



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103319129 B

(45) 授权公告日 2014. 11. 19

(21) 申请号 201310260592. 6

(22) 申请日 2013. 06. 27

(73) 专利权人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市四牌楼 2 号

(72) 发明人 郭丽萍 孙伟 黄伟 樊俊江

(74) 专利代理机构 江苏永衡昭辉律师事务所

32250

代理人 齐旺

(51) Int. Cl.

C04B 28/04 (2006. 01)

审查员 谢燕婷

权利要求书1页 说明书7页

(54) 发明名称

一种生态纳米颗粒增强水泥基复合材料及其制备方法

(57) 摘要

本发明公开了一种生态纳米颗粒增强水泥基复合材料及其制备方法,采用工业废渣中的高强高弹球形纳米颗粒大量取代水泥,同时使用减水率 50% 以上的高性能外加剂及高强超细镀铜钢纤维,通过水泥、生态纳米颗粒、化学外加剂、钢纤维及其多元复合技术的有效和高效利用,大大促进了混凝土材料组成与结构优化,各组分优势叠加、成份互补。本发明解决了现有水泥基复合材料在标准养护和蒸汽养护条件下无法达到抗压强度 300MPa 以上、抗弯强度 60MPa 以上的难题,大大提升了工业废渣的高效再生利用率和核心技术价值,降低水泥基复合材料中水泥熟料的用量,适用于混凝土设计抗压强度为 300MPa 的大型土木工程结构材料。

1. 一种生态纳米颗粒增强水泥基复合材料,其特征在于,该复合材料包括以下质量百分比的组分:

- 水泥 23.5%~26.9%;
- 生态纳米颗粒 15.6%~23.1%;
- 高性能减水剂 1.2%~1.5%;
- 分散剂 0.6%~1.2%;
- 消泡剂 0.01% ~ 0.02%;
- 水  $\leq$  5%;
- 高强细集料 36.0%~50.0%;
- 高强超细钢纤维 5.0%~13.0%;

所述的水泥是强度等级 52.5~62.5 的硅酸盐水泥;

所述的生态纳米颗粒是从硅灰、超细粉煤灰、稻壳灰、磨细钢渣、磨细矿渣、赤泥任意一种工业废渣中分离出的密度大于  $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、粒径小于 100nm 的球形纳米颗粒,要求该生态纳米颗粒的弹性模量超过 50GPa,抗压强度超过 500MPa,且主要化学成分为无定形  $\text{SiO}_2$  或  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  复合相;

所述的高性能减水剂是减水率 50% 以上的聚羧酸类外加剂;

所述的分散剂为静电排斥稳定型分散剂、空间位阻稳定型分散剂和静电位阻稳定型分散剂中的任意一种;

所述的消泡剂是高效有机硅消泡粉;

所述的高强细集料是最大粒径不超过 4.75mm 且抗压强度超过 200MPa 的辉长岩、辉绿岩和玄武岩机制砂,连续级配,细度模数为  $3\sim 2.3$ ,含泥量小于 1%;

所述的高强超细钢纤维是直径为 0.2mm,长度 13mm,抗拉强度  $\geq 2850\text{MPa}$  的镀铜微细钢纤维。

2. 一种制备权利要求 1 所述的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料的方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

1) 按配方比例称取球形纳米颗粒团聚体与分散剂混合干拌 1~2 分钟,再倒入盛满水的 200W 功率超声波振荡仪中,超声振荡混合 20 分钟后,将浆体置于真空干燥箱中,在  $40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$  温度范围内真空干燥 12 小时,制备出分散的生态纳米颗粒;

2) 将按配方比例称取的水泥、生态纳米颗粒、高强细集料在砂浆搅拌容器中干拌 3 分钟,得到干料,所述生态纳米颗粒为步骤 1) 中制备的分散的生态纳米颗粒;

3) 称取高性能减水剂、消泡剂和水混合均匀成水剂,缓慢倒入所述步骤 2) 得到的干料中,继续搅拌 10 分钟;

4) 将钢纤维均匀的加入砂浆搅拌容器内,再持续搅拌 2~3 分钟,使钢纤维均匀的分散在基体中,得到水泥基复合材料;

5) 将所述步骤 4) 制备好的水泥基复合材料装入模具内,覆盖一层塑料膜密封,  $20\pm 2^\circ\text{C}$  条件下带模养护 3 天后拆模;

