



## 高强无收缩套筒灌浆料的制备及性能研究

王卫东

(南京兴佑交通科技有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 随着国家大力推广装配式建筑,大量的建筑部品由车间预制加工完成,各部品之间通过套筒灌浆料进行连接,灌浆料质量的好坏决定了连接的安全性,因此开发性能优异的灌浆料具有重要意义。文章采用硅酸盐水泥,并辅助添加磨细砂、高效减水剂、膨胀剂等组分来提高灌浆料的工作性能、力学性能,制备出具有早强、微膨胀等性能优异的无收缩套筒灌浆料。研究表明:硅酸盐水泥质量分数为 77.7%,磨细砂质量分数为 20%,硅灰质量分数为 2.3%,减水剂质量分数为 0.43%,膨胀剂质量分数为 2.0%,塑性膨胀剂质量分数为 0.07%,胶砂比 1:1,水料比 0.11,初始流动度 310 mm,30 min 流动度 290 mm,1、3、28 d 抗压强度分别为 49.1、63.3、91.9 MPa,3 h 膨胀率 0.24%,24 h 与 3 h 膨胀率差值 0.37%,满足标准《钢筋连接用套筒灌浆料》中的要求。

**关键词:** 灌浆料; 水料比; 胶砂比

**中图分类号:** TU578

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-8993(2024)10-0090-05

**doi:** 10.13402/j.gcjs.2024.10.139

## Research on the preparation and properties of high strength non-shrinkage sleeve grouting material

WANG Weidong

(Nanjing Xingyou Transportation Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

**Abstract:** With the promotion of prefabricated building by the state, a large number of building parts are prefabricated in workshops, and all parts are connected by sleeve grouting. The quality of the grouting material determines the safety of the connection, therefore, it is of great significance to develop grouting materials with excellent properties. Using portland cement and adding other components such as ground sand, super plasticizer and expansion agent to improve the workability and mechanical properties of grout, the non-shrinkage sleeve grouting material with excellent properties of early strength and micro-expansion was prepared. The results show that: portland cement 77.7%, fine sand 20%, silica fume 2.3%, water reducing agent 0.43%, expansion agent 2.0%, plastic expansion agent 0.07%, mortar ratio 1:1, water to material ratio 0.11, initial fluidity 310 mm, 30 min fluidity 290 mm, the compressive strength of 1, 3, 28 d is 49.1, 63.3, 91.9 MPa respectively, the expansion rate of 3 h is 0.24%, the expansion rate of 24 ~ 3 h is 0.37%, which meets the requirements of "Sleeve grouting material for steel bar connection".

**Key words:** grouting material; ratio of water to material; rubber sand ratio

近年来,我国装配式建筑进入快速发展期<sup>[1]</sup>。为了保证装配式建筑的整体性及构件连接的强度,需要对预制构件钢筋套筒进行灌浆连接<sup>[2]</sup>,采用大流动度、早强、高强、微膨胀的水泥基灌浆料

填充于套筒和带肋钢筋间隙内<sup>[3]</sup>,待浆体凝结硬化后使钢筋与套筒固定连接。水泥基灌浆料具有较高的抗拉强度及抗压强度、连接可靠、成本低、施工效率高等优势。我国于 2010 年首次自主研发

收稿日期: 2024-04-11

作者简介: 王卫东(1986—),男,高级工程师,从事新型建筑材料方面的研究与应用。

出“钢筋套筒水泥灌浆直螺纹连接技术”并成功推广应用。张岩等<sup>[4]</sup>采用硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥-石膏复合体系研制出了低收缩早强型灌浆料, 1、3 d 抗压强度分别为 60.1、75.5 MPa。李崇智等<sup>[5]</sup>采用硫铝酸盐水泥-硅灰-微珠三元复合体系, 1、3 d 抗压强度达到 59.8、68.6 MPa。丁泓力等<sup>[6]</sup>与 ZHANG Y 等<sup>[7]</sup>以硫铝酸盐水泥和普通硅酸盐水泥为主要胶凝材料, 通过调整普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥以及矿物掺合料的比例, 成功配制出具有大流态、较高早强效果的水泥基灌浆料, 并成功应用于实际工程中。

