

硅灰及硅灰混凝土综述

林毓梅

(建筑工程系)

摘要 本文较系统地综述了硅灰及其化学组成和主要物理性质、硅灰混凝土的特性、硅灰混凝土改性机理、硅灰混凝土在工程中的应用,以及硅灰和硅灰混凝土有待进一步研究的问题。

关键词: 硅灰; 混凝土; 水胶比; 超高强混凝土; 硅灰混凝土; 耐久性; 火山灰; 微集料; 和易性; 硅灰效率系数; 综述

一、概 述

硅灰 (Silica Fume) 又称硅粉、冷凝硅粉、硅尘及硅烟,是钢厂和铁合金厂生产硅钢和硅铁时产生的一种烟尘,经静电除尘而回收的粉尘。其颗粒极细,平均粒径约为 $0.1\text{--}1.0\mu\text{m}$,是普通水泥颗粒的 $1/50\text{--}1/100$ 。其主要成分是无定性二氧化硅,含量占 $85\%\text{--}90\%$ 〔1〕〔2〕〔3〕。因此,活性很高,是一种新的、高活性的火山灰质掺合料。在混凝土中掺入适量硅灰而拌制成的硅灰混凝土,可大幅度提高混凝土的密实性、强度、抗渗、抗冻、抗冲磨,以及耐化学侵蚀,并能抑制或减少碱-骨料反应。这不仅可提高混凝土工程的质量,降低成本,具有重大的技术经济效益;而且,由于硅灰的回收,减少了硅灰对大气的污染,还可收到积极的社会效益。因此近年来,硅灰和硅灰混凝土的开发与应用已引起国内外研究人员的极大关注,1983、1986和1989年已相继召开过有关在混凝土中掺有矿渣、粉煤灰及硅灰的三次国际会议。

硅灰的火山灰活性,早在50年代初期已被人们所掌握,但因其颗粒极细,掺入混凝土后,会引起混凝土拌和物用水量的增加。所以直至70年代后期,高效减水剂的大量应用才解决了硅灰的实际应用问题。挪威和丹麦等国1976年开始在混凝土搅拌厂和预制厂小规模应用,其后,美国、加拿大、日本、联邦德国及苏联等也相继开始研究和应用〔1〕〔3〕。

我国对硅灰的研究和应用始于80年代初,近年来进展很快,中国建筑科学研究院、上海建筑科学研究所、同济大学、水电部东北勘测设计院、南京水利科学研究院,以及水利水电科学研究院等单位,都先后开展了大量的试验研究和推广应用工作,并取得可喜的技术经济效益。

目前,硅灰的研究和应用已遍及世界各国。据1981年推算,1987年全世界硅灰总产

表1 一些国家的硅灰年产量(1981推算值)〔3〕

国 家	产量(t)	国 家	产量(t)
美 国	300 000	瑞 典	15 000
苏 联	150 000	加 拿 大	15 000
挪 威	120 000	巴 西	13 000
日 本	70 000	澳 大 利 亚	12 000
西 班 牙	30 000	意 大 利	10 000
法 国	20 000	委 内 瑞 拉	10 000
冰 岛	20 000	联 邦 德 国	6 000

量约为110万t⁽³⁾，一些国家的硅灰产量见表1。

二、硅灰的化学组成和特性

硅灰的化学组成，随所生产的合金和金属品种不同而异。一般而言，其中主要是无定形二氧化硅，其含量在90%左右，高的可达98%，低的也在80%以上。此外，还有少量的铁、镁等氧化物。国内外一些厂家和国家硅灰的化学组成⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾列于表2和表3。

表2 国产硅灰的化学组成 (%)

厂 家	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	烧失量
上海铁合金厂	94.48	0.27	0.83	0.54	0.97	0.80	—	—	—	1.91
天津铁合金厂	90.2	0.5	—	0.5	1.5	—	0.6	1.2	1.5	4.0
唐山铁合金厂	89.48	1.04	1.79	0.35	1.84	0.99	—	—	—	4.14
昆钢铁合金厂	90.69	1.29	1.14	0.83	1.99	0.66	—	—	—	—