6) 经标准养护 90 天或  $85^\circ\text{C}$  蒸养 5 天,可得到抗压强度 300MPa、抗折强度 60MPa 以上的超高性能水泥基复合材料。

## 一种生态纳米颗粒增强水泥基复合材料及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于建筑材料和基础工程建设领域,涉及一种水泥基复合材料及其制备方法。

### 背景技术

[0002] 超高性能水泥基复合材料是 20 世纪 80 年代发展起来的一种新材料,具有超高的强度、耐久性和工作性,最先出现在法国。与普通水泥基复合材料和高性能水泥基复合材料相比,其具有优异的力学性能和耐久性,并且由于在其体系内掺入了大量的纤维,在受力开裂过程中存在多缝开裂和应变强化的过程,韧性显著提高,具有极强的阻裂能力。最近十几年来,由于其具有相同或超过金属和有机高分子材料的优异性能,超高性能水泥基复合材料进入了机械制造、电子工业以及航空航天等高新技术领域,大大的拓宽了这一无机非金属材料的应用范围。可以预见,超高性能水泥基复合材料在未来必将获得更为广泛的应用。

[0003] 从上世纪 80 年代开始,国际上先后出现了多种超高性能水泥基复合材料。1981 年,英国牛津大学冶金与材料科学系和帝国化学工业公司的科研人员,用普通水泥作为原材料,掺加一些水溶性有机聚合物,采用热压成型工艺,首先制备出抗压强度高达 300MPa 抗折强度高达 300MPa 的无宏观缺陷(MDF)水泥材料。接着,1982 年,丹麦国家实验室的 Bache 等人首次研制出了 DSP 材料,全称为高致密水泥基均匀体系(Densified system containing homogeneously arranged ultrafine particles)。该材料是一种由 70%~80% 水泥和 20%~30% 平均尺寸只有 0.1~0.2 $\mu\text{m}$  超细材料组成的致密和高强的胶结材料。通过优化粒径分布和加压成型,从而保证了整个粉体材料紧密地堆积,DSP 材料的抗压强度可达到 345MPa。然而这两种材料的耐水性极差,其中的水泥组分不是靠水化而是靠加压形成强度,因而对周围环境湿度极为敏感,当形成强度后再遇水,未水化的水泥快速水化而引起体积膨胀,导致体系开裂,使强度大幅下降,从而限制了他们的应用。1993 年,RPC(Reactive Powder Concrete)的问世,在水泥基材料学术界引起了很大的震动,被认为是水泥基材料研究开发的一个重大突破。RPC 是通过剔除粗骨料,掺加不同粒径的掺合料,加压成型,热养护,掺入纤维等方法制得的最高强度的可达 800MPa 的超高性能水泥基材料。其主要特点是高强与较大的韧性,抗折强度大幅提高,从而克服了传统水泥基材料脆性大,抗拉强度小的致命弱点。但是其成本昂贵且其成型工艺较为复杂,难以在工程中得到广泛推广,只在少数试点工程中得到了应用,例如加拿大的圣布鲁克桥、韩国的仙游桥和法国的卡尔加里轻轨车站。因此,如何制备高强度等级的超高性能水泥基复合材料,同时降低其工艺成本,始终是超高性能水泥基复合材料推广应用的技术难题。

[0004] 为了提高普通混凝土的强度,国内外均采用纳米材料,但强度提升效果十分有限。Li 等研究表明,掺加 10% 的纳米  $\text{SiO}_2$  可以使水泥砂浆的 28d 强度提高 26%,而掺加 15% 的硅灰只能提高 10%。即使掺加 0.25% 的纳米  $\text{SiO}_2$  也能使 28d 的抗压强度提高 10%,抗折强度提高 25%。Byung 等在水灰比为 0.5 的砂浆中掺加 15% 的硅灰,试样的 7d、28d 抗压强度分别为普通试样的 135% 和 146%,而掺加 12% 纳米  $\text{SiO}_2$  试样的 7d、28d 强度是普通试样的近 2.5