装配式建筑属于结构工程, 而现有的研究主要采用硫铝酸盐类水泥或硫铝酸盐类水泥和硅酸盐类水泥的复合体系, 硫铝酸盐水泥虽然早期强度高, 但后期强度存在倒缩<sup>[8-10]</sup>等问题, 且成本较高, 限制了大规模工程应用。然而预制构件本身就是采用硅酸盐类水泥制作, 但硅酸盐水泥存在早期强度低, 收缩性大等缺点。基于此, 本文通过采用硅酸盐体系研究出大掺量惰性掺合料的配方体系, 以期可为相关工程提供参考与借鉴。

## 1 原材料

(1) 水泥: P·Ⅱ52.5 R 硅酸盐水泥, 水泥基本性能指标如表 1 所示。

(2) 硅灰: 比表面积  $\geq 18\,000\text{ m}^2/\text{kg}$ ,  $\text{SiO}_2$  质量分数  $\geq 90\%$ 。

(3) 磨细砂: 采用细度模数 0.8~1.0 的特细砂粉磨, 比表面积  $\geq 400\text{ m}^2/\text{kg}$ ,  $\text{SiO}_2$  质量分数  $\geq 90\%$ 。

(4) 膨胀剂: UEA 膨胀剂, 水中 7 d 限制膨胀率  $\geq 0.025\%$ 。

(5) 塑性膨胀剂: 胶凝材料 0.06% 掺量时灌浆料 24 h 膨胀率  $\geq 0.5\%$ 。

(6) 河砂: 采用细度模数 2.0~2.5 的天然河砂过 2.36 mm 筛得到, 含泥量  $\leq 1\%$ , 泥块质量分数  $\leq 0.5\%$ 。

(7) 减水剂: 粉剂, 聚羧酸高性能减水剂, 减水率  $\geq 27\%$ 。

## 2 试验方法

试验采用行星式胶砂搅拌机进行拌合, 试件成型环境温度、相对湿度、养护温度等条件按《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2019) 要求执行。

### 2.1 流动度测试

将拌合的试样, 倒入高度为  $(60 \pm 0.5)\text{ mm}$ , 上口内径为  $(70 \pm 0.5)\text{ mm}$ , 下口内径为  $(100 \pm 0.5)\text{ mm}$  的截锥圆模, 按 JGT 408—2019 附录 A 要求的方法测试初始、30 min 流动度。

### 2.2 抗压强度测试

将拌合好的试样, 倒入  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$  的三联试模中, 抹平, 然后养护 1、3、28 d, 按 JGT 408—2019 附录 B 和《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021) 要求的方法测试抗压强度。

### 2.3 竖向膨胀率测试

采用  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  的立方体试模, 将拌合好的试样, 按 JGT 408—2019 附录 C 规定的竖向膨胀率接触式测量法试验方法进行测试。

## 3 结果与分析

### 3.1 胶砂比对灌浆料性能的影响

对于套筒灌浆料, 首要条件是具有高流动性, 其次要确保具有足够的力学性能, 所以灌浆料应具有足够的水泥浆体<sup>[11]</sup>。因此胶砂比对水泥基套筒灌浆料的性能及成本至关重要, 在配制水泥基套筒灌浆料过程中是首要确定的因素。

试验固定减水剂质量分数为 0.43%, 膨胀剂质量分数为 2.0%, 塑性膨胀剂质量分数为 0.07%, 硅灰质量分数为 2.3%, 消泡剂质量分数为 0.02%, 水料比为 0.11, 研究胶砂比对灌浆料性能的影响, 试验配比及结果如表 2 所示。

表 1 水泥物理力学性能指标

| 比表面积/<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 标准稠度<br>用水量/% | 安定性 | 凝结时间/min |     | 3 d 强度/MPa |      | 28 d 强度/MPa |      |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|-----|----------|-----|------------|------|-------------|------|
|                                                |                                            |               |     | 初凝       | 终凝  | 抗折         | 抗压   | 抗折          | 抗压   |
| 367                                            | 3 100                                      | 27.2          | 合格  | 175      | 240 | 6.5        | 33.0 | 9.1         | 56.5 |

