

文章编号: 1005-0523(2026)02-0095-09



## 引气剂在盾构隧道注浆材料中的应用研究

邓文武<sup>1,2</sup>, 黄大维<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

**摘要:** 为探讨同步注浆对隧道结构上浮及地表沉降的影响, 提出一种改进的注浆材料以优化施工效果。通过在浆液中添加引气剂引入微小气泡, 使注浆浆液具备轻质化及弹性可压缩性能。采用室内试验与现场监测相结合的方法, 评估引气剂掺量对浆液性能及施工效果的影响。本研究开发了一种基于引气剂的轻质化及弹性可压缩盾构隧道同步注浆材料。研究表明, 在相同注浆压力及注浆量条件下, 轻质化注浆材料有效抑制了施工期隧道上浮, 平均上浮量从 8.7 mm 降至 0.1 mm; 同时, 地表沉降在 14 d 内从 10.5 mm 减少至 4.5 mm, 降低约 57%。引气剂的引气效应使浆液实现轻质化并提升了性能, 显著改善了盾构隧道施工期的上浮和地表沉降问题, 为隧道施工提供了一种高效的注浆材料解决方案。

**关键词:** 盾构隧道; 同步注浆; 引气剂; 浆液轻质化; 弹性可压缩; 浆液性能

中图分类号: U451.3

文献标志码: A

本文引用格式: 邓文武, 黄大维. 引气剂在盾构隧道注浆材料中的应用研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(2): 95-103.

## Study on the Application of Air Entraining Agent in Grouting Materials for Shield Tunnels

Deng Wenwu<sup>1,2</sup>, Huang Dawei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

**Abstract:** To explore the effects of synchronous grouting on tunnel structure uplift and ground settlement, this study proposes an improved grouting material to optimize construction performance. Microbubbles were introduced into the grout by adding an air entraining agent, endowing the grout with lightweight, elastic and compressible properties. A combination of laboratory experiments and field monitoring was employed to evaluate the influence of air entraining agent content on grout properties and construction performance. A lightweight, elastic, and compressible synchronous grouting material for shield tunnels based on the air entraining agent was developed. The study revealed that under identical grouting pressure and volume conditions, the lightweight grouting material effectively suppressed tunnel uplift during construction, reducing the average uplift from 8.7 mm to 0.1 mm. Additionally, ground settlement over 14 d decreased from 10.5 mm to 4.5 mm, a reduction of approximately 57%. The air-inducing effect of the air entraining agent enables grout lightweighting and enhances its performance, significantly mitigating tunnel uplift and ground settlement during shield tunnel construction. This provides an efficient grouting material solution for tunnel engineering projects.

收稿日期: 2025-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378398, 52078213)

**Key words:** shield tunnel; synchronous grouting; air entraining agent; lightweight grout; elastic compressibility; grout properties

**Citation format:** DENG W W, HUANG D W. Study on the application of air entraining agent in grouting materials for shield tunnels[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(2):95-103.

近年来,随着城市轨道交通建设的快速发展,盾构法因其高效、低环境影响和施工安全的优势,成为隧道工程的主流技术。截至2023年底,我国已有61座城市开通城市轨道交通线路,运营总里程达11 034 km<sup>[1]</sup>。盾构掘进过程中,盾尾与管片之间的环状空隙需及时注浆填充,以保证结构稳定性、抑制地层变形并提高隧道耐久性<sup>[2]</sup>。盾构隧道长距离掘进施工中,同步注浆材料的轻质化,对减小盾构掘进引起的地表沉降具有重要意义。

目前,单液活性浆液被广泛应用于盾构隧道同步注浆中,其具备早期高强度、低渗透性和良好的泵送性能等优点<sup>[3]</sup>。然而,现有研究多集中在浆液配合比优化和性能改进等方面,如胶凝材料用量、水灰比、膨润土与粉煤灰的掺量对浆液性能的影响等<sup>[4-9]</sup>。黄德楷等<sup>[6]</sup>通过室内试验系统研究了粉煤灰掺量对同步注浆浆液性能的影响,得出了最佳配合比。盛炎民等<sup>[8]</sup>采用宏微观相结合的手段,研究了配合比及养护条件对同步注浆浆液性能的影响,发现水养条件下,水分子渗入注浆液内部与SiO<sub>2</sub>发生化学反应,会引起注浆材料强度损失。

将浆液同步注入盾尾间隙后,浆液处于流体状态并围绕隧道结构形成注浆圈,而浆液对隧道结构产生的浮力直接与浆液密度相关<sup>[10-13]</sup>。传统注浆材料因密度较高,在浮力作用下容易引起隧道结构上浮<sup>[14-18]</sup>,同时浆液渗透及固结收缩导致的体积损失无法得到有效补偿,进而引发地表沉降问题,难以实现对隧道施工期地层变化的有效控制。肖明清等<sup>[19]</sup>研究指出,盾构隧道施工过程中,管片衬砌上浮是客观存在的现象,且管片直径越大,上浮问题越突出。根据阿基米德原理,浆液对隧道的上浮力与浆液密度正相关。李利平等<sup>[20]</sup>研究了基于渗滤效应的可压缩智能同步注浆材料的固结扩散机理。黄大维等<sup>[21]</sup>通过模型试验分析了不同注浆压力下浆液的空间分布以及注浆区域上部土压力变化,并对不同注浆压力引发的地表沉降进行了研究,认为注浆压力是注浆过程中地表

