

掺无机纤维钢渣胶凝材料的理化特性分析

邓侃, 刘家祥, 涂 昆, 柳 倩

(北京化工大学材料电化学过程与技术北京市重点实验室, 化工资源有效利用国家重点实验室, 北京, 100029)

摘要:本文研究了玻纤和矿纤分别掺入钢渣、水泥复合胶凝材料时对胶砂强度和膨胀性的影响。结果表明随着钢渣掺量的提高, 各龄期胶砂强度下降; 随着纤维掺量的提高, 胶砂试件各龄期强度下降, 相比纤维掺量为0时, 玻纤掺量为0.1%、0.5%时, 28 d抗压强度分别提高2.36%、降低10.6%, 矿纤掺量为0.1%、0.5%时, 28 d抗压强度分别提高7.4%、降低17.2%。沸煮和压蒸试验结果表明, 钢渣与水泥配比相同时, 玻纤掺量高的试件其压蒸膨胀率低; 掺入质量分数0.3%的6 mm玻纤时, 试件压蒸膨胀率比纤维掺量为0时降低18.87%; 掺入混合玻纤的试件其压蒸膨胀率较单掺时低。SEM显示, 随着水化的进行, 纤维表面生长C-S-H凝胶以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体, 纤维与基体的粘结程度提高, 矿纤与基体的表面粘结程度较玻纤高。

关键词:钢渣; 无机纤维; 胶砂强度; 压蒸; 膨胀性

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2015.01.017

中图分类号:TD989 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2015)01-0073-08

钢渣是钢铁冶炼的重要副产物之一, 其产生量为粗钢产量的10%~15%^[1]。2013年我国产生钢渣10,127万t, 而综合利用率仅为30%^[2], 大量的钢渣堆积不仅占用土地资源, 还造成对环境的污染和破坏, “十二五”规划提出了钢铁渣集约化、规模化综合利用的目标, 合理利用钢渣资源意义重大。

我国钢渣的利用途径主要有两种, 一是作为烧结助熔剂和造渣料^[3], 二是用于建筑建材行业。钢渣中含有50%以上的硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S), 其矿物相组成与硅酸盐水泥熟料相似^[4-5], 具有潜在的水硬性, 其颗粒级配、磨耗率等物理力学指标与普通花岗岩、玄武岩碎石相当^[6], 利用价值很高。但钢渣存在膨胀性问题, 由于经过1600℃以上的高温煅烧, 钢渣中生成结构致密、晶粒粗大的游离氧化物(f-CaO 、 f-MgO 及RO相)^[7-8], 这些成分经过90 d甚至更长时间才开始水化生成氢氧化物, 发生体积

膨胀^[9-10], 引起开裂, 导致掺钢渣的水泥制品长期稳定性差, 制约了钢渣的应用。

水泥等胶凝材料中掺入纤维可以提高抗开裂性能^[11-12], 如钢纤维、碳纤维、耐碱玻璃纤维(玻纤)、玄武岩矿物纤维(矿纤)、聚合物纤维等^[13-14]。玻纤和矿纤具有耐碱性, 与水泥适应性好, 且成本低, 来源广, 本文选择玻纤和矿纤作为实验材料。钢渣胶凝材料中掺入低体积分数(<1%)的纤维时, 可以抑制体积膨胀和微裂纹的扩展。但纤维的掺入使砂浆流动性变差^[15], 降低试件早期强度, 因此需要综合评价纤维所起的作用。

目前有关利用纤维来抑制钢渣中体积膨胀的文献报道较少。本文旨在研究玻纤和矿纤的掺入对钢渣胶凝材料的力学性能和膨胀性的影响, 通过胶砂试验研究纤维对胶砂强度的影响, 通过沸煮和压蒸试验研究纤维对钢渣体积膨胀的影响, 通过SEM观

收稿日期:2014-06-30

基金项目:国家自然科学基金(51174011)

作者简介:邓侃(1986-), 男, 硕士研究生。

察纤维在基体中的分布及界面粘结程度。

1 试 验

1.1 原材料

新余热闷钢渣,主要化学成分见表 1。经 XRD 分析钢渣的主要矿物组成有: C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 、RO 相(CaO - MgO - FeO - MnO 固溶体)。采用乙二醇-TG 法^[16]测得钢渣中 f- CaO 的含量为 0.936%,按 GB/T 8074—2008《水泥比表面积测定方法(勃氏法)》测得钢渣粉比表面积 $423.36\text{ m}^2/\text{kg}$;基准水泥,28 d 抗折和抗压强度分别为 9.5 MPa、54 MPa;厦门艾思欧标准砂;浙江安捷复合材料有限公司的玻纤和矿纤的主要化学成分和主要性能指标见表 2、3。

