

# 矿物掺合料对预应力孔道压浆材料力学性能影响研究

Effect of Mineral Admixture on Mechanical Properties of Prestressed Duct Grouting Material

范杰林

(新疆维吾尔自治区交通运输综合行政执法局, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 为研究矿物掺合料改良预应力孔道压浆材料的力学性能, 室内利用粉煤灰矿物掺合料制备了新型孔道压浆 (FADG) 材料, 对不同养护龄期的 FADG 砂浆材料开展流动度、单轴压缩强度、抗折强度、膨胀性和泌水性试验, 并基于微观电镜扫描从微观结构角度展开研究。结果表明: 粉煤灰矿物掺合料能够加强普通水泥孔道压浆材料的流动性, 但对孔道压浆材料的早期抗压强度和抗折强度有着非常明显的劣化效应; 养护龄期为 28 d 的抗压强度和抗折强度均呈现出先升高后降低的变化趋势; 新型 FADG 材料中粉煤灰的最优配比为 20%, 此时其初始流动度为 13.25 s, 抗压强度和抗折强度分别为 78.88 MPa 和 12.92 MPa, 无泌水和倒缩现象, 养护成型材料的内部结构致密, 综合工程性能最佳。

**关键词:** 粉煤灰; 孔道压浆材料; 力学性能; 流动度; 膨胀率; 微观电镜扫描

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0080-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.014

FAN Jielin

(Xinjiang Comprehensive Administrative Law Enforcement Bureau of Transportation, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** To study the mechanical properties of mineral admixture to improve the pressure drop material of prestressed duct, a new type of duct grouting (FADG) material was prepared by using fly ash mineral admixture indoors. The fluidity test, uniaxial compression strength test, flexural strength test, expansion test and bleeding test of FADG mortar materials with different curing ages were carried out, and the research was performed from the perspective of micro mechanism by micro electron microscope scanning test. It is found that: (1) fly ash mineral admixture can strengthen the fluidity of ordinary cement pore grouting materials. However, it has a very obvious deterioration effect on the early compressive strength and flexural strength of pore grouting materials. When the curing age was 28 days, the compressive strength and flexural strength increased first and subsequently decreased; (2) The optimum proportion of fly ash in the new FADG material is 20%. At this time, its initial fluidity is 13.25 s, and its compressive strength and flexural strength are 78.88 MPa and 12.92 MPa respectively. At the same time, it will not produce bleeding and shrinkage. The internal structure of the curing molding material is dense and the comprehensive engineering performance is the best.

**Keywords:** fly ash; duct grouting material; mechanical properties; fluidity; expansion rate; microscopic scanning electron microscope

## 0 引言

传统预应力孔道压浆材料由于成本较低、修复时间快等优势, 被广泛应用到我国建筑施工孔道压浆施工中<sup>[1-3]</sup>。然而, 传统的孔道压浆材料仍

作者简介: 范志林 (1989—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程。

收稿日期: 2022-03-27

存在一些问题,如修复强度较低、稳定性较差、流动性差等<sup>[4-6]</sup>。因此,研究并开发出工程力学性能更佳的预应力孔道压浆材料具有非常重要的意义。

目前,我国学者针对预应力孔道压浆材料的改良工作展开了大范围的研究。部分学者通过掺入不同的外加剂对孔道压浆材料进行改良,并指出聚羧酸减水剂等化学试剂具有较好的改良效果<sup>[7-8]</sup>。此外,利用矿物掺合料部分替代水泥也是孔道压浆材料改良的主要方法之一。一方面,部分掺入矿物掺合料后,孔道压浆材料的内部结构更加致密,其能够表现出更好的工程性能<sup>[1,9-10]</sup>;另一方面,对废弃的矿物掺合料的回收利用,是固体废弃物处置的重要手段之一,不仅合理回收利用了废弃资源,还实现了环境保护的重要目的<sup>[11-12]</sup>。

然而,现有研究较少涉及粉煤灰改性预应力孔道压浆材料的研究。本次研究利用粉煤灰矿物掺合料制备了新型孔道压浆(FADG)材料,并不同养护龄期的FADG砂浆材料开展了流动度、单轴压缩强度、抗折强度、膨胀性和泌水性试验,基于微观电镜扫描从微观结构角度展开研究。