沉降的主要控制性因素之一。高培伟等<sup>[22]</sup>制备了新型发泡剂并对泡沫的强度、韧性等进行了研究。

从现有研究可见,成果多集中于传统注浆材料的配比优化等方面,针对浆液轻质化及弹性可压缩性能以控制施工期地层变形的研究较少。

本研究开发了一种基于引气剂引气效应的轻质化及弹性可压缩盾构隧道同步注浆材料。在实际工程试验段中,通过监测数据对比分析,验证了该材料在控制隧道上浮和地表沉降方面的显著优势。

## 1 试验原材料及性能测试方法

### 1.1 试验原材料

滨海某盾构隧道工程采用混凝土搅拌站供应的成品同步注浆材料,试验原材料(除引气剂)均取自搅拌站。

水泥:唐山泓泰水泥有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥。

粉煤灰:天津国电津能热电有限公司生产的Ⅱ级粉煤灰。

膨润土:潍坊市坊子区宏力活性膨润土厂生产的钠基膨润土。

砂:细度模数为1.4的河砂。

拌和水:自来水。

引气剂:SITREN AirVoid 616型阴离子表面活性剂。

### 1.2 配合比设计

基于滨海某盾构隧道工程同步注浆浆液实际配合比,在此基础上添加不同比例引气剂。根据发泡试验结果,引气剂选取5个掺量(0.025%、0.050%、0.075%、0.100%、0.125%)进行配合比试验,另设一组空白对照组,共计6组,配合比设计见表1,引气剂掺量按胶凝材料质量的百分比计算。

### 1.3 试验流程

试验流程如图1所示。首先测定砂的含水率,依据设计配合比计算并称量一定量的水泥等材料,按顺序投放至砂浆搅拌机中进行干拌,干拌时长为

30 s;随后,将称量好的引气剂添加至拌和水中,再将其一同加入搅拌机继续搅拌,搅拌时间为5 min,搅拌结束后停机出料;最后,对同步注浆材料的使用性能展开测试,制作试块并测试其力学性能等。

表1 同步注浆配合比设计  
Tab.1 Simultaneous grouting mix ratio design

组别	水泥/ (kg/m <sup>3</sup> )	粉煤灰/ (kg/m <sup>3</sup> )	膨润土/ (kg/m <sup>3</sup> )	砂/ (kg/m <sup>3</sup> )	拌和水/ (kg/m <sup>3</sup> )	引气剂 掺量/%
1	180	250	55	770	350	0
2	180	250	55	770	350	0.025
3	180	250	55	770	350	0.050
4	180	250	55	770	350	0.075
5	180	250	55	770	350	0.100
6	180	250	55	770	350	0.125

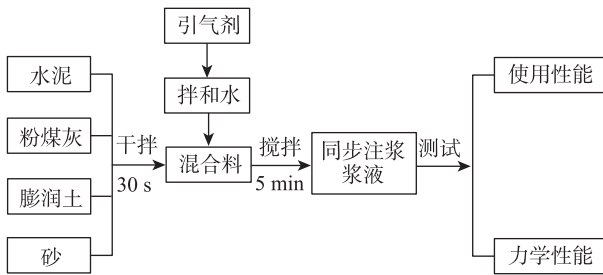


图1 同步注浆浆液试验流程图

Fig. 1 Flow chart of synchronous grouting slurry test

### 1.4 浆液性能指标及测试方法

为探究引气剂加入对盾构隧道同步注浆浆液性能的影响,在室内进行了轻质化同步注浆浆液性能测试。测试指标包括表观密度、含气量、稠度、稠度经时损失、分层度、泌水率、抗压强度和水陆强度比,均参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)进行。其中,稠度经时损失分别测试了1,2,3 h的稠度损失;抗压强度则分别测试了3,7,28,60 d的强度。泌水率和水陆强度比测试则依据《盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程》(T/CECS 563—2018)进行。

### 1.5 表面张力测量

采用德国Data Physics公司生产的DCAT21表面张力仪,对不同引气剂掺量溶液的表面张力进行测试。测试过程中,每种溶液均进行三次独立测量,以确保数据的准确性和可重复性。每次测量均在相同的温度和环境湿度等条件下进行,以排除外部环境因素的干扰。最终取3次测量值的平均值作为每种溶液的表面张力结果。

## 2 引气剂对新拌浆液性能的影响

### 2.1 引气剂对水溶液表面张力的影响

表面张力会阻碍水泥浆中气泡的形成与稳定,表面张力越大,气泡越难形成,且已形成的气泡也更容易破裂。引气剂掺量对水溶液表面张力的影响曲线见图2。由图2可知,加入引气剂后,溶液的表面张力显著下降。水的表面张力为73.02 mN/m;当引气剂掺量为0.025%时,水溶液的表面张力降至28.24 mN/m,较水的表面张力下降约61.33%,表明引气剂能有效降低水溶液的表面张力。随着引气剂掺量增至0.075%,溶液的表面张力不再继续下降并逐渐趋于平稳,因此推测引气剂掺量达到0.075%时可达到理想的引气效果。

