



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114804791 A

(43) 申请公布日 2022.07.29

(21) 申请号 202210491009.1

B33Y 10/00 (2015.01)

(22) 申请日 2022.05.07

(71) 申请人 西安建筑科技大学

地址 710055 陕西省西安市雁塔路13号

(72) 发明人 刘超 姚羿舟 刘化威 武怡文

丁淑敏

(74) 专利代理机构 西安恒泰知识产权代理事务

所 61216

专利代理师 孙雅静

(51) Int. Cl.

C04B 28/06 (2006.01)

C04B 18/08 (2006.01)

C04B 18/14 (2006.01)

C04B 24/38 (2006.01)

B33Y 70/10 (2020.01)

权利要求书2页 说明书14页 附图1页

(54) 发明名称

一种可调控流变性的3D打印混凝土、制备方法
及打印工艺

(57) 摘要

本发明公开了一种可调控流变性的3D打印混凝土、制备方法及打印工艺,可调控流变性的3D打印混凝土由以下成分按质量百分含量组成:水泥20%~25%;再生粗骨料30%~40%;细骨料20%~30%;水5%~12%;粉煤灰2%~4%;硅灰1%~2%;早强剂2%~5%;纤维0.02%~0.1%;纤维素醚0.02%~0.05%;超级塑化剂0.1%~0.4%;粘度改性剂0.05%~0.1%;增稠剂0.01%~0.05%。本发明采取“材料优化-调整参数-整体提高”的设计思路,有效提高浆料打印的开放时间,实现精准调控拌合物可打印性和可建造性。使得3D打印再生粗骨料混凝土的力学性能和耐久性得到提高,同时再生粗骨料替代天然粗骨料符合绿色低碳的发展理念,因此该技术适用于实际工程,为3D打印再生粗骨料的推广发展提供了理论支撑。

1. 一种可调控流变性的3D打印混凝土,其特征在于,由以下成分按质量百分含量组成:

水泥20%~25%;
再生粗骨料30%~40%;
细骨料20%~30%;
水5%~12%;
粉煤灰2%~4%;
硅灰1%~2%;
早强剂2%~5%;
纤维0.02%~0.1%;
纤维素醚0.02%~0.05%;
超级塑化剂0.1%~0.4%;
粘度改性剂0.05%~0.1%;
增稠剂0.01%~0.05%。

2. 根据权利要求1所述的可调控流变性的3D打印混凝土,其特征在于,由以下原料按质量份数组成:

水泥240份、再生粗骨料360份、细骨料240份、早强剂32份、纤维0.5份、纤维素醚0.5份、增稠剂0.5份、粉煤灰21份、硅灰11份、粘度改性剂0.5份、90份水和4份超级塑化剂。

3. 根据权利要求1或2所述的可调控流变性的3D打印混凝土,其特征在于,所述的3D打印混凝土的制备方法包括:

水泥、再生粗骨料、细骨料和早强剂混合3min,再加入纤维、纤维素醚和增稠剂混合2min,最后加入粉煤灰、硅灰和粘度改性剂混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

最后将水和超级塑化剂加入搅拌机混合搅拌2min。

4. 根据权利要求3所述的可调控流变性的3D打印混凝土,其特征在于,原料混合后还需进行静置,静置时间为5min。

5. 根据权利要求1或2所述的可调控流变性的3D打印混凝土,其特征在于,所述原料想选取指标包括:

水泥为P0 42.5级普通硅酸盐水泥,28天抗压强度为50~55MPa,标准稠度用水量为22%~27%,初凝时间为130~150min,终凝时间为230~260min;

再生粗骨料为粒径5-12mm连续级配碎石料,粒径范围包括5-7mm、7-10mm和10-12mm,各个粒径的质量占比为8:15:7;吸水率为6.5%~7.5%,表观密度为2550~2660kg/m³,压碎指标为22.8%~24.2%;

细骨料为平均粒径0.3~0.6mm天然河砂,最大粒径为2.8mm,细度模数为2.0~2.3,含水率为3%;

粉煤灰为F类、I级灰,粒径分布范围1~100um,50%的颗粒粒径小于20um,密度为2500~2700kg/m³,比表面积1500~1580m²/g;

硅灰的平均粒径0.1~0.3um、比表面积为25000~29000m²/g、密度为2.0~3.0g/cm³、硅灰中二氧化硅含量≥95%;

早强剂为以无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物组成的硫铝酸盐水泥,其烧失量为

10%~14%，1天的抗压强度75~85MPa；

纤维为聚乙烯醇纤维，其直径为20~50 μm ，长度为9~15mm，抗拉强度为1590MPa，杨氏模量为30GPa，断裂伸长率为7.5%，密度为1.3g/cm³；

纤维素醚为白色纤维状的羟丙基甲基纤维素醚，视密度0.25~0.70g/cm³，比重1.26~1.31；

超级塑化剂为聚羧酸高效减水剂，固体含量为10~50%，减水率为15%，沁水率为90%；

粘度改性剂为纳米粘土，主要化学成分SiO₂和Al₂O₃，晶片平均厚度为20nm~50nm，晶片平均直径300nm~500nm，比表面积32m²/g；

增稠剂为温轮胶，由产碱杆菌分泌的可溶性胞外多糖。

6. 一种可调控流变性的3D打印混凝土的制备方法，其特征在于，所述的可调控流变性的3D打印混凝土为权利要求1或2所述的可调控流变性的3D打印混凝土，制备步骤包括：

S1、将制备原料按配合比称重后分为4组；第一组为水泥、再生粗骨料、细骨料和早强剂，第二组为纤维、纤维素醚和增稠剂，第三组为粉煤灰、硅灰和粘度改性剂，第四组为水和超级塑化剂；