倍。M. S. Morsy 等研究了多臂碳纳米管和纳米偏高岭土对水泥砂浆的改性作用,结果表明在水泥砂浆中掺加 6% 纳米偏高岭土相比对比试样可以提高抗压强度 18%, SEM 显示多臂碳纳米管能在浆体的水化产物间起到很好的桥接作用,复掺 6% 纳米偏高岭土和 0.02% 多臂碳纳米管后,抗压强度可以进一步提升 11%。颗粒大小在  $200\text{nm} \times 100\text{nm} \times 20\text{nm}$  的偏高岭土颗粒在平均粒径为  $10\mu\text{m}$  的水泥颗粒中起到了很好的填充作用,偏高岭土主要成分  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  长期的火山灰反应也是多臂碳纳米管与基体界面过渡区良好结合的重要因素。过多的碳纳米管会导致团聚的产生,大量碳纳米管包裹在水泥颗粒周围而产生较差的结合效果。Ehaan 等研究了掺加水泥质量比为 5% 的喷碳纳米  $\text{SiO}_2$  和未经处理的纳米  $\text{SiO}_2$  对 0.22 水胶比超高性能水泥基复合材料早期和后期强度的影响。纳米  $\text{SiO}_2$  的掺入使得超高性能水泥基复合材料的 7d 抗压强度提高了 11%, 28d 强度提高了 6%, 其对早期强度的改善更为明显。纳米  $\text{SiO}_2$  表面喷碳后增强超高性能水泥基复合材料的强度没有提升反而出现了下降,表明其增强作用主要在于其超高的火山灰活性。

[0005] 而且,纳米材料的价格非常昂贵,这使得纳米材料增强超高性能水泥基复合材料价格也大幅上升,很难大规模推广应用,因此有必要从现有的工业废渣中寻找纳米尺度的物质。

[0006] 同时我们注意到,目前我国工业生产固体废渣已达 155 亿吨,矿山固体废弃物达 250 亿吨以上,并以年排放量 1000 万吨速度增加,再生技术水平低,总利用率不足 20%,这不仅加剧对环境的污染,也造成了能源和资源的巨大浪费。因此,利用材料科学理论,合理发挥工业废渣的形态效应、火山灰效应和填充效应,采用常规原材料和普通的生产工艺,制备低成本、高强度等级的超高性能水泥基复合材料,对于节省能源、资源,保护生态环境,提高水泥基复合材料材料的各项重要性能,具有重要的现实意义和实际应用价值。

[0007] 因此,进一步提高超高性能水泥基复合材料的强度并使之应用于对力学性能要求更高的工程结构中具有重要的意义。通过在现有工业废渣(硅灰、超细粉煤灰、稻壳灰等)中寻找具有纳米尺度物质的矿物掺合料,并从中分离出颗粒密度大于  $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、粒径小于 100nm、主要化学成分为无定形  $\text{SiO}_2$  或  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  复合相的球形颗粒作为生态纳米颗粒来提高超高性能水泥基复合材料的力学性能,是进一步提升该材料性价比的重要途径。

## 发明内容

[0008] 技术问题:本发明目的是提供一种具有抗压强度达 300MPa 以上、抗折强度达 60MPa 以上、可高效利用工业废渣的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料,同时还提供了一种该复合材料的制备方法。

[0009] 技术方案:本发明的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料,包括以下质量百分比的组分:

[0010] 水泥 23.5%~26.9%;

[0011] 生态纳米颗粒 15.6%~23.1%;

[0012] 高性能减水剂 1.2%~1.5%;

[0013] 分散剂 0.6%~1.2%;

[0014] 消泡剂 0.01%~0.02%;

[0015] 水  $\leq 5\%$ ;