表3 国外硅灰的化学组成 (%)

国家	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	S	烧失量
挪 威	90.0—96.0	0.5—3.0	0.2—0.8	0.1—0.5	0.5—1.5	0.2—0.7	0.4—1.0	0.5—1.4	0.1—0.4	0.7—2.5
丹 麦	93.0—97.6	0.1—0.3	0.02—0.41	0.06—0.53	0.11—0.46	0.06—0.25	0.23—0.81	0.6	0.1	1.15—3.44
加拿大	93.7	0.30	0.8	0.2	0.2	0.2	0.5	2.6	0.1	2.8
美 国	94.3	0.36	0.66	0.27	1.42	0.76	1.16	—	—	—
法 国	93.1	0.30	0.6	0.2	0.6	—	—	—	—	3.5
芬 兰	96.5	0.24	0.06	0.63	0.23	0.27	0.83	—	0.21	1.7
瑞 士	90.0—96.0	0.2—0.5	0.3—2.0	0.26—0.35	0.1—0.3	0.1—0.5	—	3.0	SO ₃ 0.1—0.3	—
日 本	87.8—91.6	0.2—1.5	0.9—2.6	0.1—0.8	0.3—1.5	0.2—1.3	0.8—3.0	0.4—2.3	SO ₃ 0.5—0.7	2.5—3.6

硅灰的火山灰活性指标高达110%，需水量比*为134%，比ASTM—C618中规定的火山灰质掺合料的极限指标（活性为≥75%，需水量比为≤115%（火山灰）和≤105%（粉煤灰））还高。其有效取代系数高达3—4，即1kg硅灰可取代3—4kg水泥⁽¹⁾（参见本文五）。

三、硅灰的主要物理性质⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

（一）粒径与粒形

硅灰色泽呈浅灰至深灰不等，随含碳量增加由浅变深。在电子显微镜下为乳白色或灰白色的空心球状颗粒。硅灰成泥浆状时呈黑色。

（二）比重与容重

硅灰的比重为2.1—2.2，约为普通水泥的2/3。其松散容重为250—300kg/m³，是水泥的1/4左右。也就是说，一袋（装50kg水泥的袋子）硅灰仅有10—12kg。因此，硅灰的贮运较为困难。

（三）细 度

硅灰的颗粒极细是其物理性质上的一大特点。其比表面积为20—25万cm²/g，而普通水

*指硅灰需水量与硅酸盐水泥需水量之比。

泥是3000—4000cm²/g (粉煤灰是2000—7000cm²/g, 烟草灰是10万cm²/g左右) 前者是后者的60—70倍。其平均粒径为0.1—1.0μm, 是普通水泥的1/50—1/100。因此, 硅灰具有极大的表面能, 粘聚性好。

四、硅灰混凝土的特性

在混凝土中掺入适量的硅灰, 可使混凝土的一系列性能得到提高或改善。

(一) 和易性

由于硅灰颗粒极细, 比表面积非常大。因此, 硅灰混凝土拌和物的粘聚性增加, 泌水和离析现象显著降低, 稳定性提高, 从而可有效控制混凝土的沉缩裂缝。正如有的试验⁽³⁾所表明的那样, 当硅灰取代水泥用量大于15%、高效减水剂掺量为胶结材料的1%—2%时, 混凝土坍落度达15—20cm的情况下, 未见拌和物离析; 当硅灰取代水泥用量20%—30%时, 即使用自来水直接冲击混凝土拌和物也基本不离析。硅灰混凝土可配制水下混凝土和喷射混凝土即基于此。但在另一面, 和不掺硅灰的普通混凝土相比, 在用水量一定的条件下, 硅灰混凝土的坍落度明显减小, 为了保证施工要求的坍落度, 就得增加用水量, 且随硅灰掺量的增加而增大。这也就是硅灰混凝土必须与高效减水剂同时掺用的原因。因为高效减水剂将使硅灰微粒得到充分的分散, 进而使拌和物不必增加或仅少增加用水量便能达到所要求的和易性。

