

## 废玻璃用于水泥混凝土的研究进展

柯国军<sup>1</sup>, 柏纪平<sup>2</sup>, 谭大维<sup>3</sup>

(1. 南华大学 城市建设学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 英国格拉摩根大学 土木工程学院, 英国 盘提普里夫;  
3. 英国伦敦南岸大学 工程、科学与建筑环境学院, 英国 伦敦)

**摘要:** 废玻璃排放量非常大, 其再利用可以节约资源、降低能耗和减少污染。将废玻璃用于生产水泥混凝土是废玻璃再利用重要手段之一, 发达国家已开展过大量相关研究, 并取得可用于实践的研究成果, 而中国这方面的研究较滞后, 随着中国经济的快速发展, 开发适用于中国的废玻璃水泥混凝土技术是必由之路。本文回顾与总结了废玻璃水泥混凝土主要研究内容与成果, 认为废玻璃能以粉料、细骨料和粗骨料三种形式掺入混凝土中, 一定细度的玻璃粉不会产生碱骨料反应 (ASR) 膨胀危害, 其应用最为安全, 其它两种形式通过采取抑制 ASR 措施也可以安全使用。

**关键词:** 废玻璃; 再利用; 混凝土; 砂浆

**中图分类号:** TU 528 45      **文献标识码:** A

## A Review on the Reuse of Waste Glasses in the Cement Concrete

KE Guo-jun<sup>1</sup>, BAI Ji-ping<sup>2</sup>, TAN Da-wei<sup>3</sup>

(1. School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;  
2. Department of Engineering, University of Glamorgan, Pontypridd, CF37 1 DL, UK; 3. Faculty of Engineering Science and the Built Environment, London South Bank University, London SE1 6LN, UK)

**Abstract** The recycling and reuse of waste glasses can contribute to the conservation of natural resources, reduction of energy consumption and avoidance of contaminations. A lot of research has been carried out to investigate the utilization of waste glasses in concrete worldwide and great progress has been made on practical applications of waste glasses in concrete. With rapid economical development, in particular the enormous development of construction industry in China, more and more waste glasses are produced. Therefore the exploration of reuse of waste glasses in China needs to be fully considered. This paper reviews the current research work on the potential utilization of waste glass in concrete and mortar as grinding powder, fine and coarse aggregates, and presents concerns of ASR and recommends effective measures for safe use of waste glasses.

**Key words** waste glass; reuse; concrete; mortar

城市垃圾中混杂着使用过的玻璃容器、玻璃灯泡、玻璃板和阴极射线管等废玻璃, 在欧美一些发达国家废玻璃量占城市垃圾总量的 4% ~ 8%<sup>[1]</sup>, 中国城市固体废料中有 6% ~ 11% 为废玻璃<sup>[2]</sup>, 据联合国估计, 全球固体废渣中有 7% 为废玻璃<sup>[3]</sup>. 将大量的废玻璃弃之不用, 既占用土地, 又污染环境, 并造成资源和能源的浪费. 在玻璃制造业, 废玻璃的再利用可以降低生产能耗、减少原料消耗, 但要求再利用之前按颜色分选, 同时要去除玻璃上的标签、粘胶及容器内的残留物等杂质, 因而废玻璃常因混色、杂质和价格等方面的原因, 不能顺利地用于生产新玻璃, 其再利用能力是有限的.

将废玻璃用于生产水泥混凝土是处理废玻璃重要手段之一, 废玻璃有适合配制混凝土诸多优点<sup>[4]</sup>, 如有火山灰活性(玻璃粉)、吸水率极低、耐久性高、装饰性好和流动性好; 同时, 前期处理成本相对较低, 因为混凝土对玻璃颜色没有苛刻要求, 允许杂质含量有一定的波动; 另外, 混凝土是大宗土木工程材料, 再利用量大. 所以研究人员一直致力于将废玻璃用于混凝土的可行性研究.