表 2 胶砂比对灌浆料性能的影响

| 序号 | 胶砂比 | 流动度/mm |        | 抗压强度/MPa |      |       | 竖向膨胀率/% |               | 备注 |
|----|-----|--------|--------|----------|------|-------|---------|---------------|----|
|    |     | 初始     | 30 min | 1 d      | 3 d  | 28 d  | 3 h     | 24 h 与 3 h 差值 |    |
| 1  | 1:2 | 330    | 315    | 16.7     | 55.4 | 73.9  | 0.06    | 0.51          | 泌水 |
| 2  | 1:1 | 300    | 295    | 59.8     | 87.9 | 103.7 | 0.14    | 0.25          | —  |
| 3  | 3:2 | 290    | 280    | 65.3     | 85.4 | 109.2 | 0.32    | 0.50          | —  |
| 4  | 2:1 | 270    | 265    | 68.9     | 90.8 | 117.0 | 0.09    | 0.35          | —  |

由表 2 可知,随着胶砂比的增大,拌合物流动度有下降的趋势。这是由于在体积相同情况下,胶砂比增大,相对而言水胶比减小。胶砂比在 1:1 ~ 3:2 之间,拌合物初始流动度基本不变,说明在这区间胶砂比对拌合物的流动度影响不明显。但随着胶砂比增加,拌合物流动度损失增加。从拌合物的流动性和黏聚性等工作性方面评价,当胶砂比在 1:1 ~ 3:2 时,灌浆料的流动性满足施工要求,且黏聚性较好,不存在泌水等问题。

对于抗压强度而言,随着胶砂比增大,1、3、28 d 整体呈上升趋势,在胶砂比为 2:1 时,抗压强度增长量并不比胶砂比 1:1 或 3:2 时增长量大,从成本等方面考虑,胶砂比在 1:1 ~ 3:2 时,灌浆料的各个龄期的抗压强度基本上较接近,没有太大的变化,说明胶凝材料和砂的比例较匹配。另外,随着胶砂比的增大,灌浆料 3 h 膨胀率先增加后降低,24 h 与 3 h 膨胀率差值没有明显的规律,但均大于 3 h 膨胀率。

### 3.2 水料比对灌浆料性能的影响

套筒灌浆料对流动度和强度要求苛刻,而影响灌浆料流动度和强度的重要因素就是水料比。

由于水料比的变化将直接影响到灌浆料的强度,因此为增加灌浆料的流动性而增加用水量时,必须保证灌浆料的强度以及其质量,否则将破坏灌浆料的工作性能。试验固定膨胀剂质量分数为 2.0%,

塑性膨胀剂质量分数为 0.07%,硅灰质量分数为 2.3%,消泡剂质量分数为 0.02%,研究水料比对灌浆料性能的影响,试验配比及结果如表 3 所示。

由表 3 可知,在其它掺量不变的情况下,随着水料比的增加,灌浆料的初始流动度及 30 min 流动度逐渐增加,流动度损失变小,黏聚性增强,当水料比为 0.12 时,拌合物出现微泌水现象。另一方面,水料比的大小还要与减水剂掺量相协调,才可保证灌浆料的流动性和黏聚性。从搅拌和易性上看,水料比不高于 0.11 时,砂浆的和易性较好。水料比过大时,保水性能不好,导致灌浆料浆体产生轻离析,微泌水现象。

水料比是影响灌浆料强度变化的重要因素。在其他掺量不变的情况下,随着水料比的增加,灌浆料的 1 d 抗压强度下降较大,3、28 d 强度下降较小。这说明水料比对初期强度的影响比较大,初期强度降幅较大,随着龄期的增长,抗压强度的降幅变小,抗压强度变化趋势是增长的。另外,随着水料比的增加,3 h 膨胀率和 24 h 与 3 h 膨胀率差值均降低。

