

## 硅灰在干拌喷混凝土中的应用

U 441.481

Kuste., W 穆鹏

**提 要:** 硅灰是近年发展起来的一种混凝土外加剂。本文介绍了德国在喷混凝土中掺加硅灰所进行的一系列试验研究的结果。可以看出, 在干喷法中掺加硅灰(浆体或干粉), 不仅可以替代部分水泥, 提高喷混凝土的强度和粘着能力, 改进喷混凝土结构的压实度, 而且可以大大降低粉尘的发展, 将干喷法的回弹减小到湿喷法的水平, 具有重要的实用价值。

### 1. 引 言

近年来, 德国因斯布鲁克大学建筑材料科学和材料检验研究所已进行了 4 个与喷混凝土工艺有关的研究项目:

- ①用于隧道工程的薄层喷混凝土衬砌;
- ②通过工艺方法减少干喷法的回弹;
- ③各种喷射方法和速凝剂对喷混凝土性能的影响;
- ④硬壳式仅用喷混凝土作内衬砌的隧道工程。

所有的隧道工程都采用了有硅灰添加剂的喷混凝土。

从 1989 年 1 月起, 奥地利混凝土协会的喷混凝土(ÖBV)指南中已经规定了下列与硅灰的应用有关的内容:

硅物质——硅灰

为进一步改进喷混凝土性能所需的施工措施, 可通过掺加硅物质(非结晶硅酸)来实现。

现场实际应用的优点在于:

- ①大大减少粉尘的发生;
- ②减少回弹;
- ③增强粘着效应;
- ④改善了喷混凝土结构物的密实度, 从而提高其抗化学侵蚀和机械的破坏作用。

为了确保正确处理硅灰, 可取的方法是使用浓度较稀的悬浮液(浆体)。为此需要一台定量喂料泵。必须仔细确保悬浮液在加入料流(有可能是在喷嘴内加入)时, 能与液

态速凝剂相容相配。

### 2. 隧道工程的薄层喷混凝土衬砌

这些研究的目的是检查在岩体上施作薄层的可能性、作用和耐久性。

稳定围岩中洞室的衬砌不大可能与围岩本身协同工作, 以形成一种支护效应, 但它是防止地下水涌入的止水密封体, 也是在形成新的岩石表面后防止岩体风化的保护措施。特别是在通水的巷道中, 它可认作为防止水流失和保护岩石表面不受侵蚀的密封体, 也可设计来作为一种减小开挖横断面水流阻力的措施。

下面是干喷法中使用的最初的水泥粘结混合料:

- ①PZ (波特兰水泥) 275(H<sub>1</sub>);  
450kg/m<sup>3</sup>;
- ②硅灰外加剂: 25kg/m<sup>3</sup>;
- ③在级配曲线(A+B)/2 范围内 0~4mm 的掺合骨料;
- ④粘结剂: 掺合骨料=1:3.8;
- ⑤加入有机骨料, 不加速凝剂。

作为试验参数, 本文给出了抗压强度、粘着抗拉强度和粘着剪切强度。由图 1 可见, 通过加入硅灰, 这种拌合料抗压强度在 28 天后可达到 92.8N/mm<sup>2</sup>。

为了检验喷混凝土和围岩间的粘结状况, 研究人员在多种岩石上应用了这种拌合料。从图 2 可见, 24 小时后粘结抗拉强度就完成了 80%。这意味着仅一天后衬砌就能承受重载(例如来自外围的水压力)。

收缩、围岩和衬砌间的相对位移及收敛等，使衬砌壳体沿平行于其分界面方向变形。因此，剪裂是衬砌失效的一个经常原因。剪应变加上衬砌内产生抗压强度的共同作用，这也是收敛的结果。换句话说，必须解决剪—压联合作用问题，而根据经验，通过建立库伦断裂条件，即可很好的达到。

