壁的端部状态，所以模块两端要适当楔紧，使模块纵向不发生应变(实际有应变)。根据

第二次实验数据(表5),利用平面应变的弹模计算公式,求得充填模块的弹模、泊桑系数与实验测得的弹模、泊桑系数在数值上基本一致。

同时,根据模拟原理,以第一次实验的应力(表1)、弹模数据与《盘古山钨矿地压

研究总结》的岩体强度(551公斤/厘米<sup>2</sup>)、弹模( $0.7 \times 10^6$ 公斤/厘米<sup>2</sup>)、龟裂系数(0.5)进行检测,证明用水泥模拟采场夹壁是合理的。通过模型弹模换算系数求得的夹壁强度与现场声波测定强度,基本是一致的。

表5 试样弹模、泊桑系数 (1986, 12)

模块编号	不充弹模 $E_c$ ( $\times 10^5$ )	滞充弹模 $E_w$ ( $\times 10^5$ )	半充弹模 $E_H$ ( $\times 10^5$ )	纵向应变(X)			横向应变(Z)		
				不充 $\mu_0$	全充 $\mu_w$	半充 $\mu_H$	不充 $\mu_0$	全充 $\mu_w$	半充 $\mu_H$
''' A <sub>11</sub> <sup>W</sup>			0.42			0.866			0.105
''' A <sub>12</sub> <sup>W</sup>		0.63			0.472			0.351	
''' A <sub>14</sub> <sup>O</sup>	0.50			0.755			0.113		
''' A <sub>21</sub> <sup>H</sup>			0.88			1.00			0.100
''' A <sub>22</sub> <sup>H</sup>			0.63			0.075			0.138
''' A <sub>23</sub> <sup>W</sup>		0.96			0.95			0.312	
''' A <sub>24</sub> <sup>O</sup>	0.85			0.358			0.491		
''' A <sub>31</sub> <sup>H</sup>			1.25			0.002			1.130
''' A <sub>32</sub> <sup>H</sup>			1.15			0.389			0.030
''' A <sub>33</sub> <sup>O</sup>	1.05			0.213			0.179		
''' A <sub>34</sub> <sup>O</sup>	1.00			0.732			0.275		
''' A <sub>35</sub> <sup>W</sup>		1.00			0.175			0.164	
''' A <sub>36</sub> <sup>W</sup>		0.93			0.182			0.308	
合计	3.40	3.52	4.33	2.058	1.779	2.332	1.058	1.135	1.503
平均	0.85	0.88	0.866	0.514	0.445	0.466	0.245	0.284	0.301

(1) 弹模检测。根据平面应变原理,纵向(x)应变可视为无应变。但在实测中,不管是空、半充、全充,模型在纵向都发生应变,因而使横向(z)应变受到一定的影响。但是横向上,理论计算弹模与实测弹模(用应力、应变计算)基本一致。

$E_c$ ——单向受力弹模(不充填),  $0.85 \times 10^5$ ;

$E_w$ ——两向受力弹模(充满),  $0.88 \times 10^5$ ;

$E_H$ ——两向受力弹模(半充填),  $0.866 \times 10^5$ ;

$E'$ ——平面应变计算弹模;

$\mu_0$ ——横向泊桑系数, 0.245;

$$E' = \frac{E_c}{1 - \mu_0^2} = 0.85 \times 10^5 / (1 - 0.245^2) = 0.91 \times 10^5$$

因此,  $E' \approx E_w \approx E_H$

(2) 泊桑系数检测。横向(z)泊桑系数,按理论计算与实测应变数据计算,两者

基本相近。

$\mu_0$ ——单向受力的泊桑比(不充填),  
0.245;

$\mu_w$ ——两向受力的泊桑比(充满),  
0.284;

$\mu_H$ ——两向受力的泊桑比(充半满),  
0.301;