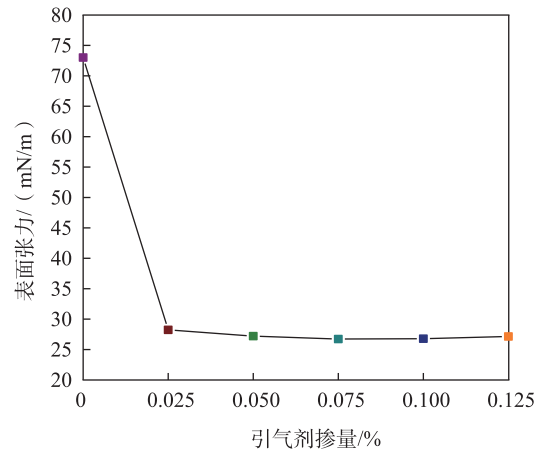


图2 引气剂掺量对水溶液表面张力的影响曲线

Fig. 2 Influence curve of air entraining agent dosage on surface tension of aqueous solution

### 2.2 引气剂对浆液表观密度的影响规律

采用容积为1 L的容量筒对各组新拌同步注浆浆液进行表观密度测试,各组试样表观密度随引气剂掺量变化的规律曲线见图3。由图3可知,空白对照组的表观密度为1 920 kg/m<sup>3</sup>。随着引气剂掺量的不断增加,试样的表观密度显著下降,但下降速率逐渐减缓。当引气剂掺量为0.125%时,新拌浆液的表观密度降至1 723 kg/m<sup>3</sup>。这是由于引气剂在浆液中引入了微小气泡,这些微小气泡占据了部分原有浆液的体积,从而导致浆液表观密度的降低。

### 2.3 引气剂对浆液含气量的影响规律

采用LS-546型数字显示砂浆含气量测定仪对各组新拌同步注浆浆液的含气量进行测试,各组试样含气量随引气剂掺量变化的规律曲线见图4。由

图4可知,新拌空白对照组浆液的含气量为1.20%。引气剂的加入在浆液中引入了微小气泡,从而显著提高了浆液的含气量。从图4可以看出,随着引气剂掺量的增加,浆液的含气量不断上升,但增加的趋势逐渐趋于平缓。当引气剂掺量为0.125%时,新拌浆液的含气量达到11.44%。

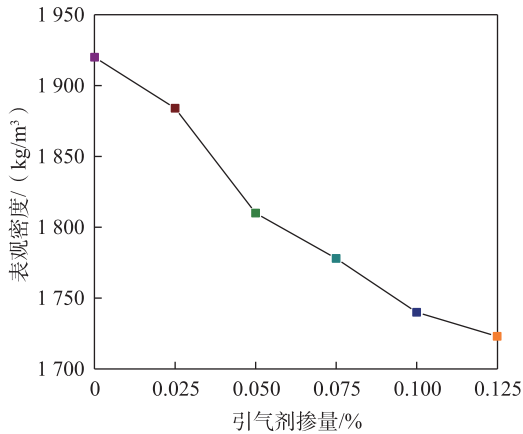


图3 引气剂掺量对浆液表观密度影响曲线

Fig. 3 Influence curve of air entraining agent dosage on the apparent density of grout

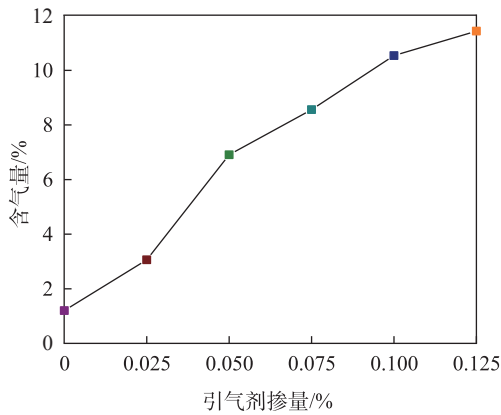


图4 引气剂掺量对浆液含气量影响曲线

Fig. 4 Influence curve of air entraining agent dosage on gas content of grout

2.4 引气剂对浆液稠度及稠度经时损失的影响规律

同步注浆浆液的稠度和稠度经时损失指标是衡量其施工可注性的关键指标之一。合理的稠度和稠度经时损失是确保浆液在失去部分流动性之前顺利完成注浆施工的重要前提。本研究采用砂浆稠度仪对新拌浆液的稠度和稠度经时损失进行测试,并结合实际施工情况,对浆液的初始稠度及3 h内稠度经时损失进行评估。各组试样稠度和稠度经时损失随引气剂掺量变化的规律曲线如图5所示。

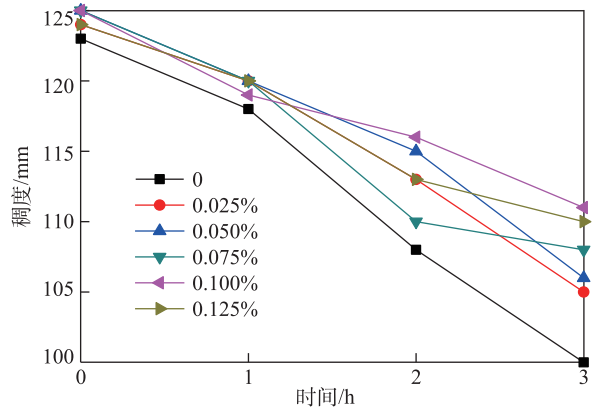


图5 引气剂掺量对浆液稠度及稠度经时损失影响曲线  
Fig. 5 Influence curve of air entraining agent dosage on grout consistency and duration loss