## 1 试验设计

### 1.1 原材料

传统预应力孔道压浆材料的主要材料为水泥、减水剂以及水。通过室内试验掺入粉煤灰矿物掺合料制备新型孔道压浆(FADG)材料,研究矿物掺合料对改良孔道压浆材料性能的影响。FADG材料的主要成分:粉煤灰选用产自江西省某建材公司生产的I级粉煤灰,主要成分为 $\text{SiO}_2$  (56.58%)、 $\text{CaO}$  (5.34%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (24.65%)、及 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (6.89%);水泥采用产自山东威海某公司生产的P·O 5.25级普通硅酸盐,主要成分为 $\text{SiO}_2$  (4.58%)、 $\text{SiO}_2$  (1.67%)、 $\text{CaO}$  (55.14%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9.65)及 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;聚羧酸减水剂选用产自山东某建筑科技有限公司生产的高性能聚羧酸减水剂材料,外观呈白色,pH值为7.6,减水率35%;水为市政自来水。

### 1.2 压浆材料制备

利用粉煤灰矿物掺合料制备FADG材料,根据现有研究成果,确定减水剂掺量为0.2%、水胶比为0.28时孔道压浆材料工程性质优良。FADG材料的制备具体流程如下:首先,按照质量比,分别加入一定量的水泥、粉煤灰和减水剂,制备得到压浆料。其次,称取1 kg压浆料并加入到高速制浆机中,再加入适量自来水;以3000 r/min的转速均匀搅拌10 min,制备得到均匀搅拌的孔道压浆材料。为研究粉煤灰矿物掺合料掺量对FADG材料工程性能的影响,室内制备了粉煤灰掺量分别为0(对照组)、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%和40%共9种FADG材料,见表1。

表1 不同粉煤灰掺量的FADG材料的配合比  
Table 1 Specific ratio of FADG materials with different fly ash content

试样编号	原材料配合比/%			水胶比
	水泥/%	减水剂%	粉煤灰%	
FADG-1	100	0.2	0	0.28
FADG-2	95	0.2	5	0.28
FADG-3	90	0.2	10	0.28
FADG-4	85	0.2	15	0.28
FADG-5	80	0.2	20	0.28
FADG-6	75	0.2	25	0.28
FADG-7	70	0.2	30	0.28
FADG-8	65	0.2	35	0.28
FADG-9	60	0.2	40	0.28

### 1.3 试验设计

在室内展开了流动度试验、单轴压缩强度试验、抗折强度试验、膨胀性试验和泌水性试验,此外,为深入了解矿物掺合料掺量影响FADG材料力学性质的微观机理,对养护成型28 d的FADG材料开展了微观电镜扫描(SEM)。FADG材料的流动度试验、泌水性试验以及膨胀性试验,均参照(JTG/T F50-2011)《公路桥涵施工技术规范》进行<sup>[13]</sup>;单轴抗压强度试验和抗折强度试验参照(GB/T 17671-2021)《水泥胶砂强度检验方法》进行<sup>[14]</sup>,使用的试验设备为YAW-2000型万能试验机,最大可实现1000 kN轴向荷载;微观电镜扫描采用XL-30扫描电子显微镜展开。

## 材料科学

### 2 试验结果分析

#### 2.1 浆料流动度

不同压浆时间、不同粉煤灰掺量条件下 FADG 材料的流动性试验结果,如图 1 所示。由图 1 可知,在不同压浆时间条件下,不同粉煤灰掺量的 FADG 材料的流动度曲线均表现出相同的变化趋势,随着粉煤灰掺量增大,FADG 材料的流动度呈现出逐渐降低的变化趋势,且降低速度越来越慢。以压浆 60 min 条件下的 FADG 材料为例,对照试验组试样的流动度为 22.92 s;而随着粉煤灰掺量的增大,FADG 材料的流动度分别相对下降 4.87%、8.72%、12.58%、15.45%、18.82%、20.23%、20.27%以及 20.31%。由此可见,粉煤灰矿物掺合料能够加强普通水泥孔道压浆材料的流动性。分析认为,当在水泥孔道压浆材料中掺入一定含量的粉煤灰矿物掺合料后,由于粉煤灰材料的粒径相对较小且大部分为球体状,其在孔道压浆材料中能够起到很好的“滚珠效应”,使得水化反应生成的水泥絮状结构能够分散开,水泥颗粒分布更加均匀;同时可以将包裹的自由水置换出来,浆液中自由水含量增加,因此有效提高了孔道压浆材料流动性。