$\mu'$ ——两向应变计算的泊桑比,

$$\mu' = \frac{\mu_0}{1 - \mu_0} = \frac{0.245}{1 - 0.245} = 0.325$$

因此,  $\mu^1 \approx \mu_w \approx \mu_H$

(3) 模拟检测。根据相似原理, 实体  $\sigma_p$ 、 $\epsilon_p$ 、 $E_p$  与  $\sigma_m$ 、 $\epsilon_m$ 、 $E_m$  之间存在下述关系:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{\epsilon_p \cdot E_p}{\epsilon_m \cdot E_m}$$

但必须  $\epsilon_p = \epsilon_m$  时, 模型与实体才能相似。已知盘古山钨矿岩石力学性质及声波测定的岩体强度数据, 因此, 用第一次模型的不充填试验数据进行检测。检测结果, 证明模块与现场夹壁的受力状态是相似的。

实体 (p):

$$\sigma_p = 551 \left( \text{岩体强度} \frac{560 + 542}{2} \right)$$

$$E_p = 0.7 \times 10^9 \times 0.5 = 3.5 \times 10^8 \text{ (0.5为龟裂系数)}$$

$$\epsilon_p = 1.57 \times 10^{-5}$$

模型 (m):

$$\sigma_m = \frac{\sum \sigma_i}{n} = 133 \text{ (见表1)}$$

$$E_m = \frac{\sum E_i}{n} = 0.79 \times 10^8 \text{ (见表1)}$$

$$\epsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = 1.68 \times 10^{-5}$$

因  $\epsilon_p = \epsilon_m$

$$\text{故 } \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{E_p}{E_m}$$

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{551}{133} = 4.14$$

$$\frac{E_p}{E_m} = \frac{3.5 \times 10^8}{0.79 \times 10^8} = 4.43$$

$$\sigma_p = 4.14 \times \sigma_m = 4.14 \times 133 = 550 \approx 551$$

(4) 充填后夹壁的强度。由于模型与实体是相似的, 因此, 水泥模块充填后的强度提高比率就等于采空场充填后夹壁强度的提高比率。以盘古山钨矿为例, 不充填时, 厚夹壁强度为560公斤/厘米<sup>2</sup>, 薄夹壁的强度为542公斤/厘米<sup>2</sup>; 充填后, 夹壁强度计算如下:

夹壁高50米:

厚夹壁, 全充时:

$$\sigma^w = 560 \times 109\% = 610 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)},$$

半充时:

$$\sigma^H = 560 \times 0\% = 0 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)},$$

薄夹壁, 全充时:

$$\sigma^w = 542 \times 124\% = 672 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)},$$

半充时:

$$\sigma^H = 542 \times 114\% = 617 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)}。$$

夹壁高40米:

厚夹壁, 全充时:

$$\sigma^w = 560 \times 101\% = 566 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)},$$

薄夹壁, 全充时:

$$\sigma^w = 542 \times 120.5\% = 653 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)}。$$

夹壁高30米:

厚夹壁, 全充时:

$$\sigma^w = 560 \times 103\% = 577 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)},$$

薄夹壁, 全充时:

$$\sigma^w = 542 \times 120\% = 650 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)}。$$

(六) 试验结论 薄脉群钨矿用留矿法采完后形成各种厚度的夹壁, 大致可划分为两类: 一类厚度在10米以上(不含10米), 称为厚夹壁; 一类厚度在10米以下(含10米), 称为薄夹壁。

1. 矸石充填, 可以提高夹壁强度。一般地说, 薄夹壁比厚夹壁提高的比率大, 高夹壁比低夹壁提高的比率大。以盘古山钨矿为例: 厚夹壁的强度由不充填的560提高到

610; 薄夹壁的强度由不充填的542 提高到 653 (公斤/厘米<sup>2</sup>)。

2.薄夹壁的采空场只需充半满,厚夹壁的采空场可以不充。厚夹壁的采空场充满时,夹壁强度可提高9%,充半满时提高很少,因此可以不充。薄夹壁的采空场充满时,夹壁强度可提高24%,充半满时,提高14%,两者提高强度虽然相差10%,但采空场不但有一定残留矿石量,而且经一定时间后,夹壁总有一定程度的片帮,起到充填作用。因此建议,厚夹壁的空场可以不充,薄夹壁的采空场只需要充半满。但必须指出,采空场实际需要充填高度必须着重研究夹壁的地质构造弱面高度。