表 1 钢渣的主要化学成分/%

Table 1 The main chemical composition of steel slag

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	P ₂ O ₅
41.35	11.04	1.35	12.69	12.74	8.62	<8

表 2 玻纤和矿纤的主要化学成分/%

Table 2 The main chemical composition of alkali-resistant glass fiber and mineral fiber

成分	SiO ₂	ZrO ₂	Na ₂ O	CaO+ MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
玻纤	60.1	16.7	10.4	5.0	0.3	6.0	-
矿纤	52.72	-	3.02	14.67	16.13	1.30	7.84

表 3 玻纤和矿纤的主要性能指标

Table 3 The main performance indexes of alkali-resistant glass fiber and mineral fiber

性能 指标	单丝直径/ μm	纤维长度/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa
玻纤	14	3/6/12	2.60	3 100~3 800	76~78
矿纤	10~18	6	2.63	4 100~4 500	90~110

1.2 试验仪器

试验所用主要仪器和设备见表 4。

表 4 试验仪器与设备

Table 4 Instruments and equipments

名称	规格或型号	生产厂家
水泥净浆搅拌机	NJ-160B	无锡建材试验仪器厂
水泥胶砂搅拌机	JJ-5	无锡建材试验仪器厂

标准恒温恒湿养护箱	YB-40B	北京中路仪科技发展公司
水泥恒温养护水箱	SBY-64	
全自动抗压抗折一体机	DYE-300	无锡建材试验仪器厂
沸煮箱	FZ-31A	上海东星建材试验设备公司
比长仪	BC-300	天津市建仪试验仪器厂
百分表		汉中万目机电有限责任公司
雷氏夹测定仪	LD-50	上虞市冲压筛具厂
水泥安定性试验压蒸釜	YZF-2A	无锡市锡东建材设备厂

1.3 试验方法

按 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》进行胶砂试验;掺入不同质量分数的玻纤或矿纤,测试胶砂试件各龄期抗折和抗压强度;按 GB/T 750—1992《水泥压蒸安定性试验方法》进行沸煮和压蒸试验,研究玻纤和矿纤分别对钢渣胶凝材料体积膨胀的抑制作用。

2 结果与讨论

2.1 不同钢渣掺量的胶砂试件强度分析

将钢渣与水泥复掺,钢渣质量分数为 0%、10%、20%、30%、40%、50%,胶砂试验水胶比为 0.5,分别制备胶砂试件,测试各龄期抗折和抗压强度,绘制胶砂强度-钢渣掺量曲线图,见图 1、2。

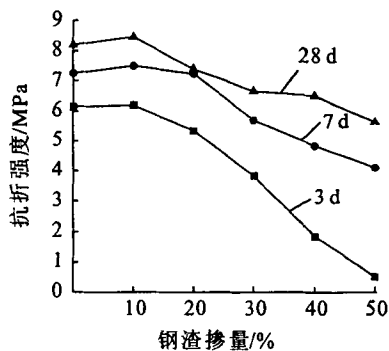


图 1 不同钢渣掺量的胶砂试件各龄期抗折强度

Fig. 1 Flexural strength of mortar specimens with different steel slag mixing amounts

钢渣掺量为 10% 时,各龄期强度比钢渣掺量为 0 时有所提高,钢渣掺量为 20% 时,3 d、28 d 抗折强度分别下降 13.2%、9.6%,3 d、7 d 抗压强度分别下降 23.5%、10.4%,28 d 抗压强度提高 8%,这是因

为钢渣掺量低时,钢渣中的微小颗粒起到填充砂浆中的孔隙和改善界面过渡区的作用^[17],钢渣早期水化程度低,只起到细集料填充作用,水化后期,钢渣潜在水硬性得到激发,试件的强度提高。钢渣掺量为30%时,28 d抗压强度相比钢渣掺量为0时仍有提高,继续增加钢渣掺量,钢渣的细集料填充作用无法弥补胶凝活性差带来的强度损失。如钢渣掺量为50%时,3 d抗折、抗压强度相比钢渣掺量为0时分别下降94.24%、91.5%。

