

# 铝粉掺量对微膨胀UHPC力学性能及工作性的影响

史力, 汪杰, 张祖雪

无锡地铁建设有限责任公司, 江苏 无锡

收稿日期: 2024年1月9日; 录用日期: 2024年1月31日; 发布日期: 2024年2月18日

## 摘要

基于装配式地下车站二次结构湿接缝的结构需求, 研究铝粉掺量对于微膨胀UHPC的流动性、膨胀率、干密度、力学性能及气孔形态等性能的影响。在超高性能混凝土(UHPC)中掺入0.005%、0.010%和0.015%质量分数的铝粉。随着铝粉掺量的增大, 微膨胀UHPC的流动性和膨胀率明显提升, 干密度下降; 微膨胀UHPC的抗压强度分别为123.97、121.00和109.60 MPa, 下降率分别为12.58%、14.67%、22.71%, 但对抗折强度的影响较小。当铝粉掺量为0.005%时, 微膨胀UHPC能够在保证力学性能的情况下具有较为合适的膨胀率, 适用于装配式地下车站二次结构湿接缝。

## 关键词

超高性能混凝土, 铝粉, 工作性能, 力学性能, 微膨胀

# The Effect of Aluminum Powder Content on the Mechanical Properties and Workability of Micro Expanded UHPC

Li Shi, Jie Wang, Zuxue Zhang

Wuxi Metro Construction Co. Ltd., Wuxi Jiangsu

Received: Jan. 9<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 31<sup>st</sup>, 2024; published: Feb. 18<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

This study aims to investigate the impact of aluminum powder content on the flowability, expansion rate, bulk density, mechanical properties, and pore morphology of micro-expansive

**Ultra-High Performance Concrete (UHPC) for wet joints in prefabricated underground stations. Aluminum powder was added to UHPC at mass fractions of 0.005%, 0.010%, and 0.015% respectively. With the increase in aluminum powder content, the flowability and expansion rate of micro-expansive UHPC significantly improved, while the bulk density decreased. The compressive strengths of micro-expansive UHPC were 123.97 MPa, 121.00 MPa, and 109.60 MPa respectively, with corresponding reduction rates of 12.58%, 14.67%, and 22.71%. However, the influence on flexural strength was relatively small. When the aluminum powder content was 0.005%, micro-expansive UHPC exhibited a suitable expansion rate while maintaining adequate mechanical performance, making it suitable for wet joints in prefabricated underground stations.**

## Keywords

**Ultra High Performance Concrete, Aluminum Powder, Workability, Mechanical Properties, Micro Expansion**

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国家和行业“工业化和双碳”政策要求，预制构件装配式施工在地铁车站的施工中应用愈加广泛，在进行装配式地下车站主体结构和二次结构施工中往往涉及到构件之间的湿接缝连接，而接缝质量的好坏往往影响到整体装配式结构的质量[1]。超高性能混凝土(UHPC)是一种新型水泥基复合材料，由于其独特的成分和生产过程而表现出超高的强度、耐久性和韧性[2] [3] [4]。近年来，UHPC因其优越的性能，在世界范围内被广泛关注，并已用于包括桥面、预制混凝土元件和高层建筑等用途中，将UHPC用于装配式地下车站二次结构的湿接缝连接具有良好前景。

然而由于UHPC的低水胶比、高胶凝材料含量、高矿物掺合料掺量、低粗骨料掺量甚至不掺粗骨料等特点，其收缩特性与普通混凝土有较大差异，具体表现为UHPC在凝结硬化以及硬化后的服役过程中会产生较大的自收缩，其收缩幅度往往大于普通混凝土，一般可达 $500 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ ，并且收缩发展速度较快，大幅度增加早期开裂的风险[5] [6]。自收缩定义为由于水泥水化过程中的自干燥和化学过程引起的毛细管压力引起的宏观体积变化，没有水分转移到周围环境[7]。据报道，水胶比(w/b)小于约0.42的混凝土会发生自收缩，并随着w/b的降低而增加，早期产生的高自收缩会导致潜在的开裂，从而影响硬化水泥基材料的机械性能和耐久性[7] [8]。另外，由于湿接缝用UHPC与预制构件的龄期不同，会引起额外的收缩应力，导致装配式结构更容易在接缝位置发生受力或疲劳破坏，影响构件的受力性能和耐久性[9]。