3.充填后,夹壁下部稳固性得到提高。根据表面分析,夹壁两侧空场充填后,夹壁的下部破坏率比不充填下降14%,全部破坏率下降15%,因而夹壁承载能力大为提高。

## 二、矸石充填作用的讨论

1.矸石充填对夹壁或矿柱的强度提高很小。通过上述混凝土模块试验,高50米、长50米、厚度10米以上的厚夹壁,充满时,强度提高9%,充半满时无提高,厚度10米以下的薄夹壁,充满时强度提高24%,充半满时提高14%。为了验证这些数据,我们采用 Pricel、HobbS的经验公式进行验算,计算数据表明:充填后其夹壁强度提高比率,薄夹壁充满时,强度提高4%,半充时强度提高2%。其计算方法如下:

$$\sigma = \sigma_0 + \text{tg}\beta \cdot \sigma_3$$

式中:  $\sigma$  ——加边界应力(充满), 岩石破坏应力(公斤/厘米<sup>2</sup>);

$\sigma_0$  ——无边界应力(不充), 岩石破坏应力(公斤/厘米<sup>2</sup>);

$\sigma_3$  ——边界应力(公斤/厘米<sup>2</sup>);

$$\text{tg}\beta \text{——直线斜率, } \text{tg}\beta = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$$

$\phi$ ——岩石内摩擦角(度)。

试验曲线如图6所示(页岩 $\phi = 15 \sim 30^\circ$ )。

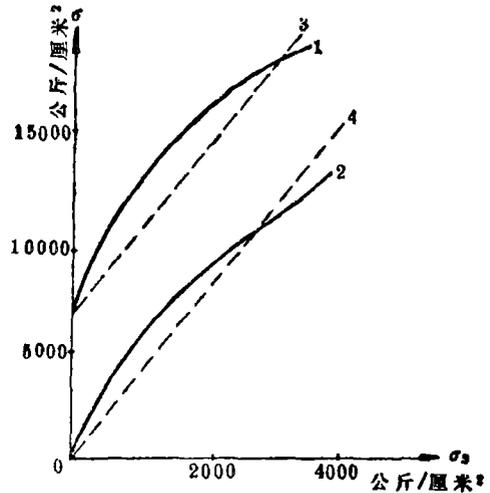


图6 岩体强度曲线

1—未破碎岩石; 2—破碎岩石; 3— $\sigma = \sigma_0 + 3.9\sigma_3$ ; 4— $\sigma = 3.9\sigma_3$ 。

盘古山钨矿岩石力学参数(变质砂岩):

$\phi = 60^\circ$  (内摩擦角);

$\gamma = 2.7$  (吨/米<sup>3</sup>) (容重);

$k = 1.5$  (松散系数);

$\eta = \frac{\mu}{1 - \mu} = 0.4$  (侧压系数);

$\sigma_0 = 560$  (公斤/厘米<sup>2</sup>);

$$\text{tg}\beta = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} = \frac{1.86}{0.14} = 13.3$$

$G^w = 0.27 \times 2/3 \times 50 = 9$  (全充废石重量);

$G^H = 0.27 \times 2/3 \times 25 = 4.5$  (半充废石重量);