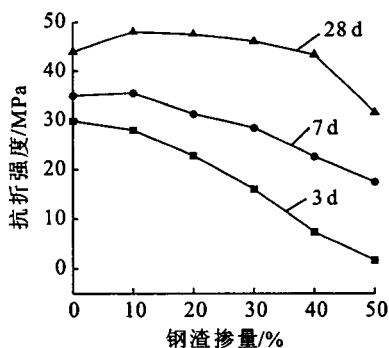


图2 不同钢渣掺量的胶砂试件各龄期抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of mortar specimens with different steel slag mixing amounts

2.2 钢渣掺量为30%时纤维对胶砂强度的影响

2.2.1 掺30%钢渣时6 mm玻纤对胶砂强度的影响

将6 mm玻纤按砂浆(450 g胶凝材料、1 350 g标准砂和225 mL水)总质量的0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%掺入钢渣掺量为30%的胶凝材料中,进行胶砂试验,胶砂强度-玻纤掺量曲线见图3、4。

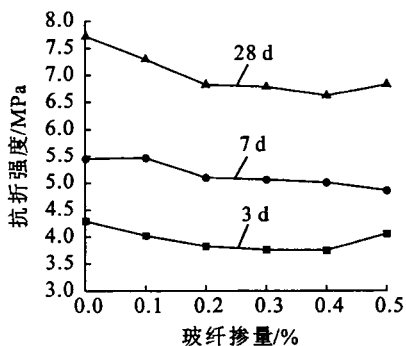


图3 掺30%钢渣时不同玻纤掺量的胶砂试件抗折强度

Fig. 3 Flexural strength of 30% wt steel slag mortar specimens with different glass fiber mixing amounts

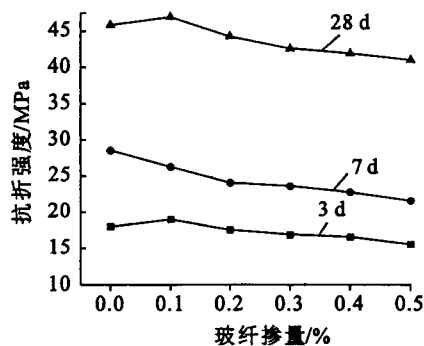


图4 掺30%钢渣时不同玻纤掺量的胶砂试件抗折强度

Fig. 4 Compressive strength of 30% wt steel slag mortar specimens with different glass fiber mixing amounts

3 d时,抗折试验试件断面处,可观察到玻纤被拔出基体,28 d时,除部分分散不均呈团簇状的玻纤外,其余均随基体断裂,说明随着龄期的增长,玻纤与基体的界面粘结程度提高。

玻纤掺量为0.1%时,试件3 d、28 d抗折强度分别下降6.3%、5.6%,3 d、28 d抗压强度分别提高5.2%、2.36%。其原因是水泥的含量较高,早期水化产物较多,玻纤掺量低时,对试件强度影响较小。玻纤掺量为0.3%时,3 d、28 d抗折强度分别下降12.2%、12.1%,3 d、28 d抗压强度分别下降6.2%、7.2%。其原因是单位体积内纤维分布的数量增加,破坏了基体的密实性,同时可能在加工过程中夹带空气^[18],增加基体的孔隙率,使试件的强度下降。玻纤掺量为0.5%时,3 d、28 d抗折强度提高,抗压强度则发生较大幅度的下降。

2.2.2 掺30%钢渣时6 mm矿纤对胶砂强度的影响

将6 mm矿纤按砂浆总质量的0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%与30%钢渣掺量的胶凝材料复掺,进行胶砂试验,其胶砂强度-矿纤掺量曲线见图5、6。

随着矿纤掺量的增加,早期胶砂强度下降。由于矿纤与基体的界面粘结程度较玻纤高,当矿纤掺量为0.5%时,早期抗折强度提高,但大量的矿纤相互缠结,因而后期抗折强度持续下降。矿纤掺量为0.1%、0.2%时,28 d抗压强度提高分别7.3%、

3.8%, 矿纤掺量为 0.3% 时, 28 d 抗压强度开始下降, 说明矿纤适量时, 在基体中分散均匀, 且与基体粘结紧密, 后期抗压强度提高。当掺量过高时, 大量团簇和缠结的矿纤造成胶砂强度的下降。