### 3.3 减水剂掺量对灌浆料性能的影响

高效减水剂是高性能水泥基材料获得高流动性必不可少的组分,需借助高效减水剂,使灌浆料在很低的水料比的情况下,获得很好的流动度。因此,确定减水剂最佳掺量是十分重要的。

表 3 水料比对灌浆料性能的影响

| 序号 | 减水剂/% | 胶砂比 | 水料比  | 流动度/mm |        | 抗压强度/MPa |      |       | 竖向膨胀率/% |               | 备注 |
|----|-------|-----|------|--------|--------|----------|------|-------|---------|---------------|----|
|    |       |     |      | 初始     | 30 min | 1 d      | 3 d  | 28 d  | 3 h     | 24 h 与 3 h 差值 |    |
| 1  | 0.43  | 1:1 | 0.10 | 260    | 240    | 68.5     | 87.6 | 106.8 | 0.18    | 0.26          | —  |
| 2  | 0.43  | 1:1 | 0.11 | 300    | 295    | 59.8     | 87.9 | 103.7 | 0.14    | 0.25          | —  |
| 3  | 0.43  | 1:1 | 0.12 | 320    | 320    | 60.7     | 81.3 | 94.2  | 0.01    | 0.23          | 泌水 |
| 4  | 0.86  | 3:2 | 0.10 | 270    | 235    | 78.2     | 90.3 | 114.3 | 0.22    | 0.53          | —  |
| 5  | 0.86  | 3:2 | 0.11 | 300    | 290    | 70.2     | 86.7 | 109.5 | 0.19    | 0.21          | —  |
| 6  | 0.86  | 3:2 | 0.12 | 315    | 300    | 68.9     | 85.6 | 102.3 | 0.02    | 0.21          | 泌水 |

试验固定硅灰质量分数为 2.3%，膨胀剂质量分数为 2.0%，塑性膨胀剂质量分数为 0.07%，消泡剂质量分数为 0.02%，胶砂比 1:1，水料比 0.11，试验配比及结果如表 4 所示。

由表 4 可知,在其它材料掺量相同情况下,随着减水剂掺量的增加,灌浆料的初始流动度和 30 min 流动度均呈先增大后减小的趋势。研究表明减水剂掺量存在最佳的饱和点,达到一定掺量附近时,减水剂掺量继续增大时,流动度不会再增加<sup>[12]</sup>,过大掺量时,甚至会出现泌水等方面作用。综合灌浆料的流动性以及成本等方面,减水剂的掺量应不大于 0.77%。由于减水剂自身自由部分的缓凝作用,因此,灌浆料 30 min 流动度与初始变化不大。

从表 4 中可以看出,减水剂掺量变化,灌浆料 1、3、28 d 抗压强度变化不大,说明减水剂在 0.32%~0.86% 掺量范围内,基本上不会对灌浆料各个龄期的抗压强度造成影响。

对于灌浆料膨胀率而言,减水剂掺量的增加,灌浆料 3 h 和 24 h 与 3 h 膨胀率差值略有增加。这是由于减水剂中含有部分缓凝成分,导致胶凝材料的水化变的较缓慢,从而使得灌浆料 3 h 的膨胀率略有增加。

3.4 磨细砂掺量对灌浆料性能的影响

矿物掺合料作为水泥基材料的重要组分,不仅可以降低成本,还可以改善新拌水泥基材料的工作性能以及硬化水泥浆体的力学性能,提高结构的耐久性。用于水泥基材料的矿物掺合料主要有矿粉、粉煤灰等。根据市场调查,粉煤灰的产量受到限制,不能满足生产的供应要求。另外,结合公司实际情况,选择磨细砂作为矿物掺合料,着重研究其对灌浆料流动性能、力学性能和膨胀率等的影响。

试验固定硅灰质量分数为 2.3%，减水剂质量分数为 0.43%，膨胀剂质量分数为 2.0%，塑性膨胀剂质量分数为 0.07%，消泡剂质量分数为 0.02%，胶砂比 1:1，水料比 0.11，研究磨细砂替代水泥时对灌浆料性能的影响,试验配比及结果如表 5 所示。

