

# 聚丙烯纤维增强的水泥-玻璃复合材料的物理和机械性能

瓦尔德玛·杜德克, 丹尼尔·卡德拉

所属单位: 波兰土木工程学院

**摘要:** 根据可持续发展的原则, 应该使用环境友好、低排放和能源密集型的材料和技术, 以及废物管理。混凝土的生产需要消耗大量的能源和产生大量的二氧化碳; 因此, 有必要寻找新的解决方案, 用其他材料, 最好是回收材料来代替组件。一个积极的方法是使用玻璃废料。为了确定大量玻璃渣含量对混凝土性能的影响, 玻璃粉被用作填料和100%的玻璃骨料。水泥-玻璃复合材料的抗拉强度很低, 而且是脆性破坏。为了提高抗拉强度, 作者研究了添加聚丙烯纤维对复合材料力学性能的影响。加入300、600、900、1200和1500克/立方米的纤维, 分别相当于水泥质量的0.0625%、0.1250%、0.1875%、0.2500%和0.3125%, 与基础样品相比, 抗弯强度分别提高了4.1%、8.2%、14.3%、20.4%和26.5%, 而劈裂强度的提高分别为35%、45%、115%、135%和185%。此外, 随着纤维的加入, 与参考试样相比, 坍落度分别减少了25.9%、39.7%、48.3%、56.9%和65.5%。

**关键词:** 副产品废料; 包装废料; 玻璃渣; 大聚合纤维; 回收; 生态高效混凝土; 坍落度锥; 抗压强度; 抗折强度; 分裂强度

## Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Fibre Reinforced Cement-Glass Composite

Waldemar Dudek, Daniel Kadela

Affiliation: Faculty of Civil Engineering, Poland

**Abstract:** In accordance with the principles of sustainable development, environmentally friendly, low-emission, and energy-intensive materials and technologies, as well as waste management, should be used. Concrete production is responsible for significant energy consumption and CO<sub>2</sub> production; therefore, it is necessary to look for new solutions in which components are replaced by other materials, preferably recycled. A positive way is to use glass waste. In order to determine the effect of a significant glass cullet content on the properties of concrete, glass powder was used as a filler and 100% glass aggregate. The cement-glass composite has low tensile strength and brittle failure. In order to improve tensile strength, the effects of adding polypropylene fibres on the mechanical properties of the composite were investigated. With the addition of 300, 600, 900, 1200, and 1500 g/m<sup>3</sup> of fibres, which corresponds to 0.0625%, 0.1250%, 0.1875%, 0.2500%, and 0.3125% of cement mass, respectively, flexural strength increased compared with the base sample by 4.1%, 8.2%, 14.3%, 20.4%, and 26.5%, respectively, while the increase in splitting strength was 35%, 45%, 115%, 135%, and 185%, respectively. Moreover, with the addition of fibres, a decrease in slump by 25.9%, 39.7%, 48.3%, 56.9%, and 65.5%, respectively, compared with the reference specimen was determined.

**Keywords:** by-product waste; packaging waste; glass cullet; macro-polymeric fibre; recycling; eco-efficient concrete; slump cone; compressive strength; flexural strength; splitting strength

### 引言:

近期的主要问题是环境污染。这与聚合物材料的生产 and 消费每年平均增加9%, 并假定上升趋势将继续下去有关(据估计, 在未来几年, 每年将增加5%)。根据欧

洲塑料协会的数据, 世界聚合物产量从1950年的150万吨增加到2008年的2.45亿吨。欧盟(EU)经济的产量约占世界聚合物总产量的20%。个别欧洲国家对原材料的需求在很大程度上取决于特定经济体的规模和发展程