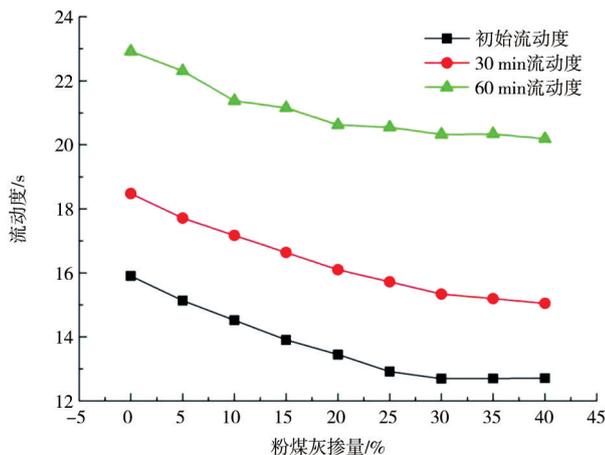
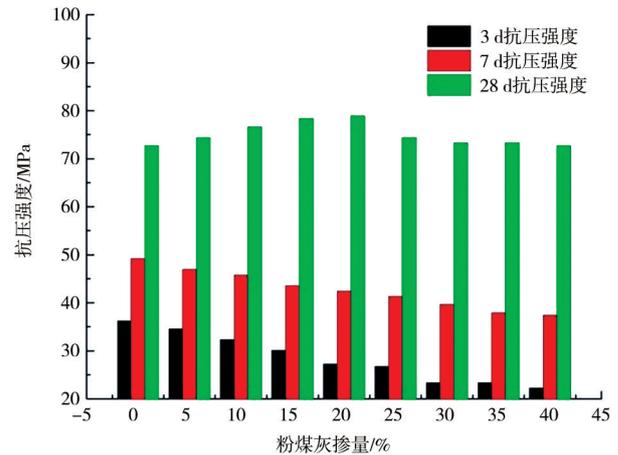


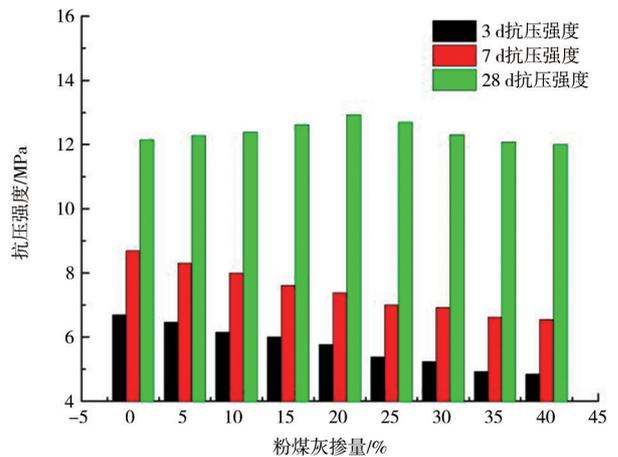
图 1 不同时间和粉煤灰掺量下 FADG 材料的流动度曲线  
Fig. 1 Fluidity curves of FADG materials at different time and fly ash content

#### 2.2 力学试验结果

不同养护龄期和粉煤灰掺量条件下 FADG 材料力学试验结果,如图 2 所示。



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

图 2 不同养护龄期和粉煤灰掺量下 FADG 材料力学性质  
Fig. 2 Mechanical properties of FADG materials at different curing ages and fly ash content

由图 2 可知,当养护时间较短时(3 d 和 7 d),粉煤灰矿物掺合料的掺入对孔道压浆材料的早期抗压强度和抗折强度有着非常明显的劣化效应。以养护 3 d 的试验组为例,当粉煤灰掺量为 0 时,FADG 材料的早期抗压强度和抗折强度分别为 36.36 MPa 和 6.69 MPa;此后,随着粉煤灰掺量的增大,FADG 材料的抗压强度和抗折强度均逐渐降低;当粉煤灰掺量达到 40% 时,此时 FADG 材料的早期抗压强度和抗折强度分别仅有 22.24 MPa 和 4.85 MPa,分别较对照组下降 38.83% 和 27.50%。而对于养护龄期为 28 d 的试验组,FADG 材料的抗压强度和抗折强度均呈现出先升高后降低的变化趋势,且当粉煤灰掺量为