$\sigma_3^w = G^w \times \frac{\mu}{1 - \mu} = 9 \times 0.4 = 3.6$  (采场最低点水平压力);

$$\begin{aligned} \sigma_3 H &= GH \times \frac{\mu}{1-\mu} = 4.5 \times 0.4 = 1.8 \text{ (采} \\ &\text{场最低点水平压力),} \\ \sigma^w &= \sigma_0 + \text{tg}\beta \cdot \sigma_3 / 2 = 560 + 13 \times 1.8 \\ &= 583.4 \text{ (公斤/厘米}^2\text{),} \\ \sigma^H &= 560 + 13 \times 0.9 = 572 \text{ (公斤/} \\ &\text{厘米}^2\text{).} \end{aligned}$$

因此，薄夹壁充满时强度提高比率

$$\frac{583 - 560}{560} = 4\%$$

薄夹壁半充时强度提高比率

$$\frac{572 - 560}{560} = 2.1\%$$

2. 残余强度很小。岩石力学界较为普遍地承认，岩体（矿柱）破碎后，只要未发生倒塌，周围充填后，仍具有一定的承载能力。这个承载力称之为残余强度。可用剪切强度理论来说明，

$$\tau = C + \sigma \text{tg}\phi$$

岩石破碎后，当然岩石的内聚力  $C = 0$ 。上述公式就成为纯剪切公式，即

$$\tau = \sigma \text{tg}\phi$$

则破碎岩石还可承载  $\sigma = \tau / \text{tg}\phi$  的压力。实际上岩石破碎后，岩石碎块之间已发生一定量的位移，不管这个位移量多小，破碎块岩体已不能承载压力。如果要使这种碎块岩体能承载压力，必须对这种碎块岩体进行严格约制，即在承载压力时，不允许碎块发生位移。以矸石充填的形态来看，它们在采空场中是松散状态，空隙率大，即使充填后经过一定时间，也不可能压实。因此，矸石充填体不可能对已破碎夹壁提供承载力，它只能在岩体未破碎前按上述Prisel、Hobbs计算提供很小的边界力( $\sigma_0$ )。所以，矸石充填对破碎的岩体产生的残余强度是不可靠的。

3. 充填体作用。充填体除了能提高夹壁强度之外尚能消除空区，约制岩移范围，制造垫层，防止冲击地压，这是充填体在防护地压过程中一个十分重要的作用。

根据盘古山钨矿大面积地压调查，在陷落区内，我们发现许多横切巷在矿脉交会处，即采空场交会处，呈阶梯式陷落，而且夹壁呈整体状下移，许多采空场依然完好，只是空场幅度减少，两墙有些闭合，如图7所示。在761米中段2#溜井东局部地压区（我们定为大面积地压突破口）， $W_{18}$ 沉降最大，高差约1.6米， $W_{16}$ 约1米，往北横巷阶梯高差逐渐减小。如果7#、11#、13#、15#脉的采空场，采放后进行矸石充填，由于夹壁强度得到提高，或许不会折断，也就免除了这次地压的发生；即使 $W_{18}$ 在F处折断，由于空场的消除，则 $W_{18}$ 的沉降量也将大为减少，两侧 $W_{11}$ 、 $W_{15}$ 、 $W_{16}$ 等可能不发生移动。因而限制了地压范围，把大面积地压化为局部地压。