度。例如, 经济领先的国家, 如德国、意大利、法国和英国, 消耗的聚合物材料与所有其他欧洲国家的总和一样多。然而, 根据Plastic Europe Polska, 近年来个别国家的消费量一直保持不变。只有个别类型的聚合物材料的需求会有波动。除其他国家外, 波兰是一个例外, 无论全球经济形势如何, 其需求每年都在增加。据福布斯报道, 由于冠状病毒的威胁, 全球对某些塑料用途的需求有所增加。其中主要包括用于外卖食品包装的聚合物聚丙烯, 以及用于一次性塑料水瓶的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)。这是由于从坐着的餐馆转向外卖, 以及消费者囤积杂货和瓶装水的结果。出于同样的原因, 玻璃垃圾的数量也有所增加, 这是日常生活中最常见的材料之一。与其他固体废物相比, 许多国家的玻璃废物的回收率相当低。例如, 在美国, 2017年产生了1138万吨的废玻璃, 但有26.6%被回收, 主要用于生产容器和包装, 60.37%被填埋。在香港, 2018年和2019年分别产生了4063和7174吨的玻璃废料, 2018年的回收率约为16.3%。2018年, 最终被填埋的废旧玻璃容器总量为77400吨。在新加坡, 2011年有7280万吨玻璃被处理, 但只有29%被回收。在英国, 每年有185万吨的废玻璃被收集, 对于集装箱玻璃, 城市回收率为34%。

混凝土是一种可以处理废物的材料。其中, 自密实混凝土 (SSC) 的特点是具有很好的流动性, 它可以在自身重量的作用下流动, 填充具有复杂形状和密集钢筋的模板, 而不需要内部或外部压实。在提供这些特性的同时, SCC还能保持其稳定性, 不发生偏析或渗漏。在过去的几年里, SCC的使用急剧增加。与传统的混凝土相比, SCC有许多优点。它的一些优点是, 由于生产水平的提高, 缩短了混凝土施工时间, 建造了大量的加固部分, 提高了现场混凝土的质量, 减少了与振动和浇筑工程有关的噪音和伤害, 从而导致更好的工作条件, 以及优秀的混凝土表面质量。另一方面, 高性能混凝土 (HPC) 是一种旨在提供高强度和优良耐久性的混凝土。为了从SCC和HPC的特性中获益, 一种新型的混凝土被开发出来, 它被称为自固结高性能混凝土 (SCHPC)。SCHPC在提供高强度和优良的耐久性能的同时, 表现出很好的流动性和稳定性。

此外, 对于不可生物降解或难以分解的材料, 如聚合物或玻璃废料, 它是非常重要的。高分子材料已被用作混凝土中天然骨料的替代品、水泥的替代品、添加物 (例如, PET瓶、聚氯乙烯 (PVC) 管、高密度聚乙烯 (HDPE) 和热固性塑料)、发泡聚苯乙烯 (EPS)、聚丙烯

烯纤维、外加剂 (如聚碳酸酯和聚氨酯泡沫) 或混凝土的元素 (如混凝土钢筋和塑料锚)。与普通混凝土相比, 在混凝土中回收塑料包装所使用的聚丙烯纤维副产品已经在以前的研究中进行了详细讨论。玻璃粉可以作为水泥或骨料的替代品, 而粒径低于100微米的玻璃粉的沸石反应性被观察到, 其抗压强度会增加。一些研究介绍了玻璃粉作为水泥替代物对混凝土或土工合成物性能的影响。例如, Federico和Chidiac分析了含有玻璃粉的水泥基混合物的动力学和性能特性。Mirzahosseini和Riding研究了固化温度和玻璃类型对含玻璃粉的混凝土的沸石反应和性能的影响。

许多科学家测试了用玻璃骨料替代粗骨料、细骨料或水泥的混凝土, 以便在混凝土工业中使用废玻璃。Yu等人报告说, 在混凝土中作为骨料使用的玻璃渣增强了其机械性能。然而, Limbachiya等人和Tittarelli等人在添加了高达15%的玻璃砂的混凝土混合物中获得了相同的机械性能。研究发现, 由于骨料和水泥基体之间的结合力降低, 以及强度的降低, 使用玻璃渣替代粗骨料的效果并不理想。Ling和Poon以及Yousefi等人分析了玻璃颗粒的大小对新拌合物和硬化样品性能的影响。然而, 纤维对水泥-玻璃复合材料性能的影响却很少被报道。