S2、在搅拌机中加入水泥、再生粗骨料、细骨料和早强剂混合3min，再加入纤维、纤维素醚和增稠剂混合2min，最后加入粉煤灰、硅灰和粘度改性剂混合2min，得到混合干料，搅拌机搅拌速度设置为160r/min；

S3、将水和超级塑化剂加入搅拌机混合搅拌1~2min，得到混合浆料，搅拌机搅拌速度设置为180r/min，混合浆料拌合物在放入3D打印机挤出前静置。

7. 根据权利要求6所述的可调控流变性的3D打印混凝土的制备方法，其特征在于，所述静置的静置时间为5min。

8. 一种3D打印工艺，其特征在于，打印对象为可调控流变性的3D打印混凝土，可调控流变性的3D打印混凝土为权利要求1或2所述的可调控流变性的3D打印混凝土；

打印参数为：喷头移动速度为120~140mm/s，螺杆挤出速度为150~200r/min，喷头高度为20~30mm，层间打印时间间隔为15~60s。

9. 根据权利要求8所述的3D打印工艺，其特征在于，所述的螺杆挤出速度为180r/min。

10. 根据权利要求8所述的3D打印工艺，其特征在于，采用桁架式3D打印机，喷头采用圆形喷头，直径为40mm，单层预设高度15~20mm；

打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。

一种可调控流变性的3D打印混凝土、制备方法及打印工艺

技术领域

[0001] 本发明属于建筑材料技术领域,特别涉及一种可调控流变性的3D打印混凝土、制备方法及打印工艺。

背景技术

[0002] 近年来,传统建筑业面临产能落后、效率低下的发展困局,以数字化和自动化为特点的智能建造正在掀起一场深刻改变建筑业发展的巨大革命。3D打印混凝土技术是将水泥基材料层层堆积采用自下而上的制造方式将数字模型构建成实物的技术。3D打印混凝土技术以其高效建造、安全环保、自由设计等优点正成为智能建造领域的凸出代表技术之一。

[0003] 随着城市化进程的逐渐加快,大量的建筑垃圾不断产生,对生态环境的保护起到了严峻的考验,建筑垃圾资源化、再生化可以实现废弃混凝土的循环利用,是发展绿色低碳混凝土的重要措施之一。再生骨料部分替代或全部替代天然骨料已成为混凝土材料向着低碳环保发展的重要举措。将再生粗骨料掺入3D打印混凝土以减少水泥等胶凝材料的方法使得3D打印混凝土更加符合绿色低碳的发展理念,同时现有3D打印技术大多采用砂浆为原料,其较差的整体性和抗震性能限制了3D打印混凝土技术的发展。加入再生粗骨料增强了3D打印混凝土结构的整体性,提高了3D打印混凝土结构的抗震性能。

[0004] 但再生粗骨料在3D打印混凝土中应用存在一定的困难与挑战,主要原因是再生粗骨料的加入导致骨料粒径增大,且因为再生粗骨料的吸水率高、表面粗糙度高,造成骨料与骨料之间、骨料与凝胶颗粒之间的机械咬合力和相对摩擦力增大,使拌合物的屈服应力和塑性粘度大幅增加,显著缩短开放时间,造成流变性离散性增大而难以控制,影响拌合物的可打印性。屈服应力增长过快会导致材料挤出后断点及表观裂纹增多,拌合物粘度过高会造成打印条撕裂或打印喷头堵塞,使得3D打印无模堆叠制造无法完成。

发明内容

[0005] 本发明主要目的在于提供一种可调控流变性的3D打印混凝土、制备方法及打印工艺,有效解决了3D打印混凝土浆料因加入再生粗骨料导致浆料流变性离散性增大难以控制的难题。

[0006] 本发明的目的及解决其技术问题是采用以下技术方案来实现的。

[0007] 一种可调控流变性的3D打印混凝土,由以下成分按质量百分含量组成:

[0008] 水泥20%~25%;

[0009] 再生粗骨料30%~40%;

[0010] 细骨料20%~30%;

[0011] 水5%~12%;

[0012] 粉煤灰2%~4%;

[0013] 硅灰1%~2%;

[0014] 早强剂2%~5%;