由图5可见,添加引气剂对提升浆液初始稠度具有显著效果,初始稠度从空白对照组的123 mm增至126 mm,3 h后的稠度也从空白对照组的100 mm提升至111 mm。在3 h内,稠度经时损失呈现出减小的趋势。

分析其成因,引气剂的加入在新拌浆液中引入了大量非连续的微小封闭气泡,这些微小气泡在浆液中起到了类似滚珠的润滑作用,从而有效提高了浆液的稠度,并在一定程度上抑制了稠度经时损失。

2.5 引气剂对浆液分层度的影响规律

同步注浆浆液的分层度是确保其良好施工效果的关键因素。若分层度过大,浆液中的砂颗粒会下沉,导致砂与浆液分离,进而引发堵管、堵泵等工程问题。根据规范要求,水泥基同步注浆浆液的分层度应不大于6.0 mm。各组试样分层度随引气剂掺量水平的变化规律如图6所示。

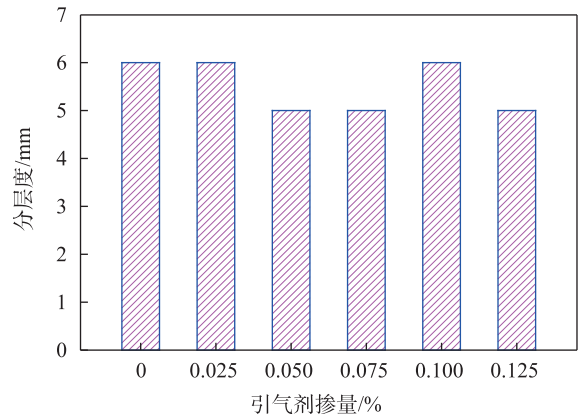


图6 引气剂掺量对浆液分层度影响柱状图  
Fig. 6 Column chart of the influence of air entraining agent dosage level on the stratification degree of grout

由图6可知,随着引气剂掺量的增加,浆液的分层度保持相对稳定,为5.0~6.0 mm。分析认为,浆液的分层度与浆液中气泡的体积大小和均匀稳定性密切相关。当浆液处于静置状态时,浆液中的砂颗粒在重力作用下会产生下沉趋势。砂颗粒挤压周围的气泡,导致气泡体积发生变化。若气泡个体体积较大,则更容易被压缩和变形,这种变化为砂颗粒的沉降提供了通道,表现为浆液分层度增大。相反,若气泡个体体积较小,则不易被压缩,相同含气量的浆液中气泡密度更大,砂颗粒在沉降过程中受到抑制,表现为浆液分层度稳定。

这种现象表明,在实际工程中,控制气泡的大小和数量对于保持浆液的稳定性至关重要。

### 2.6 引气剂对浆液泌水率的影响规律

浆液泌水率是表征浆液稳定性的关键指标之一。泌水率较高时,新拌浆液中的砂颗粒容易下沉,导致砂颗粒与浆液分离,进而增大浆液的分层度,严重时甚至会造成注浆过程中的堵管等工程问题。各组试样泌水率随引气剂掺量的变化规律见图7。

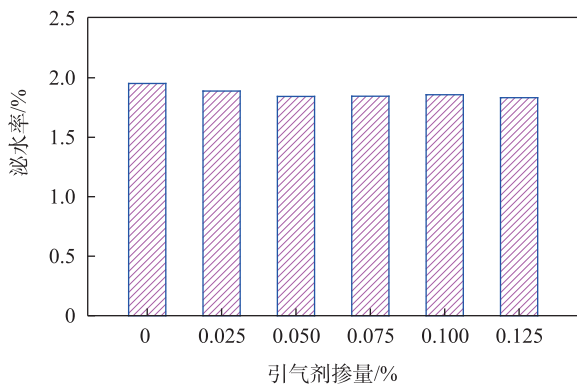


图7 引气剂掺量对浆液泌水率影响柱状图

Fig. 7 Column chart of the influence of air entraining agent dosage on grout bleeding rate

由图7可知,随着引气剂掺量的增加,浆液的泌水率保持相对稳定,均在2.0%以下,且随着引气剂掺量的增加,泌水率略有降低。分析泌水率数据可知,浆液中的砂颗粒挤压并未导致气泡上浮析出或气泡壁破裂,也未增加游离拌和水量,这表明浆液中的气泡以一种相对稳定的状态存在。

## 3 引气剂对浆液硬化结石体性能的影响

### 3.1 引气剂对结石体抗压强度的影响规律

考虑到经济性及实际工程应用,《盾构法隧道

同步注浆材料应用技术规程》(T/CECS 563—2018)规定,单液活性浆液硬化后3 d的抗压强度不得小于0.5 MPa,28 d的抗压强度不得小于2.5 MPa。为研究引气剂掺量对浆液结石体抗压强度的影响规律,分别对各试样浆液结石体在3,7,28,60 d的抗压强度进行了测试,各组试样结石体抗压强度随引气剂掺量变化的规律曲线见图8。