另一方面, 建筑材料的生产造成了大量的能源消耗和二氧化碳的产生, 因此有必要寻找新的材料, 以取代目前使用的材料, 最好是回收的。在作者以前的研究中, 已经研究了在混凝土中添加回收的玻璃集料作为5%、10%和15%的天然集料的替代品。在这项研究中, 使用了100%的玻璃骨料, 这是由Malek et al.进行的研究的延续和扩展。此外, 由于水泥-玻璃复合材料的抗拉强度低, 容易发生脆性破坏, 因此另外添加了聚丙烯纤维以提高其抗拉强度。为了促进再生材料的使用, 聚丙烯纤维是由消费后的废物 (食品包装) 制成的。这项研究旨在评估不同纤维含量对水泥-玻璃复合材料机械性能的影响。

#### 材料: 水泥混合物的产品

在这项研究中, 使用了波特兰水泥、自来水和聚羧酸酯超塑化剂。设计水泥-玻璃复合材料的概念是以白水泥形式的单一粘合剂为基础的。由于复合材料的成分由100%的颗粒状玻璃渣组成, 因此使用了工业白色波特兰水泥CEM I 52.5R NA, pH值=13。这是一种特殊用途的水泥, 碱性化合物的含量非常低。水泥的化学成分由PN EN 196-6: 2011进行调查。水泥的物理性能和抗压强

度分别根据 PN-EN 196-6: 2011 和 PN EN 196-1: 2016-07 确定。通过扫描电子显微镜 (SEM-Joel JSM 6600, Yvelines, France) 研究了水泥增益颗粒的形状和纹理。

在复合材料的组成中, 使用了回收的玻璃钠颗粒作为骨料。筛分分析是用 "干法" 对三个颗粒样品进行的, 使用的是实验室摇床和一套标准筛子, 筛子的网孔是校准过的方形。确定了筛分后的颗粒物的各个馏分的分布百分比。碎屑堆是由 0/0.9 (0/1) 和 0.9/1.5 (1/2) 两个馏分组的颗粒设计的。作为复合材料组成中的添加剂 (填料), 使用了来自玻璃钠的玻璃粉, 颗粒大小为 0 至 100 微米, 干密度为 1.0 公斤/立方米。玻璃粉作为碎石堆的密封剂, 其目的是为了确保材料内部结构的连续性。粒化曲线是按照砂混凝土的粒化准则设计的; 设计的曲线与上、下限曲线有关。设计的曲线在良好的粒度分布区域内运行。根据所用玻璃骨料的分级曲线, 被粉碎的玻璃秆显示出尖锐的边缘, 表面纹理比较粗糙, 没有裂缝。玻璃集料的比密度和莫氏硬度等级分别约为 1.6 公斤/立方米和 6-7。玻璃砂骨料的细度模量等于 2.56MPa。

## 结果和讨论

### 新鲜特性

在搅拌过程中, 所有的水泥-玻璃复合材料混合料都没有观察到纤维结块的过程, 这是有纤维的混凝土混合料的一个主要问题。在新拌合物中, 纤维没有浮到表面, 也没有沉到底部。它们与复合混合物平稳地混合在一起。根据坍落度锥体 (SC) 测试的结果, 可以看出, 通过用玻璃集料代替全部集料并使用玻璃粉作为填料, 参考混合料和纤维含量较低的混合料都在坍落度等级 S2 之内。此外, 水泥-玻璃复合材料得到的坍落度锥体比使用花岗岩骨料的普通混凝土高约 66%, 强度为 50MPa。Castro 和 Brito 观察到坍落度随着细玻璃集料的增加而增加, 而根据 Limbachiya 和 Taha, 由于缺乏细比例, 使用玻璃砂导致混凝土的工作性下降。

在参考混合料中加入 PP 纤维会降低其工作性, 这与增强 PP 纤维的普通混凝土的观察结果相类似。加入 600 到 1500g/m<sup>3</sup> 纤维的混合料在坍落度等级 S1 内。此外, 加入 300、600、900、1200 和 1500 克/立方米的纤维后, 与参考试样 (不含纤维) 相比, 坍落度的下降分别为 25.9%、39.7%、48.3%、56.9% 和 65.5%。实际上, 对于用相同内容的塑料包装制成的聚丙烯纤维加固的普通混凝土, 也观察到了同样的坍落度锥体下降。其他科学家也确定了工作性的降低与纤维含量的增加有类似的相关性。