自上世纪 60 年代西方发达国家就开始了用废玻璃渣作混凝土骨料的研究, 但是当时的混凝土均出现了碱骨料反应膨胀破坏现象<sup>[5]</sup>, 这导致废玻璃用于水泥混凝土的研究几乎陷入停滞. 但近二十年来, 由于固体废渣排放收费的增高和公众环境意识的增强, 在西方发达国家开展了新一轮更广泛的将废玻璃用于混凝土的研究热潮<sup>[6]</sup>, 取得了很多可用于实践的研究成果. 而中国这方面的研究较少<sup>[7-9]</sup>, 中国废玻璃利用率目前仅 25% ~ 30%, 而欧洲很多国家废玻璃利用率超过 70%<sup>[10]</sup>, 其中德国和荷兰超过 80%, 瑞士已超过 90%. 随着中国经济持续快速发展, 废玻璃将越来越多, 开发适用于中国的废玻璃水泥混凝土技术是必由之路.

## 1 废玻璃的性质

玻璃是以石英砂、纯碱、长石、石灰石等为主要原料, 经 1550℃ ~ 1600℃ 高温熔融、成型、冷却、固化后得到的透明非晶态无机物. 普通玻璃的化学成分主要是  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及少量  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$  等, 如果在玻璃中加入某些金属氧化物、化合物, 可制成各种特殊性能的玻璃. 玻璃根据化学成分可分为以下几类<sup>[5]</sup>: 硅质玻璃、碱硅酸玻璃、钠钙玻璃、硼硅酸玻璃、铅玻璃、钡玻璃、铝硅酸玻璃等, 最常见的钠钙玻璃化学成分为

$\text{SiO}_2$  66% ~ 75%,  $\text{Na}_2\text{O}$  12% ~ 17%,  $\text{CaO}$  5% ~ 12%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0.7% ~ 7%. 0.15 ~ 5.00 mm 废玻璃吸水率为 0.35% ~ 0.45%, 密度为 2.42 ~ 2.50  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 堆积密度为 1610 ~ 1690  $\text{kg}/\text{m}^3$ . 大颗粒废玻璃渣外形趋于扁平 and 细长<sup>[11]</sup>; 中等废玻璃多为方形或球形, 但最大粒径受原片的厚度限制<sup>[12]</sup>; 玻璃粉主要由薄片状和棱角状颗粒组成<sup>[12-3]</sup>, 其中破碎玻璃粉主要为薄片状且粒径分布范围广, 磨细玻璃粉主要为棱角状且粒径分布范围窄<sup>[12]</sup>. 废玻璃比热为 0.503  $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ , 导热系数为 0.93  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ <sup>[14]</sup>. 玻璃是无定形的硅酸盐材料, 具有火山灰活性潜质.

## 2 废玻璃渣取代骨料对混凝土性能的影响

### 2.1 对和易性的影响

废玻璃渣掺入混凝土中对和易性的影响与再生玻璃的制作方法(破碎或粉磨)、平均粒径及粒径分布等因素有关. 混凝土流动性随废玻璃渣取代细骨料或粗骨料比率的增大而增大<sup>[13-15-16]</sup>, 因为玻璃颗粒光滑的表面能减少内摩擦, 同时结构致密, 吸水率极低.

但是研究者<sup>[3]</sup>用废玻璃渣等量取代 15% ~ 60% 粗骨料, 发现混凝土和易性没有明显改变; 研究者<sup>[17]</sup>用废玻璃渣等量取代 50% 和 100% 细骨料, 发现混凝土产生了严重的泌水离析, 混凝土的塑性性能受到显著改变; 研究者<sup>[18-19]</sup>用废玻璃渣取代混凝土中天然砂, 发现混凝土坍落度随取代率增大而减少.

### 2.2 对力学性能的影响

混凝土抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度随废玻璃渣取代细骨料或粗骨料的比率增大而降低<sup>[3 16 19-21]</sup>, 因为粗颗粒的玻璃活性很低, 短期内与水泥石之间的结合主要为机械啮合; 废玻璃渣光滑的表面会大大减少与水泥石之间的粘结强度; 废玻璃渣中大量的片状颗粒, 在受力时易折断而产生应力集中, 上述因素都会对废玻璃混凝土强度产生不利影响. 研究者<sup>[3]</sup>用废玻璃等量取代 0%、15%、30%、45% 和 60% 粒径 4 ~ 16 mm 粗骨料, 当取代率为 60% 时混凝土抗压强度减少 49%, 因此该研究者认为在不考虑废玻璃碱骨料反应危害的前提下, 废玻璃优先用作代替细骨料, 因为废玻璃渣作细骨料时多为方形球形, 更符合骨料外形要求.

