

# 硅粉混凝土

胡平编译

(射洪县电力公司,射洪,629200)

**摘要** 硅粉是一种高效的火山灰材料,自1976年以来已在北欧一些国家开展了将有限比例的硅粉掺入混凝土中的研究。本文从硅粉材料的物理性能和化学成份、火山灰性能、在混凝土中应用以及硅粉混凝土的性能及耐久性论述了硅粉在混凝土中使用的可能性,最后提出了掺用硅粉存在的问题与尚待研究的问题。

**关键词** 硅粉混凝土 超高强 低渗透 抗化学侵蚀 混凝土

## 1 导言

近年来,由于国际上对环境问题越来越关注,许多国家都将硅粉回收,同粉煤灰一样当作人工火山灰材料,用于混凝土中。另外,高效减水剂(超塑化剂)的效力也为在混凝土中掺用硅粉来生产超高强混凝土(>100MPa)提供了可能。

以有限的比例将硅粉掺入混凝土中的研究,自1976年以来已在北欧一些国家开展(如冰岛、挪威、瑞典)。硅粉是在电弧炉中用高纯度的石英和碳生产硅和硅铁合金的副产品。这种粉尘中有很高的无定形二氧化硅含量,由大量极细的球形颗粒组成,从炉子排放的烟气中收集而得。硅粉中二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )含量同硅合金的生产有关,硅铁合金用额定的含硅量50%、75%和90%来生产,当硅的含量达到了98%时,产品就被称为硅金属而不再是硅铁合金。当合金中硅的含量增加,硅粉中 $\text{SiO}_2$ 的含量也将增加。见表1。

表1 硅铁种类与 $\text{SiO}_2$ 含量

硅铁合金或金属	硅粉中 $\text{SiO}_2$ 含量(%)
50%硅铁	72~77
75%硅铁	84~88
单质硅(含硅98%)	93~98

精确地得到全球硅粉年产量是不可能的,据估计1982年世界总产量为767 500t,其中产自炼硅铁电炉的约为492 000t。

## 2 硅粉的物理性能和化学成份

颜色:浅黑灰色

比重:约为2.2,个别可达2.5,而普通硅酸盐水泥为3.1。因此以硅粉代替水泥时,在质量不变的前提下,加入的硅粉的体积要比被代替的水泥的体积大一些,因此浆体的体积要增大。故按体积考虑,水与胶凝材料的比值降低了,这也就解释了为什么一定量的水泥被相同质量的硅粉代替后成为硅粉混凝土,其流变性发生变化的原因。

松散容重:为2.45~2.94 $\text{kN/m}^3$ ,一般水泥为11.77 $\text{kN/m}^3$ 左右。

细度:硅粉由非常细小的玻璃质物质组成,其比表面积为20 000 $\text{m}^2/\text{kg}$ 左右,同其它材料相比,粉煤灰为400~700 $\text{m}^2/\text{kg}$ ,水泥为350~400 $\text{m}^2/\text{kg}$ ,硅粉的细度最小。一般硅粉的颗粒粒径都小于 $1\mu\text{m}$ ,平均粒径约为 $0.1\mu\text{m}$ ,约为水泥颗粒平均粒径的百分之一。

化学成份:表2列出了挪威和北美地区常见硅粉的化学成分。硅粉中 $\text{SiO}_2$ 的含量一般都大于90%。硅粉的化学成分随着被生产的硅铁合金的种类不同而变化。