由于硅灰混凝土不泌水的特点, 往往又会导致混凝土表面因缺水而引起塑性收缩*产生开裂。因此, 硅灰混凝土必须十分重视早期潮湿养护⁽⁶⁾。

(二) 强度

早强和高强是硅灰混凝土的一大特点。一般在相同水灰比的条件下, 硅灰混凝土的抗压强度随硅灰掺量的增加而提高 (如图1所示)⁽⁶⁾。但掺量最多不宜超过35%, 一般在5%—30%是有效的。上海建筑科学研究院曾用525号普通水泥、5—25mm碎石及中砂为原料, 掺入5—10%的硅灰和适量的SN—II型高效减水剂, 可使混凝土1d抗压强度提高120%、28d抗压强度提高60%—80%; 从而配制出抗压强度1d为40MPa、28d为80—90MPa的高强混凝土⁽¹⁾。按贝切 (Bache H.H.) 的论述, 如果硅灰与高效减水剂联合使用, 水胶比控制在0.13—0.18, 水泥颗粒间的空隙为硅粉填充达紧密状态时, 则硅灰混凝土的抗压强度可达120—270MPa, 约为普通混凝土的2—4倍⁽²⁾⁽³⁾。

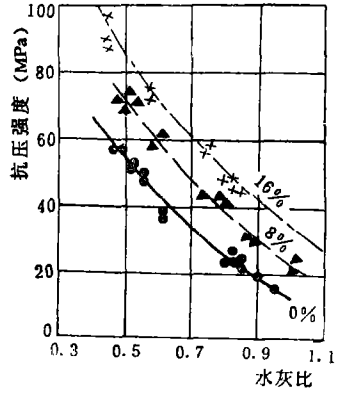


图1 不同硅灰掺量下混凝土强度与水灰比的关系 (图中数字为硅灰掺量)

硅灰混凝土的抗拉、抗弯强度和抗压强度一样, 也随硅灰掺量的增加而提高; 但其拉压比、弯压比与硅灰掺量无关, 且其比值和普通混凝土相当或略低些⁽³⁾⁽⁸⁾。

(三) 抗渗性

硅灰混凝土由于硅灰的充填作用, 使混凝土的密实度显著提高。据国内有关试验结果⁽⁹⁾,

* 又称沉缩, 指混凝土拌和物刚成型后 (尚处塑性状态), 因沉降、泌水而引起的混凝土体积缩减。

胶结材料用量为 $225\text{kg}/\text{m}^3$ 的对比混凝土(未掺硅灰),其抗渗标号为 0.5MPa ,而掺有 20% 硅灰时,相应为 6.2MPa ,后者比前者提高了11倍。又如胶结材料用量为 $325\text{kg}/\text{m}^3$ 时不掺硅灰的混凝土,其抗渗标号仅为 1.5MPa ;而掺入 20% 硅灰后,其抗渗标号达 30.2MPa ,后者较前提高了19倍。国外曾有过这样的报导^[8],当混凝土中硅灰掺量为 $10\%—20\%$ 时,其抗渗性比不掺硅灰的混凝土提高100—1000倍,如图2所示。

丹麦利用硅灰的填充性,已批量生产超密水泥,用以配制核反应堆的高密度混凝土和封闭核废料,效果很好^[9]。

(四) 耐久性

1. 抗冻性

由于混凝土中掺入硅灰后,改善了混凝土的孔结构,毛细孔大孔减少,超微细孔增加;气孔间距系数减小;减少了可冻水量,从而使抗冻性明显提高,对加气混凝土和轻骨料混凝土更为突出。如水利水电科学研究所的试验结果^[10]:硅灰混凝土(掺硅灰 10% ,水胶比 0.5 ,胶结材料总量为 $400\text{kg}/\text{m}^3$)冻融300次后,其相对动弹模为 78% ;而相同含气量(6%),不掺硅灰的普通混凝土冻融110次后,其相对动弹模却下降到 50.2% ,抗冻性的提高是明显的。类似的情况,国外也有报导。