- [0015] 纤维0.02%~0.1%；
- [0016] 纤维素醚0.02%~0.05%；
- [0017] 超级塑化剂0.1%~0.4%；
- [0018] 粘度改性剂0.05%~0.1%；
- [0019] 增稠剂0.01%~0.05%。
- [0020] 可选的,由以下原料按质量份数组成:
- [0021] 水泥240份、再生粗骨料360份、细骨料240份、早强剂32份、纤维0.5份、纤维素醚0.5份、增稠剂0.5份、粉煤灰21份、硅灰11份、粘度改性剂0.5份、90份水和4份超级塑化剂。
- [0022] 可选的,所述的3D打印混凝土的制备方法包括:
- [0023] 水泥、再生粗骨料、细骨料和早强剂混合3min,再加入纤维、纤维素醚和增稠剂混合2min,最后加入粉煤灰、硅灰和粘度改性剂混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;
- [0024] 最后将水和超级塑化剂加入搅拌机混合搅拌2min。
- [0025] 可选的,原料混合后还需进行静置,静置时间为5min。
- [0026] 可选的,所述原料想选取指标包括:
- [0027] 水泥为P0 42.5级普通硅酸盐水泥,28天抗压强度为50~55MPa,标准稠度用水量为22%~27%,初凝时间为130~150min,终凝时间为230~260min;
- [0028] 再生粗骨料为粒径5-12mm连续级配碎石料,粒径范围包括5-7mm、7-10mm和10-12mm,各个粒径的质量占比为8:15:7;吸水率为6.5%~7.5%,表观密度为2550~2660kg/m³,压碎指标为22.8%~24.2%;
- [0029] 细骨料为平均粒径0.3~0.6mm天然河砂,最大粒径为2.8mm,细度模数为2.0~2.3,含水率为3%;
- [0030] 粉煤灰为F类、I级灰,粒径分布范围1~100um,50%的颗粒粒径小于20um,密度为2500~2700kg/m³,比表面积1500~1580m²/g;
- [0031] 硅灰的平均粒径0.1~0.3um、比表面积为25000~29000m²/g、密度为2.0~3.0g/cm³、硅灰中二氧化硅含量≥95%;
- [0032] 早强剂为以无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物组成的硫铝酸盐水泥,其烧失量为10%~14%,1天的抗压强度75~85MPa;
- [0033] 纤维为聚乙烯醇纤维,其直径为20~50μm,长度为9~15mm,抗拉强度为1590MPa,杨氏模量为30GPa,断裂伸长率为7.5%,密度为1.3g/cm³;
- [0034] 纤维素醚为白色纤维状的羟丙基甲基纤维素醚,视密度0.25~0.70g/cm³,比重1.26~1.31;
- [0035] 超级塑化剂为聚羧酸高效减水剂,固体含量为10~50%,减水率为15%,沁水率为90%;
- [0036] 粘度改性剂为纳米粘土,主要化学成分SiO₂和Al₂O₃,晶片平均厚度为20nm~50nm,晶片平均直径300nm~500nm,比表面积32m²/g;
- [0037] 增稠剂为温轮胶,由产碱杆菌分泌的可溶性胞外多糖。
- [0038] 一种可调控流变性的3D打印混凝土的制备方法,其特征在于所述的可调控流变性的3D打印混凝土为本发明所述的可调控流变性的3D打印混凝土,制备步骤包括:

[0039] S1、将制备原料按配合比称重后分为4组；第一组为水泥、再生粗骨料、细骨料和早强剂，第二组为纤维、纤维素醚和增稠剂，第三组为粉煤灰、硅灰和粘度改性剂，第四组为水和超级塑化剂；

[0040] S2、在搅拌机中加入水泥、再生粗骨料、细骨料和早强剂混合3min，再加入纤维、纤维素醚和增稠剂混合2min，最后加入粉煤灰、硅灰和粘度改性剂混合2min，得到混合干料，搅拌机搅拌速度设置为160r/min；

[0041] S3、将水和超级塑化剂加入搅拌机混合搅拌1~2min，得到混合浆料，搅拌机搅拌速度设置为180r/min，混合浆料拌合物在放入3D打印机挤出前静置。

[0042] 可选的，所述静置的静置时间为5min。

[0043] 一种3D打印工艺，打印对象为可调控流变性的3D打印混凝土，可调控流变性的3D打印混凝土为权利要求1或2所述的可调控流变性的3D打印混凝土；

[0044] 打印参数为：喷头移动速度为120~140mm/s，螺杆挤出速度为150~200r/min，喷头高度为20~30mm，层间打印时间间隔为15~60s。

[0045] 可选的，所述的螺杆挤出速度为180r/min。

[0046] 可选的，采用桁架式3D打印机，喷头采用圆形喷头，直径为40mm，单层预设高度15~20mm；打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。

[0047] 上述技术方案体现本发明的优点有：

[0048] (1) 本发明提供了一种可调控流变性的3D打印再生粗骨料混凝土材料及制备方法，利用粉煤灰和硅灰的“滚珠效应”和减水剂的“分散效应”，显著改善了混凝土浆料的流变性。通过对配合比的合理调控，优化了混凝土的颗粒级配，挤出填充水并增加自由水，降低了混凝土浆料的粘度和静态屈服应力，实现了3D打印混凝土优异的可打印性能。

[0049] (2) 本发明提供了一种可调控流变性的3D打印再生粗骨料混凝土材料及制备方法，突破了3D混凝土打印技术不适合打印再生粗骨料的瓶颈，通过合理调节3D打印机的工作参数，实现了3D混凝土打印条打印过程中良好的流动性和挤出性能，保证打印喷头不发生喷涌和堵塞的现象，硅灰、纤维素醚和硫铝酸盐水泥的掺入实现了打印后试件强度的快速提高，增强了3D打印试件的可建造性。

[0050] (3) 本发明提供了一种可调控流变性的3D打印再生粗骨料混凝土材料及制备方法，通过添加掺合料和外加剂和调控各材料配合比，并控制打印参数在合理的区间范围，充分发挥了再生粗骨料带来的3D打印混凝土整体性增强的优势，并弥补了流变性降低的缺陷，全面实现了3D打印再生粗骨料混凝土的可打印性、可建造性的优化，且材料来源易得，施工方便，可显著提升3D打印再生粗骨料混凝土的应用推广，具有较高的应用价值和经济效益。

[0051] 上述说明仅是本发明技术方案的概述，为了更好地说明本发明的目的和实施手段，下面结合具体实施例对本发明技术方案做进一步详细说明。

附图说明

[0052] 附图是用来提供对本发明的进一步理解，并且构成说明书的一部分，结合下面的具体实施方式用于解释本发明的技术方案，但并不构成对本发明的限制。在附图中：

[0053] 图1为3D打印再生粗骨料混凝土不同实施例的剪切应力随剪切时间的变化图；

[0054] 图2为3D打印再生粗骨料混凝土不同实施例的打印效果图,其中图a为实施例一打印效果图,图b为实施例二打印效果图,图c为实施例四打印效果图,图d为对比例一打印效果图,图e为对比例三打印效果图。