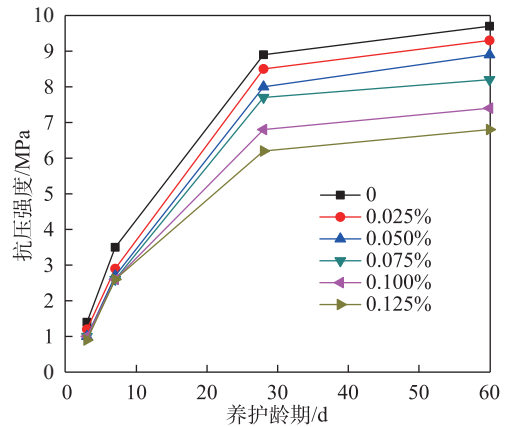


图8 引气剂掺量对浆液结石体抗压强度影响曲线

Fig. 8 Influence curve of air entraining agent dosage on compressive strength of grout stone body

由图8可知,在相同的养护龄期及养护条件下,浆液结石体的抗压强度随引气剂掺量的增加而逐渐降低。而在相同的引气剂掺量条件下,浆液结石体的抗压强度则随着试样养护龄期的延长而增大,其中前期[3,28] d强度增长较快,后期[28,60] d增长趋势则逐渐趋于平缓。

分析其原因,引气剂在浆液搅拌过程中会引入微小气泡,这些气泡在硬化后以气孔的形式存在于浆液中。气孔的存在导致浆液结石体内部出现缺陷,容易引起应力集中,在外力作用下,结石体更易沿缺陷部位发生破坏,从而表现为抗压强度的下降。

### 3.2 引气剂对水陆强度比的影响规律

水陆强度比定义为水中成型的注浆材料与空气中成型的注浆材料在28 d养护龄期下的抗压强度之比。该比值主要用于表征盾构隧道同步注浆浆液的水分散性能。《盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程》(T/CECS 563—2018)规定,水陆强度比不得小于65.0%。引气剂掺量对浆液水陆强度比的影响规律如图9所示。

由图9可知,各试样的水陆强度比均高于规范要求要求的65.0%。空白对照组的水陆强度比为

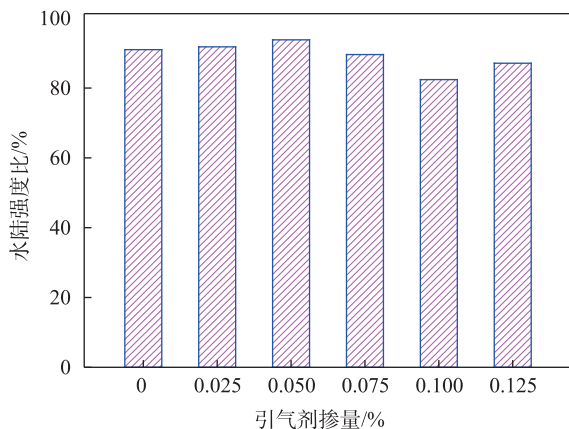


图9 引气剂掺量对浆液水陆强度比影响曲线

Fig. 9 Influence curve of the dosage of air entraining agent on grout water-air compressive strength ratio

91.0%，添加引气剂后，对同步注浆材料的水陆强度比产生了一定影响，部分掺量下甚至略有提升，水陆强度比达到93.8%。这表明本研究中的轻质化同步注浆浆液具备良好的抗水分散性能。

#### 4 同步注浆对施工期隧道上浮及地表沉降的影响

为验证含引气剂的新型注浆浆液对施工期隧道上浮和地表沉降的控制效果，依托滨海某盾构工程进行了现场监测。前述室内试验结果表明，当引气剂掺量为0.075%时，浆液含气量为8.56%，28 d抗压强度为7.7 MPa，水陆强度比高达89.6%，综合性能最佳。因此，在实际工程中，同步注浆浆液中引气剂的最优掺量推荐为0.075%。

##### 4.1 同步注浆对施工期隧道上浮的影响

同步注浆浆液包裹管片产生的浮力通常被认为是静态上浮力。盾构隧道施工期上浮的原因是拼装完成的管片结构受到的浮力及各种竖向向上的分力大于其自重及压重，导致隧道结构出现上浮趋势。

盾构隧道结构为柔性拼装结构，隧道上浮会导致线形改变，环向及纵向连接螺栓受力重新分布，局部应力过大可能引起管片错台、开裂等破坏。隧道结构脱出盾尾后上浮，会使盾构机盾尾受到一个向上的分力，导致盾尾刷上部与下部受力不均，破坏盾尾刷，进而引发窜浆。盾尾持续受到向上的分力，容易使盾构姿态发生一定改变，机头下沉，造成工程安全事故。同时，隧道结构上浮会导致原有注

浆圈与理论注浆圈差异较大，隧道外壁不再是一圈均匀的同时注浆材料包裹，而是上部薄下部厚的不均匀注浆圈，对长期耐久性及其防水不利。

根据阿基米德原理，注浆浆液的浮力与其密度直接相关。通过在浆液中添加引气剂引入微小气泡，可以降低浆液的整体密度，从而减小其产生的浮力，抑制管片上浮。同时，引气剂引入的气泡在浆液内部形成可压缩的弹性介质，使浆液在受到挤压或固结收缩时能通过弹性变形有效缓冲并弥补体积损失。此外，可压缩性材料在注入盾尾间隙后能快速扩展并填充不规则的空隙，有效减小因填充不足引起的地层不均匀沉降。