20%时, FADG 材料的抗压强度和抗折强度均取得最大值, 分别为 78.88 MPa 和 12.92 MPa。分析认为, 这是由于利用粉煤灰替代一部分水泥时, 会导致内部水化反应不充足, 产生的水化硅酸钙凝胶产物也就变少, 因此其早期强度降低。而由于粉煤灰矿物掺合料具有火山灰效应, 当养护龄期较长时, 火山灰质成分能够与水化产物发生反应产生水化铝酸钙和水化硅酸钙, 材料的后期强度得到了增强。

### 2.3 浆料稳定性

表 2 为 24 h 自由泌水性和自由膨胀性试验结果, 由表 2 可知, 当粉煤灰掺量超过 20% 时, FADG 材料便开始出现泌水现象, 且随着粉煤灰掺量的增大, 材料的自由泌水率越来越大。而当粉煤灰掺量低于 15% 时, 24 h 内 FADG 材料会产生不同程度的膨胀; 而当粉煤灰掺量超过 25% 时, 24 h 内 FADG 材料则会产生不同程度的倒缩。由此可见, 当粉煤灰掺量在 15% ~ 20% 以内时, FADG 材料不会出现泌水现象也不会产生自由膨胀或倒缩问题, 此时对孔道和内部钢筋的保护效果是最佳的。

表 2 不同 FADG 材料的泌水性和膨胀性试验结果/%

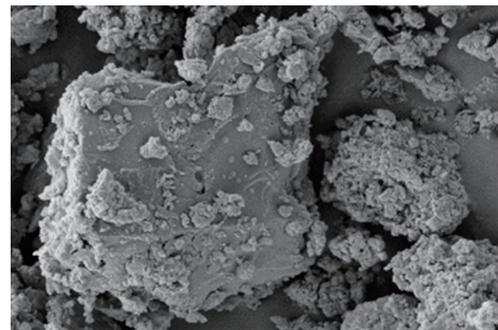
Table 2 Test results of water leakage and expansibility of different FADG materials /%

粉煤灰掺量	自由膨胀率	自由泌水率
0	0.12	0
5	0.09	0
10	0.09	0
15	0	0
20	0	0
25	0	0.10
30	-0.11	0.11
35	-0.13	0.21
40	-0.15	0.29

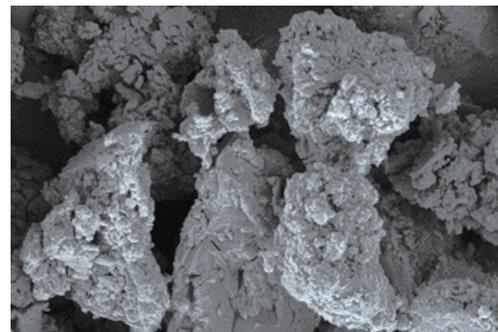
### 3 微观结构特征

图 3 为不同粉煤灰掺量下养护 28 d 的 FADG 材料微观结构。受限于文章篇幅, 本文仅给出对照组、FADG-3 (10%)、FADG-3 (20%) 和 FADG-9 (40%) 的试验结果。由图 3 可知, 当粉煤灰矿物掺合料掺量较低时, 孔道压浆材料内部存在大量的水化产物大颗粒, 材料的内部结构较

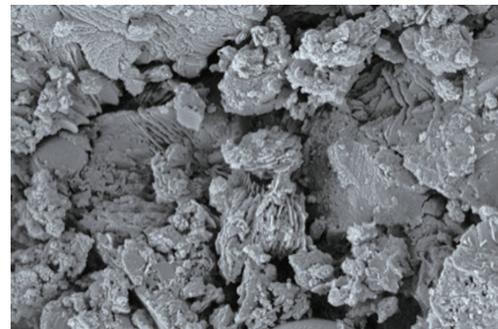
为松散, 大颗粒较多, 存在较多孔隙, 因此其流动性差, 稳定性差, 且强度相对较低。而当粉煤灰掺量达到 10% 时, FADG 材料的内部大颗粒粒径明显变小; 而当粉煤灰掺量达到 20% 时, 材料内部的大颗粒几乎已经消失, 此时 FADG 材料的内部结构较为致密, 孔隙少, 颗粒分布均匀, 因此材料的流动性、力学性质以及稳定性都较好。而当粉煤灰掺量达到 40% 时, 此时由于水化产物较多, 材料内部结构未产生较大的变化, 但是产生了较多细小孔隙。