表2 挪威和北美地区炼硅炉硅粉的化学成分

成分	挪威 (%)	北美地区	
		加拿大 (%)	美国 (%)
SiO <sub>2</sub>	90.0-96.0	89.0-95.0	90.0-93.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-3.0	0.1-0.7	0.5-0.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2-0.8	0.1-3.1	3.4-4.5
MgO	0.5-1.5	0.3-1.0	0.3-0.5
CaO	0.1-0.5	0.1-1.0	0.5-0.8
Na <sub>2</sub> O	0.2-0.7	0.1-0.2	0.1-0.3
K <sub>2</sub> O	0.4-1.0	0.5-1.4	1.0-1.2
C	0.5-1.4	2.1-4.2	1.3-3.6
S	0.1-0.4	0.1-0.2	0.1-0.2
LOI(=C+S)	0.7-2.5	2.3-4.4	1.4-3.8
SO <sub>3</sub>		0.1-0.6	0.4-1.3
游离水份			
H <sub>2</sub> O		0.0-0.6	0.0-4.8

### 3 化学反应

掺入到硅酸盐水泥浆体中的硅粉所发生的水化反应,是以存在 Ca(OH)<sub>2</sub> 为条件,也可以与碱和 Ca<sup>++</sup> 离子反应。硅粉反应形成的硅酸钙水化物同硅酸盐水泥中水化生成的硅酸钙水化物稍有不同,前者的容重略低于后者,但其渗透性仍非常低。

### 4 硅粉的火山灰性能

因为细度极小和含 SiO<sub>2</sub> 量高,故硅粉是一种高效的火山灰材料。硅粉与在水泥水化时产生的 Ca(OH)<sub>2</sub> 发生凝硬性反应,生成稳定的硅酸钙水化物(CSH)胶凝成分。美国材料与试验协会(ASTM)中 C618 条目前还没有涉及到硅粉,将必须修改,加入这方面的内容。表3列出了硅粉的火山灰活性和需水性的典型资料。

表3 火山灰活性和需水量

火山灰活性 (按照 C618 试验)	硅粉	ASTM 要求 (C618)		
		火山灰	粉煤灰	
			F 级	C 级
(与硅酸盐水泥比较)				
28d 强度 (%)	110	≥75	≥75	≥75
需水量 (%)	134	≤115	≤115	≤105
(与石灰比较)				
7d 强度 (MPa)	9-10	≥5.5	≥5.5	≥5.5

## 5 硅粉在混凝土中的应用

一般应用:混凝土中一部分水泥可以由比它数量少得多的硅粉代替,而强度并不降低,一般 1kg 硅粉可以取代 3~4kg 水泥。但掺用了硅粉,则用水量要增加。在保持水胶比(按重量计)不变的情况下,如果仍要求达到需要的坍落度值,则应使用减水剂或高效减水剂(超塑化剂)。硅粉取代水泥的一般水平在 5%~10% 范围内。

特殊应用:已经成功地用硅粉生产了超高强(>70MPa)低渗透和抗化学侵蚀的混凝土。在这种混凝土中掺用了占水泥重量 25% 的硅粉,其造成的坍落度损失由掺加高效减水剂来补偿。

拌合时间:试验室和现场经验都已表明,为了将混凝土中的硅粉完全分散,需要增加拌合时间,增加的确切时间取决于硅粉的掺量和混凝土的配合比。高效减水剂的使用极大地改善了这方面的难度。

硅粉砂浆和混凝土的需水量:其用水量随着硅粉掺量的增加而增加。当混凝土的水灰比为 0.64,用硅粉按重量替代 30% 的水泥时,其需水量约增加 30%。为了充分地发挥硅粉在混凝土中潜在的增强作用,相应地要采取减水措施,可取的就是使用高效减水剂。高效减水剂的用量将取决于它的种类以及硅粉的掺量。