但硅灰的掺量不是愈多愈好。据国外有些资料介绍,当硅灰掺量超过 15% 时,混凝土的抗冻性反而变差,这可能是由于致密的结构对水分的迁移不利所致^[2]。另外,由于掺入硅灰,混凝土中的含气量要比不掺时略有减少。因此,为了保持一定的含气量,必须增加引气剂的掺量。一般当硅灰掺量为 10% 时,达到同样含气量,引气剂用量需增加1倍^[11]。

2. 抗冲磨性

据有关资料介绍^[12],硅灰混凝土的抗冲磨性同样随硅灰掺量的增加而提高,详见表4。

表4 硅灰混凝土的抗冲磨性

编号	水泥用量 (kg/m^3)	硅灰掺量 (%)	$\left(\frac{\text{水}}{\text{水泥}+\text{硅灰}}\right)$	抗压强度 $R_{28}(\text{MPa})$	冲磨失重率 (%)	备注
1	317	0	0.45	39.4	6.9	石灰岩骨料
2	269	17.6	0.53	49.5	5.0	石灰岩骨料
3	351	42.9	0.21	95.6	2.2	石灰岩骨料

水电部东北勘测设计院科研所的试验结果^[9]也说明了硅灰混凝土的抗冲磨性能好。混凝土的胶结材料用量为 $325\text{kg}/\text{m}^3$,经含砂水流冲磨对比试验(龄期28d),掺硅灰 20% 的硅灰混凝土,其抗冲磨强度为 $1.14\text{h}/\text{kg}/\text{m}^2$,而未掺硅灰的对比混凝土是 $0.62\text{h}/\text{kg}/\text{m}^2$,也就是说,前者的抗冲磨强度是后者的1.84倍。

南京水利科学研究所通过对外加剂品种、掺量以及硅灰掺量等的优选,也已配制出抗冲磨强度比400号混凝土提高1—2倍左右、抗空蚀强度提高3—5倍的硅灰混凝土^[13]。

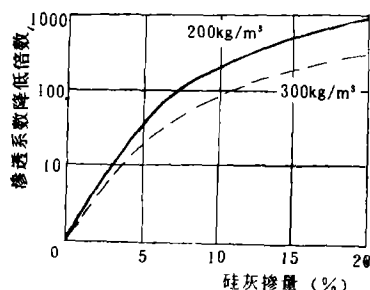


图2 硅灰掺量对混凝土抗渗性的影响(图中数字为水泥用量)

3. 抗钢筋锈蚀

一般当混凝土的pH值下降到小于11.5时,钢筋表面的钝化膜就被破坏,导致锈蚀。另外,大量氯离子浸入,也会使钝化膜破坏而导致锈蚀发生。国内外试验结果^[14]表明,硅灰混凝土即使硅灰掺量达30%(一般掺入硅灰会使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 减少,pH值降低,碳化速度加快),pH值仍大于11.5,钢筋钝化膜仍稳定存在。另外,由于硅灰混凝土密实度增加,抗渗性好,氯离子不易渗入, CO_2 也难以侵入而延缓碳化。因此,硅灰混凝土抵抗钢筋锈蚀的能力比普通混凝土强。有关试验^[14]指出,硅灰钢筋混凝土腐蚀耐久年限至少可延长50%—90%。

4. 抑制碱-骨料反应

由于混凝土中掺入硅灰,可减少混凝土细孔溶液中的碱离子浓度,从而可有效地抑制或减小碱-骨料反应。如冰岛的试验结果^[3],在波特兰水泥中掺入7.5%的硅灰,有效地防止了因碱-骨料反应而引起的破坏。

5. 抗化学侵蚀性

如前所述,由于硅灰混凝土的渗透性小,减慢了氯离子的渗透速度,加上掺入的硅灰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 起反应,形成C-S-H凝胶,从而使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 减少,提高了硅灰混凝土的化学稳定性。据挪威的试验^[3],掺有15%硅灰的混凝土,经26年暴露试验,其抗侵蚀性与抗硫酸盐水泥(C_2A 含量小于5%)的相同。这说明硅灰混凝土的抗化学侵蚀也有明显提高。