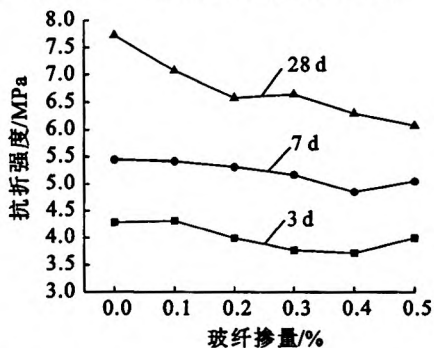


图 5 掺钢渣 30% 时不同矿纤掺量的胶砂试件抗折强度

Fig. 5 Flexural strength of 30% wt steel slag mortar specimens with different mineral fiber mixing amounts

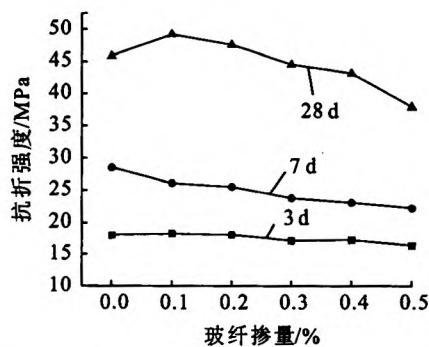


图 6 掺钢渣 30% 时不同矿纤掺量的胶砂试件抗压强度

Fig. 6 Compressive strength of 30% wt steel slag mortar specimens with different mineral fiber mixing amounts

2.2.3 掺 30% 钢渣时不同长度和不同种类纤维对胶砂强度的影响

长纤维与基体的接触面积较短纤维大, 界面粘结程度高, 对胶砂试件抗折强度的影响小, 但长纤维容易发生缠结, 分散性较短纤维差。将不同长度的玻纤(本试验所用玻纤直径均相同)混合掺入胶凝材料时, 可以减少因长玻纤掺量高引起的缠结。

将不同长度和种类的纤维按砂浆质量分数的 0.3% 分别掺入钢渣掺量为 30% 的钢渣、水泥复合胶凝材料中, 其中: 试验 1、2、3 分别单掺 3 mm、6

mm、12 mm 玻纤, 4 为 3 mm 玻纤与 12 mm 玻纤按 1:1 混合掺入; 5、6 分别掺入 6 mm 矿纤、12 mm 矿纤。测试各龄期胶砂强度, 结果见图 7、8。

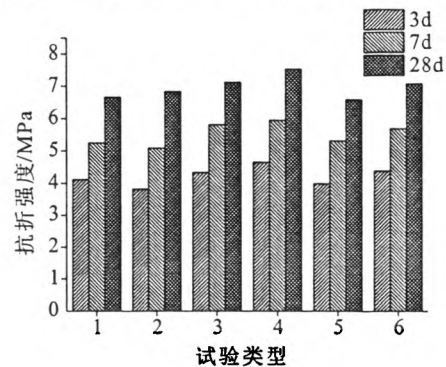


图 7 掺不同长度和种类纤维的胶砂试件抗折强度

Fig. 7 Histogram of flexural strength of mortar specimens with different lengths and species fibers

相同掺量时, 掺 12 mm 的玻纤或矿纤, 试件各龄期抗折强度均比掺 3 mm 玻纤、6 mm 玻纤或 6 mm 矿纤时高, 抗压强度相差不大; 3 mm 玻纤与 12 mm 玻纤混合掺入的试件其 3 d、7 d、28 d 抗折强度比掺 6 mm 玻纤时分别提高 21.4%、16.8%、10.2%, 3 d、7 d、28 d 抗压强度分别提高 17.1%、16.6%、8.9%。掺 6 mm 矿纤的试件 3 d 抗折、抗压强度分别比掺 6 mm 玻纤的试件高 4.2%、3.3%, 28 d 抗折、抗压强度分别下降 3.7%、7.6%, 其原因是水化早期矿纤与基体的界面粘结程度较玻纤高。玻纤因分散性较矿纤好, 水化后期掺玻纤的试件强度较掺矿纤时高。