具体实施方式

[0055] 从目前已有含3D打印再生粗骨料混凝土技术公开知,再生粗骨料主要指建筑垃圾破碎分选得到的粒径大于5mm的石子。有鉴于上述现有3D打印再生粗骨料混凝土中存在的缺陷,本发明人基于已有文献研究进行合理创新,发明了一种新的可调控流变性的3D打印再生粗骨料混凝土材料及其制备方法。可调控流变性的混凝土配合比能够解决因加入再生粗骨料带来的流变性离散性增大难以控制的难题,为3D打印混凝土技术的应用推广提供了理论支撑。

[0056] 为了使本发明实现的技术手段、创作特征、达成效果明白易懂、详细全面、反映真实,结合以下6个实施例和6个对比例,对本发明的技术方案进行清楚、详细地描述。显然,所描述的实施例和对比例仅仅是一部分流变性离散较小易控制的实施例和流变性离散过大的对比例,而不是全部实施例和对比例。基于本发明中的实施例,在此基础上进行简单重复或者有限创造的其它实施例,均属于本发明的保护范围。

[0057] 下述实施例中,P0 42.5级硅酸盐水泥和硫铝酸盐水泥采购于郑州市建文特材科技有限公司,再生粗骨料由陕西建鑫环保科技有限公司提供,其制备是利用废弃混凝土经破碎加工、分级筛分后而制得,为粒径5-12mm连续级配碎石料。如未特别说明,本发明采用的设备均为本领域常用设备。

[0058] 本发明的再生粗骨料3D打印混凝土材料按重量百分比计,混凝土材料包含如下表1的成分且各成分含量为:

[0059] 表1 3D打印再生粗骨料混凝土材料成分及成分含量

	材料	含量
[0060]	水泥	20%~25%
	再生粗骨料	30%~40%

	细骨料	20%~30%
	水	5%~12%
	粉煤灰	2%~4%
	硅灰	1%~2%
	早强剂	2%~5%
[0061]	纤维	0.02%~0.1%
	纤维素醚	0.02%~0.05%
	超级塑化剂	0.1%~0.4%
	粘度改性剂	0.05%~0.1%
	增稠剂	0.01%~0.05%

[0062] 水泥为P0 42.5级普通硅酸盐水泥,28天抗压强度为50~55MPa,标准稠度用水量为22%~27%,初凝时间为130~150min,终凝时间为230~260min。

[0063] 再生粗骨料为粒径5-12mm连续级配碎石料,粒径范围包括5-7mm、7-10mm、10-12mm,质量占比为8:15:7,不同粒径的再生粗骨料通过筛网筛分获取。吸水率为6.5%~7.5%,表观密度为2550~2660kg/m³,压碎指标为22.8%~24.2%。

[0064] 细骨料为平均粒径0.3~0.6mm天然河砂,最大粒径为2.8mm,细度模数为2.0~2.3,含水率为3%。

[0065] 水为PH为7.3的西安市普通自来水。

[0066] 粉煤灰为F类、I级灰,粒径分布范围1~100um,50%的颗粒粒径小于20um,密度为2500~2700kg/m³,比表面积1500~1580m²/g,颗粒为珠状形态。

[0067] 硅灰的平均粒径0.1~0.3um、比表面积为25000~29000m²/g、密度为2.0~3.0g/cm³、硅灰中二氧化硅含量≥95%。

[0068] 早强剂为以无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物组成的硫铝酸盐水泥,包含赤泥、铝灰、电石渣和脱硫石膏组分,其烧失量为10~14%,1天的抗压强度75~85MPa。

[0069] 纤维为聚乙烯醇纤维,其直径为20~50um,长度为9~15mm,抗拉强度为1590MPa,杨氏模量为30GPa,断裂伸长率为7.5%,密度为1.3g/cm³。

[0070] 纤维素醚为白色纤维状的羟丙基甲基纤维素醚,视密度0.25~0.70g/cm³,比重1.26~1.31。

[0071] 超级塑化剂为聚羧酸高效减水剂,固体含量为10~50%,减水率为15%,沁水率为90%。

[0072] 粘度改性剂为纳米粘土,主要化学成分SiO₂和Al₂O₃,晶片平均厚度为20nm~50nm,

晶片平均直径300nm~500nm,比表面积 $32\text{m}^2/\text{g}$ 。

[0073] 增稠剂为温轮胶,由产碱杆菌分泌的可溶性胞外多糖,具有良好的耐温性、流变性、保水性等特点。

[0074] 本发明的目的及解决其技术问题还可采用以下技术方案进一步实现。

[0075] 本发明的再生粗骨料3D打印混凝土材料制备方法,制备步骤包括:

[0076] S1、将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。第一组为硅酸盐水泥、再生粗骨料、河砂、硫铝酸盐水泥,第二组为聚乙烯醇纤维、羟丙基甲基纤维素醚和温轮胶,第三组为粉煤灰、硅灰和纳米粘土,第四组为水和聚羧酸高效减水剂;

[0077] S2、在搅拌机中加入硅酸盐水泥、再生粗骨料、河砂、硫铝酸盐水泥混合3min,再加入聚乙烯醇纤维、羟丙基甲基纤维素醚和温轮胶混合2min,最后加入粉煤灰、硅灰和纳米粘土混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0078] S3、将水和聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌1min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,混合浆料拌合物在放入3D打印机挤出前静置一段时间,静置时间记为开放时间;

[0079] S4、将上述混合浆料放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为 $3.5\text{m}\times 3.5\text{m}\times 3\text{m}$,可打印长宽高 $3\text{m}\times 3\text{m}\times 1.2\text{m}$ 体积范围的混凝土试件,打印机配有 $12\text{m}\times 2\text{m}$ 的轨道,轨道上铺设3张每张 $1.5\text{m}\times 3\text{m}$ 可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度15~20mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120~140mm/s,螺杆挤出速度为150~200r/min,喷嘴高度为20~30mm,层间打印时间间隔为15~60s。打印试件尺寸设置为 $600\text{mm}\times 160\text{mm}\times 180\text{mm}$ 。