- [0016] 高强细集料 36.0%~50.0%；
- [0017] 高强超细钢纤维 5.0%~13.0%；
- [0018] 其中水泥是强度等级 52.5~62.5 的硅酸盐水泥；
- [0019] 生态纳米颗粒是从硅灰、超细粉煤灰、稻壳灰、磨细钢渣、磨细矿渣、赤泥等任意一种工业废渣中分离出的密度大于  $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、粒径小于 100nm 的球形纳米颗粒，要求该生态纳米颗粒的弹性模量超过 50GPa，抗压强度超过 500MPa，且主要化学成分为无定形  $\text{SiO}_2$  或  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  复合相；
- [0020] 高性能减水剂是减水率 50% 以上的聚羧酸类外加剂；
- [0021] 分散剂为静电排斥稳定型分散剂、空间位阻稳定型分散剂和静电位阻稳定型分散剂中的任意一种；
- [0022] 消泡剂是高效有机硅消泡粉；
- [0023] 高强细集料是最大粒径不超过 4.75mm 且抗压强度超过 200MPa 的辉长岩、辉绿岩和玄武岩机制砂，连续级配，细度模数为  $3\sim 2.3$ ，含泥量小于 1%；
- [0024] 高强超细钢纤维是直径为 0.2mm，长度 13mm，抗拉强度  $\geq 2850\text{MPa}$  的镀铜微细钢纤维；
- [0025] 本发明生态纳米颗粒增强水泥基复合材料的制备方法，包括以下步骤：
- [0026] 1) 按配方比例称取球形纳米颗粒团聚体与分散剂混合干拌 1~2 分钟，再倒入盛满水的 200W 功率超声波振荡仪中，超声振荡混合 20 分钟后，将浆体置于真空干燥箱中，在  $40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$  温度范围内真空干燥 12 小时，制备出分散的生态纳米颗粒；
- [0027] 2) 将按配方比例称取的水泥、生态纳米颗粒、高强细集料在砂浆搅拌容器中干拌 3 分钟，得到干料，其中生态纳米颗粒为步骤 1) 中制备的分散的生态纳米颗粒；
- [0028] 3) 称取高性能减水剂、消泡剂和水混合均匀成水剂，缓慢倒入步骤 2) 得到的干料中，继续搅拌 10 分钟；
- [0029] 4) 将钢纤维均匀的加入砂浆搅拌容器内，再持续搅拌 2~3 分钟，使钢纤维均匀的分散在基体中，得到水泥基复合材料；
- [0030] 5) 将步骤 4) 制备好的水泥基复合材料装入模具内，覆盖一层塑料膜密封， $20\pm 2^\circ\text{C}$  条件下带模养护 3 天后拆模；
- [0031] 6) 经标准养护 90 天或  $85^\circ\text{C}$  蒸养 5 天，可得到抗压强度 300MPa、抗折强度 60MPa 以上的超高性能水泥基复合材料。
- [0032] 本发明为高效再生利用工业废渣中的纳米颗粒开辟了新方向，制备的水泥基复合材料主要用于高层建筑、大跨径桥梁、高速铁路、隧道工程、国防防护工程、核电工程等土木工程材料领域。
- [0033] 有益效果：本发明与现有技术相比，具有以下优点：
- [0034] 本发明高效利用我国资源丰富的工业废渣(粉煤灰、硅灰、稻壳灰等)，从中提取生态纳米颗粒并大量取代水泥，同时使用减水率 50% 以上的高性能外加剂及国产的高强超细镀铜钢纤维，通过水泥、生态纳米颗粒、化学外加剂、钢纤维及其多元复合技术的有效和高效利用，大大促进了混凝土材料组成与结构优化，各组分优势叠加、成份互补，生态纳米颗粒的特殊物化效应(颗粒形态效应、微集料效应、表面效应、火山灰质效应)使得结构更加致密、砂和钢纤维分散更加均匀，充分发挥其骨架增强作用，在简单成型工艺及养护制度下，

成功制备出了抗压强度达 300MPa, 抗折强度 60MPa 以上的生态纳米颗粒增强超高性能水泥基复合材料。

[0035] 与国内外同类技术相比, 该项成果具有以下特色: (1) 性价比高。本发明所使用的原材料全部为水泥基复合材料制备过程中所用的常规材料, 原材料易得, 价格低廉。(2) 生态环保, 节能减排。本发明所用的工业废渣为发电厂、炼铁厂等工业副产品, 通过制备生态纳米颗粒增强超高性能水泥基复合材料, 不仅可实现大规模高效利用工业废渣、缓解环境压力, 而且其制备工艺简单, 不需要高压养护, 原材料成本和生产成本均较低, 具有显著降低生产能耗和节能环保效用。(3) 施工方便。本发明制备出的水泥基复合材料流动性好, 在工程现场施工和预制构件制作中均能得到广泛应用。

### 具体实施方式

[0036] 本发明的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料, 是由八大组分组成, 其比例为:

[0037] 水泥 23.5%~26.9%;

[0038] 生态纳米颗粒 15.6%~23.1%;