以滨海某地铁盾构隧道为例，隧道内径5.9 m，外径6.6 m，刀盘直径6.88 m，环宽1.5 m。拼装后管片自重约172 kN，根据阿基米德原理，采用常规浆液，因浆液包裹产生的上浮力理论计算值为643 kN，不考虑压重等影响，浮重比（上浮力与管片自重的比值）约为3.7，该数据直接反映出施工期管片结构上浮的主要因素。采用本文研究的轻质化同步注浆材料，上浮力理论计算值为577 kN，较常规浆液上浮力减少约66 kN，理论上能够有效抑制管片结构施工期上浮。

选取试验段进行现场数据监测分析，选取372~381环（共计10环）采用本文研究的轻质化同步注浆浆液，407~416环（共计10环）采用常规同步注浆浆液，其中，372~381环和407~416环所处的荷载与环境条件相同。在同一注浆压力及注浆量水平下对施工期各组中间8环管片上浮数据进行监测，监测数据对比见图10。

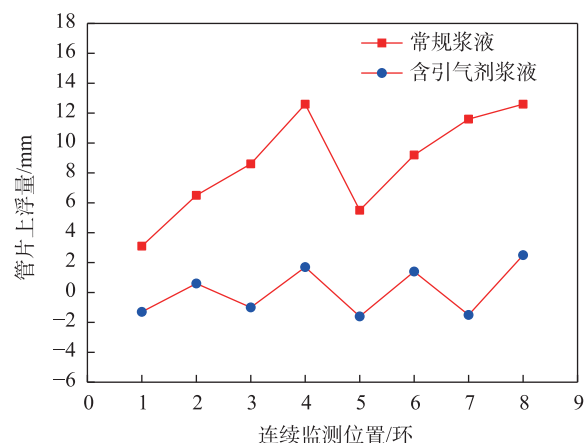


图10 施工期管片上浮量对比图

Fig. 10 Comparison of segment buoyancy during construction

由图 10 可知,采用常规同步注浆浆液,管片结构施工期上浮量最大值为 12.6 mm,最小值为 3.1 mm,平均上浮量为 8.7 mm。采用本文研究的轻质化及弹性可压缩同步注浆浆液,管片上浮最大值为 2.5 mm,部分成环管片上浮量为负值,平均上浮量为 0.1 mm,采用轻质化及弹性可压缩同步注浆浆液能够有效抑制施工期管片结构上浮。

#### 4.2 同步注浆对地表沉降的影响

盾构机刀盘大于管片外径,管片结构拼装后脱出盾尾会在土体与管片结构之间形成环状空隙,为抑制地层变形,需及时注浆填充该空隙。适当的注浆压力及注浆量能够有效控制地表沉降。同步注浆浆液凝结硬化过程中,浆液渗透及固结收缩导致体积缩小,传统同步注浆材料对于浆液渗透及固结收缩造成的体积损失无法有效弥补,导致地表沉降持续发展,对控制地层变形不利。

在同一注浆压力与注浆量水平下,分别采用常规浆液及轻质化及弹性可压缩浆液进行断面地表沉降监测。由图 11 可知,采用常规注浆浆液时初期对控制地表沉降效果较好,局部监测数据显示地表隆起 0.6 mm。随着浆液不断向周围土体中渗透及浆液硬化体积收缩,地层变形持续发展,14 d 拱顶位置最大沉降达到 10.5 mm。

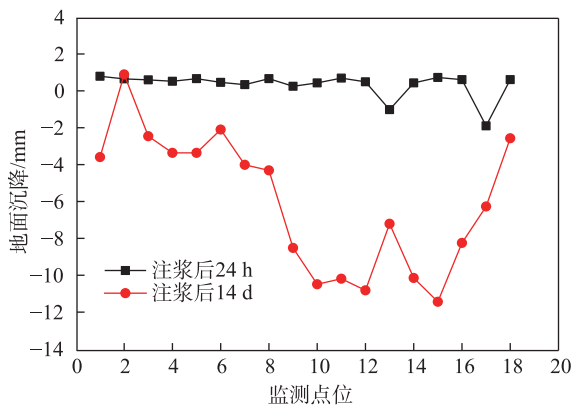


图 11 采用常规注浆浆液地表沉降图  
Fig. 11 The ground settlement map of conventional grouting grout

由图 12 可知,在控制注浆压力及注浆量水平与常规浆液相当条件下,采用轻质化及弹性可压缩注浆浆液时,浆液体积在注浆压力作用下被压缩,导致初期控制地表沉降效果较常规浆液差,拱顶位置沉降值约 1.9 mm。随着浆液渗透,浆液

内部压力释放,对浆液渗透及固结收缩造成的体积损失进行弥补,限制地层持续变形,14 d 拱顶地表沉降约 4.5 mm,较常规注浆浆液降低约 57%。

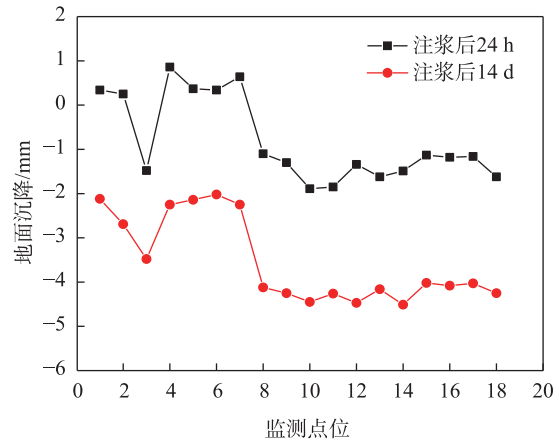


图 12 采用轻质化及弹性可压缩注浆浆液地表沉降图  
Fig. 12 The ground settlement map of lightweight elastic compressible grouting grout