混凝土弹性模量随废玻璃渣取代率增大而降

低<sup>[16,20]</sup>. 研究者<sup>[16]</sup>的结果中废玻璃混凝土弹性模量小于基准混凝土, 而研究者<sup>[20]</sup>的结果中废玻璃混凝土弹性模量大于基准混凝土, 超出值为 19% ~ 39%. 这与研究者所用废玻璃的种类与颗粒级配、混凝土强度等因素有关.

### 2.3 对水化热的影响

研究者<sup>[14]</sup>将绿色、棕色和无色三种废玻璃渣分别 100% 取代混凝土骨料(基准混凝土骨料仅有 0.15~10.0 mm 这一种), 测定三种废玻璃混凝土和基准混凝土内部温度与水化时间关系曲线, 发现所有废玻璃混凝土放热峰大于基准混凝土,

其中绿色废玻璃混凝土放热峰最大(图 1). 该研究者认为这由两个方面原因引起, 一是玻璃比热小于砂、石英和混凝土, 导致混凝土中的水吸收更多的水化热, 加速了水泥水化; 二是细玻璃颗粒有火山灰活性, 其火山灰反应也能产生一定的热量. 另外, 该研究者将上述四种混凝土试件置于 60°C 和 -20°C 环境下测定混凝土试件内部温度变化情况, 试验发现废玻璃混凝土内部升降温速度均低于基准混凝土, 因此认为废玻璃混凝土比基准混凝土有更好的温度稳定性, 适合于冬季施工.

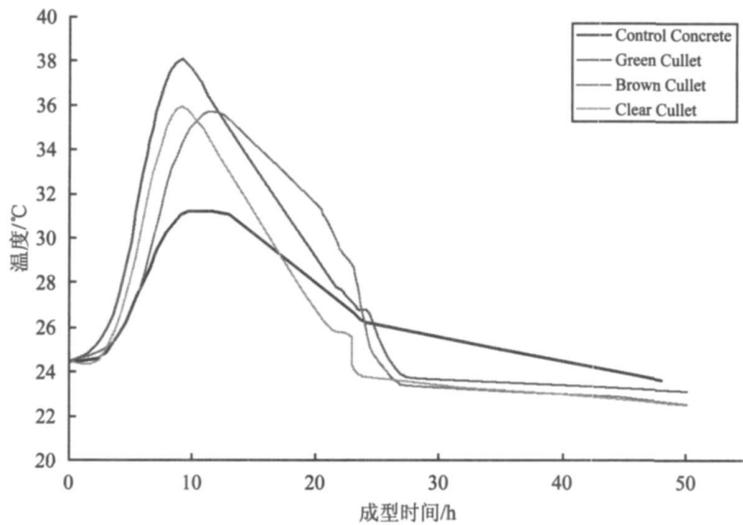


图 1 水化过程中混凝土温度随时间变化关系

Fig 1 Relationship between temperature and time during hydration

### 2.4 对耐久性的影响

废玻璃渣取代混凝土骨料后, 混凝土耐久性增大<sup>[11,13,16,20]</sup>. 研究者<sup>[20]</sup>用液晶显示屏废玻璃渣等量取代 0%、20%、40%、60% 和 80% 细骨料, 硫酸盐侵蚀试验表明, 混凝土质量损失率随取代率增大而减少, 废玻璃混凝土的电阻均大于基准混凝土, 随着龄期的延长, 电阻增加值随取代率的增大而增大, 这表明废玻璃混凝土抗硫酸盐侵蚀能力增强. 另外宏观和微观观测试验发现, 玻璃与水泥石之间界面上有稠密的 C-S-H 凝胶, 这也说明了废玻璃能增强混凝土耐久性.

### 2.5 对耐高温性能的影响

普通玻璃软化点为 600°C ~ 680°C, 在高温作用下, 玻璃颗粒软化、迁移和嵌入到混凝土空隙, 能对混凝土高温性能产生影响. 作者用英国产无色废玻璃瓶渣分别等量取代 0% - 100% 细骨料和粗骨料, 测定 20°C ~ 900°C 温度下混凝土质量

损失率、抗压强度和劈裂抗拉强度变化情况. 研究发现, 废玻璃渣取代混凝土骨料后有益于减缓混凝土受热劣化, 能在混凝土内形成新的固结核心, 废玻璃渣取代粗骨料比取代细骨料更有利于提高混凝土抗高温劣化能力. 研究者<sup>[15]</sup>用废玻璃渣取代 0% ~ 100% 细骨料或粗骨料或粗细骨料, 测定 20°C、60°C、150°C、500°C 和 700°C 温度下混凝土抗压强度, 试验发现, 取代率为 10% 时的废玻璃混凝土, 在 150°C 及以上温度时的强度大于相同温度的基准混凝土强度.