不管 PP 纤维含量如何, 水泥-玻璃复合材料的空气含量是恒定的, 等于 4.0 0.5%。纤维的加入并不影响混合物中的空气含量。然而, 所获得的水泥-玻璃复合材料的空气含量比普通混凝土和添加了高达 20% 水泥的玻璃骨料的混凝土高两倍。

### 密度

根据水泥-玻璃复合材料密度的结果, 所给出的数值是每种混合物的五个样品的密度和十个样品的机械性能的平均值。随着纤维含量的增加, 水泥-玻璃复合材料的密度呈线性增长, 而玻璃砂添加的影响可以忽略不计。对于最高的纤维含量, 与基础样品相比, 复合材料的密度增加了 1.7%。这可能与复合材料的生产误差或发生的沸石反应有关。根据样品中玻璃集料和纤维的均匀分布, 获得的水泥-玻璃复合材料的密度远远低于含有花岗岩骨料的普通混凝土的密度 ( $\gamma = 2205.4 \text{ kg/m}^3$ ), 并且遵循了已证明的密度随玻璃细骨料增加而下降的趋势。其他科学家也观察到同样的结果。Park 等人得到的结果是, 随着废玻璃集料含量的增加, 混凝土密度呈线性下降, 而 Lee 等人则认为, 用玻璃砂代替集料的量达到 20-25% 时, 对混凝土密度略有影响。

### 抗压强度

根据水泥-玻璃复合材料样品的抗压强度的测试结果, 抗压强度随着 PP 纤维添加量的增加而略有增加, 由于纤维可以提高抗拉强度, 但不能提高抗压强度的原理, 这一点是出乎意料的。Oni 等人确定, 加入 0.3% PP 纤维的混凝土强度略有提高, 而加入 0.4% 这种纤维的混凝土强度则略有下降。对于其他测试的聚丙烯纤维类型, 他们获得了抗压强度的下降。此外, Jiang 等人报告说, 与基础样品相比, PP 纤维增强的混凝土的抗压强度下降了 3.12%。

可以看到, 14 天后, 获得了 28 天后抗压强度的 75%。此外, 水泥-玻璃复合材料的抗压强度比类似成分的普通混凝土 (水泥 CEM I 52.5R, 花岗岩骨料 0/4 毫米, 并添加了超塑化剂以减少水的用量, 达到  $w/c = 0.26$ ) 高 1.5 倍, 其抗压强度为  $f_c = 53 \text{ MPa}$ 。这可能是使用玻璃粉以确保材料内部结构的连续性的结果, 这反过来又通过减少水泥水化过程中的气孔而导致机械强度的增加。此外, 根据其他科学家的观察, 粒径在 100 微米以下的细小废玻璃的沸石反应性被观察到, 由于沸石反应而使抗压强度增加。此外, 这与抗压强度随着玻璃细集料含量的增加而提高的观察结果相一致。Lee 等人获得了与普通混凝土相比, 使用粒径为 0-0.6mm 的玻璃细集料的混凝

土的抗压强度增加了34.3%。Chung等人也报告说,使用粒径小于4.0毫米的集料,有可能实现抗压强度的提高。在混凝土混合物中使用玻璃粉可能会导致更高的抗压强度,因为在其他研究中已经发现使用玻璃粉的混凝土的抗压强度增加。

Bajad等人确定,抗压强度随着加入玻璃粉作为水泥替代物的比例高达20%而增加,然后下降。其他科学家也报道了含有细玻璃粉的混凝土长期抗压强度的改善。抗压强度的提高可能是由非常细的颗粒的沸石反应引起的。根据Shi等人,尺寸为40-700微米的细玻璃粉在7天和28天的强度活性指数分别为70%到74%。Kamali和Ghahremaninezhad以及Ling和Poon报告说,较小粒径的骨料可以增强骨料-水泥基体的粘结强度。Yamada等人证明了对于发生沸腾反应的临界颗粒尺寸为0.15至0.30毫米,而Jin等人、Idir等人 and Xie等人确定这一尺寸为0.60至1.18毫米。