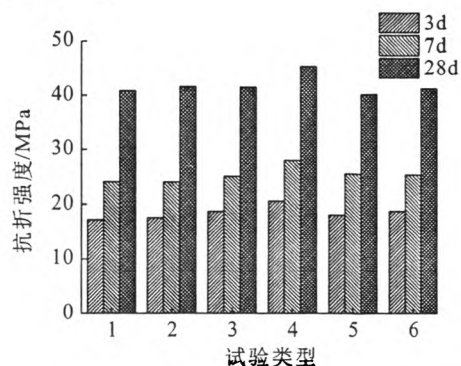


图 8 掺不同长度和种类纤维的胶砂试件抗压强度

Fig. 8 Histogram of compressive strength of mortar specimens with different lengths and species fibers

2.3 沸煮和压蒸试验

2.3.1 钢渣掺量不同时沸煮和压蒸试验

称取三组各 800 g 钢渣、水泥复合胶凝材料(配比分别为 3:7、4:6、5:5),进行沸煮和压蒸试验。测量试件初始长度,将试件放入沸煮箱中沸煮 3 h,冷却至室温后测定沸煮膨胀值,将压蒸试件放入压蒸釜内,在压力 2 MPa、237℃ 饱和蒸汽下压蒸 3 h,冷却至室温后取出试件,测量终长,记录试验数据,见表 5、6。

表 5 雷氏夹沸煮试验结果

Table 5 Results of boiling test				
钢渣与水泥比例	试验编号	沸煮前指针 间距/mm	沸煮后指针 间距/mm	平均膨胀 值/mm
3:7	1-1	9.0	10.5	1.5
	1-2	11.0	12.5	
4:6	2-1	10.0	11.0	1.25
	2-2	11.0	12.5	
5:5	3-1	10.0	11.0	1.0
	3-2	11.0	12.0	

由表 5 可知,每组试验两个试件沸煮后的平均膨胀值均不大于 5 mm,即雷氏沸煮试验合格。

表 6 压蒸试验结果

Table 6 Results of autoclave test				
钢渣与水泥比例	试验编号	脱模后初长 读数/mm	压蒸后长度 读数/mm	压蒸膨胀 率/%
3:7	1-1	1.102	1.606	0.202
	1-2	1.780	2.289	0.204
4:6	2-1	0.592	1.261	0.268
	2-2	0.519	1.177	0.263
5:5	3-1	3.341	4.050	0.284
	3-2	1.991	2.697	0.282

试件压蒸膨胀率按式(1)计算

$$L_A = \frac{L_1 - L_0}{L} \times 100\% \tag{1}$$

其中: L_A 为试件压蒸膨胀率,%; L 为试件有效长度,250 mm; L_0 为试件脱模后初长读数,mm; L_1 为试件压蒸后的长度读数,mm。

由表 6 中数据可知,三组试验的压蒸膨胀率分别为 0.203%、0.265%、0.283%。因此,钢渣掺量越高,压蒸膨胀率越高。

2.3.2 掺不同纤维时沸煮和压蒸试验

表 7 雷氏夹沸煮试验结果

Table 7 Results of boiling test				
试验项目	试验编号	沸煮前指针 间距/mm	沸煮后指针 间距/mm	平均膨胀 值/mm
6 mm 玻纤 (0.2%)	4-1	12.5	14.0	1.75
	4-2	11.0	13.0	
3 mm 玻纤 (0.3%)	5-1	10.0	11.5	1.25
	5-2	10.5	12.5	
6 mm 玻纤 (0.3%)	6-1	10.5	12.0	1.75
	6-2	8.5	10.5	
12 mm 玻纤 (0.3%)	7-1	7.5	9.0	1.5
	7-2	9.0	10.5	
混合玻纤 (0.3%)	8-1	6.5	8.0	1.5
	8-2	8.5	10.0	
6 mm 矿纤 (0.3%)	9-1	10.0	12.0	2.0
	9-2	10.0	12.0	
12 mm 矿纤 (0.3%)	10-1	10.5	12.0	1.25
	10-2	13.0	14.0	

称取 7 组各 800 g 胶凝材料(钢渣与水泥比例 3:7),分别掺入胶凝材料和水总质量 0.2% 的 6 mm 玻纤、0.3% 的 3 mm 玻纤、6 mm 玻纤、12 mm 玻纤、3 mm 与 12 mm 混合玻纤(1:1)、6 mm 矿纤、12 mm 矿纤,按上述方法制备沸煮试件和压蒸试件,进行沸煮和压蒸试验,试验数据见表 7、8。