目前, 废玻璃对普通混凝土及高性能混凝土高温性能影响的研究还不多, 有待加强.

## 3 废玻璃引起碱骨料反应 (ASR) 膨胀危害

玻璃是碱硅质熔液在快速冷却下而制得的非晶体材料, 具有火山灰活性潜质, 当早期将废玻璃

渣代替混凝土骨料因产生碱骨料反应 (ASR) 膨胀而使应用失败后, 许多研究者一直致力于研究废玻璃在混凝土中产生 ASR 膨胀破坏规律及防止膨胀的措施。

### 3.1 导致废玻璃发生 ASR 膨胀危害的因素

废玻璃掺入水泥混凝土发生 ASR 与产生 ASR 膨胀危害是两个概念。前者是指废玻璃掺入水泥混凝土中会不会发生碱骨料反应, 由于玻璃具有碱活性, ASR 总会存在, 只不过颗粒大小不同碱骨料反应速度也不一样而已, 颗粒越细反应越快; 后者是指碱骨料反应产物累积与集中达到一定程度引起的破坏, 绝大多数研究者是从这个角度来进行研究。

废玻璃掺入水泥混凝土中是否产生 ASR 膨胀破坏受多种因素的影响, 主要因素有废玻璃的掺量、废玻璃的粒径大小、废玻璃的成分、混凝土中的碱含量和活性骨料的含量等, 这些因素中的一部分或全部共同作用才会发生 ASR 膨胀危害, 目前研究最多的是废玻璃粒径大小和掺量对 ASR 膨胀的影响, 但还没有形成共识性、定量性的结论, ASR 膨胀涉及的因素很多很复杂, 这方面的研究尚不系统与全面。

#### 3.1.1 废玻璃渣掺量

在不磨细不掺 ASR 抑制剂条件下, 对废玻璃渣取代细骨料或粗骨料达到什么样的比率才会发生 ASR 膨胀尚没有量化参数, 但在废玻璃渣掺量与产生 ASR 膨胀大小的趋势上已基本形成共识, 也就是 ASR 膨胀值随玻璃渣掺量增大而增大<sup>[16 22-23]</sup>。例如研究者<sup>[22]</sup>用 25%、50%、75% 和 100% 废玻璃渣分别取代天然砂, 用砂浆棒快速测试方法 (ASIM C1260) 测试砂浆棒膨胀值, 3 天、9 天、14 天和 21 天的膨胀值均随废玻璃取代率增大而增大, 且各配合比膨胀值都超过了标准规定的安全值 (14 天小于 0.1%); 研究者<sup>[23]</sup>用废玻璃渣取代 0%、50% 和 100% 天然砂, 用 ASIM C1260 方法测试砂浆棒 14 天和 28 天膨胀值, 也得到相同的结论。但是研究者<sup>[18]</sup>得到相反的试验结果, 用废玻璃渣取代 0%、10%、15% 和 20% 天然砂, 用 ASIM C1260 方法测试 3 天、7 天、10 天和 14 天砂浆棒膨胀值, 发现膨胀值随废玻璃取代率增大而降低, 且都低于标准规定的安全值。

#### 3.1.2 废玻璃细度

在相同取代率时, 随着废玻璃粒径减少 ASR 膨胀值有减少的趋势, 这种趋势在玻璃粉中表现得

更清晰, 研究者<sup>[24]</sup>用粒径 < 36  $\mu\text{m}$ 、36~50  $\mu\text{m}$  和 50~100  $\mu\text{m}$  等 3 种磨细玻璃粉分别等质量取代 0%、30%、70% 天然砂, 试验表明, 对于同取代率同龄期砂浆棒, 玻璃粉越细膨胀值越小; 研究者<sup>[25]</sup>用粒径 < 38  $\mu\text{m}$ 、38~75  $\mu\text{m}$  和 75~150  $\mu\text{m}$  等 3 种玻璃粉分别等体积取代 30% 普通水泥, 试验表明, 对于同龄期砂浆棒, 玻璃粉越细膨胀值越小。