(a) 0

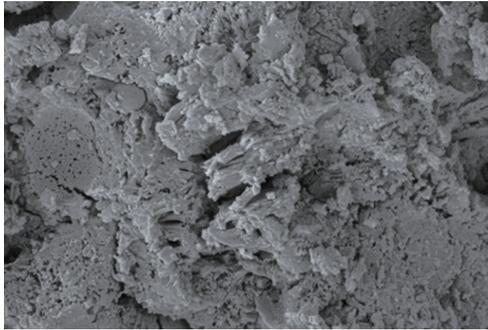


(b) 10%



(c) 20%

## 材料科学



(d) 40%

图3 不同粉煤灰掺量下养护 28 d 的 FADG 材料微观结构图  
Fig.3 Microstructure of FADG materials after curing for 28 d with different fly ash content

#### 4 结论

(1) 粉煤灰矿物掺合料能够加强普通水泥孔道压浆材料的流动性。在压浆 60 min 条件下, 随着粉煤灰掺量的增大, FADG 材料的流动度分别相对下降 4.87%、8.72%、12.58%、15.45%、18.82%、20.23%、20.27%以及 20.31%。

(2) 粉煤灰矿物掺合料的掺入对孔道压浆材料的早期抗压强度和抗折强度具有非常明显的劣化效应; 而当养护龄期为 28 d 时, 其抗压强度和抗折强度均呈现出先升高后降低的变化趋势, 且当粉煤灰掺量为 20% 时, FADG 材料的抗压强度和抗折强度均取得最大值, 分别为 78.88 MPa 和 12.92 MPa。

(3) 当粉煤灰掺量超过 20% 时, FADG 材料出现泌水现象; 而当粉煤灰掺量低于 15% 时, 24 h 内 FADG 材料会产生不同程度的膨胀; 而当粉煤灰掺量超过 25% 时, 24 h 内 FADG 材料则会产生不同程度的倒缩。

(4) 新型 FADG 材料中粉煤灰的最优配比为

20%, 此时其初始流动度为 13.25 s, 抗压强度和抗折强度分别为 78.88 MPa 和 12.92 MPa, 同时也不会产生泌水和倒缩现象, 养护成型材料的内部结构致密, 综合工程性能最佳。

#### 参 考 文 献

- [1] 边江, 陈超. 公路预应力孔道压浆材料高速制浆设备与应用 [J]. 建材世界, 2021, 42 (5): 77-80.
- [2] 幸福. 桥梁施工预应力孔道压浆配合比及材料确定分析 [J]. 运输经理世界, 2021 (7): 89-90.
- [3] 史艳娜. 孔道压浆材料的性能优化及工程应用 [D]. 重庆大学, 2019.
- [4] 卞建民. 预应力孔道压浆配合比及材料的选择 [J]. 四川水泥, 2019 (4): 288-289.
- [5] 李月霞. 后张预应力孔道压浆材料试验分析 [J]. 交通世界, 2016 (25): 90-91.
- [6] 侯永生. 预应力孔道压浆材料强度影响因素分析 [J]. 交通世界, 2016 (16): 108-109+119.
- [7] 许东. 一种大流动性预应力孔道压浆料的试验研究 [D]. 山东建筑大学, 2020.
- [8] 康勇. 复合膨胀剂在预应力孔道压浆材料中的应用试验研究 [J]. 低温建筑技术, 2020, 42 (5): 34-36+40.
- [9] 张帅. 高抗折微膨胀孔道压浆料的试验研究 [D]. 山东建筑大学, 2020.
- [10] 李建永, 白亚通, 刁书磊, 等. 全固废胶凝材料在预应力孔道压浆材料中的应用 [J]. 山东化工, 2020, 49 (10): 138-140.
- [11] 蔚美娇, 孔祥云, 黄劲松, 等. 我国尾矿固废处置现状及建议 [J]. 化工矿物与加工, 2022, 51 (1): 34-38.
- [12] 姬敏, 伊佳雨, 曹长林, 等. 建筑固废资源化处置技术的难点分析及提升策略 [J]. 福建师范大学学报 (自然科学版), 2022, 38 (1): 1-8.
- [13] JTG/TF50-2011, 公路桥涵施工技术规范 [S].
- [14] GB/T17671-2021, 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法) [S].