表 8 压蒸试验结果

Table 8 Results of autoclave test				
试验项目	试验编号	试件脱模后 初长/mm	试件压蒸后 长度/mm	试件压蒸 膨胀率/%
6 mm 玻纤 (0.2%)	4-1	2.045	2.659	0.246
	4-2	0.949	1.550	0.240
3 mm 玻纤 (0.3%)	5-1	0.215	0.751	0.214
	5-2	1.399	1.940	0.216
6 mm 玻纤 (0.3%)	6-1	1.611	2.148	0.215
	6-2	0.168	0.708	0.216
12 mm 玻纤 (0.3%)	7-1	2.651	3.202	0.220
	7-2	0.718	1.271	0.221
混合玻纤 (0.3%)	8-1	2.665	3.198	0.213
	8-2	0.639	1.140	0.200
6 mm 矿纤 (0.3%)	9-1	1.602	3.185	0.214
	9-2	1.940	2.236	0.222
12 mm 矿纤 (0.3%)	10-1	2.649	2.174	0.229
	10-2	1.680	2.509	0.228

由表 7 的数据可知,每组试验的两个试件平均

膨胀值均不大于 5 mm,则雷氏沸煮试验合格。

由表 8 的数据可知,掺入一定质量分数的纤维,试件的压蒸膨胀率比不掺纤维时低,如钢渣与水泥配比为 4:6 时,不掺纤维的试件其压蒸膨胀率为 0.265%,掺入质量分数 0.3% 的 6 mm 玻纤时,试件压蒸膨胀率为 0.215%,降低 18.87%。钢渣与水泥的配比相同时,同种类型玻纤掺量高的试件其压蒸膨胀率低,掺 0.3% 的 6 mm 玻纤试件比掺 0.2% 的 6 mm 玻纤试件压蒸膨胀率下降 11.32%。掺 3mm 玻纤试件与掺 6 mm 玻纤试件的压蒸膨胀率接近,掺 12 mm 玻纤的试件其压蒸膨胀率比前二者高 2% 左右,其原因可能是长玻纤较难分散,在净浆拌制时缠结。掺入 3 mm 和 12 mm 混合玻纤的试件其压蒸膨胀率为 0.206%,较单掺 3 mm、6 mm、12 mm 玻纤时分别低 4.19%、4.63%、6.36%。

掺矿纤的试件其压蒸膨胀率比掺玻纤时高。矿纤长度越长,越容易发生缠结,掺 12 mm 矿纤的试件压蒸膨胀率比掺 6 mm 矿纤时高 4.82%。

2.4 水化产物 SEM 分析

水化早期, C_3S 或 C_2S 水化形成 C-S-H 胶体颗粒,并逐渐形成 C-S-H 凝胶。C-S-H 凝胶有多种形貌,见图 9,为钢渣胶凝材料(钢渣与水泥比例 3:7)3 d 时的一种珊瑚状 C-S-H 凝胶。

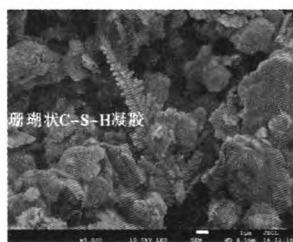


图 9 3d 时生成的 C-S-H 凝胶

Fig. 9 C-S-H gels of 3d hydration curing age

早期水化体系中,溶液中的 $Ca(OH)_2$ 浓度达到饱和,则以六方板状晶体析出,图 10 中可看到水化早期生成的 $Ca(OH)_2$ 晶体存在空隙,结构疏松。