至于废玻璃粒径小到什么程度才不发生有害的 ASR 膨胀则众说纷纭。研究者<sup>[24]</sup>用 100  $\mu\text{m}$  玻璃粉取代 70% 天然砂配制的砂浆, 没有观测到有害的膨胀, 但又认为废玻璃粉安全粒径以不超过 75  $\mu\text{m}$  为宜; 研究者<sup>[26]</sup>认为, 粒径在 1.18~2.36 mm 之间的玻璃颗粒膨胀性最大, 粒径小于 300  $\mu\text{m}$  时, 膨胀性处在很低的水平; 研究者<sup>[27]</sup>试验发现, 0.9~1 mm 是砂浆棒体积变化的关键临界值, 玻璃粒径在此范围以下时砂浆没有膨胀, 同时作者引述“有些研究结果认为玻璃渣不发生 ASR 膨胀的粒径在 0.6~1.18 mm 以下, 有的认为在 0.15~0.30 mm 以下”; 研究者<sup>[11]</sup>研究认为 0.30 mm 以下的玻璃粉不会引起有害膨胀, 0.6 mm 以上的玻璃会引起有害膨胀, 同时引述“有人认为 1.5 mm 左右玻璃渣会产生过渡膨胀, 而小于 0.25 mm 的玻璃渣不会产生膨胀, 有人发现对于 0.15~4.75 mm 范围的废玻璃, 1.2 mm 左右的废玻璃产生最大的膨胀。”综上所述, 多数研究者倾向于废玻璃安全粒径小于 300  $\mu\text{m}$ 。

#### 3.1.3 废玻璃颜色

玻璃的颜色通常有无色 (白色)、绿色、茶色 (棕色)、蓝色等几种, 是由掺入到玻璃中的金属氧化物、化合物所引起, 目前尚未发现有研究者从废玻璃化学成分微小差异上来研究其应用能力, 但是有少数研究者研究了不同颜色的玻璃对 ASR 膨胀程度的影响。研究者<sup>[22]</sup>用白、绿、蓝三种颜色的玻璃渣等量取代细骨料, 在相同取代率下白玻璃引起的膨胀性最大, 绿玻璃引起的膨胀性最小, 对玻璃进行分色研究没有实用价值, 因为分色意味着提高利用成本, 如果能低成本分色, 把废玻璃用作生产新玻璃会更经济。

#### 3.1.4 混凝土碱含量

混凝土中的碱主要来自于水泥, 也来自外加剂、掺合料、骨料、拌合水等组分。目前研究混凝土中碱含量与废玻璃发生 ASR 膨胀的定量关系的

#### 3.1.5 活性骨料的含量

不多, 但从 ASR 膨胀一般性机理可知, 混凝土中碱含量越低发生 ASR 膨胀可能性越小。

混凝土发生 ASR 膨胀破坏有三个条件, 即碱

活性骨料占骨料总量的比例足够大(通常认为大于1%),含有过量的碱以及潮湿的环境.研究者<sup>[11]</sup>用玻璃粉取代10%~40%含碱量达1.4%的高碱水泥,然后与非活性骨料配制混凝土,试验表明,混凝土580天的膨胀值小于0.02%,也就是说在没有活性骨料存在时玻璃粉不会在混凝土中引起有害膨胀.当然如果废玻璃粒径足够大,掺入混凝土就是活性骨料,只要数量超过一定值就会发生ASR膨胀破坏.

### 3.2 防止废玻璃发生ASR的措施

为了促使废玻璃应用于工程,必须解决废玻璃引起ASR膨胀破坏难题,研究人员开展了相关研究,它成为研究废玻璃混凝土不可回避的问题,防止废玻璃发生ASR的措施概括起来有两个方面:

1)将废玻璃渣磨制成一定细度的玻璃粉,用它取代部分细骨料或水泥.这部分的研究与3.1.2.4.2和4.3等是交织在一起的.在玻璃粉安全粒径及合理掺量上还没有形成共识.粒径大小影响到产生ASR膨胀的可能性,掺量大小既影响到产生ASR膨胀的可能性,又涉及到混凝土强度、耐久性等方面是否会产生劣化.