## 6 硅粉混凝土的性能和耐久性

### 6.1 新拌混凝土的性能

6.1.1 颜色 同常规混凝土比较,其拌和物及硬化后的硅粉混凝土的颜色为深黑色,究其原因,是由于硅粉中含碳量较高。

6.1.2 加气 对于生产某一含气量的混凝土随着硅粉掺量的增加,加气剂的用量也要显著地增加,因为硅粉比表面积大,碳又有吸附作用,见图1。

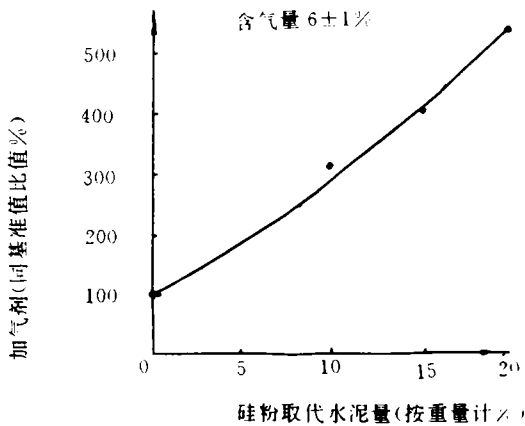


图1 硅粉取代水泥对加气剂用量的影响  
(水泥+硅粉)用量=400kg/m<sup>3</sup>

6.1.3 稠度 显得较粘,不易分离。当硅粉代替水泥量(按重量计)超过10%时,拌合物就变得粘滞。为了在一定长的时间内保持同(基准混凝土)一样的稠度,需要将掺硅粉的混凝土的机口坍落度增大到50mm。

6.1.4 泌水性 硅粉与水有很强的亲合力,故拌合物中自由水存在甚微,因此掺硅粉的混凝土其泌水性减小。需要指出由于混凝土表面水份蒸发速率超过了内部泌水达到表面的水量,故硅粉混凝土常常产生有塑性收缩裂缝。因此,要对新浇筑混凝土进行仔细养护,防止早期水份损失,以预防塑性收缩裂缝。

### 6.2 硬化混凝土的性能

6.2.1 强度发展 在一般的养护温度下,

硅粉对混凝土强度的作用主要发生在大约3~28d内,硅粉混凝土典型的强度发展特征见图2及图3。图2给出的是混凝土中直接用硅粉等量取代水泥的情况,图3给出的是将硅粉作为硅酸盐水泥+粉煤灰混凝土掺和料(即不取代水泥——译者)的情况。两种混凝土同基准混凝土比较,硅粉混凝土1d的抗压强度一般与之相等或稍高,但28d的强度则显著提高。硅粉混凝土的弯曲和劈裂抗拉强度的增长率也与抗压强度类似。硅粉混凝土的强度的获得非常象粉煤灰或矿渣混凝土,重要的区别是硅粉的火山灰活性较粉煤灰更加显著,且其早龄期内的火山灰反应也较粉煤灰混凝土更加明显。

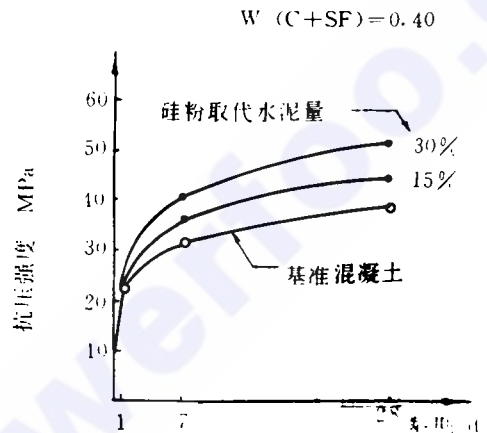


图2 硅粉对混凝土强度的影响

使用了超塑化剂圆柱体试件尺寸:152mm×305mm

6.2.2 渗透性和孔隙率 许多研究者都指出,掺入硅粉的砂浆和混凝土其渗透性降低。见图4,在水泥中掺入了硅粉,尽管“水泥+硅粉”浆体结石中总孔隙与净水泥浆体几乎相同,但前者粗的孔隙减少了。硅粉混凝土其它力学性能的改善也是起因于混凝土硬化浆体中孔隙率和微观结构的变化。