[0080] 本发明采取“材料优化-调整参数-整体提高”的设计思路,有效提高浆料打印的开放时间,实现精准调控拌合物可打印性和可建造性。上述手段的实施使得3D打印再生粗骨料混凝土的力学性能和耐久性得到提高,同时再生粗骨料替代天然粗骨料符合绿色低碳的发展理念,因此该技术适用于实际工程,为3D打印再生粗骨料的推广发展提供了理论支撑。

[0081] 本实施例以再生粗骨料替代率、开放时间和3D打印机的挤出速度以及3D打印再生粗骨料混凝土配合比作为变量,按重量份计算,实施例1、实施例2和实施例3再生粗骨料的替代率分别为100%、50%、0%。实施例1和实施例4分别将拌合物开放时间设置为5min和10min,实施例1和实施例5分别将3D打印机的螺杆挤出速度设置为180r/min和150r/min。实施例6采用素混凝土配合比进行3D打印。

[0082] 实施例一:(100%替代率、开放时间为5min,挤出速度180r/min)

[0083] (1)按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0084] (2)将90份水和4份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌物流动度,试验结果见表1;

[0085] (3) 将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为3.5m×3.5m×3m,可打印长宽高3m×3m×1.2m体积范围的混凝土试件,打印机配有12m×2m的轨道,轨道上铺设3张每张1.5m×3m可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为180r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0086] 图1反映了不同实施例和对比例的3D打印再生粗骨料混凝土混合浆料剪切应力随剪切时间的曲线变化图。其曲线的第一个峰值代表混合浆料的静态屈服应力大小,其对3D打印混凝土的可建造性有重要影响。剪切后期曲线平稳段的纵坐标值代表混合浆料的动态屈服应力大小,其决定3D打印混凝土挤出应力的的大小,间接影响浆料挤出量和打印条性能优劣。由图1可得,最优实施例一混合浆料的静态屈服应力大小为3884Pa,动态屈服应力大小大约为900Pa,结合图2(a)最优实施例一打印条连续无断点,再生粗骨料被砂浆紧密包裹,打印条层间结合紧密,没有因为自重和上层打印条的重力挤压而流动变形。结果表明,最优实施例一在合理的配合比和工艺参数以及两者之间的兼容协调下具有优异的可打印性和可建造性。

[0087] 实施例二:(50%替代率、开放时间为5min,挤出速度180r/min)

[0088] (1) 按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料180份、粒径5~12mm的连续级配天然粗骨料180份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0089] (2) 将90份水和4份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 $0.2s^{-1}$,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0090] (3) 将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为3.5m×3.5m×3m,可打印长宽高3m×3m×1.2m体积范围的混凝土试件,打印机配有12m×2m的轨道,轨道上铺设3张每张1.5m×3m可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为180r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0091] 图1反映了不同实施例和对比例的3D打印再生粗骨料混凝土混合浆料剪切应力随剪切时间的曲线变化图。由图1可得,实施例二混合浆料的静态屈服应力大小为3544Pa,动态屈服应力大小大约为1180Pa,结合图2(a)实施例二打印条出现部分断点,再生粗骨料未被砂浆紧密包裹,打印条因自重产生流动变形导致宽度增大,结果表明,实施例二因为再生粗骨料替代率的减小,静态屈服应力减小,打印条在仅自身重力的作用下便发生流动扩散。

动态屈服应力增大,导致在相同的挤出应力下挤出量减小,打印条出现部分断点和裂缝。

[0092] 实施例三:(0%替代率、开放时间为5min,挤出速度180r/min)

[0093] (1)按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配天然粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0094] (2)将90份水和4份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0095] (3)将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为 $3.5\text{m}\times 3.5\text{m}\times 3\text{m}$,可打印长宽高 $3\text{m}\times 3\text{m}\times 1.2\text{m}$ 体积范围的混凝土试件,打印机配有 $12\text{m}\times 2\text{m}$ 的轨道,轨道上铺设3张每张 $1.5\text{m}\times 3\text{m}$ 可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为180r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为 $600\text{mm}\times 160\text{mm}\times 180\text{mm}$ 。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0096] 图1反映了不同实施例和对比例的3D打印再生粗骨料混凝土混合浆料剪切应力随剪切时间的曲线变化图。由图1可得,实施例三混合浆料的静态屈服应力大小为3053Pa,动态屈服应力大小大约为720Pa。结果表明,随着再生粗骨料的替代率的减小,混合浆料的静态屈服应力持续降低,砂浆基体疏松多孔,与骨料发生分离,且打印条在自身重力作用下发生变形扩散。这是因为再生粗骨料吸水率高,表面粗糙,造成骨料与骨料之间、骨料与胶凝颗粒之间机械咬合力和相对摩擦力增大,因此再生粗骨料替代率越大,混合浆料的静态屈服应力越大。

[0097] 实施例四:(100%替代率、开放时间为10min,挤出速度180r/min)

[0098] (1)按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0099] (2)将90份水和4份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置10min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0100] (3)将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为 $3.5\text{m}\times 3.5\text{m}\times 3\text{m}$,可打印长宽高 $3\text{m}\times 3\text{m}\times 1.2\text{m}$ 体积范围的混凝土试件,打印机配有 $12\text{m}\times 2\text{m}$ 的轨道,轨道上铺设3张每张 $1.5\text{m}\times 3\text{m}$ 可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移