为保证UHPC在湿接缝的充分填充，通过在添加引气剂对UHPC进行收缩补偿，抵消其自身收缩和温度应变，从而降低其开裂倾向。铝粉作为一种常用的混凝土引气剂，通过与浆料中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水反应产生氢气，在混凝土中形成微小气泡，从而提高混凝土的流动性和减少水泥用量，并且产生的氢气能够很好的保存在混凝土浆体内部，其反应如下[10]：



本文通过使用铝粉的引气作用，在UHPC成型时引入微小气泡抵抗凝结过程中的自收缩性能，并探

究铝粉对 UHPC 性能的影响, 寻找适用于装配式地下车站二次结构湿接缝的微膨胀 UHPC, 为其在工程中的应用提供了理论依据。

## 2. 原材料及试验方法

### 2.1. 试验原材料及配合比

试验用到的材料为铝粉、水泥、硅灰、石英粉、石英砂、高效减水剂和水。水泥采用南京江南小野田水泥厂生产的 P.II 52.5 水泥; 硅灰采用上海天恺公司生产的 970 U 微硅粉; 石英粉采用上海胜阔建筑材料有限公司生产的 1500 目石英粉; 石英砂采用上海胜阔建筑材料有限公司生产的 30~60 目和 70~100 目两种目数的石英砂; 高效减水剂采用上海英衫新材料有限公司生产的 PC-200 型聚羧酸减水剂。原材料化学组成如表 1 所示。本文拟利用铝粉对 UHPC 的自收缩性进行改善, 并研究对 UHPC 性能的影响。

**Table 1.** Chemical composition of raw materials

**表 1.** 原材料的化学组成

原料	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
水泥	0.09	0.66	4.33	19.90	2.91	0.03	0.78	3.28	-
硅灰	0.19	0.57	0.19	96.20	1.30	0.03	0.33	-	0.33

铝粉 UHPC 的配合比如表 2 所示。

**Table 2.** Mix design of aluminum powder UHPC (g/L)

**表 2.** 铝粉 UHPC 的配合比设计(g/L)

试样	水泥	硅灰	石英粉	30~60 目石英砂	70~100 目石英砂	高效减水剂	水	铝粉
U0	743	90	250	856	214	7.15	193	0
U5	743	90	250	856	214	7.15	193	0.03715
U10	743	90	250	856	214	7.15	193	0.0743
U15	743	90	250	856	214	7.15	193	0.11145

### 2.2. 试验原材料及配合比

制备工艺: 将铝粉、P.II 52.5 水泥、硅灰、石英粉、30~60 目石英砂、70~100 目石英砂按配合比称量并混合放入搅拌锅中, 将粉体材料搅拌至均匀(1 min); 通过磁力搅拌机提前混合高效减水剂与水, 混合均匀后(5 min)与粉体材料混合, 慢搅 2 min, 快搅 1.5 min; 待搅拌完成后, 将砂浆材料浇注在试模中, 在振动台上振动 30 s, 刮去多余的砂浆, 完成试件的成型制备; 将试件放置在温度 20℃, 相对湿度 95% 以上的标准养护室静置 2 d 后脱模, 放入蒸汽快速养护箱中, 温度为 90℃, 湿度为 100%, 养护 2 d; 养护完成的试块进行后续试验。

### 2.3. 试验原材料及配合比

流动度测试参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》(GB8077-2012) [11]中“水泥净浆流动度”进行。浆体的膨胀率通过特殊装置测量试块高度, 计算浆体体积, 直至不变。气孔形态通过相机拍照进行记录, 并通过 ImageJ 软件对图片进行灰度处理, UHPC 的孔隙结构进行分析。干密度通过将试件置于 110℃下烘至恒重, 测量其重量并量取其尺寸, 计算得到干密度。制品强度按照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671-2021) [12]中规定的方法进行测定。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 铝粉掺量对流动性的影响