图 11 为水化早期断裂面表面的微裂纹。这些微裂纹是由水化早期浆体自身干缩或受到外力作用时形成的,或是钢渣中游离氧化物在硬化浆体中发

生水化膨胀而形成的。纤维的掺入一方面起到阻止裂纹扩展和改变发展方向的作用,另一方面,起到承载应力的作用。

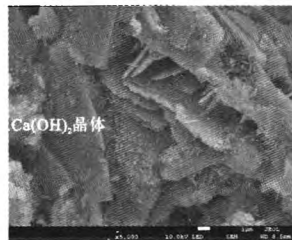


图 10 3d 时生成的 $Ca(OH)_2$ 晶体

Fig. 10 $Ca(OH)_2$ crystals of 3d hydration curing age

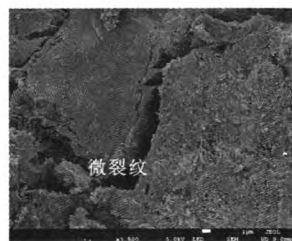


图 11 水化早期硬化浆体表面的微裂纹

Fig. 11 Microcrack on the hardened paste surface

因玻纤与基体的成分及形态相差大,水化早期玻纤与基体相互分离。图 12 为 3 d 时玻纤表面附着少量 C-S-H 凝胶,与基体粘结程度差。

图 13 为水化后期的水化产物。 $Ca(OH)_2$ 随着龄期的增长定向生长;C-S-H 凝胶穿插生长在晶体或未水化完全的颗粒的间隙,增加基体的密实性,提高基体的强度;水化体系中,饱和 $Ca(OH)_2$ 溶液中, C_3A 与 $Ca(OH)_2$ 反应,生成 AFt 针状晶体。AFt 与原料中的水泥中掺入的石膏发生反应,生成片层状 AFm,见图 14。

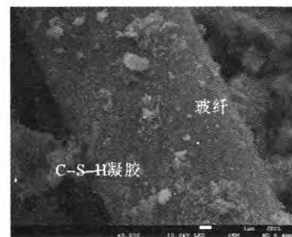


图 12 3 d 时玻纤表面形貌

Fig. 12 Glass fiber's surface of 3d hydration curing age

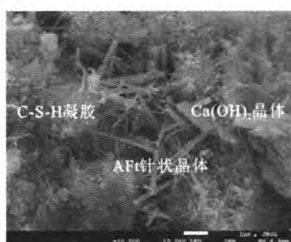


图13 水化后期水化产物

Fig. 13 Hydration products of late hydration curing age

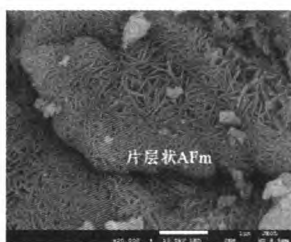
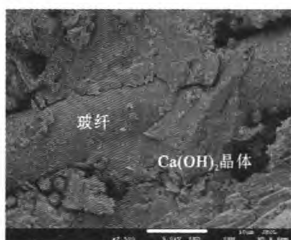
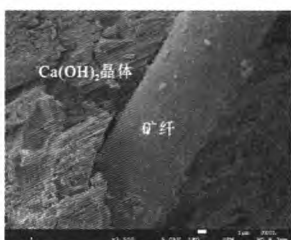


图14 片层状单硫型水化硫铝酸钙(AFm)

Fig. 14 Lamellar structure AFm

水化后期, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在纤维表面定向生长,纤维与基体的界面粘结程度提高。图15为玻纤表面生长的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体。由于矿纤与基体的化学成分类似,因而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体容易附着在矿纤表面生长,见图16。

图15 28 d时玻纤表面覆盖 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体Fig. 15 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystals on glass fibers surface of 28 d hydration curing age图16 28 d时矿纤表面 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体生长情况Fig. 16 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystals on mineral fibers surface of 28 d hydration curing age

3 结 论

(1)随着钢渣掺量的提高,胶砂强度下降。钢渣掺量为10%时,钢渣中的微小颗粒起到填充砂浆中的孔隙和改善界面过渡区的作用,胶砂试件各龄期强度相比钢渣掺量为0时小幅度提高,钢渣掺量为30%时,28 d抗压强度提高4.8%。

(2)随着纤维掺量的提高,胶砂试件各龄期强度降低。如掺入0.1%的玻纤时,3 d、28 d抗压强度相比纤维掺量为0时分别提高5.2%、2.36%。玻纤掺量为0.3%时,3 d、28 d抗压强度分别降低11.6%、3.5%,继续增加纤维掺量,则因为纤维破坏了硬化浆体的密实性,导致强度下降。掺不同长度混合玻纤的胶砂试件其抗折和抗压强度均高于同掺量单种玻纤的胶砂试件;相同长度和掺量时,掺矿纤的胶砂试件早期强度比掺玻纤时高。

(3)钢渣与水泥的配比相同时,玻纤掺量高的试件其压蒸膨胀率低。掺入3 mm和12 mm混合玻纤的试件其压蒸膨胀率较单掺3 mm、6 mm、12 mm玻纤时低,长纤维和短纤维混合掺入时,可以减少因长玻纤掺量高引起的缠结。矿纤由于容易发生缠结,掺矿纤的试件其压蒸膨胀率较掺玻纤时高。