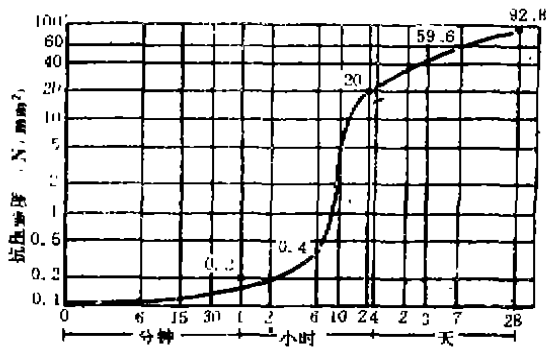


图1 单轴抗压强度的发展

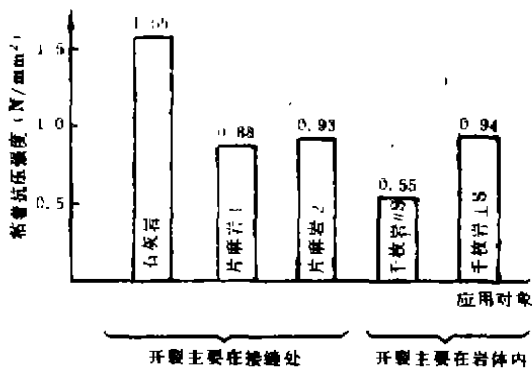
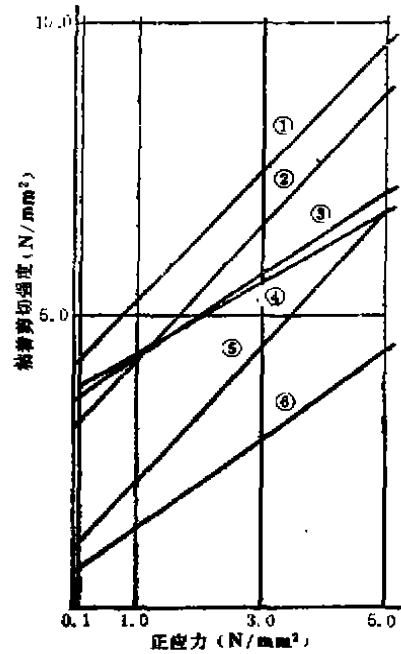


图2 28天后粘着抗拉强度试验结果

由根据奥地利标准所进行的不透水性检查中，测得平均潮湿深度为5mm。这些结果表明，可以将厚层喷混凝土施作成纯水泥粘结的薄层，并应用于岩石洞室的建造中。根据上面提出的一些性能，经检验过的这种类型衬砌很适合于无压流水巷道及类似洞室。对于有压水流巷道，由于需要靠围岩承受内压，以及可能发生的承压的缘故，这类衬砌的应用受到了限制。作为一层厚仅2cm、不能接受静载任务的喷浆层，其应用被限制在稳定围岩中。然而，由于所达到的最终强度高，故被检验的拌合料具有抵抗意外压应变



- ① 喷混凝土 ( $\tau = 4.17 + \sigma \text{tg}48^\circ$ )
- ② 片麻岩 1 ( $\tau = 3.12 + \sigma \text{tg}49^\circ$ )
- ③ 石灰岩 ( $\tau = 3.60 + \sigma \text{tg}38^\circ$ )
- ④ 片麻岩 2 ( $\tau = 3.78 + \sigma \text{tg}31^\circ$ )
- ⑤ 干枚岩 ⊥ S ( $\tau = 1.04 + \sigma \text{tg}49^\circ$ )
- ⑥ 干枚岩 // S ( $\tau = 0.64 + \sigma \text{tg}38^\circ$ )

图3 喷混凝土与围岩—喷浆分界面的剪切线

的储备强度。

### 3. 减少干喷法的回弹

在各种隧道工程现场，喷混凝土是一项主要的造价因素。与此同时，当按通常的用法施作干喷法时，却有平均25%的喷射材料以回弹的形式浪费掉了。这意味着需要更多干拌料，也可能需要更多的速凝剂，也意味着隧道内供料运量增加、粉尘浓度增大，喷射作业时间延长，并使作业人员更多面临由于空气中存在更多粉尘所造成的危害。

在因斯布鲁克的隧道混凝土研究所 (the Tunnel Concrete Research Consortium) 喷混凝土试验台上，精确地测定了干喷法产生的回弹。试验中用作成隧道拱型段的试验板，它可承受0.5m³的喷混凝土来作一系列试验。所用的干拌料的配方在水泥和粉煤灰含量、级配曲线方面有所变化，此外硅灰又以粉末和悬浮液两种形式来加