动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为180r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0101] 图1反映了不同实施例和对比例的3D打印再生粗骨料混凝土混合浆料剪切应力随剪切时间的曲线变化图。由图1可得,实施例四的剪切应力变化曲线出现多个剪切应力峰值的有趣现象,这可能是因为在混合浆料整体屈服的情况下,流变仪叶片周围的再生粗骨料发生了“骨料局部自锁”,造成局部范围内的屈服应力出现峰值。混合浆料的最大静态屈服应力大小为5852Pa,因“骨料局部自锁”现象剪切应力曲线无明显的平稳段,即动态屈服应力是实时变化的。结合图2(c)实施例四打印条出现明显的断裂现象,结果表明,实施例四因为混合浆料开放时间增加,静态屈服应力急剧增大,动态屈服应力持续改变,流变性的离散性过大,造成混合浆料挤出失败。

[0102] 实施例五:(100%替代率、开放时间为5min,挤出速度150r/min)

[0103] (1)按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0104] (2)将90份水和4份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0105] (3)将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为3.5m×3.5m×3m,可打印长宽高3m×3m×1.2m体积范围的混凝土试件,打印机配有12m×2m的轨道,轨道上铺设3张每张1.5m×3m可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为150r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0106] 实施例六:(素混凝土配方,水胶比0.30,粘聚性差,可打印性,可建造性较差)

[0107] (1)按重量份数计,在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥300份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份混合3min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0108] (2)将100份水加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0109] (3)将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为3.5m×3.5m×3m,可打印长宽高3m×3m×1.2m体积范围的混凝土试件,打印机配有12m×2m的轨道,轨道上铺设3张每张1.5m×3m可交替使用的滑动钢打印

平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为150r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。试验结果表明,此配合比下的再生粗骨料混凝土流动性过低,粘聚性较差,造成3D打印再生粗骨料混凝土可挤出性较差,再生粗骨料无法顺利挤出完成3D打印。

[0110] 对比例一:(开放时间为20min,开放时间过大)

[0111] (1)按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0112] (2)将90份水和4份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置20min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动度,试验结果见表1;

[0113] (3)将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为3.5m×3.5m×3m,可打印长宽高3m×3m×1.2m体积范围的混凝土试件,打印机配有12m×2m的轨道,轨道上铺设3张每张1.5m×3m可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为180r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0114] 图1反映了不同实施例和对比例的3D打印再生粗骨料混凝土混合浆料剪切应力随剪切时间的曲线变化图。由图1可得,对比例一的剪切应力变化曲线也出现多个剪切应力峰值,原因同实施例四。混合浆料的最大静态屈服应力大小为7812Pa,其静态屈服应力比实施例四大2060Pa,已严重超出合理的静态屈服应力范围,证明随混合浆料静置时间的增加,混合浆料不断硬化,静态屈服应力持续增大。因“骨料局部自锁”现象剪切应力曲线无明显的平稳段,即动态屈服应力是实时变化的。结合图2(d)对比例一打印条出现明显的断裂现象,再生粗骨料完全暴露在外,结果表明,对比例一因为混合浆料开放时间过大,静态屈服应力已完全超出可打印的静态屈服应力合理范围,动态屈服应力持续改变,流变性的离散性过大,造成混合浆料挤出失败。

[0115] 对比例二:(水胶比增大,减水剂含量提高,河砂和再生粗骨料减小)

[0116] (1)按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料338份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0117] (2)将110份水和6份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物

的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0118] (3) 将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为 $3.5\text{m}\times 3.5\text{m}\times 3\text{m}$,可打印长宽高 $3\text{m}\times 3\text{m}\times 1.2\text{m}$ 体积范围的混凝土试件,打印机配有 $12\text{m}\times 2\text{m}$ 的轨道,轨道上铺设3张每张 $1.5\text{m}\times 3\text{m}$ 可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为180r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为 $600\text{mm}\times 160\text{mm}\times 180\text{mm}$ 。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0119] 对比例三:(水胶比减小,将再生粗骨料继续提高)

[0120] (1) 按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料382份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0121] (2) 将70份水和2份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0122] (3) 将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为 $3.5\text{m}\times 3.5\text{m}\times 3\text{m}$,可打印长宽高 $3\text{m}\times 3\text{m}\times 1.2\text{m}$ 体积范围的混凝土试件,打印机配有 $12\text{m}\times 2\text{m}$ 的轨道,轨道上铺设3张每张 $1.5\text{m}\times 3\text{m}$ 可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为180r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为 $600\text{mm}\times 160\text{mm}\times 180\text{mm}$ 。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0123] 结合图2(e)对比例三打印条出现明显的撕裂现象,结果表明,对比例三因为水灰比较小,再生粗骨料含量较大,静态屈服应力过大,打印条不连续,造成混合浆料挤出失败。结果表明,材料的配合比对打印效果有重要影响。

[0124] 对比例四:(100%替代率、开放时间为5min,挤出速度120r/min,挤出速度过低)

[0125] (1) 按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0126] (2) 将90份水和4份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 0.2s^{-1} ,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0127] (3) 将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为3.5m×3.5m×3m,可打印长宽高3m×3m×1.2m体积范围的混凝土试件,打印机配有12m×2m的轨道,轨道上铺设3张每张1.5m×3m可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为120r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0128] 对比例五:(100%替代率、开放时间为5min,挤出速度250r/min,挤出速度过高)

[0129] (1) 按重量份数计,将所有组分按上述配合比称重后分为4组并放置一边。首先在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥240份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份、硫铝酸盐水泥32份混合3min,再加入聚乙烯醇纤维0.5份、羟丙基甲基纤维素醚0.5份和温轮胶0.5份混合2min,最后加入粉煤灰21份、硅灰11份和纳米粘土0.5份混合2min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0130] (2) 将90份水和4份聚羧酸高效减水剂加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 $0.2s^{-1}$,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0131] (3) 将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为3.5m×3.5m×3m,可打印长宽高3m×3m×1.2m体积范围的混凝土试件,打印机配有12m×2m的轨道,轨道上铺设3张每张1.5m×3m可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为250r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。打印完成后,测量打印试件的高度表征其塌落度的大小,试验结果见表1。