由图 13 和图 14 可知,常规注浆浆液在初期对地表沉降的控制效果较好,而轻质化及弹性可压缩浆液在长期控制地表沉降方面表现更优。分析其原因,在相同水平的注浆压力和注浆量下进行比较,由于轻质化注浆材料具备弹性可压缩特性,注入管片外壁后在注浆压力作用下体积被压缩,导致初期地层控制效果欠佳。然而,随着压力的释放,注浆圈保持相对带压状态,逐渐弥补体积损失,有利于长期地表沉降的控制。使用轻质化及弹性可压缩浆液时,需结合工程实际情况对注浆压力和注浆量进行适当调整。

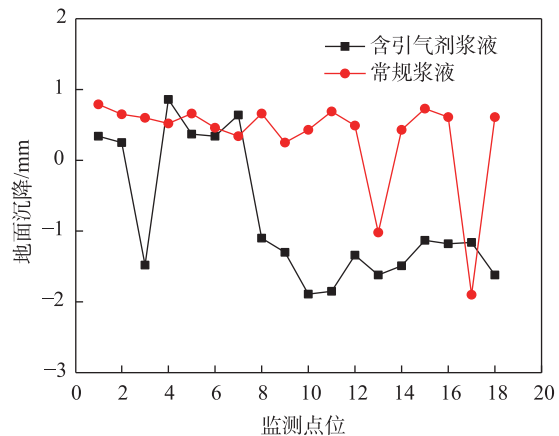


图 13 注浆后 24 h 地表沉降图  
Fig. 13 Ground settlement map after 24 h grouting

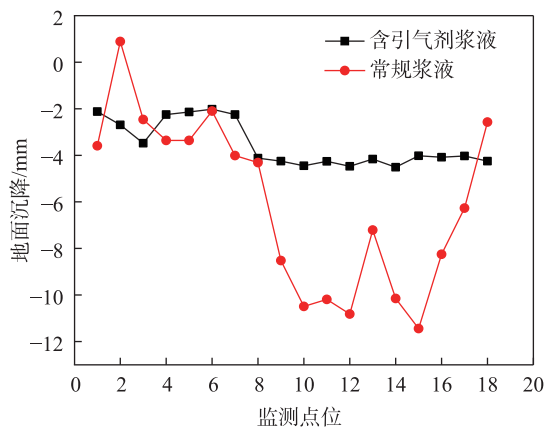


图14 注浆后14 d地表沉降图

Fig. 14 Ground settlement map after 14 d grouting

## 5 结论

1) 引气剂能够显著降低水溶液表面张力,在浆液中引入微小气泡,实现浆液轻质化。在0.075%掺量水平下,浆液含气量约为8.56%,3 h稠度经时损失较常规浆液减少8.0 mm,提高了浆液的可注性。该掺量下,引气剂对浆液的分层度和泌水率的影响并不显著。

2) 引气剂的使用在一定程度上降低了浆液结石体不同龄期的抗压强度。在0.075%掺量下,28 d抗压强度为7.7 MPa,水陆强度比高达89.6%。实际工程中,同步注浆浆液中引气剂的最优掺量推荐为0.075%。

3) 现场监测数据显示,在相同注浆压力及注浆量水平下,轻质化注浆材料能够有效抑制施工期盾构隧道的上浮,施工期隧道平均上浮量从8.7 mm降低至0.1 mm。

4) 采用轻质化及弹性可压缩浆液,24 h地表沉降由微隆起(0.6 mm)转变为沉降1.9 mm,14 d地表沉降从10.5 mm降低至4.5 mm,较常规注浆浆液降低约57%。建议在使用轻质化及弹性可压缩浆液时,结合工程实际情况,对注浆压力及注浆量进行适当调整。

### 参考文献:

[1] 王福文, 梁帅文, 冯爱军. 2023年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(2): 393-400.  
WANG F W, LIANG S W, FENG A J. Statistics and development analysis of urban rail transit in China in 2023 [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 393-400.

[2] 韩鑫, 叶飞, 何彪, 等. 盾构隧道壁后注浆试验的研究现状与发展[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(4): 62-67.  
HAN X, YE F, HE B, et al. Research status and development of backfill grouting test of shield tunnelling[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36(4): 62-67.

[3] 杨远征. 盾构隧道壁后新型注浆材料的试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
YANG Y Z. Study on the new type of grouting material behind shield tunnel[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[4] 贺雄飞, 王光辉. 单液活性同步注浆浆液的配合比试验[J]. 隧道建设, 2010, 30(1): 9-14.  
HE X F, WANG G H. Study on mixing proportion of single-component active grout for simultaneous grouting[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(1): 9-14.

[5] 周麟, 毛文, 施墨华. 盾构隧道同步注浆浆液配合比优化设计[J]. 武汉工程大学学报, 2013, 35(9): 29-33.  
ZHOU L, MAO W, SHI M H. Optimized design of grout mix proportion for synchronous grouting in shield tunneling[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2013, 35(9): 29-33.