入。喷混凝土是采用多种类型喷嘴对着边墙上和拱顶上施作的。试验结果表明,对于每立方米混凝土含390kg水泥的标准配料,对边墙部位的回弹为17%,对拱顶部位的为32%,这个数字正好在一般现场所得结果的范围之内(表1)。当水泥含量减至350kg/m<sup>3</sup>时,回弹约增加20%。通过添加粉煤灰来将粘结料含量增至430kgf/m<sup>3</sup>,回弹减少的程度也很有限。通过添加粉煤灰得出不同的水泥含量,或者用粉煤灰替代水泥,都没能使回弹产生较大的改善。而以粉末方式加入硅灰后得出的回弹值,与用相当水泥的拌合料或粉煤灰—水泥的拌合料得出的回弹值处于同一范围,干硅灰(Silipon)的加入只在某种程度上减少回弹。另外,配料中集料最大粒径为16mm的两组干喷试验,其回弹要比最大粒径为8mm的拌合料的回弹大得多;粗略计:喷于边墙的试样显著地从20%增至30%,而喷在拱顶上的混凝土也从37%增至41%。在最大粒径8mm情况下向钢筋部位喷混凝土的回弹并未发生较大变化,而钢筋对这种含最大粒径16mm的混合料则对回弹有消极作用。另外,持喷嘴工人会因为反弹的石子而处在比平常更加危险的环境中。

试验所得最小回弹是通过掺加硅灰浆而实现的(表1)。由表1可见,拱顶部位回弹降低一半,即由36%降至18%;边墙部位9%的最小回弹也已由现场试验进一步证实。各种类型喷嘴的试验均采用标准配料(水泥含量390kg/m<sup>3</sup>,掺合集料粒径0~8mm),其中最小回弹是采用Aliva MS喷嘴而得到的。试验表明圆锥形喷嘴似乎有优势。实际上,射流喷管、预湿式喷嘴和毛细搅拌管得到的是相同的回弹数值。但毛细搅拌管的实际加水量比水的可能容许量小得多,无法利用附加高压的优越性。而“管式喷嘴”因其嘴部的轻微弯状,所造成回弹量最大。经过计算表明,在满足德国联邦铁路隧道所遇情况下,通过掺加悬浮液状硅灰,最多可节约

表1 采用不同配料和喷嘴时回弹的重量百分比

| 喷嘴类型       | 含量(kg/m <sup>3</sup> ) |          | 回弹(重量百分比)(%) |    |
|------------|------------------------|----------|--------------|----|
|            | 波特兰水泥                  | 掺合料      | 边墙           | 拱顶 |
| Aliva圆锥形喷嘴 | 390                    | —        | 17           | 32 |
|            | 350                    | —        | 21           | 37 |
|            | 350                    | 粉状硅灰40   | 16           | 31 |
|            | 350                    | 粉状硅灰20   | 18           | 36 |
|            | 350                    | 粉煤灰60    | 18           | 32 |
|            | 350                    | 粉煤灰40    | 19           | 34 |
|            | 330                    | 粉煤灰100   | 17           | 32 |
|            | 310                    | 粉煤灰80    | 20           | 34 |
|            | 390                    | 粉煤灰40    | 16           | 27 |
|            | 350                    | 硅灰悬浮液    | 9            | 18 |
|            | 350                    | 粉末状硅灰    | 17           | 34 |
|            | 390                    | 粉末状硅灰    | 16           | 30 |
|            | 350                    | 0~16细粒集料 | 29           | 40 |
| 350        | 0~16粗粒集料               | 31       | 42           |    |
| Aliva MS   | 390                    | —        | 14           | 29 |
| Wolff射流喷嘴  | 390                    | —        | 18           | 36 |
| 预湿式喷嘴      | 390                    | —        | 19           | 36 |
| SBS高压型管式喷嘴 | 390                    | —        | 18           | 35 |
| 管式喷嘴       | 390                    | —        | 22           | 38 |