[0132] 对比例六:(素混凝土配比,水胶比0.6,加大水的用量,使得可建造性大大降低)

[0133] (1) 按重量份数计,在搅拌机中加入强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥250份、粒径5~12mm的连续级配再生粗骨料360份、平均粒径为0.5mm的天然河砂240份混合3min,得到混合干料,搅拌机搅拌速度设置为160r/min;

[0134] (2) 将150份水加入搅拌机混合搅拌2min,得到混合浆料,搅拌机搅拌速度设置为180r/min,将混合浆料静置5min后,采用博勒飞流变仪测量拌合物的静态屈服应力,剪切速率设置为 $0.2s^{-1}$,测试时间设置为2min,根据中国国家标准GB/T2419-2005规范采用跳桌试验测试扩散直径以表征拌合物流动性,试验结果见表1;

[0135] (3) 将上述混合浆料静置5min后放入3D打印机并挤出堆叠,该打印机为桁架式3D打印机,长宽高尺寸为3.5m×3.5m×3m,可打印长宽高3m×3m×1.2m体积范围的混凝土试件,打印机配有12m×2m的轨道,轨道上铺设3张每张1.5m×3m可交替使用的滑动钢打印平面,喷头采用圆形喷头,直径为40mm,单层预设高度18mm。设置打印设备打印参数喷嘴移动速度为120mm/s,螺杆挤出速度为150r/min,喷嘴高度为20mm,层间打印时间间隔为30s,打印试件尺寸设置为600mm×160mm×180mm。试验结果表明,此配合比下的再生粗骨料混凝土流动性过大,静态屈服应力过低,骨料产生离析现象,造成3D打印再生粗骨料混凝土可建

造性较差,无法层层堆叠完成3D打印。

[0136] 表2可调控流变性的3D打印再生粗骨料混凝土静态屈服应力、扩散直径和塌落度

实验组	静态屈服应力 (Pa)	扩散直径(mm)	塌落度(mm)
实施例一	3884	18.21	1.2
实施例二	3544	18.66	1.4
实施例三	3053	18.95	1.5
实施例四	5325	16.58	0.3
[0137] 实施例五	3825	18.03	1.5
实施例六	-	-	-
对比例一	7812	-	-
对比例二	2820	19.27	2.8
对比例三	5941	-	-
对比例四	3866	18.32	3.2
[0138] 对比例五	3845	18.28	2.9
对比例六	-	-	-

[0139] 由表2测试结果可知,本发明基于掺加再生粗骨料的技术手段的可调控流变性的3D打印再生粗骨料混凝土的流变性、可打印性和可建造性性能优异。粉煤灰、硅灰和纳米粘土的掺入降低了骨料与骨料、骨料与胶凝颗粒之间的摩阻力,聚羧酸系减水剂的掺入分离了水泥颗粒形成的絮凝结构,释放了大量的自由水,极大地增强了砂浆基体的润滑作用,降低了再生粗骨料的“骨料自锁效应”,显著增加材料的可打印性。硅灰、纤维素醚、温轮胶和硫铝酸盐水泥的掺入提高了材料的早期强度和刚度,保证了材料的可建造性。

[0140] 通过合理的配比,可以看出五组实施例均具有优异的性能,第六组实施例因为配比不合理无法3D打印。由打印条层叠堆积的视觉直观效果得出,当静态屈服应力在3000~4000Pa、扩散直径在17~21mm范围内时,打印条连续性良好,无断点和裂纹,可以保持自身形状,不因上层重力产生流动,即既能保持优异的可打印性又能保持可建造性,因此将此区间设置为适宜打印的参数区间。实施例一对比于实施例二和实施例三,展现了随着再生粗骨料替代率降低,材料的静态屈服应力和流动性下降,但仍保持在适宜的打印区间。实施例

四相比于实施例一扩大了拌合物的静置时间,静态屈服应力显著增大,流动度下降明显,打印条出现明显的断点和裂纹,但可建造性提升巨大。实施例五与实施例一相比降低了3D打印机的挤出速率,较长的打印时间造成了打印条层间黏结能力下降,进而造成材料可建造性降低。

[0141] 对比例一因材料静置时间过长导致静态屈服应力过大,材料无法泵送和挤出,造成打印失败。对比例二因水胶比增大造成流动度过高,即时打印性较好,但塌落度较大,可建造性劣化较为严重。对比例三因水胶比减小,造成晶体屈服应力过高,流动度过低,材料无法满足可打印性的最低要求。对比例四和对比例五因3D打印机螺杆挤出速度与材料流变性能适配性较差,虽可以满足材料可打印性,但会对材料的可建造性产生劣化效果。由上述各实施例和对比例可知,材料的流变特性对可打印性和可建造性均具有重要影响。当流变性参数在合理的区间内时,材料可顺利泵送和挤出,打印试件强度和刚度发展良好,对3D打印混凝土硬化后的力学性能和耐久性有积极影响。

[0142] 图1为具有代表性的实施例和对比例的剪切应力随剪切时间的变化图,其曲线的第一个峰值代表了静态屈服应力(对应于表1中的第一列数据),与可泵性和可建造性有关。曲线最后的平稳段的纵坐标值代表动态屈服应力,与可挤出性有关。结果表明,最优实施例一因为其合适的静态屈服应力和平稳的动态屈服应力具有优异的可打印性和可建造性。其余实施例和对比例因材料配比和工艺参数的原因可打印性和可建造性均出现不同程度的劣化。