6.2.3 干缩 图5表明,在水胶比相同情况下,经潮湿养护至28d后,硅粉混凝土的干缩值同基准混凝土相类似。但经潮湿养护7d和14d后,则硅粉混凝土的干缩值大。

6.2.4 冻融循环耐久性 按照 ASTM C618中方法 A,对硅粉掺量在20%以内的加气混凝土进行冻融循环试验,结果是令人满意的.但对掺量超过20%的混凝土所作的几组试验中,结果又不太满意,耐久性不良,这有可能是由于硅粉掺量大,在混凝土中形成

致密的内部结构,因而对水份的迁移造成了不良的影响。

6.2.5 对抗硫酸盐侵蚀的耐久性 在高铝酸钙水泥中,掺入30%的各种火山灰材料,将试件裸露于硫酸钠中试验,以掺硅粉的抗硫酸盐侵蚀能力为最佳。

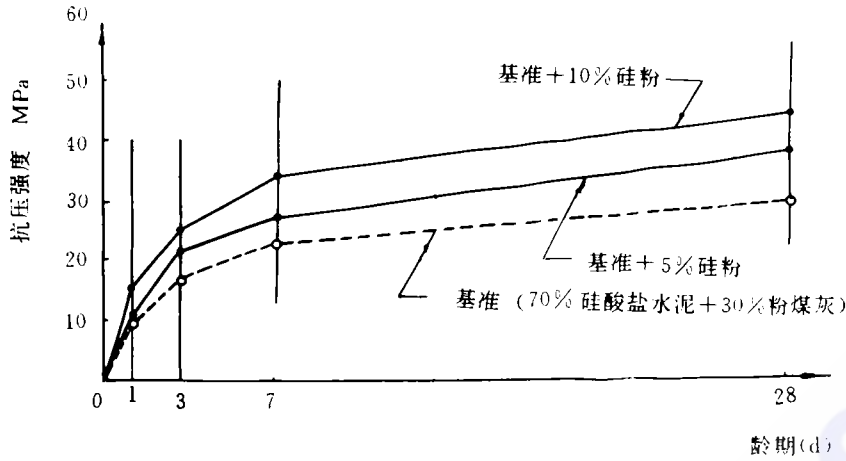


图3 硅粉对粉煤灰混凝土强度的影响

注:硅粉外加量指与“水泥+粉煤灰”重量的百分比。

水泥:ASTM I 型;粉煤灰:ASTM F 型;硅粉:硅金属生产付产品;加气剂:磺化烷基型;超塑化剂:萘系基类;粗骨料:石灰岩碎石(最大粒径19mm);细骨料:天然砂。 $\frac{\text{水}}{\text{水泥}+\text{粉煤灰}}=0.40$