从图 1 可见, 铝粉掺量为 0%、0.005%、0.010% 和 0.015% 时, 浆体的流动度分别为 267 mm、275 mm、277.5 mm、282.5 mm。相比于掺量为 0% 的空白对照组, 剩下的实验组流动性能分别降低了 2.99%、3.93% 及 5.81%。可见, 随着铝粉掺量的增加, 拌和浆体的流动性能呈现提高的趋势, 这主要是由于铝粉的引气作用, 在拌合过程中不断释放微气泡, 引入的气泡具有“滚珠效应” [13], 对改善流动度有利, 在测量时已在发挥微膨胀作用, 铝粉的掺量越高, 微膨胀作用越明显, 导致其流动度越大。

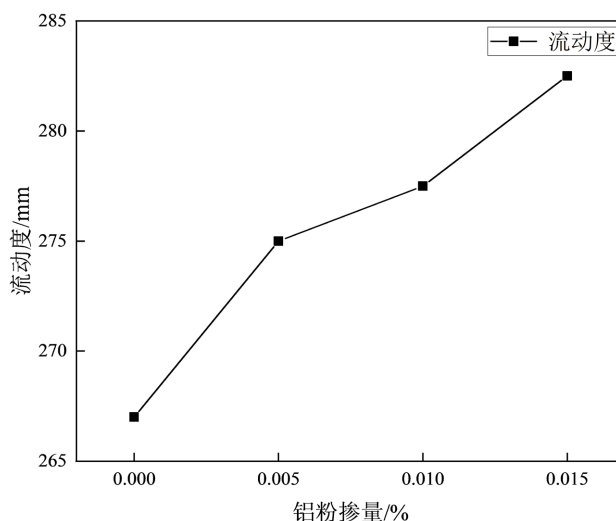


Figure 1. Effect of different aluminum powder dosages on slurry fluidity

图 1. 不同铝粉掺量对浆体流动度的影响

#### 3.2. 铝粉掺量对膨胀率的影响

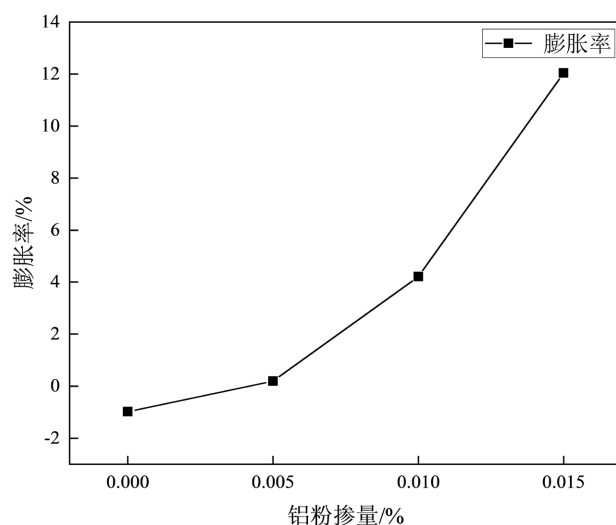


Figure 2. Effect of different aluminum powder dosages on the expansion rate of test blocks

图 2. 不同铝粉掺量对试块膨胀率的影响

图 2 所示为不同铝粉掺量的 UHPC 试块养护 2 d 后的膨胀率,由图 2 可知,铝粉掺量为 0%、0.005%、0.010%和 0.015%时,试块的膨胀率分别为-0.98%、0.20%、4.21%及 12.04%。与未掺铝粉试块的自收缩相比,随着铝粉掺量的增加,试块的膨胀率逐渐增大,其原因为铝粉通过与水反应产生氢气形成的微小气泡为球形气孔,其孔径明显大于浆体形成的毛细孔隙,根据毛细管张力理论[14],毛细管收缩应力 $\sigma_{ca}$ 计算式为

$$\sigma_{ca} = \Delta p = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (2)$$