由表 5 可知,在其它掺量相同的情况下,随着磨细砂掺量的增加,灌浆料的初始流动度和 30 min 流动度均先增加后降低,这是由于磨细砂的比表面积较大,掺入后起到很好的微填充作用,但另一方面增加到一定量也会增加体系的需水量,导致流动性降低,但均能满足 JGT 408—2019 要求。

表 4 减水剂掺量对灌浆料性能的影响

| 序号 | 减水剂/% | 流动度/mm |        | 抗压强度/MPa |       |       | 竖向膨胀率/% |               | 备注 |
|----|-------|--------|--------|----------|-------|-------|---------|---------------|----|
|    |       | 初始     | 30 min | 1 d      | 3 d   | 28 d  | 3 h     | 24 h 与 3 h 差值 |    |
| 1  | 0.32  | 280    | 255    | 62.5     | 84.0  | 110.5 | 0.19    | 0.21          | —  |
| 2  | 0.40  | 290    | 275    | 58.8     | 86.9  | 108.7 | 0.21    | 0.25          | —  |
| 3  | 0.43  | 300    | 295    | 59.8     | 87.9  | 103.7 | 0.14    | 0.25          | —  |
| 4  | 0.70  | 320    | 310    | 68.0     | 93.1  | 110.5 | 0.24    | 0.32          | —  |
| 5  | 0.77  | 330    | 325    | 70.2     | 86.7  | 103.8 | 0.29    | 0.37          | —  |
| 6  | 0.86  | 350    | 350    | 63.0     | 101.6 | 114.1 | 0.11    | 0.16          | 泌水 |

表 5 磨细砂掺量对灌浆料性能的影响

| 序号 | 磨细砂/% | 流动度/mm |        | 抗压强度/MPa |      |       | 竖向膨胀率/% |               |
|----|-------|--------|--------|----------|------|-------|---------|---------------|
|    |       | 初始     | 30 min | 1 d      | 3 d  | 28 d  | 3 h     | 24 h 与 3 h 差值 |
| 1  | 0     | 300    | 295    | 59.8     | 87.9 | 103.7 | 0.14    | 0.25          |
| 2  | 10    | 300    | 285    | 57.6     | 73.2 | 94.9  | 0.29    | 0.24          |
| 3  | 20    | 310    | 290    | 49.1     | 63.3 | 91.9  | 0.24    | 0.37          |
| 4  | 30    | 320    | 295    | 41.5     | 55.0 | 79.6  | 0.09    | 0.35          |
| 5  | 40    | 340    | 350    | 38.1     | 61.1 | 76.8  | -0.01   | 0.49          |
| 6  | 50    | 340    | 320    | 29.4     | 50.8 | 73.8  | -0.01   | 0.47          |
| 7  | 60    | 330    | 320    | 20.4     | 38.5 | 64.2  | -0.02   | 0.45          |

对于抗压强度而言,随着磨细砂掺量增加,灌浆材料1、3、28 d抗压强度均呈逐渐下降趋势,但掺量超过20%时,抗压强度下降幅度明显增大,20%掺量时1 d抗压强度下降17.9%,30%下降30.6%到60%下降65.9%。28 d抗压强度幅度相较1、3 d有所降低。这是由于磨细砂活性低,早期强度不易发挥出来,导致早期强度降低,后期随着水泥水化的进行和磨细砂的填充等效应,使得后期强度降幅有所减少。另外,当磨细砂掺量为30%时,其抗压强度已经不能满足JGT 408-2019要求。

从灌浆料膨胀率来看,随着磨细砂掺量的增加,灌浆料3h膨胀率先增加后降低,而24 h与3 h膨胀率差值变化不大。磨细砂掺量高于30%时,灌浆料的3 h膨胀率为负数,说明灌浆料出现收缩现象,而24 h时效效果改善。这说明掺加过高磨细砂时,会对灌浆料3 h膨胀率产生不利影响。