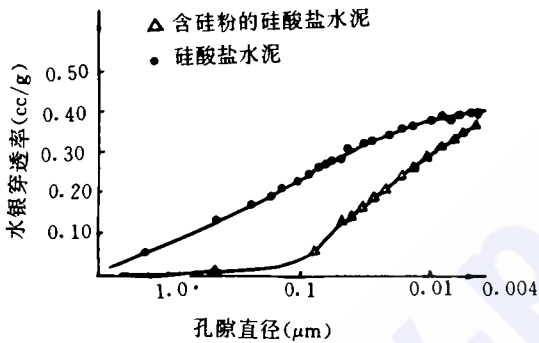


图4 硅酸盐水泥和硅酸盐水泥+硅粉浆体中孔隙大小分布

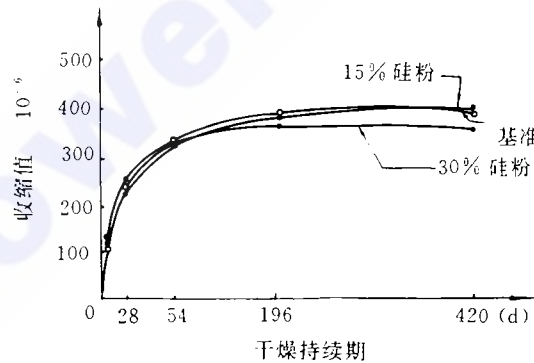


图5 水/(水泥+硅粉)=0.40的硅粉混凝土的干缩值

说明:用水量保持不变使用萘系超塑化剂来保持坍落度;水泥:ASTM I 型;粗骨料:石灰岩碎石(最大粒径19mm);细骨料:天然砂;加气剂:磺化烷基类。

## 7 硅粉在混凝土中的使用可能性

### 7.1 降低单位水泥用量

因为硅粉的活性很高,利用硅粉可以节省水泥,尤其对于高水灰比的混凝土。

### 7.2 超高强混凝土

已经利用硅粉和高效减水剂来生产超高强混凝土,已经报道的有抗压强度高达100MPa,甚至更高的混凝土。以一些特别的

配比方法,已可生产水胶比低于0.25的混凝土,这种混凝土中硅粉掺量大,高效减水剂用量多,因此这种混凝土抗渗性能非常好,抗压强度达150MPa左右,这种混凝土的优点基于它自身致密的填充:极细的硅粉微粒填充在水泥颗粒周围的空间,同样地,水泥颗粒又填充于粗细骨料周围。这种超高强混凝土可以用于桥面板建造和修补,以及对抗渗性要求特别高的各种建筑。

### 7.3 碱——骨料反应

象粉煤灰和天然火山灰一样,硅粉也可以避免由于混凝土中碱——骨料反应引起的有害膨胀。硅粉的这种特点与其它火山灰材料的区别,就是所需要的掺量是很小的。

### 7.4 化学作用

近年来,由于防冻化学物的作用,在一些国家里已出现桥面板和停车场出现龟裂和破坏的现象。由于抗渗性好,氯离子贯入的速率降低,硅粉混凝土已在这方面表现出优越性,也更能经受其它侵蚀性化学物质的腐蚀。

### 7.5 提高粉煤灰或矿渣混凝土的早期强度

许多研究者指出,由于硅粉的使用,可以增进粉煤灰或高炉粒化矿渣混凝土的早期强度。

## 8 掺用硅粉存在的问题

### 8.1 加工处理问题

硅粉细度极小,松散容重亦小,这就带来了一系列的问题,如要制造合适的装载设备、运输、存储及拌合系统,在挪威、美国及加拿大,其处理工艺得到了发展,将最初为疏松形态的硅粉夯实或压实成球形,兑成水悬浮物等等,各种方法皆有优缺点,见表4。

### 8.2 健康危害

由于硅粉微粒很小,吸入了硅粉,对人体有一点潜在的健康危害,在挪威制锰工厂的试验得出,因此而得上矽肺病的危险是非常小的。

### 8.3 加气

在高水泥用量和硅粉掺量为20%~30%的混凝土中加入5%~7%的气体有一些困难;在硅粉掺量低时则不会有这种问题。然而,同基准混凝土比较,加气剂的配量要明显增加。

### 8.4 塑性收缩

试验室和现场试验都表明,硅粉混凝土产生塑性收缩缝有增加的趋势,因为硅粉混凝土的泌水作用实际上被排除了,在温度高、湿度低,特别是刮大风的情况下易失去混凝土表层的水份,故需将新浇筑的硅粉混凝土的表面覆盖。

### 8.5 质量控制

应注意到将那些由于硅粉细度和SiO<sub>2</sub>含量变化而使混凝土的质量产生的波动减小到最低限度内。硅粉细度和SiO<sub>2</sub>含量取决于生产控制和粉尘回收系统,必须每周乃至每天对其主要成份进行取样检查。

表4 不同硅粉状态的优缺点

硅粉形态	优点	缺点
未密实	火山灰活性、技术性能和效果最好。运输、存储或拌合不需要温控。	粉尘危害大,用水反应灵敏。运输成本高。风力运输距离有限。
夯或压	运输成本最低。存储和运输体积最小。粉尘危害减少。	火山灰活性、性能和效果最差。易受潮。
水悬浮物	无粉尘危害。运输和拌合系统最简单。	由于沉积作用含硅率不均匀。混凝土单位用水量难以控制。存储和在容器中配制必须不断搅拌,以保持硅粉悬浮。必须控制pH值,以避免凝胶体过早地产生。运输、存储和拌合中要有温控,以防冻结。