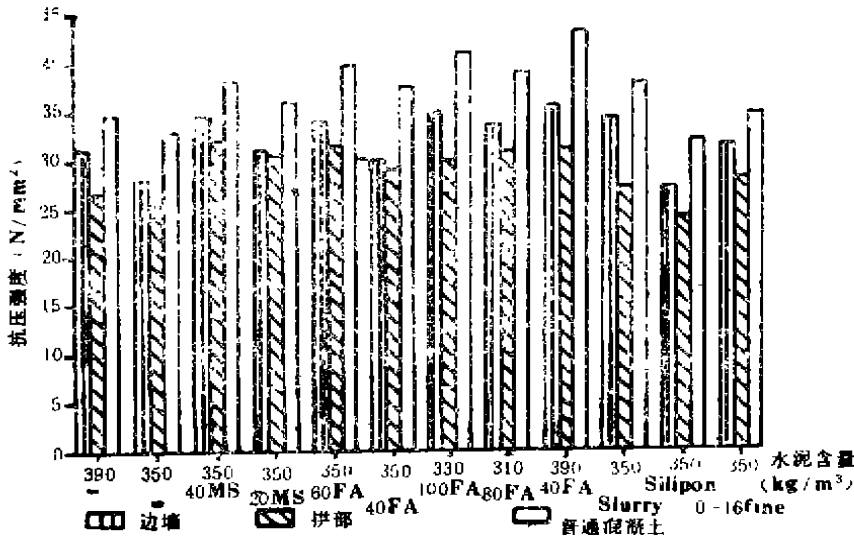
喷混凝土造价达20%。

图4示出不用喷混凝土配料的抗压强度。

#### 4. 各种喷射方法及速凝剂的作用

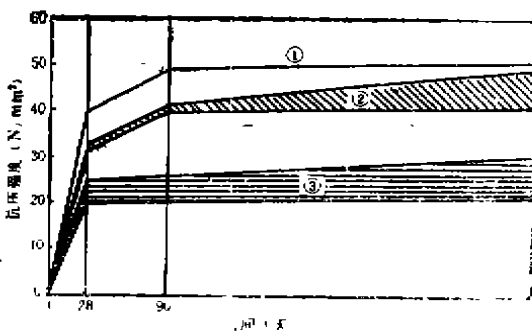
如果喷混凝土将成为永久性构造物,则还应该注意进行一项长期调查。对此,研究人员在一系列试验中除其它参数外,着重观测了抗压强度在一年内的的发展情况。喷混凝土试样是用干喷法和湿喷法(粘稠喷流和稀薄喷流)两种方法制作的。试验所用的初始拌合料的组成多少有些相似,各种外加剂加速了这些拌合料强度的完成。研究人员在一个干喷法试验中加入了7%的硅灰悬浮液,尽管剂量较小,但这种拌合料的强度却最高(图5)。

另外,采用水玻璃作速凝剂时,强度损失超过了奥地利混凝土协会的标准所容许的值。



注：MS—粉状硅灰；  
FA—粉煤灰；  
Slurry—硅灰悬浮液（硅灰浆）；  
Silipon—粉状硅灰（干硅灰）；  
fine—细粒。

图4 给定各种初始配料的喷混凝土的抗压强度（28天）



①铝酸盐速凝剂，硅灰 ②铝酸盐速凝剂  
③水玻璃

图5 掺硅灰+铝酸盐速凝剂的喷混凝土与未掺硅灰、掺水玻璃的喷混凝土的抗压强度比较

### 5. 硬壳式的隧道工程

硬壳式（仅用喷混凝土作内衬砌）喷混凝土衬砌施工方法中，需要逐层喷筑一个多层的喷混凝土衬砌，以取代现场灌注的内衬砌和各种准备安装在衬砌层之间的隔离物。由于喷混凝土各层间粘着加强，这种组合结构内各层的相互作用是安全的。这样，既减少了开挖断面和混凝土用量，也不再需要模板了。现在已经出现了许多用硬壳法建造的结构物，然而，用于多层喷混凝土内衬砌的喷混凝土的质量仍不够高。已有一座用高质量喷混凝土按硬壳法建造的排污隧道，长3.2km，开挖断面约10m<sup>2</sup>。