根据前述各组成材料对灌浆料流动性能、力学性能、膨胀性能等影响的试验结果,最后确定出其最佳配合比,水泥质量分数为77.7%,磨细砂质量分数为20%,硅灰质量分数为2.3%,减水剂质量分数为0.43%,膨胀剂质量分数为2.0%,塑性膨胀剂质量分数为0.07%,胶砂比1:1,水料比0.11,初始流动度310 mm,30 min流动度290 mm,1、3、28 d抗压强度分别为49.1、63.3、91.9 MPa,3 h膨胀率0.24%,24 h与3 h膨胀率差值0.37%,满足JGT 408-2019要求。从经济上,由于采用硅酸盐水泥、普通河砂及自产的磨细砂,相较市面上现有的灌浆料,吨成本约降低20%左右。

## 4 结 论

(1) 随着胶砂比的增大,灌浆料流动度呈下降的趋势,灌浆料流动度损失增加。胶砂比在1:1~3:2之间,灌浆料初始流动度基本不变,且黏聚性较好,不存在泌水等问题。

(2) 随着水料比的增加,灌浆料的初始流动度及30 min流动度逐渐增加,流动度损失变小,黏聚性增强。随着水料比的增加,灌浆料的1 d抗压强度下降较大,3、28 d强度下降较小。当水料比为0.12时,拌合物出现微泌水现象。从搅拌和易性上看,水料比不高于0.11时,砂浆的和易性较好。

(3) 随着减水剂掺量的增加,灌浆料的初始流动度和30 min流动度均呈先增大后减小的趋势。改变减水剂掺量,灌浆料1、3、28 d抗压强度变化不大。随着减水剂掺量的增加,灌浆材料3 h膨胀率和24 h与3 h膨胀率差值略有增加。

(4) 随着磨细砂掺量的增加,灌浆料的初始流动度和30 min流动度均降低,1、3、28 d抗压强度均呈逐渐下降趋势,但1、3 d等早期强度下降幅度稍大,28 d强度下降幅度减小。另外,掺加过高的磨细砂对灌浆料的3 h早期膨胀率不利。

## 参考文献:

- [1] 刘良林,肖建庄. 钢筋套筒灌浆连接研究进展[J]. 建筑结构学报,2023,44(1):235-247.
- [2] 陈晓磊,魏奇科,朱晓霜,等. 钢筋套筒灌浆料流动机理及灌浆系统研究[C]//2022年工业建筑学术交流会论文集(中册). 北京:《工业建筑》杂志社,2022:352-358.
- [3] 韩瑞龙,施卫星,周洋. 灌浆套筒连接技术及其应用[J]. 结构工程师,2011,27(3):149-153.
- [4] 张岩,高青宇,纪欢乐,等. 低收缩早强型灌浆料的制备与微观机理[J]. 建筑材料学报,2023,26(8):922-930.
- [5] 李崇智,王坤,王婉怡,等. 高性能水泥基灌浆料的制备及性能研究[J]. 材料导报,2023,37(增刊2):1-5.
- [6] 丁泓力,黄晖. 早强型水泥基灌浆料的试验研究[J]. 新型建筑材料,2019(11):136-139.
- [7] ZHANG Y, LI W, LI D X. preparation and performance research of cement-based Grouting materials with high early strength and expansion [J]. Journal of Wuhan University of Technology ( Materials Science ), 2017, 32(5):1115-1118.
- [8] 肖忠明,郭俊萍. 快硬硫铝酸盐水泥抗折强度倒缩机理的探讨[J]. 水泥,2016,43(12):3-5.
- [9] 何锐,郑欣欣,王渊,等. 硫铝酸盐水泥性能特点与改性技术研究现状[J]. 应用化工,2002,51(5):1495-1501.
- [10] 魏定邦,丁民,任国斌,等. 硫铝酸盐复合水泥体系水化特征研究[J]. 材料导报,2018,32(11):492-497.
- [11] 张璐. 高性能水泥基结构灌浆料试验研究[D]. 济南:山东建筑大学,2009.
- [12] 董军军. 减水剂掺量对早强型套筒灌浆料性能的影响[J]. 工程与建设,2016,30(2):223-224.