[0143] 图2是反映了具有代表性的实施例和对比例的打印效果图,从打印结果可以看出。实施例一为最有实施例,打印连续,无明显断点和裂纹,打印效果良好。而其余组受再生粗骨料掺量、开放时间和水胶比的影响均出现打印条断电增多,裂缝、空洞明显或打印失败的现象。

[0144] 以上结合附图选择优先详细论述最佳实施例,并不用于限制本发明。在上述描述的各个具体技术特征,在不矛盾的情况下,可以通过任意合适的形式进行组合,本发明不在一一赘述。任何本领域技术人员在不脱离技术方案范围内的前提下采取对技术方案进行任意组合或同等替换等简单修改或修饰的手段,并不影响其技术方案的本质仍属于本发明的各实施例代表的技术方案的保护范围之内。

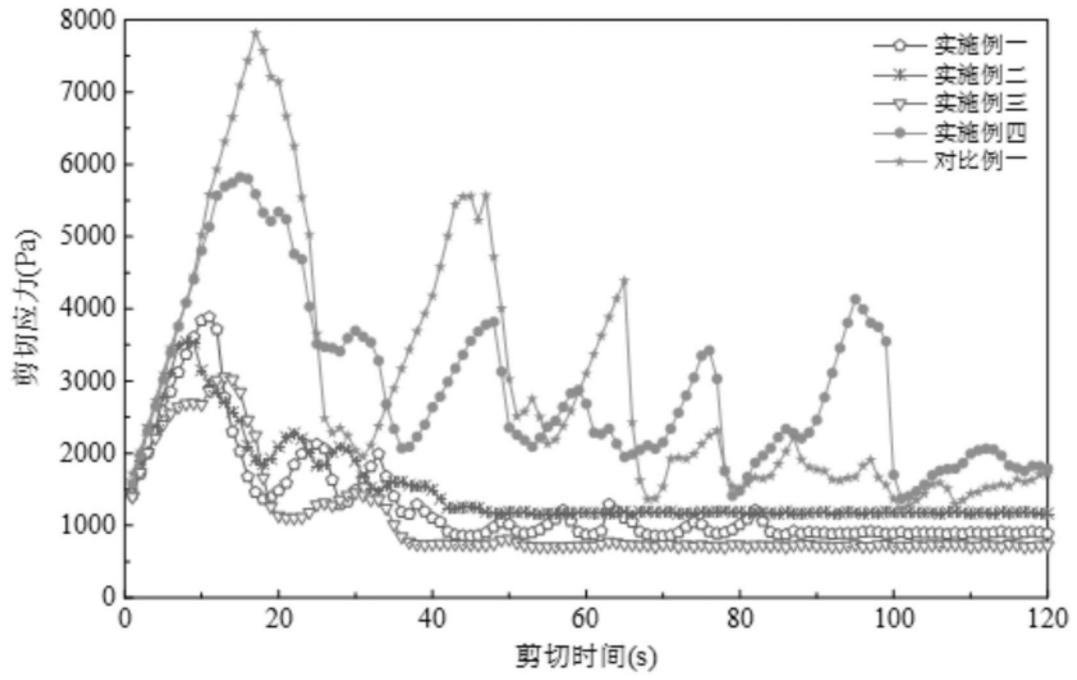


图1

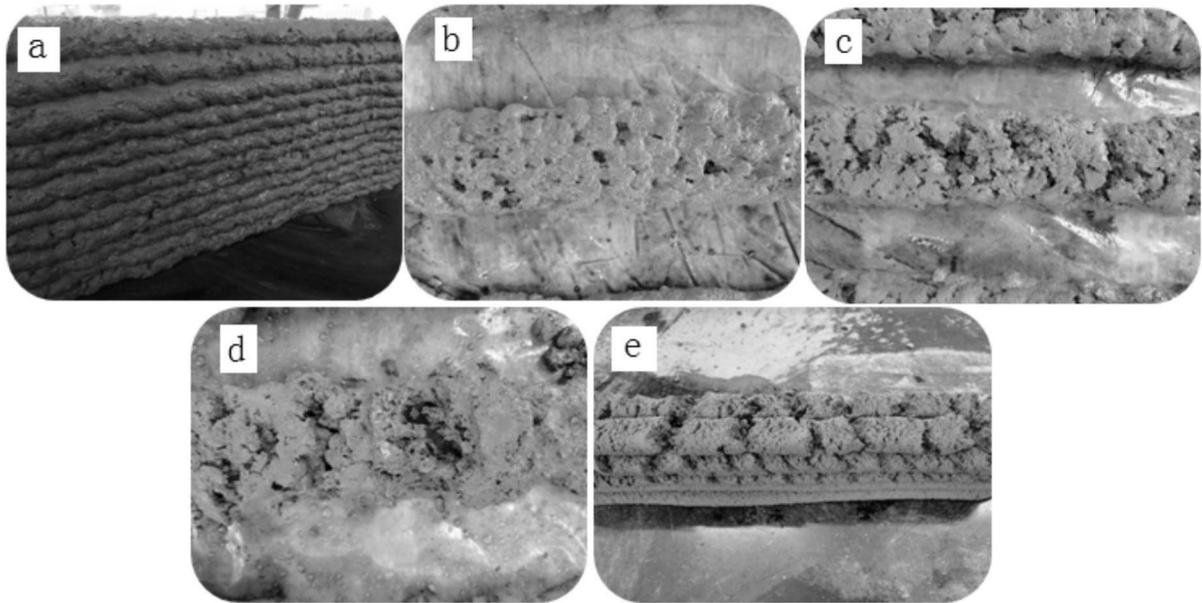


图2