传统的干喷混凝土（这里指供应的是已搅拌好的成品）它含450kg/m<sup>3</sup> 波特兰水泥45F、最大粒径8mm的集料和粉末状速凝剂，应用来作外衬砌层（这个支护性喷混凝土称为外衬砌层；继之再施作的喷混凝土层形成内衬砌层，以便完成组合的横断面）。B25排污隧道就是按这些措施施工的。对内衬砌层所有的质量要求除抗压强度外都是比较的。

内衬砌层应该采用水密性、同时也能防止微弱化学侵蚀的混凝土。还必须测量层间粘着抗拉强度和粘着剪切强度，以保证层间充分粘着。最后，要求表面光滑、整齐，尽可能减少留下凸出物造成的浪费。下列措施有助于实现这些要求：

#### （1）不用速凝剂

速凝剂增强了喷混凝土的早期强度，但从第一天以后，它实际上也损害了所有凝固混凝土的质量特征。不幸的是，人们常常相信没有不加这种辅助剂的喷混凝土。事实上，这种外加剂通常在隧道掘进期间是必不可少的，但对于硬壳式结构的内衬砌层，弃而不用是很有利于质量的。

#### （2）在喷嘴内加入硅灰悬浮液

加入硅灰悬浮液，可以提高喷层的实用强度。其主要是带来了一个切实的效果，即

确保了主要的进度问题(日喷筑  $80\text{m}^3$ )。进一步说,回弹和粉尘的生成率也大大降低。量测表明,喷射作业中的全断面内回弹为15%。对于隧道干喷法,这当然是一个极好的数值。

抗压强度、水密性和抵抗微弱化学侵蚀的能力也得到提高。试验还表明,这种喷混凝土能有效地覆盖已布钢筋条。在Q188钢筋网的背后也没有收缩孔出现。添加硅灰时,其缺点可能是增加早期收缩量,但通过适当措施可予以防止。

(3) 用高压水射流清洗

支护性喷混凝土(外衬砌层)的外表面被使用一年后积累起来的灰尘污染了。另外,因为使用了速凝剂和缺乏后期处理,其质量在一定程度上较次。因此,在喷筑内衬砌层前需要用高压水射流(600bar)对外衬砌层进行清洗,并将旧混凝土充分润湿。这样,可将粘着抗拉强度适当维持在  $1.5\text{N}/\text{mm}^2$  以上。由于表面的粗糙(附加了连锁作用),粘着剪切强度比较容易维持。

(4) 将后期处理列入计划

为了获得甚至超过所要求的性状,使得结构变形和收缩变形尽可能保持较小的数值,7天内必须对混凝土喷水以保证其湿润。

(5) 收尾喷层采用  $0\sim 2\text{mm}$  材料

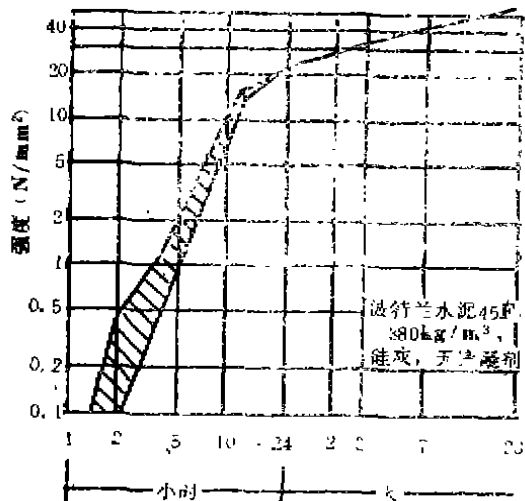


图8 初始温度35℃时的强度发展



图7 有、无后期处理样本的收缩

表2 影响喷混凝土抗压强度的因素

| 影响因素  | 影响因素   |
|-------|--------|
| ①水灰比  | ⑦纤维    |
| ②喷射方法 | ⑧外加剂   |
| ③喷嘴类型 | ⑨集料    |
| ④水泥类型 | ⑩喷射方向  |
| ⑤水泥含量 | ⑪温度、湿度 |
| ⑥掺合料  |        |