式中: $r$ 为毛细孔内液体的表面张力; $\theta$ 为液体与固体之间的接触角; $r$ 为毛细孔临界半径。

从式(2)可以知道,由于铝粉产生的气泡具有更大的空隙半径,具有更小的毛细管收缩应力,因此有助于抵抗凝结过程中的 UHPC 自收缩。

### 3.3. 铝粉掺量对干密度的影响

图 3 为不同铝粉掺量对试块干密度的影响。从图 3 可见,铝粉掺量为 0%、0.005%、0.010%及 0.015%时,微膨胀 UHPC 的干密度分别为 2.20 g/cm<sup>3</sup>、2.18 g/cm<sup>3</sup>、2.09 g/cm<sup>3</sup>及 1.88 g/cm<sup>3</sup>。与未掺铝粉的空白对照组相比,随着铝粉掺量的提升,干密度下降了 0.86%、5.10%和 14.44%。试块的干密度随着铝粉的提升呈现逐步减少的趋势,这主要是由于掺入铝粉使浆体中引入微小气泡,在发气过程中,试块的总孔隙率增大,在同样的总体积下浆体的占比降低,从而导致试块的干密度有所下降。

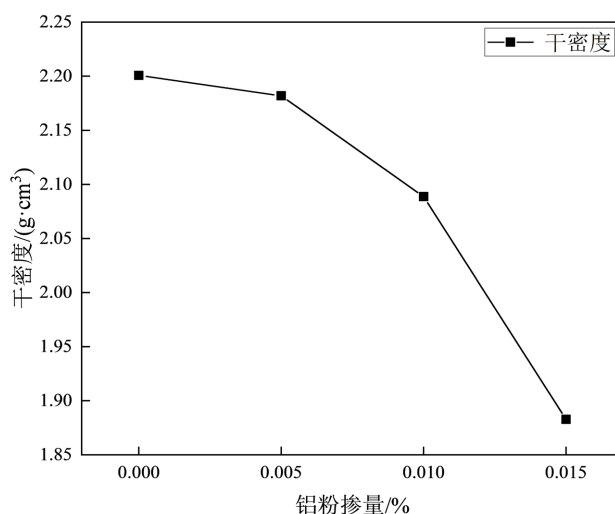
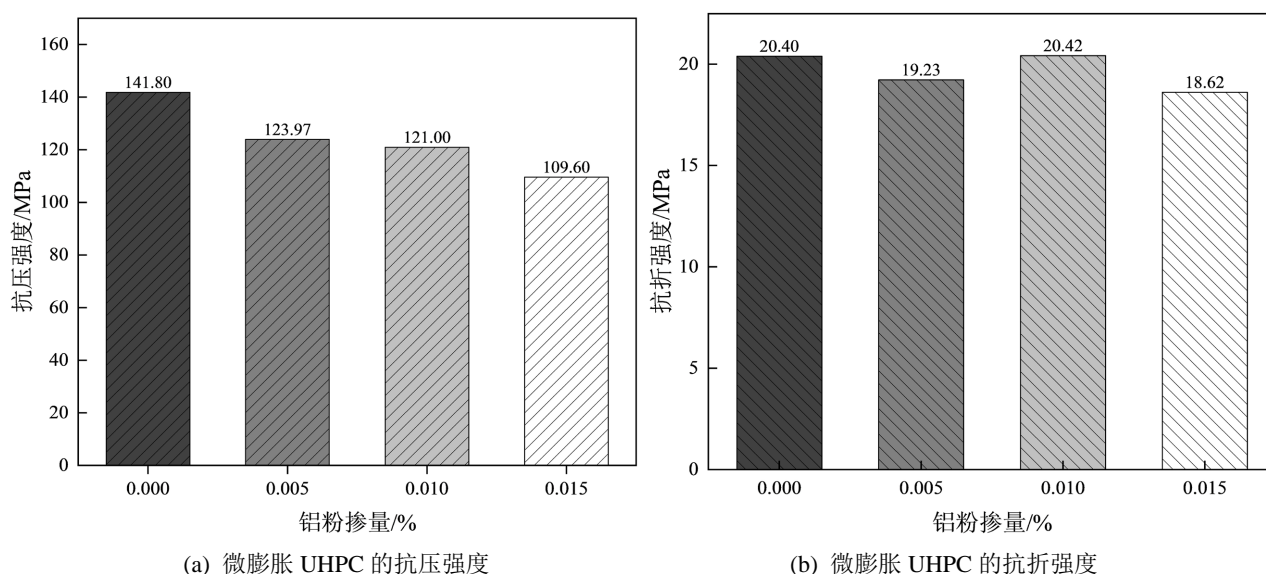