[6] 黄德楷, 王小刚, 夏正茂, 等. 粉煤灰掺量对盾构隧道同步注浆浆液性能的影响试验研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2019(8): 74-77.  
HUANG D K, WANG X G, XIA Z M, et al. Experimental study on the effect of fly ash content on the performance of synchronous grouting slurry in shield tunnel[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2019(8): 74-77.

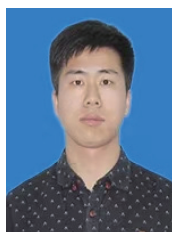
[7] 郝晨哲, 徐新, 杨帆, 等. 膨水比对盾构同步注浆浆液性能的影响试验分析[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(5): 79-82.  
HAO C Z, XU X, YANG F, et al. Experimental analysis of influence of bentonite ratio on performance of shield synchronous grouting slurry[J]. Sichuan Building Science, 2019, 45(5): 79-82.

[8] 盛炎民, 李书进, 汤政, 等. 可硬性盾构注浆材料试验研究[J]. 混凝土, 2019(9): 108-110, 116.  
SHENG Y M, LI S J, TANG Z, et al. Experimental study on hardenability grouting material for shield[J]. Concrete, 2019(9): 108-110, 116.

[9] 朱东元, 钟小春, 王红飞. 盾构隧道壁后注浆浆液组分对其渗透性影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, 33(1): 27-30.  
ZHU D Y, ZHONG X C, WANG H F. Experiment study of the influence of shield tunnel grouting behind segment components on its permeability[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016, 33(1): 27-30.

[10] 张文宏, 刘映晶, 王军棋, 等. 基于硅灰对注浆材料抗水分散性能影响的外加剂优化研究[J]. 现代隧道技术,

- 2022, 59(4): 265-272.  
ZHANG W H, LIU Y J, WANG J Q, et al. Study on the optimization of admixtures based on the impact of silica fume on the water dispersion resistance of grouting materials[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 265-272.
- [11] 邹翀. 盾构隧道同步注浆技术[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(1): 26-30.  
ZOU C. Simultaneous grouting technique for shield-driven tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(1): 26-30.
- [12] 韩波, 顾洋, 刘丙全, 等. 抗水分散剂对抗水分散同步注浆材料性能的影响[J]. 混凝土, 2022(11): 82-86.  
HAN B, GU Y, LIU B Q, et al. Effect of water resistant dispersant on properties of high water resistant dispersing synchronous grouting material[J]. Concrete, 2022(11): 82-86.
- [13] 宋普涛, 王晶, 周永祥, 等. 耐水抗渗型高性能盾构同步注浆材料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 438-442.  
SONG P T, WANG J, ZHOU Y X, et al. Properties of high performance synchronous grouting material of water-resistance property and impermeability[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(2): 438-442.
- [14] 黄大维, 罗仲睿, 罗文俊, 等. 盾构隧道施工同步注浆材料流动性测试方法及影响因素分析[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(3): 94-102.  
HUANG D W, LUO Z R, LUO W J, et al. Test method and influencing factors of fluidity of synchronous grouting material in shield tunnel construction[J]. China Railway Science, 2022, 43(3): 94-102.
- [15] 金立忠, 彭国峰, 韩爱民, 等. 同步注浆浆液流动性指标适用性对比试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(26): 303-307.  
JIN L Z, PENG G F, HAN A M, et al. Contrast test for the applicability of the fluidity index of simultaneous grouting slurry[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(26): 303-307.
- [16] RYU Y M, KWON Y S, KIM T H, et al. Slurry clogging criteria for slurry shield tunnelling in highly permeable ground[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(6): 2784-2793.
- [17] LI T, LIU B, LI Y, et al. Properties of foam and soil improvements for earth-pressure balance shield construction in red soils[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243/244/245/246/247/248/249: 2834-2841.
- [18] QIAO J L, FAN Y L, LIU B, et al. The research of back-fill grouting pressure in shield tunneling[J]. Advanced Materials Research, 2012, 446/447/448/449: 2240-2245.
- [19] 肖明清, 孙文昊, 韩向阳. 盾构隧道管片上浮问题研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1041-1045.  
XIAO M Q, SUN W H, HAN X Y. Research on upward moving of segments of shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1041-1045.
- [20] 李利平, 曹阳阳, 丁传逵, 等. 基于渗率效应的可压缩智能同步注浆材料扩散机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(9): 1324-1333.  
LI L P, CAO Y Y, DING C K, et al. Diffusion mechanism of compressible synchronous grouting materials based on permeability effect[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(9): 1324-1333.
- [21] 黄大维, 石海斌, 罗仲睿, 等. 盾尾同步注浆模拟试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(3): 1-9.  
HUANG D W, SHI H B, LUO Z R, et al. Simulation test of synchronous grouting at shield tail[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 1-9.
- [22] 高培伟, 仲建军, 邓岩松, 等. 高性能轻质注浆材料制备与微观结构分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 29-35.  
GAO P W, ZHONG J J, DENG Y S, et al. Preparation and microstructure analysis of high performance lightweight grouting materials[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 29-35.



第一作者: 邓文武(1988—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为盾构隧道设计、盾构同步注浆材料。E-mail: 18102175090@163.com。



通信作者: 黄大维(1980—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为地铁盾构隧道设计、施工与运维相关的理论与技术。E-mail: gddthdw@126.com。