#### 弯曲强度

根据水泥-玻璃复合材料的弯曲试验结果,可以看出,加入300、600、900、1200和1500克/立方米的PP纤维后,与基础样品相比,抗弯强度分别增加了4.1%、8.2%、14.3%、20.4%和26.5%。这些数值是在纤维占水泥重量的0.0625%至0.3125%的极少量情况下获得的。因此,聚丙烯纤维的加入提高了水泥-玻璃复合材料的抗弯强度。这与使用天然骨料的纤维增强混凝土相类似。Nili和Afroughdaset用硅灰和0.3%的聚丙烯纤维制作的混凝土获得了22%的改善。Satisha等人也确定了添加了2.0%的PP纤维的混凝土的抗折强度提高了30%左右。Badogiannis等人获得了添加1.0wt.%聚丙烯纤维的混凝土的抗弯强度增加了约37%。其他科学家报告说,加入聚丙烯纤维后,抗折强度的增加幅度从10%到35%。

此外,经过14天的固化,获得的抗弯强度约为目标抗弯强度的70%到80%。与基础样品相比,14天抗折强度的增长分别为5.7%、14.3%、20.0%、31.4%和40.0%。这证明了回收纤维的大量使用,是Malek等人提出的研究的延续。水泥-玻璃复合材料的抗弯强度几乎是类似成分的普通混凝土抗弯强度的一半,但有花岗岩骨料( $f_{tk}=10.5 \text{ 0.3 MPa}$ )。根据Tan和Du的说法,抗折强度的降低是由于玻璃颗粒表面和水泥基体的粘合强度下降造成的,此外,在透明玻璃骨料的情况下,还存在微裂缝。玻璃集料与水泥基体的粘合力减弱的影响在抗折试验中比在压缩试验中更重要。此外,这与弯曲强度随着细玻璃集料的加入而增强,从而增加断裂韧性的观察结果相

反。然而,弯曲强度的降低被其他科学家证明了。Ling和Poon获得了含有100%玻璃集料的混凝土的抗弯强度下降了大约30%(60重量%的玻璃集料尺寸从0到2.36毫米,40重量%的尺寸从2.36到5.00毫米)。

#### 劈裂强度

根据不同纤维含量的水泥-玻璃复合材料的劈裂强度,结果显示,随着PP纤维含量的增加,劈裂强度呈线性增长。对于PP纤维含量为300、600、900、1200和1500克/立方米的水泥-玻璃组合物,与基准样品相比,28天的劈裂强度分别提高了35%、45%、115%、135%和185%,而与基准样品相比,14天的劈裂强度分别提高了48%、68%、132%、156%和220%。这种明显的改善是在纤维量占水泥重量的0.0625%至0.3125%的极少量情况下获得的。因此,聚丙烯纤维的加入提高了水泥-玻璃复合材料的劈裂强度。其他科学家对含有天然骨料的混凝土也观察到了同样的现象。纤维能够弥合裂缝并在裂缝上传递应力。当纤维滑出基体或断裂时,纤维增强的复合材料就会被破坏(在第二种情况下,载荷被重新分配到其他纤维上)。因此,纤维增强的水泥-玻璃复合材料的破坏方法主要取决于材料的强度和纤维与基体的粘附力。

#### 结论

本研究的目的是评估使用大量的玻璃渣作为混凝土构件替代品的可能性。作者使用了玻璃粉作为填充物和100%的玻璃集料。水泥-玻璃复合材料表现出低抗拉强度和脆性破坏。为了提高抗拉强度,研究了添加聚丙烯纤维对复合材料机械性能的影响。聚丙烯纤维含量分别为水泥质量的0.0625%、0.1250%、0.1875%、0.2500%和0.3125%。根据这个实验调查的结果,可以得出以下主要结论:

- 注意到添加PP纤维后坍落度锥体下降的影响;参考混合料和纤维含量较低的混合料的坍落度等级为S2,但PP纤维含量较高的混合料的坍落度等级为S1。

- 水泥-玻璃复合材料混合料中的空气量等于4.0 0.5%。纤维的加入并不影响混合物的空气含量。

- 随着PP纤维含量的增加,水泥-玻璃复合材料的密度增加,但这种影响可以忽略不计(与参考样品相比,2-3%)。

- 加入0.0625%、0.1250%、0.1875%、0.2500%和0.3125重量百分比的聚丙烯纤维后,与参考样品相比,水泥-玻璃复合材料的抗弯强度分别增加了约4%、8%、14%、20%和27%,而劈裂强度的增加分别为48%、60%、

132%、156%和220%。劈裂强度增加的影响比弯曲强度的增加大得多。抗压强度随着聚丙烯纤维含量的增加而略微增加,这是出乎意料的,因为纤维可以提高抗折强度,但不能提高抗压强度(0.025、0.050、0.075、0.100和0.125重量百分比的聚丙烯纤维分别增加0.1%、0.6%、1.6%、2.3%和2.8%)。

-PP纤维含量为0.0625%、0.1250%、0.1875%、0.2500%和0.3125wt.%的水泥-玻璃复合材料的弹性模量约为31 GPa,而与花岗岩骨料的普通混凝土相当。

-PP纤维的添加量不超过水泥的0.3125%并不影响泊松比。

弯曲和劈裂强度的高值是聚丙烯纤维的结果。这项研究将有待于进一步的测试。在这方面,计划使用其他类型的水泥、玻璃废料及其混合物,以及不同含量的玻璃粉,并特别强调长期疲劳试验。此外,应该强调的是,测试的混凝土复合材料的弹性模量非常低,这可能会导致结构出现更大的挠度。这就是为什么没有明显挠度的构件,如柱子或板桩,可以用水泥-玻璃复合材料(最好是获得最高的机械性能,如添加0.3125%PP纤维的配方M5)。

#### 参考文献:

[1]Kijen'ski, J.; Błędzki, A.; Jeziórska, R. Recovery and Recycling of Polymeric Materials [Odzysk i Recykling Materiałów Polimerowych]; PWN: Warsaw, Poland, 2011.

[2]Plastics Europe. The Compelling Facts about Plastics - Analysis of Plastics Production, Demand and Recovery for 2008 in Europe; Plastics Europe: Brussels, Belgium, 2008.

[3]Knap, P. The Influence of Raw Materials on the Load-Bearing Capacity of Plastic Connectors in Building Fastenings [Wpływ Surowców na Nosność Łączników w Tworzywowych w Zamocowaniach Budowlanych]. Ph.D. Thesis, Building

Research Institute, Varsav, Poland, 20 April 2017.

[4]Plastics Europe Polska. Analysis of Production, Demand and Recovery of Plastics in Europe in 2011 [Analiza Produkcji, Zapotrzebowanie oraz Odzysk Tworzyw Sztucznych w Europie w Roku 2011]; Plastics Europe Polska: Warszawa, Poland, 2012.

[5]Bostanci, S.C.; Limbachiya, M.; Kew, H. Portland-composite and composite cement concretes made with coarse recycled and recycled glass sand aggregates: Engineering and durability properties. *Constr. Build. Mater.* 2016, 128, 324 - 340.

[6]Liu, F.; Ding, W.; Qiao, Y. An experimental investigation on the integral waterproofing capacity of polypropylene fiber concrete with fly ash and slag powder. *Constr. Build. Mater.* 2019, 212, 675 - 686.

[7]Sabet, F.A.; Libre, N.A.; Shekarchi, M. Mechanical and durability properties of self-consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Constr. Build. Mater.* 2013, 44, 175 - 184.

[8]Rudnicki, T.; Wołoszka, P. The use of technology whitetopping in the aspect of implementation of repairs of flexible pavements. *Bull. Mil. Univ. Technol.* 2016, 65, 3.

[9]Limbachiya, M.; Meddah, M.S.; Ouchagour, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Constr. Build. Mater.* 2012, 27, 439 - 449.

[10]Gesõlu, M.; Güneş, E.; Özbay, E. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 1847 - 1854.

[11]Rudnicki, T.; Jurczak, R. Recycling of a Concrete Pavement after over 80 Years in Service. *Materials* 2020, 13, 2262.