Figure 3. Effect of aluminum powder content on dry density of test blocks

图 3. 铝粉掺量对试块干密度的影响

### 3.4. 铝粉掺量对力学性能的影响

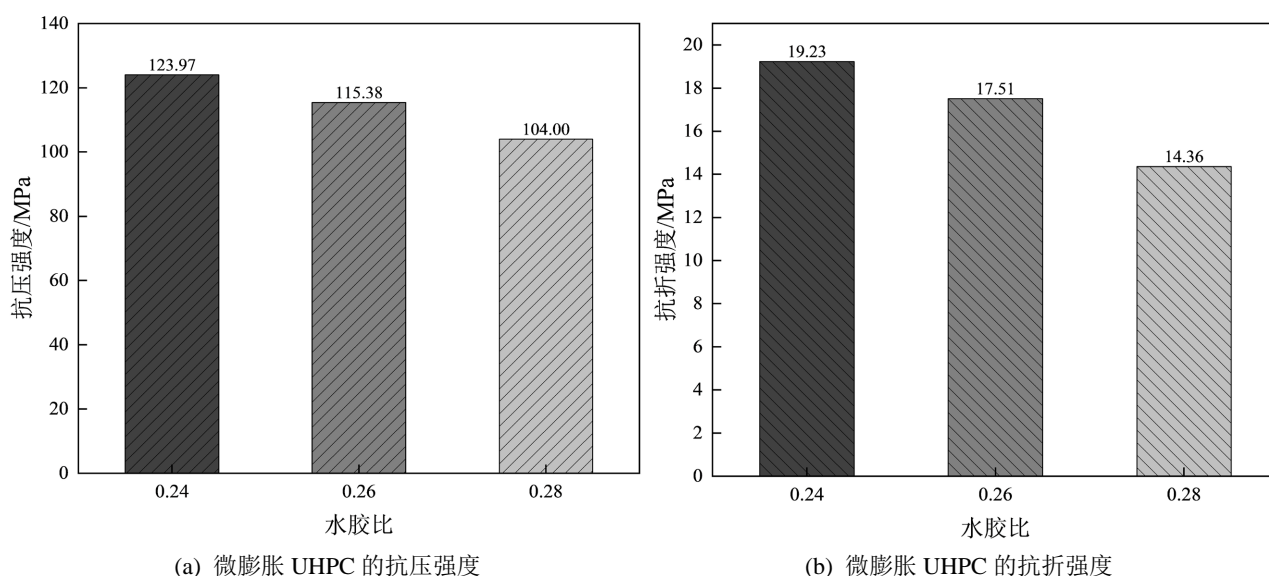
图 4 为不同铝粉掺量下的微膨胀 UHPC 的抗压强度及抗折强度。从图 4(a)可以看到,随着铝粉掺量的增加,微膨胀 UHPC 的抗压强度呈现下降的趋势,相比与未掺铝粉的 UHPC,微膨胀 UHPC 抗压强度下降率分别为 12.58%、14.67%、22.71%,其主要原因是铝粉引入的微小气泡造成 UHPC 的孔隙率增加及干密度降低,同时铝粉的引气作用会使 UHPC 试块内部的连通孔隙变多,在宏观上体现为 UHPC 抗压强度的下降。而从图 4(b)可以看到,铝粉掺量对微膨胀 UHPC 的抗折强度的影响较小,微膨胀 UHPC 的抗折强度下降率分别为 5.73%、-0.10%、8.72%。