## 9 待研究的问题

### 9.1 硅粉原材料

1. 产自于硅铬、钙和锰合金生产的硅粉的特性。  
(下转第67页)



它们的粒度分布。广西大化水电站人工砂的生产情况表明,在其它条件保持不变的情况下,进料量每增加 2t/h,则砂的细度模数值相应地增加 0.1。按此计算,当细度模数值从 2.0 增加到 2.9 时,其进料量将增加 18t/h。

### 3 应重视棒磨机的运行工况

1. 棒磨机的转速决定着钢棒的回落形式和各种不同直径的钢棒在筒体中所处的运动区间,从而决定着钢棒回落时的能量和着落区,以及物料所受到的破碎作用力的形式和大小,它对棒磨机的处理能力有着重要的影响。在生产中最好改用无级调速电动机为动力,以便能根据需要调节其转速。当不具备调速条件时,则应充分考虑转速对其处理能力的影响作用。

2. 前已述及,影响棒磨机处理能力的因素很多。其中有些因素,如料浆浓度、装棒量、钢棒的直径及其级配等,均可在一定范围内人为地进行调整。在估计棒磨机处理能力时,可不考虑这些因素的影响作用,因为操作者可根据需要将它们调整到最佳水平。

### 4 不可忽视各因素间的联合作用

在上述影响因素之间,往往产生相互作用,它们联合起来,共同对棒磨机的处理能力

产生影响。如岩石的物理力学性质与转速之间,岩石的物理力学性质与最大棒径之间,料浆浓度和排料的细度模数之间,都具有一定的联合作用。这种联合作用有时是互相促进,使棒磨机的处理能力波动程度加大,有时又可能是互相抵消,使影响程度缩小。估计棒磨机处理能力时,应该弄清其联合作用的结果,并予以区别对待。

### 5 应尽可能进行原型试验

由于影响棒磨机生产能力的因素多,情况复杂,故准确地估计其大小是件十分困难的事。即使是小型棒磨机进行模拟试验,其误差也在所难免。要想使其误差缩小到最小范围,最好的办法还是直接进行原型试验。只有这样,才能取得满意的结果。因此,凡有条件时都应采用这种办法。实践中,有不少工程就是这样做的。

到目前为止,由于对棒磨机处理能力估计不准,而使实际生产能力富余较多,造成不必要的浪费,和因实际生产能力不足而使细骨料供不应求,造成混凝土施工被动,以及因棒磨机处理能力达到或超过其铭牌产量而感到自满,不愿进一步寻找更优的运行工况和其它提高产量的科学方法等事例,国内都曾有过。今后,我们应该加强这方面的研究,以避免这类事情再度发生。

(收稿日期:19930315)

(上接第 64 页)

2. 化学反应所包含的本质。
3. 发展理想测试技术和制定限制要求。
4. 加工、运输及健康相关的一些问题。

#### 9.2 硅粉混凝土

1. 长龄期硅粉混凝土强度特征和耐久性。
2. 水灰比低于 0.55 时强度效益系数。
3. 硅粉掺量大于 15% 时混凝土的冻融

侵蚀。

4. 掺或不掺加气剂的超低水灰比混凝土的冻融侵蚀。
5. 在防冻盐保护下硅粉混凝土的结垢。
6. 掺加硅粉的水硬性水泥混合物性能。
7. 硅粉对抑制碱——骨料反应的作用。
8. 掺硅粉的混凝土抗硫酸盐侵蚀能力。
9. 产自于硅铬、钙和锰合金生产中的硅粉混凝土的性能。

(收稿日期:19920625)