(五) 变形性能

据水利水电科学研究院的试验结果^[10],硅灰混凝土的干缩随硅灰掺量的增加而增大。掺20%的硅灰,其干缩率为 690×10^{-6} ,比不掺硅灰的干缩率(409×10^{-6})增大69%;而掺30%硅灰时,其干缩率为 726×10^{-6} ,比不掺硅灰的增大78%(见图3)。南京水利科学研究所也有类似的试验结果^[14]。

另外,据有关试验,内掺10%硅灰的混凝土,其极限拉伸 ϵ_p 比不掺的(标号为200号)提高14%^[10]。硅灰混凝土的徐变化比普通混凝土的小^[8]或基本相同^[12]。而弹性模量高于同标号的普通混凝土,且随抗压强度的提高而增大,其间有良好的相关性^[3]。

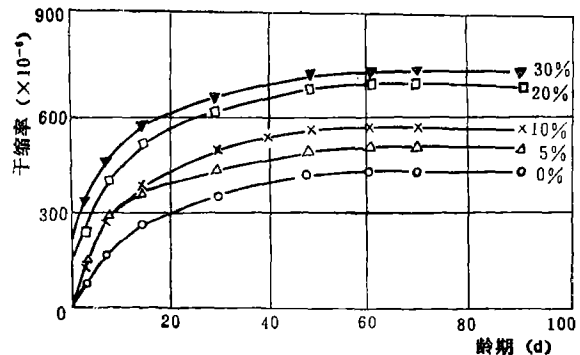


图3 硅灰混凝土的干缩中数字为硅灰掺量

五、硅灰混凝土改性机理^{[7][8][14][15][16][17]}

混凝土中掺入适量硅灰,可使混凝土的一系列性能得以提高或改善,但硅灰的增强、改性作用机理尚未完全搞清楚,正在深入研究中。目前,较为一致的观点是基于硅灰的火山灰效应和微集料效应。

硅灰的火山灰效应是指硅灰中所含的大量无定形 SiO_2 与水泥水化时析出的游离

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 化合,生成稳定的低碱C-S-H凝胶水化物的反应。这种C-S-H凝胶较无硅灰时紧凑、密集,微孔孔隙率降低,其强度高于粗大而多孔的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,从而减少了浆体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量,大孔被小孔所取代,使水泥石的最可几孔径、比表面积减小,相应的孔隙率下降,结构的密实性随之提高,在宏观上,就能导致强度、抗渗性能和抗冻性的提高。

另外,上述反应,还使水泥-水体系中早期 Ca^{2+} 和 OH^- 浓度降低,诱导期缩短,促进 C_3S 水化;加上高度分散在水泥浆体中的硅灰微粒,还起着水化产物结晶的晶核作用,从而加速水泥早期的水化,使硅灰混凝土具有早强的特点。

微集料效应,主要表现在大量硅灰微粒及其水化产物起着填充作用,改善了水泥石及水泥石-骨料界面的结构。由于硅灰颗粒极细,比表面积约为普通水泥的60—70倍。因此,当硅灰掺入混凝土,一颗水泥颗粒周围就约有10万颗超细硅灰填充在水泥颗粒空隙之间;同时还降低了水灰比,使水泥浆体更为致密。另外,硅灰还堵塞于混凝土内部的毛细孔及大孔中,把较大的毛细通道堵塞或部分堵塞,使之变成许多细微通道,从而形成在结构上更为致密的石-砂-水泥-硅灰体系,使整个混凝土结构更为密实。

由于硅灰的火山灰效应和微集料效应,还大大改善了混凝土的孔结构(包括总孔隙率、孔径大小分布及孔的形貌),不仅使孔隙率明显降低,而且在最可几孔径方面也大为缩小。正如文献[13]用压汞法测定所表明的那样,硅灰砂浆的空隙比普通水泥砂浆小66%—145%,在最可几孔径上,前者为350—500 Å,后者为1480 Å。也就是说最可几孔径上,前者比后者缩小了约(3/4) — (2/3)。还有,掺入硅灰大大改善了水泥石-骨料界面结构^[17],使界面 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的取向度降低、数量减少以及晶粒变细,使界面过渡区接触带减小。有的研究^[18]还表明,界面上根本没有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 凝胶,也没有界面裂缝,无定形的C-S-H凝胶包裹在骨料周围,从而降低了孔隙率,提高了界面粘结,也就大大提高了混凝土受压时界面的抗剪强度。显然,混凝土孔结构以及水泥石-骨料界面结构的改善,将大大提高混凝土的强度、抗渗、抗冻以及抗冲磨性能。