**Figure 4.** Compressive strength and flexural strength of micro expanded UHPC with different aluminum powder dosages

**图 4.** 不同铝粉掺量下的微膨胀 UHPC 的抗压强度及抗折强度

为探究铝粉引气反应消耗水是否对微膨胀 UHPC 的力学性能有所影响, 将微膨胀 UHPC 的铝粉掺量固定在 0.005%, 设计三种水胶比, 分别为 0.24、0.26、0.28, 测试其抗压强度和抗折强度, 结果如图 5 所示。随着水胶比的增大, 抗压强度及抗折强度均呈现下降趋势, 抗压强度下降率分别为 6.92% 和 16.11%, 抗折强度下降率分别为 8.95% 和 25.31%。力学性能下降的原因是额外添加的水过多将会降低微膨胀 UHPC 气孔孔壁的机械强度, 同时, 变稀的料浆会使存于料浆中的小气泡逐渐合并成大气泡造成塌模, 并且容易产生泌水分层现象, 不利于气孔在蒸压加气混凝土内部均匀化, 因此抗压强度和抗折强度均随水胶比增加呈现下降趋势[15]。



**Figure 5.** Compressive strength and flexural strength of micro expanded UHPC with 0.005% aluminum powder content at different water-binder ratios

**图 5.** 铝粉掺量为 0.005% 的微膨胀 UHPC 在不同水胶比下的抗压强度及抗折强度



### 3.5. 气孔形态

对不同铝粉掺量下的微膨胀 UHPC 进行切割, 并对剖面图进行灰度处理, 结果如图 6 所示。利用 ImageJ 软件对不同铝粉掺量下的微膨胀 UHPC 剖面孔隙总面积和孔隙率进行统计, 结果如表 3 所示。

从图 6 各组试件剖面图可看出, 各个试件的孔隙均分布不均匀, 随着铝粉掺量的提高, 试件孔隙的数量逐渐变多, 但孔隙的直径逐渐变小。这是由于浆体在较低的流动性下, 浆体的保气能力差, 形成的气泡结构不稳定, 容易聚集形成大气泡[16], 这与铝粉掺量和浆体流动性的规律一致。因此, 试件在宏观上表现为随着铝粉掺量的增加, 试件干密度下降, 抗压强度降低。

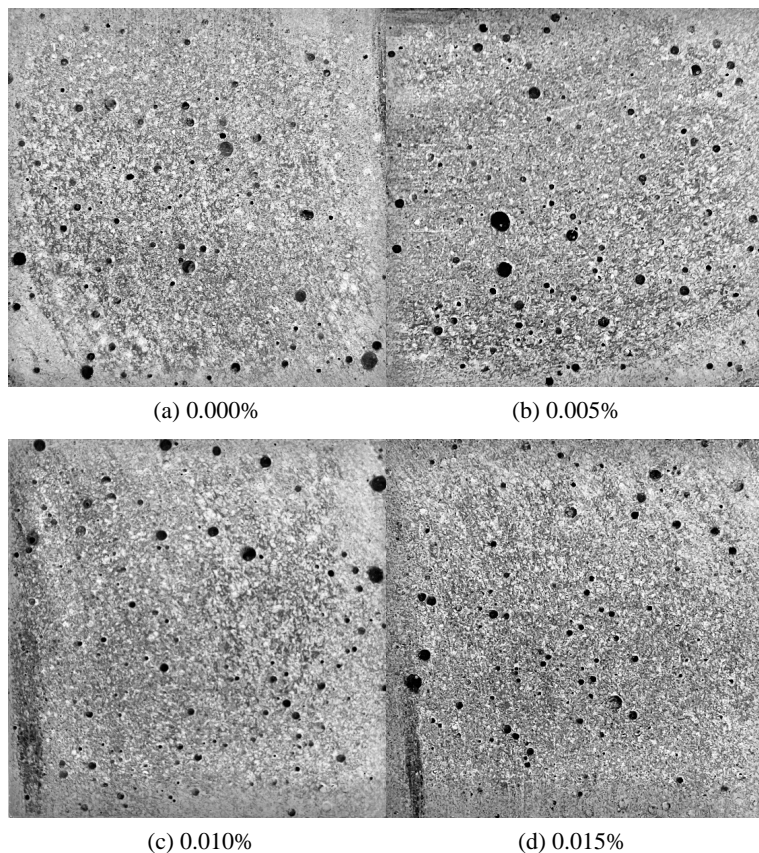


Figure 6. Profile of microexpanded UHPC test blocks with different aluminum powder dosages

图 6. 不同铝粉掺量下微膨胀 UHPC 试块剖面图

Table 3. Total pore area and porosity of micro expanded UHPC under different aluminum powder dosages  
表 3. 不同铝粉掺量下微膨胀 UHPC 孔隙总面积及孔隙率