为了得到希望的表面结构,收尾一层采用GK2喷浆施作。该表面还要经过刷光工序进行机械磨光。

质量控制和下文所附试验的数据表明,所要求的质量完全能够达到。与有关试验相比,喷混凝土筒仓材料的输送温度约  $60^\circ\text{C}$ ,是相当高的,原因是输送量大。隧道内边墙喷混凝土的初始温度达  $35^\circ\text{C}$ 。尽管这样,该排污隧道的壳体几乎没有显示出任何裂缝。这得归功于良好的后期处理。由于高温的缘故,可测的强裂发展在喷完2小时后才开始。实测28天强度略约  $44\text{N}/\text{mm}^2$ ,层间粘着抗拉强度约  $1.6\text{N}/\text{mm}^2$ 。最大渗水深度测定在  $20\sim 26\text{mm}$  之间。水灰比数值以起始水泥含量为基准,等于0.57。

6. 掺硅灰时的强度

硅灰对抗压强度的发展有着积极的影响。然而,影响喷混凝土强度的因素很多(表2),使得硅灰所产生的那部分实际强度增长值难以评估。看起来,采用水泥的类型对掺加硅灰所产生的额外强度值有很大影响。进行比较时,必须区别出搅拌是否具有相同水灰比或相同稠度,是否掺加硅灰或者是否用它替代了部分水泥等情况。就干喷法而言,

表3

掺与不掺硅灰的喷混凝土的强度比较

| 试 验 系 列     | 拌 合 料                          |          | 增长(%) |
|-------------|--------------------------------|----------|-------|
|             | $Z_{L28}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |          |       |
| 喷混凝土薄型衬砌    | 450+25MS                       | 450+30FA | 85    |
|             | 92.8                           | 56.1     |       |
| 降低回弹 (无速凝剂) | 350+40MSS                      | 350      | 15    |
|             | 38.2                           | 33.2     |       |
| 各种喷射方法      | 380+27MSS                      | 380      | 32    |
| (无速凝剂的干喷法)  | 48.4                           | 36.8     |       |
| 硬壳式喷混凝土方法   | 380+55MSS                      | 380      | 38    |
| (无速凝剂)      | 55                             | 40       |       |
| Hondrich 隧道 | 450+32MSS                      | 430      | 27    |
| (湿喷法)       | 41.7                           | 32.7     |       |
| Mannswörth  | 350+35MSS                      | 380      | 89    |
| (干喷法)       | 36                             | 19       |       |

注:  $Z_{L28}$ 代表28天抗压强度 MS=粉末状硅灰(干硅灰) MSS=悬浮液状硅灰(硅灰浆)  
FA=粉煤灰

通过开、关硅灰泵加入一定附加数量的硅灰,其作用是明显的。

这些试验结果的比较(表3)表明,掺加硅灰有可能将28天后抗压强度提高15~89%。当掺加速凝剂时会产生一些强度损失,这也使得要求的强度等级难于达到。在这种情况下,掺加硅灰以求增加强度就有特别积极的效应。而且,掺硅灰后配料粘着能力在一定程度上有进一步的提高,这是由于减小了所需速凝剂的用量。

#### 7. 降低回弹

影响回弹的因素很多。相应地,各种文献中有关回弹百分数的统计数字也不尽相同。甚至已进行的隧道喷混凝土与喷浆间的比较也是这种情况。先不考虑极端的例子,另一个原始资料引述了在隧道工程中采用干喷法引起全断面平均的回弹为20~25%。湿喷法的情形更为有利一些。本文有关图表对此的结果是依所用掺合料而定,在10~30%范围。表4给出了许多试验的结果,这是比

表4 不同试验中掺与不掺硅灰浆的干喷法的回弹生成率

| 试验系列       | 不掺硅灰浆(%) | 掺硅灰浆(%) | 备注     |
|------------|----------|---------|--------|
| 最低回弹分析     | 21       | 9       | 边墙     |
| 硬壳式隧道      | 37       | 18      | 拱顶     |
| Mannswörth | 15       | 8       | 全断面    |
| 维也纳        | 16~20    | 9       | 边墙, 试样 |

较准确的对回弹的量测数字。

从这些数据可得出结论:通过掺加硅灰,可以将干喷法的回弹降低到湿喷法的程度。

译自 Wolfgang / Kusterle, The Application of Microsilica in the Dry Shotcreting Method, Tunnel, 1990, 4, 230-238 (德文, 英文)

译者 穆 鹏

校者 秦伯士

编注: 本文还收到王彬同志的德文译稿