矸石充填，除了上述能控制地压扩展之外，还有防止冲击地压作用。当采空场充填后，采场片帮将大为减少，即使发生大片帮，由于充填体的垫层作用，也不会发生冲击地压。

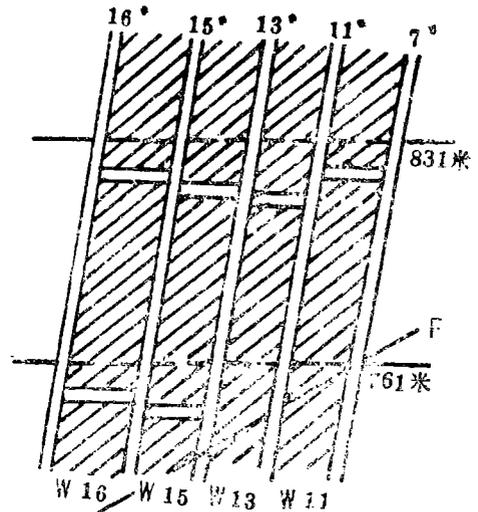


图7 陷落区夹壁破坏情况

831米、761米—为中段；

7#、11#、13#……矿脉编号；

$W_{11}$ 、 $W_{15}$ 、 $W_{16}$ ……夹壁编号；F—断层。

# 湿润剂除尘技术的应用

赣州有色冶金研究所 章兆庆

**· 提要 ·** 本文介绍了近几年来湿润剂除尘技术在金属矿山的应用情况, 证明矿山使用湿润剂来除尘, 其除尘效率可比清水提高10%左右, 是一种行之有效的除尘方法; 提供了湿润剂除尘技术在烟道除尘和混凝土构件施工中除尘的可能性。同时介绍了几种常用的湿润剂添加装置, 还为今后湿润剂除尘技术的发展提出了几点探索性意见, 供参考。

八十年代初, 在我国兴起的湿润剂除尘技术, 经过多年的研制, 已进入实际应用阶段。湿润剂产品质量也赶上国外同类产品的质量, 其应用技术正逐步完善, 为工业除尘, 特别是为地下开采的金属矿山除尘提供了新的有效的手段。

湿润剂除尘技术就是进一步提高水的捕尘效率的技术。在众多的除尘方法中, 用水抑制粉尘最简便经济, 应用范围也最广泛。然而, 水的表面张力比较大(70达因/厘米左右), 粉尘不易被水迅速、完全地湿润, 限制着水的捕尘效率的提高, 特别是对于5

微米以下的微细粉尘, 其捕尘效率更低。若在水中添加除尘湿润剂, 则可大幅度降低水的表面张力(降至30达因/厘米左右)。这样, 既保持了水除尘简便、经济的优点, 又提高了水的捕尘能力。

除尘湿润剂物质是属于石油化工产品一表面活性剂的一种。是由亲水基和疏水基两种不同性质的基团组成的化合物。当这种物质加入水中, 其亲水基被水湿润溶解于水, 而疏水基被排斥伸向空气, 在水体表面定向排列形成紧密排列的界面吸附层, 使水的表层分子与空气的接触状态发生变化, 导致水

此外, 由于充填体消灭了部分空体。在夹壁发生破坏后, 充填体可限制破碎岩体的自由移动。如果再加上夹壁片帮、冒落, 在局部充填地段, 其空场可以得到充满。如画眉坳钨矿, 在F<sub>1</sub>断层东侧采场, 由于夹壁不稳固, 采场采放完后, 其遗留空区常被夹壁自动片帮所充实。因此, 由于充填体消灭了部分空场, 即使夹壁完全破坏, 地表沉降可以得到有效控制, 不会出现陷落坑。

综上所述, 铁山垅黄沙坑口充填后, 发生地压现象可以得到较为合理的解释。黄沙坑口的三、四、五中段于1972年开始矸石充填, 1976年充完, 1979年发生夹壁倒塌的地

压现象, 其矸石充填体作用, 当作如下解释: (1) 矸石充填延缓了夹壁倒塌时间; (2) 倒塌现象是缓慢的, 没有发生地表陷落; (3) 坑内六、七生产中段没有受到任何冲击地压灾害影响。

## 参 考 文 献

- (1) 江西冶金学院、盘古山矿, 《盘古山钨矿地压研究总结报告》, 1976, 1.
- (2) 锡矿山矿务局、长沙矿山研究院, 《锡矿山南区地压总结》, 1973, 11.
- (3) 刘北陵、陈鸣森, 《弹性力学》, 冶金工业出版社, 1979, 7.
- (4) 林韵梅, 《实验岩石力学》, 冶金工业出版社, 1983,