2)掺ASR膨胀抑制剂.最常用的抑制剂是火山灰质活性材料,如粉煤灰、硅灰、磨细矿渣粉和偏高岭土等,其次是含锂的盐、碱<sup>[22]</sup>,如 $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{LiF}$ 、 $\text{LiOH}$ 等.通常将抑制剂等量取代部分水泥或外掺来使用.

研究者<sup>[23]</sup>认为没有粉煤灰作ASR抑制剂,用100%再生玻璃作骨料生产混凝土铺路砖是不可行,当粉煤灰取代废玻璃渣骨料的量从5%、10%到15%增加时,抑制碱骨料反应膨胀效果越来越好,且膨胀值均低于ASIM C1260限值要求.

磨细的玻璃粉也是一种ASR膨胀抑制剂,等取代率时的抑制效果比粉煤灰略差<sup>[12,28]</sup>,比硅灰也差<sup>[11]</sup>.研究者<sup>[11]</sup>用80%玻璃渣+20%天然砂制作砂浆骨料,分别用硅灰取代10%水泥、玻璃粉取代20%水泥、玻璃粉取代30%水泥制作胶凝材料.试验表明,当硅灰和玻璃粉有足够取代率时(硅灰 $\geq 10\%$ ,玻璃粉 $\geq 20\%$ ),它们在抑制ASR膨胀方面是非常有效的.20%和30%玻璃粉抑制ASR的效果比10%硅灰好.图2是研究者<sup>[28]</sup>用玻璃粉和粉煤灰等量取代不同比率水泥后,用ASIM C 1260方法测得的砂浆棒膨胀值.

## 4 废玻璃粉对混凝土性能的影响

### 4.1 对和易性的影响

在相似的颗粒尺寸分布情况下,磨细玻璃粉因多呈棱角状,其布莱恩(Blaine)比表面积明显大于水泥<sup>[12]</sup>,用磨细玻璃粉取代20%水泥后配制的胶砂与用100%水泥配制的胶砂达到相近的流动度时,前者所需水灰比低<sup>[12]</sup>,也就是说在相同的水胶比时,前者流动度大于后者.

### 4.2 活性指数

磨细玻璃粉表现出非常高的火山灰活性,粉末越细,火山灰活性越高<sup>[12]</sup>.研究者<sup>[25]</sup>用粒径 $< 38\ \mu\text{m}$ 、 $38\sim 75\ \mu\text{m}$ 和 $75\sim 150\ \mu\text{m}$ 等3种玻璃粉分别等体积取代30%普通水泥配制砂浆,试验表明,所有配合比在3天、7天、28天和90天的强度活性指数均超过75%(75%是ASIM C618推荐值),其中 $38\ \mu\text{m}$ 玻璃粉的强度活性指数3天、7天、28天和90天分别为91%、84%、96%和108%.研究者<sup>[24]</sup>也惊奇地发现,用玻璃粉等量取代30%~70%天然砂配制砂浆,掺玻璃粉的所有砂浆抗压强度都大于基准砂浆的抗压强度.

### 4.3 对强度影响

玻璃粉有活性但其活性发挥较慢.

研究者<sup>[11]</sup>用比表面为 $800\ \text{m}^2/\text{kg}$ 玻璃粉取代10%、20%、30%和40%水泥配制砂浆,砂浆28天强度随取代率增大而降低,与用粉煤灰同比率取代水泥时的效果相似;当用玻璃粉取代10%、20%、30%和40%砂,砂浆28天强度随取代率增大而增大.该研究者还通过与硅灰比较,研究玻璃粉砂浆长期强度发展,用硅灰取代10%水泥、玻璃粉取代20%水泥、玻璃粉取代30%水泥、玻璃粉取代30%骨料分别配制砂浆,结果显示,硅灰取代10%水泥的砂浆,28天、90天和270天的强度大于绝大多数掺玻璃粉砂浆强度,只有玻璃粉取代30%细骨料砂浆90天强度与硅灰取代10%水泥的砂浆相同.但是也显示出掺玻璃粉砂浆强度随时间持续发展的态势.