文献[14]的资料还表明,由于硅灰的火山灰效应和微集料效应,混凝土的密实度得以大大提高,从而使混凝土的抗 Cl^- 渗透的能力和电阻率得到提高。挪威费乔尔(K.P.Fischer)的对比试验表明,同样暴露在海水中2年的两种混凝土试件,其中掺有19%硅灰的,其 Cl^- 扩散系数为 $6 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{S}$,而未掺硅灰的普通混凝土则为 $1.5 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{S}$,也就是说, Cl^- 在硅灰混凝土中的扩散仅为在普通混凝土中的1/25。在电阻率方面,掺有8%和16%硅灰的硅灰混凝土,其电阻率分别为 2×10^8 和 $8 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$,而普通混凝土是 $4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$,前者分别是后者的500和2000倍。这些物理、化学性质上的变化,都将大大提高混凝土的抗化学侵蚀和钢筋锈蚀,有效地延长钢筋混凝土结构的耐久年限。

为了评定硅灰的效率,加拿大的J.I.斯科拉丁提出用硅灰效率系数(或水泥等效系数)K来表征^[4]。它表示在强度相同的条件下,水泥降低量与替代水泥的硅灰用量之比,

即:

$$K = \frac{C_{reg} - C_{fu}}{S_{fu}}$$

式中, C_{reg} 为常规混凝土的水泥用量(kg/m^3); C_{fu} 为同强度的硅灰混凝土的水泥用量(kg/m^3); S_{fu} 为硅灰混凝土的硅灰用量(kg/m^3)。

一般硅灰的K值为2—5,即1 kg硅灰可以替代2—5 kg的水泥,而能得到相同强度的混

凝土。

六、硅灰混凝土的应用

由于硅灰混凝土具有上述一系列的优良性能，致使其应用领域日益广阔。掺适量硅灰，可配制高达100—150MPa的超高强混凝土，用于高层建筑、海上钻井平台等。拌制高强、低渗透性喷射混凝土（回弹率可降至5%—10%），用于隧洞衬砌和地下混凝土工程；拌制水下浇筑混凝土，用于码头、桥梁的基础及水下加固工程等；拌制抗冲磨、耐腐蚀的耐久混凝土，用于水工建筑物的冲磨部位、高速公路的路面，以及病害混凝土的维修、加固等。国外还利用硅灰生产超密水泥，用于配制核电站安全壳的高密度防护混凝土。硅灰混凝土的应用实例列于表5⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾⁽⁹⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

表5 硅灰混凝土应用实例

工程名称	国家	应用部位	施工年代	应用目的	混凝土有关指标*
四川省渔子溪二级水电站	中国	引水隧洞混凝土衬砌	1985年	为提高喷射混凝土的强度，降低回弹率和节约水泥	水胶比=0.55 C=270kg/m ³ SF=30kg/m ³ 减水剂=0.6% SI=2.0cm R ₇ =27.7MPa R ₂₈ =44.5MPa
黑龙江省汤原县进水闸	中国	进水闸泵送混凝土施工	1986年	为提高泵送混凝土的保水性、抗骨料分离和节约水泥	水胶比=0.65 C=213kg/m ³ SF=12kg/m ³ 木钙=0.20% NF-2=0.50% SI=5—10cm
福建省范厝水电站	中国	水轮机蜗壳侧墙及顶板	1987年	为提高水轮机蜗壳的抗冲磨	水胶比=0.56 C=164kg/m ³ F=55kg/m ³ 硅粉+硅粉剂=17% SI=9.1cm R ₃ =9.1MPa, R ₂₈ =25.1MPa, R ₉₀ =30.4MPa
四川省映秀湾电站拦河闸	中国	闸底板修复	1983年	为提高闸底板抗推移质冲击和高速挟砂水流空蚀的高抗冲耐磨	C=450kg/m ³ SI=13cm 掺适量硅粉剂 R ₂₈ =82.1MPa
非斯科(Fiskaa)工程	挪威	桥面板	1971年	提高混凝土对海边盐和SO ₂ 污染的耐久性	C=316kg/m ³ SF=12% R ₂₈ =48.0MPa
哥德堡码头	瑞典	防波堤	1976—1978年	提高浪溅区混凝土的强度；耐久性，以及防止钢筋腐蚀	C=370kg/m ³ SF=15% R ₂₈ =48.0MPa