[0039] 高性能减水剂 1.2%~1.5%;

[0040] 分散剂 0.6%~1.2%;

[0041] 消泡剂 0.01% ~ 0.02%;

[0042] 水  $\leq$  5%;

[0043] 高强细集料 36.0%~50.0%;

[0044] 高强超细钢纤维 5.0%~13.0%;

[0045] 1) 水泥: 强度等级 52.5~62.5 的硅酸盐水泥;

[0046] 2) 生态纳米颗粒: 是从硅灰、超细粉煤灰、稻壳灰、磨细钢渣、磨细矿渣、赤泥等任意一种工业废渣中分离出的密度大于  $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、粒径小于 100nm 的球形纳米颗粒, 要求该生态纳米颗粒的弹性模量超过 50GPa, 抗压强度超过 500MPa, 且主要化学成分为无定形  $\text{SiO}_2$  或  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  复合相;

[0047] 3) 高性能减水剂: 减水率 50% 以上的聚羧酸类外加剂;

[0048] 4) 分散剂: 静电排斥稳定型分散剂、空间位阻稳定型分散剂和静电位阻稳定型分散剂中的任意一种;

[0049] 5) 消泡剂: 高效有机硅消泡粉;

[0050] 6) 高强细集料: 最大粒径不超过 4.75mm 且抗压强度超过 200MPa 的辉长岩、辉绿岩和玄武岩机制砂, 连续级配, 细度模数为 3~2.3, 含泥量小于 1%;

[0051] 7) 高强超细钢纤维: 直径为 0.2mm, 长度 13mm, 抗拉强度  $\geq$  2850MPa 的镀铜微细钢纤维;

[0052] 本发明提出的 300MPa 强度等级的生态纳米颗粒增强超高性能水泥基复合材料及其制备方法, 具体步骤如下:

[0053] 1) 按配方比例称取球形纳米颗粒团聚体与分散剂混合干拌 1~2 分钟, 再倒入盛满水的 200W 功率超声波振荡仪中, 超声振荡混合 20 分钟后, 将浆体置于真空干燥箱中, 在  $40^\circ\text{C}$ ~ $60^\circ\text{C}$  温度范围内真空干燥 12 小时, 制备出分散的生态纳米颗粒;

[0054] 2) 将按配方比例称取的水泥、生态纳米颗粒、高强细集料在砂浆搅拌容器中干拌 3

分钟,得到干料,生态纳米颗粒为步骤 1) 中制备的分散的生态纳米颗粒;

[0055] 3) 称取高性能减水剂、消泡剂和水混合均匀成水剂,缓慢倒入步骤 2) 得到的干料中,继续搅拌 10 分钟;

[0056] 4) 将钢纤维均匀的加入砂浆搅拌容器内,再持续搅拌 2~3 分钟,使钢纤维均匀的分散在基体中,得到水泥基复合材料;

[0057] 5) 将步骤 4) 制备好的水泥基复合材料装入模具内,覆盖一层塑料膜密封,20±2℃条件下带模养护 3 天后拆模;

[0058] 6) 经标准养护 90 天或 85℃蒸养 5 天,可得到抗压强度 300MPa、抗折强度 60MPa 以上的超高性能水泥基复合材料。

[0059] 本发明的达到并超过 300MPa 抗压强度、60MPa 抗折强度的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料,可根据应用需要,通过调整配方,获得所需要的性能。

[0060] 结合本发明内容提供以下实施例,但本发明不限于以下实施例:

[0061] 以下按重量百分比计:

[0062] 实施例 1:

[0063] 水泥 23.5%

[0064] 生态纳米颗粒 18.5%

[0065] 高性能减水剂 1.2%

[0066] 消泡剂 0.01%

[0067] 高强细集料 42.8%

[0068] 高强超细钢纤维 9.4%

[0069] 余量为水。

[0070] 其中,水泥是 P. II 52.5 硅酸盐水泥,生态纳米颗粒是从 I 级超细粉煤灰中提取的硅质球形纳米颗粒,高强细集料是细度模数 M=3 的玄武岩机制砂,高效能减水剂是减水率超过 50% 的聚羧酸类减水剂,消泡剂是高效有机硅消泡粉,采用标准养护。生态纳米颗粒分散所用的分散剂是空间位阻稳定型分散剂,重量百分比为 0.6%。上述组分按前述工艺制备得到的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料,测得其力学性能如下:

[0071] 抗压强度(90d) 307.4MPa,抗折强度(90d) 60.81MPa。

[0072] 实施例 2:

[0073] 水泥 26.4%

[0074] 生态纳米颗粒 15.6%

[0075] 高性能减水剂 1.3%

[0076] 消泡剂 0.012%

[0077] 高强细集料 39.1%

[0078] 高强超细钢纤维 12.6%

[0079] 余量为水。

[0080] 其中,水泥是 P. II 52.5 硅酸盐水泥,生态纳米颗粒是从 I 级超细粉煤灰中提取的硅铝质球形纳米颗粒,高强细集料是细度模数 M=2.7 的玄武岩机制砂,高效能减水剂是减水率超过 50% 的聚羧酸类减水剂,消泡剂是高效有机硅消泡粉,采用 85℃蒸气养护。生态纳米颗粒分散所用的分散剂是静电排斥稳定型分散剂,重量百分比为 1.0%。上述组分按前

述工艺制备得到的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料,测得其力学性能如下:

[0081] 抗压强度(5d) 308.0MPa,抗折强度(5d) 61.23MPa。

[0082] 实施例 3:

[0083] 水泥 26.9%

[0084] 生态纳米颗粒 23.1%

[0085] 高性能减水剂 1.5%

[0086] 消泡剂 0.02%

[0087] 高强细集料 36.0%

[0088] 高强超细钢纤维 9.4%

[0089] 余量为水。

[0090] 其中,水泥是 P. II 62.5 硅酸盐水泥,生态纳米颗粒是从硅灰中提取的硅铝质球形纳米颗粒,高强细集料是细度模数  $M=2.3$  的辉绿岩机制砂,高效能减水剂是减水率超过 50% 的聚羧酸类减水剂,消泡剂是高效有机硅消泡粉,采用标准养护。生态纳米颗粒分散所用的分散剂是静电位阻稳定型分散剂,重量百分比为 1.2%。上述组分按前述工艺制备得到的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料,测得其力学性能如下:

[0091] 抗压强度(90d) 312.1MPa,抗折强度(90d) 61.05MPa。

[0092] 实施例 4:

[0093] 水泥 23.5%

[0094] 生态纳米颗粒 19.1%

[0095] 高性能减水剂 1.4%

[0096] 消泡剂 0.015%

[0097] 高强细集料 38.0%

[0098] 高强超细钢纤维 13.0%

[0099] 余量为水。

[0100] 其中,水泥是 P. II 62.5 硅酸盐水泥,生态纳米颗粒是从硅灰中提取的硅铝质球形纳米颗粒,高强细集料是细度模数  $M=2.5$  的辉绿岩机制砂,高效能减水剂是减水率超过 50% 的聚羧酸类减水剂,消泡剂是高效有机硅消泡粉,采用 85℃ 蒸气养护。生态纳米颗粒分散所用的分散剂是空间位阻稳定型分散剂,重量百分比为 1.1%。上述组分按前述工艺制备得到的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料,测得其力学性能如下:

[0101] 抗压强度(5d) 320.2MPa,抗折强度(5d) 62.51MPa。

[0102] 实施例 5:

[0103] 水泥 23.5%

[0104] 生态纳米颗粒 16.5%

[0105] 高性能减水剂 1.2%

[0106] 消泡剂 0.012%

[0107] 高强细集料 50.0%

[0108] 高强超细钢纤维 5.0%

[0109] 余量为水。

[0110] 其中,水泥是 P. II 52.5 硅酸盐水泥,生态纳米颗粒是从硅灰中提取的硅铝质球



形纳米颗粒, 高强细集料是细度模数  $M=2.7$  的玄武岩机制砂, 高效能减水剂是减水率超过 50% 的聚羧酸类减水剂, 消泡剂是高效有机硅消泡粉, 采用  $85^{\circ}\text{C}$  蒸气养护。生态纳米颗粒分散所用的分散剂是空间位阻稳定型分散剂, 重量百分比为 0.6%。上述组分按前述工艺制备得到的生态纳米颗粒增强水泥基复合材料, 测得其力学性能如下:

[0111] 抗压强度(5d) 308.5MPa, 抗折强度(5d) 60.73MPa。