掺有玻璃粉的混凝土因水泥用量较小而呈现出较低的早期强度<sup>[11]</sup>,但在湿养护条件下强度随时间持续增长并接近基准混凝土<sup>[11-12]</sup>,尤其是当玻璃粉取代细骨料时,强度明显大于基准混凝土<sup>[11]</sup>.研究者<sup>[29]</sup>以玻璃粉等量取代0%、20%和30%水泥为胶凝材料,用玻璃渣取代40%~75%天然砂作细骨料,用破碎卵石为粗骨料,设计了10个配合比,配制40MPa混凝土.试验时现浇10块混凝土板并留混凝土检测样,另外从不同龄期的混凝土板中钻取芯样.研究表明,玻璃粉等量取代水泥后,直至28天混凝土强度发展仍较慢,但

是到了 404 天, 所有配合比的混凝土强度超过 40

MPa 达到约 55 MPa

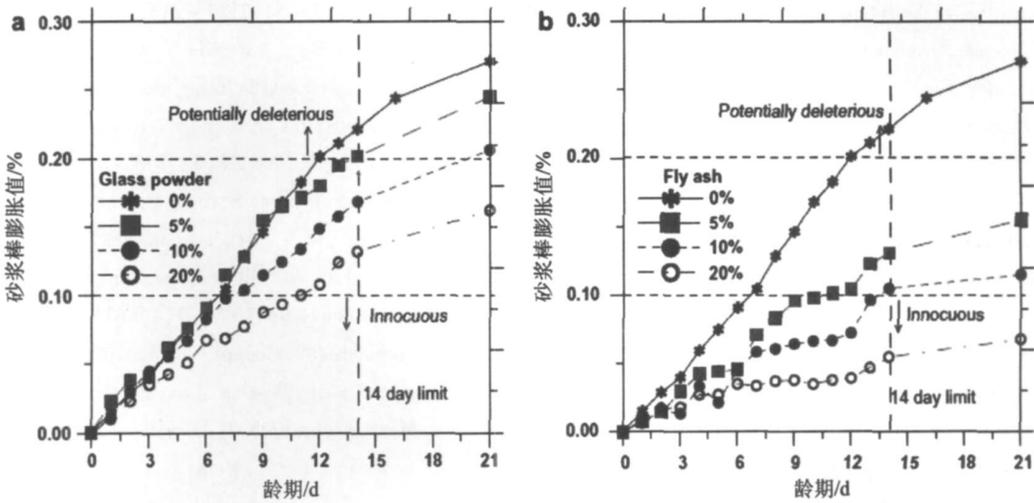


图 2 用 ASTM C 1260 方法测得的砂浆棒膨胀值

Fig 2 A SR expansion measurements carried out by per ASTM C 1260 test method

#### 4.4 对耐久性影响

玻璃粉取代部分水泥或天然砂, 混凝土干缩值没有超过规定值, 很容易满足 AS3600 要求 56 天小于 0.075% 的规定<sup>[11]</sup>. SEM 检测表明, 玻璃粉表面发生了水化反应, 表现出密实的微观结构<sup>[11, 13, 20, 24, 29-30]</sup>, 混凝土在抗硫酸盐侵蚀和抗氯离子渗透等方面都呈现良好的性能<sup>[11, 13, 16, 20-21, 29]</sup>, 因此, 除粗废玻璃粉可能会产生 ASR 膨胀危害外, 细玻璃粉对提高混凝土的耐久性是有利的。

#### 5 结论与展望

废玻璃可以以粉料、细骨料和粗骨料三种形式掺入混凝土中, 以一定细度的玻璃粉最为安全, 其它两种形式通过采取掺 ASR 膨胀抑制剂、降低混凝土中碱含量以及减少活性骨料掺量等措施也可以安全使用. 从技术层面上讲, 废玻璃有很大的应用潜力. 所以研究者<sup>[29]</sup> 强烈呼吁在混凝土中使用废玻璃粉和废玻璃骨料, 研究者<sup>[11]</sup> 指出美国纽约州能源研究与发展局倡导对再生玻璃用作混凝土砌块的应用研究, 将再生玻璃和粉煤灰一起应用于预拌混凝土已取得了令人鼓舞的成果。

中国是人均资源严重缺乏的国家, 废玻璃的利用可以节约资源降低能耗. 我们要从管理层面上学习发达国家的做法, 增大固体废物排放收费, 迫使企业去开发废物利用技术, 同时积极引导百姓自觉进行垃圾分类; 从技术层面上, 尽快开发适

用于中国的废玻璃混凝土应用技术, 如废玻璃回收加工技术 (欧美等发达国家已有生产废玻璃颗粒的公司), 并系统研究废玻璃混凝土性能, 最后编制《中国废玻璃混凝土应用技术规程》