* C、SF、F和SI，依次表示：水泥、硅灰、粉煤灰和坍落度。

续表5

工程名称	国家	应用部位	施工年代	应用目的	混凝土有关指标*
若什克 (Noisk) 水电站	挪威	面板	1977年	为提高混凝土对附近硝酸厂硝酸侵蚀的耐久性	$C=306\text{kg}/\text{m}^3$ $SF=15\%$ $R_{28}=45.2\text{MPa}$
比维卡 (Buvika) 粮仓工程	挪威	粮仓	1979年	为提高混凝土对钢筋的防腐性能	$C=280\text{kg}/\text{m}^3$ $SF=15\%$ $R_{28}=37.7\text{MPa}$
北海油田石油工程	挪威	载荷桩的基础及石油贮罐	1981年	为提高离岸工程平台基础部分与贮油罐混凝土的耐久性	$SF=10\%$ $R_{28}=71.5\text{MPa}$
卑尔根工程	挪威	桥	1983—1985年	为使混凝土消除分离, 提高抗冻性, 以及增强表面光滑性能	$SF=8\%$ $R_{28}=41.0\text{MPa}$
高层建筑	美国	高层建筑	1984年	为减少柱的截面, 提高混凝土强度, 以及降低成本。	$C=390\text{kg}/\text{m}^3$ $SF=15\%$ $S1=18\text{cm}$ $R_{28}=84.0\text{MPa}$
洛杉矶水道工程	美国	人工河床	1984年	为提高长期耐久性和耐磨性	$R_{28}=55.0\text{MPa}$
克衣坐 (Killzuo) 坝	美国	消力池	1984年	为提高挟砂石水流的磨蚀和减少侵蚀	$C=474\text{kg}/\text{m}^3$ $SF=18\%$ $R_{28}=98.1\text{MPa}$
俄亥俄州 511 公路桥面板罩面工程	美国	桥面板罩面	1983—1984年	为提高桥面板的早期强度、抗车轮磨损、抗化冻盐腐蚀, 以及抗冻融破坏。	$C=450\text{kg}/\text{m}^3$ $SF=10\%$ $R_1=40.0\text{MPa}$ $R_{28}=98.4\text{MPa}$
江苏省仪征化纤公路工程	中国	现浇混凝土路面	1988年	为提高面混凝土的早期强度和耐磨性能	$C=440\text{kg}/\text{m}^3$ 掺用早强、高效减水剂和适量硅粉, $R_{0.5}=25.3\text{MPa}$ $R_{28}=55.3\text{MPa}$
林恩湖工程	美国	坡面	1984年	采用钢纤维增强喷射硅灰混凝土以保护坡面	$C=450\text{kg}/\text{m}^3$ $SF=45\text{kg}/\text{m}^3$ 钢纤维= $75\text{kg}/\text{m}^3$ $R_{28}=89.0\text{MPa}$
黑格雷 (Heggura) 工路隧道工程	挪威	隧道	1982—1984年	为降低钢纤维增强喷射硅灰混凝土的回弹和渗水性, 并降低成本, 提高强度	

七、结 语⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁸⁾

由上可见, 硅灰是水泥基复合材料的一种新的优质高活性掺合料, 它可改善混凝土一系列的物理力学性能。因此硅灰混凝土的应用日益扩大, 一个研究和开发掺灰混凝土的热潮正方兴未艾。目前的主要问题之一是, 硅灰资源开发利用不平衡。一方面仅有若干大的硅铁合