铝粉掺量/%	孔隙总面积/mm <sup>3</sup>	孔隙率/%
0.000	179.15	3.58
0.005	196.79	3.94
0.010	224.73	4.50
0.015	276.87	5.54

从表 3 中数据可看出, 随着铝粉掺量增加, 试件的孔隙总面积和孔隙率逐渐增大。未掺铝粉掺量时,

孔隙率为 3.58%，当铝粉掺量为 0.015% 时，孔隙率增长 54.5%，达到 5.54%。

#### 4. 结论

1) 由于铝粉的引气作用，在拌合过程中不断释放微气泡，掺量越高，微膨胀作用越明显，微膨胀 UHPC 浆体流动度越大，成型后试块的膨胀率越高。

2) 铝粉掺量对微膨胀 UHPC 的孔隙率和干密度影响较大。随着铝粉掺量的提高，微膨胀 UHPC 的孔隙率提高，干密度下降。随着铝粉掺量的提高，微膨胀 UHPC 的抗压强度呈现下降趋势，下降率分别为 12.58%、14.67%、22.71%，但对抗折强度的影响较小。

3) 综合而言，当铝粉掺量为 0.005% 时，微膨胀 UHPC 能够在保证力学性能的情况下具有较为合适的膨胀率，膨胀率为 2‰，是适用于装配式地下车站二次结构湿接缝的微膨胀 UHPC。

#### 参考文献

- [1] 殷雨时, 杨纪, 苏庆田, 等. 装配式节段梁 UHPC 湿接缝界面力学性能数值模拟分析[J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(1): 77-85.
- [2] 王德辉, 史才军, 吴林妹. 超高性能混凝土在中国的研究和应用[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 141-149. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2016.01.026>
- [3] Shi, C.J., Wu, Z.M., Xiao, J.F., Wang, D.H., Huang, Z.Y. and Fang, Z. (2015) A Review on Ultra High Performance Concrete: Part I. Raw Materials and Mixture Design. *Construction and Building Materials*, **101**, 741-751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>
- [4] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2):10-20.
- [5] Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Aydın, S. and Karabulut, A.Ş. (2008) Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing Mineral Admixtures under Different Curing Regimes. *Construction and Building Materials*, **23**, 1223-1231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003>
- [6] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 安明喆, 韩松, 丁庆军. 超高性能混凝土收缩综述[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 13-28. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.01.002>
- [7] Yang, L., Shi, C.J. and Wu, Z.M. (2019) Mitigation Techniques for Autogenous Shrinkage of Ultra-High-Performance Concrete—A Review. *Composites Part B: Engineering*, **178**, Article 107456. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107456>
- [8] Altoubat, S.A. and Lange, D.A. (2001) Tensile Basic Creep: Measurements and Behavior at Early Age. *ACI Materials Journal*, **98**, 386-393. <https://doi.org/10.14359/10728>
- [9] 徐晨, 卢毅, 马磊, 等. 含湿接缝的钢-UHPC 组合桥面板收缩效应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 17-26.
- [10] 郑志, 田进, 徐宁. 生石灰形成机理及在蒸压加气混凝土砌块生产中与铝粉发气配合分析[J]. 广东化工, 2018, 45(7): 172-173.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土外加剂匀质性试验方法: GB/T 8077-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [12] 国家市场监督管理总局. 水泥胶砂强度检验方法: GB/T 17671-2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [13] 郑秀华, 张宝生, 袁杰, 等. 引气剂与粉煤灰对大流动性轻集料混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2005(4): 88-92.
- [14] 李 F.M. 水泥和混凝土化学[M]. 唐明述, 等, 译. 北京: 中国工业出版社, 1966.
- [15] 孙小巍, 张雯琪, 杨林, 回志峰, 吴昌鹏, 戚红. 石墨尾矿蒸压加气混凝土性能研究[J]. 非金属矿, 2022, 45(5): 92-96.
- [16] 张美霞, 杨朝刚, 张慧月, 等. 加气混凝土砌块用生石灰的改性研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(12): 25-27.