#### 参考文献:

- [1] 卞致璋. 从发达国家的做法看我国废玻璃的回收与利用 [J]. 中国建材, 2003 (6): 51-55.
- [2] 刘连新. 利用废玻璃研制轻粗骨料及轻混凝土 [J]. 新型建筑材料, 2002 (2): 16-17.
- [3] Topc İ B, Cambaz M. Properties of concrete containing waste glass [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34 (2): 267-274.
- [4] Meyer C. Recycled glass - from waste material to valuable resource [C] // Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit and held at the University of Dundee, Scotland, UK, 2001: 1-10.
- [5] Shi C, Zheng K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete [J]. Resources Conservation and Recycling, 2007, 52 (2): 234-247.
- [6] Federico L M, Chidiac S E W. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - Critical review of treatment methods [J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 8 (31): 606-610.
- [7] 杨医博, 文梓芸. 废玻璃在混凝土中的应用 [J]. 工业建筑, 2002, 32 (7): 78-80.
- [8] 刘光焰, 秦荣, 王晓峰. 废玻璃应用于混凝土的试验研究 [J]. 混凝土, 2009 (8): 66-68.
- [9] 李玉寿, 荀勇, 陈国伟. 废玻璃骨料混凝土的研究

- [ J]. 混凝土, 2006(6): 53- 55.
- [ 10] Barlow D. Glass recycling - the UK scene[ C] //Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit and held at the University of Dundee, Scotland, UK, 2001: 11- 14.
- [ 11] Shayan A, Xu A. Value-added utilisation of waste glass in concrete[ J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1): 81- 89.
- [ 12] Shi C, Wu Y, Chris R, et al Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders[ J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5): 987- 993.
- [ 13] Wang H Y, Huang W L. Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass[ J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 1008- 1013.
- [ 14] Poutos K H, Akni A M, Walden P J et al Relative temperature changes within concrete made with recycled glass aggregate[ J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(4): 557- 565.
- [ 15] Mohanad J T. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures[ J]. Building and Environment, 2006, 41(5): 633- 639.
- [ 16] Kou S C, Poon C S. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate[ J]. Cement & Concrete Composites, 2009, 31(2): 107- 113.
- [ 17] Taha B, Nounu G. Properties of concrete containing recycled colour waste recycled glass as sand and cement replacement[ J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(5): 713- 720.
- [ 18] Zainab Z I, Enas A. A L. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete[ J]. Waste Management, 2009, 29(2): 655- 659.
- [ 19] Park S B, Lee B C, Kim J H. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate[ J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(12): 2181- 2189.
- [ 20] Wang H Y. A study of the effects of LCD glasses and on the properties of concrete[ J]. Waste Management, 2009, 29(1): 335- 341.
- [ 21] Wang H Y. A study of the engineering properties of waste LCD glass applied to controlled low strength materials concrete[ J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2127- 2131.
- [ 22] Topcu B, Boğa A R, Bilir T. Akali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ [ J]. Waste Management, 2008, 28(5): 878- 884.
- [ 23] Lam C S, Poon C S, Chan D. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass - ASR consideration[ J]. Cement & Concrete Composites, 2007, 29(8): 616- 625.
- [ 24] Corinaldesi V, Gnappi G., Moriconi G, et al Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars[ J]. Waste Management, 2005, 2(25): 197- 201.
- [ 25] Shao Y, Lefort T, Moras S, et al Studies on concrete containing ground waste glass[ J]. Cement and Concrete Research, 30(1): 91- 100.
- [ 26] Shi C, Wu Y, Shao Y, et al Alkali-aggregate reaction expansion of mortar bars containing ground glass powder Alkali-aggregate reaction in concrete[ C] //Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, 2004, China, 789- 795.
- [ 27] Idir R, Cyr M, Azeiz T H. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars[ J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(7): 1309- 1312.
- [ 28] Schwarz N, Cam H, Neihalah N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash[ J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(6): 486- 496.
- [ 29] Shayan A, Xu A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete A field trial on concrete slabs[ J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 457- 468.
- [ 30] Sobolev K, Törker P, Soboleva S, et al Utilization of waste glass in ECO-cement Strength properties and microstructural observations[ J]. Waste Management, 2007, 27(7): 971- 976.