金厂在进行硅灰回收,致使硅灰供不应求;另一方面,还有大量硅铁合金厂的硅灰尚未回收利用,任其排放到大气中,不仅造成很大的资源浪费,而且还污染环境。问题之二是,室内试验研究多,而工程实际应用尚处在起步阶段,这和硅灰供不应求也有密切关系。因此,为使充分发挥硅灰的潜在能量,建议有关部门重视硅灰的回收开发利用,并制订相应的质量标准;加强硅灰混凝土的应用试点,以使现有科研成果更快转化为生产力。第三个问题是,由于硅灰混凝土的开发利用,在国际上也不过只近十年的历史,我国还要短些,因此,下列问题还需深入研究:硅灰混凝土的长期强度特性和耐久性;硅灰掺量超过15%以后混凝土的抗冻性;W/C很低时,掺和不掺引气剂的硅灰混凝土的抗冻性;硅灰混凝土在化冻盐下的防锈蚀问题;掺硅灰的混合水泥混凝土的性能;硅灰混凝土的抗硫酸盐侵蚀;硅灰在抑制碱-骨料反应上的作用;以及有关硅灰的装卸、贮运,和对健康的危害等。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院混凝土研究所主编,混凝土实用手册,北京,中国建筑工业出版社,1987年,第114—118页
- [2] ACI Committee 226, *Sillica Fume in Concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 2, Mar.—Apr., 1987, PP.158—186
- [3] 周广德,硅灰的特性与应用,混凝土与加筋混凝土,1987年,第3期
- [4] 沈以静、张翰声,冷凝硅粉在混凝土中的应用,西北水电技术,1988年,第3期
- [5] 林宝玉等,漫湾水电站抗磨蚀硅粉混凝土配方设计与试验研究,南京水利科学研究院材料结构研究所、水电部昆明勘测设计院科研所,1988年4月
- [6] 张敏虹,硅粉及其混凝土的性能,上海建筑科技,1985年,第2期
- [7] 傅雁等,硅粉混凝土的特性及其微结构,新型建筑材料,1987年,第3期
- [8] 缪昌文,活性硅灰对混凝土性能的影响,江苏省建筑科学研究院,1989年9月
- [9] 孙景进,硅粉混凝土的性质及其在水利水电工程中的应用,水力发电,1987年,第12期
- [10] 惠荣炎、黄国兴,硅粉混凝土性能的试验研究,水利水电技术,1988年,第2期
- [11] 范沈抚,高强硅粉混凝土的抗冻性及气泡结构性能的研究,水利水电科学研究院结构研究所,1989年9月
- [12] 黄国兴,硅粉混凝土的特性及应用综述,混凝土建筑物及修补,1989年,第1期
- [13] 林宝玉等,高强抗磨蚀硅灰混凝土的研究和应用,南京水利科学研究院,1989年,1月
- [14] 卢安琪等,新型耐久港工混凝土——硅粉混凝土研究报告,南京水利科学研究院材料结构研究所,1989年2月
- [15] 关礼杰,火山灰掺合料的若干基本问题,混凝土及加筋混凝土,1987年,第5期
- [16] 刘晓燕编译,硅灰水泥提高强度的机理,混凝土及加筋混凝土,1988年,第4期
- [17] 陈志源等,硅灰对水泥浆及水泥浆-集料界面的作用,混凝土及水泥制品,1985年,第3期
- [18] 林宝玉、徐鹏飞,硅粉、粉煤灰双掺混凝土在范厝水电站水轮机蜗壳混凝土的应用,南京水利科学研究院材料结构研究所、水电部闽江水电工程局科研所,1988年,3月
- [19] 林宝玉等,硅粉混凝土与硅粉钢纤维混凝土在映秀湾水电站拦河闸上的试验与应用,南京水利科学研究院材料结构研究所、映秀湾发电厂,1989年,8月
- [20] 林宝玉等,超早强及早强硅粉混凝土在仪征化纤公路工程中的研究和应用,南京水利科学研究院材结所、仪征化纤工业联合公司基建处,1989年,2月