(4)水化早期玻纤和矿纤表面附着的水化产物少,纤维与基体相互分离,导致掺纤维的胶砂试件早期强度低;随着水化的进行,纤维表面生长C-S-H凝胶以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,纤维与基体的粘结程度提高,胶砂试件的强度能达到不掺纤维时的水平。矿纤因与基体化学成分相似,其与基体的界面粘结程度较玻纤高。

参考文献:

- [1] 张慧宁,徐安军,崔健. 钢渣循环利用研究现状及发展趋势[J]. 炼钢,2012,6(28):74-77.
- [2] 中国废钢铁应用协会冶金渣开发利用工作委员会. 2013钢铁渣综合利用情况[J]. 中国废钢铁,2014,(1):21.
- [3] 王雄. 钢渣的回收与利用[J]. 武钢技术,2006,5(44):51-54.
- [4] 李建新. 高温重构对钢渣组成、结构与性能影响的研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.

- [5] 侯贵华,李伟峰,郭伟. 转炉钢渣的显微形貌及矿物相[J]. 硅酸盐学报,2008,(4):437-443.
- [6] 伦云霞,周明凯,陈美祝. 钢渣集料的体积稳定性与工程应用前景[J]. 矿业快报,2006,442:37-40.
- [7] George Wang, Yuhong Wang, Zhili Gao. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 184: 555-560.
- [8] Zaibo Li, Sanyin Zhao, Xuguang Zhao, Tusheng He. Cementitious property modification of basic oxygen furnace steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 575-579.
- [9] 张光明,连芳. 钢渣中的 f-CaO 及稳定化处理的研究进展[J]. 矿物学报,2012,(1):203-204.
- [10] 高博,李灿华. 钢渣膨胀机理及抑制方法的研究[J]. 中国废钢铁,2011,4(2):28-31.
- [11] Francisco J. De Caso y Basalo, Fabio Matta, Antonio Nanni. Fiber reinforced cement-based composite system for concrete confinement[J]. Construction and Building Materials, 2012, 32: 55-65.
- [12] P. Mehta, Paulo J. M. Monteiro. concrete microstructure, properties and materials [M]. McGraw-Hill: New York, 2006.
- [13] 崔玉忠. 玻璃纤维增强水泥的发展现状与前景[J]. 玻璃纤维,1999(1):22-26.
- [14] Jongsung Sim, Cheolwoo Park, Do Young Moon. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. Composites: Part B[J]. 2005, 36: 504 - 512.
- [15] 李继业. 新型混凝土技术与施工工艺[M]. 中国建材工业出版社:北京,2002.
- [16] 王博,刘家祥,罗珣. 乙二醇-TG 法测定钢渣中的游离氧化钙[J]. 北京化工大学学报,2011,38(2):17-21.
- [17] 王强. 钢渣的胶凝性能及在复合胶凝材料水硬化化过程中的作用[D]. 北京:清华大学,2010.
- [18] 陈祥宝. 复合材料在建筑工业上的应用[J]. 纤维复合材料. 1996,(4):42-45.

Analysis of Physical and Chemical Properties of Steel Slag Cementitious Materials with Inorganic Fibers

Deng Kan, Liu Jiexiang, Tu Kun, Liu Qian

(Beijing Key Laboratory of Electrochemical Process and Technology for Materials, The State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China)

Abstract: This paper studied the effects of glass fiber or mineral fiber mixed with steel slag cementitious composites on mechanical properties and volume expansion of mortar specimens. The mortar strength decreased as steel slag increased. As the glass fiber content kept increasing, each hydration curing age strength dropped. The 28d compressive strength increased by 2.36% while adding 0.1% wt glass fiber, and decreased by 10.6% while adding 0.5% wt glass fiber. When adding 0.1% wt and 0.5% wt mineral fiber, the 28d compressive strength increased by 7.4% and decreased by 17.2%, respectively. According to autoclave test, the higher glass fiber content, the lower expansion rate. The expansion rate decreased by 18.87% while adding 0.3% wt 6 mm glass fiber, it also decreased while adding mixed glass fiber. SEM results showed that C-S-H gels and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystals produced on the surface of fibers with hydration, and the interfacial adhesion bonded closely. The adhesion between basalt fiber and paste was better than that between glass fiber and paste.

Keywords: Steel slag; Inorganic fibers; Mortar strength; Autoclave; Volume expansion