

# 地铁盾构隧道水泥基同步注浆减震层材料性能研究

Study on the Material Properties of Synchronous Grouting Damping Layer for Metro Shield Tunnels

李晓强<sup>1</sup>, 王龙飞<sup>2</sup>, 董明明<sup>3</sup>

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 济南 250001; 2. 济南万科企业有限公司, 济南 250000;  
3. 山东中建房地产开发有限公司, 济南 250014)

**摘要:** 为提升高烈度地震区地铁盾构隧道在强震作用下的安全性, 提出利用多种材料配制地铁盾构同步注浆减震层材料, 以减轻地铁隧道在强震作用下的受损程度, 并通过配合比试验和数值模拟方式, 对材料的减震效果进行验证和分析。结果表明: 随着橡胶掺比和水胶比的增大, 浆液的流动性和泌水性增强, 凝结时间逐渐增大, 但力学强度逐渐下降; 随着粉胶比增大, 浆液的流动性减弱, 泌水性增强, 凝结时间逐渐增大, 力学强度逐渐减小; 随着 PVA 纤维掺量增加, 浆液的流动性和泌水性减弱, 凝结时间缩短, 强度呈先增大后减小变化特征, 当纤维掺量为 0.8% 时, 浆液结石体的强度最高; 减震注浆层材料的刚度越小, 减震隔震效果越好, 起到良好的柔性吸能作用, 同步注浆减震层的最佳配合比方案为: 水: 水泥: 闭孔珍珠岩: 橡胶: PVA 纤维掺量 = 1: 1.667: 0.076: 0.792: 0.0172。

**关键词:** 盾构同步注浆; 减震层材料; 橡胶; PVA 纤维; 配合比; 减震效果

**中图分类号:** U454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 05-0129-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.023

LI Xiaoqiang<sup>1</sup>, WANG Longfei<sup>2</sup>, DONG Mingming<sup>3</sup>

(1. Ji'nan Rail Transit Group Co., Ltd., Ji'nan 250001, China;

2. Ji'nan Vanke Enterprise Co., Ltd., Ji'nan 250001, China;

3. Shandong China Construction Real Estate Development Co., Ltd., Ji'nan 250014, China)

**Abstract:** In order to enhance the seismic safety of subway shield tunnels in high-intensity earthquake zones, a multi-material synchronous grouting damping layer for subway shield tunnels was proposed to mitigate damage under strong earthquakes. Through mix proportion tests and numerical simulations, the damping effects of the material were verified and analyzed. The results indicate: as the rubber content and water-to-cement ratio increase, the fluidity and bleeding of the grout improve, while the setting time gradually increases, but the mechanical strength decreases; as the powder-to-cement ratio increases, the fluidity of the grout weakens, bleeding intensifies, the setting time gradually lengthens, and the mechanical strength gradually diminishes; as the PVA fiber content rises, the fluidity and bleeding of the grout weaken, the setting time shortens, and the strength exhibits a trend of first increasing and then decreasing, reaching its peak when the fiber content is 0.8%. The lower the stiffness of the damping grouting layer material, the better the seismic isolation effect, providing effective flexible energy absorption. The optimal mix proportion for the synchronous grouting damping layer is: water: cement: closed-cell perlite: rubber: PVA fiber content = 1: 1.667: 0.076: 0.792: 0.0172.

**Key words:** synchronous grouting of shield; material of damping layer; rubber; PVA fiber; mix proportion; shock absorption effect

## 道桥技术

## 0 引言

地铁是缓解城市交通压力的重要基础设施。截至2025年8月,我国的地铁运营总里程已达到9722公里,而且还有一大批地铁项目正在规划和筹建中<sup>[1]</sup>。由于我国特殊的地理位置,西部地区 and 东南地区的地震频发,强震时有发生,在遭遇强震作用后,地铁盾构隧道不可避免会遭受不同程度的破坏,但是由于地铁隧道特殊的地理环境,一旦遭受破坏,灾后的修复难度非常高,因此必须提高地铁盾构隧道的抗震能力<sup>[2]</sup>。

为了减小地铁盾构隧道在强震作用下的损失程度,一些专家学者提出在地铁盾构施工时进行同步注浆,这种浆液要求具备良好的减震和隔震效果<sup>[3-4]</sup>。彭飞<sup>[5]</sup>针对沿海地铁隧道受到海水环境的影响,研制了一种新型BFSP改性盾构注浆材料,并得出BFSP的最佳掺量为20%;荆永波等<sup>[6]</sup>为提高富水粉细砂地层盾构同步注浆的效率和质量,利用羟乙基纤维素(HEC)和聚羧酸(PC)配制了一种盾构同步注浆复合浆液,利用该浆液可以将管片的上浮位移控制在20 mm以内;郝彤等<sup>[7]</sup>提出利用粉质黏土层中盾构渣土制备同步注浆材料,该材料具备良好的社会效益;黄大维等<sup>[8]</sup>针对盾构隧道施工同步注浆材料开展了流动性测试方法的研究,并得出骨料颗粒粒径越大、初始压力越大,单位长度的压力损失越小;朱先发等<sup>[9-10]</sup>利用高性能盾构注浆材料添加剂Z205,设计研究了一种高性能地铁隧道盾构同步注浆材料,使用该注浆料后可将注浆量降低17%;彭斌等<sup>[11]</sup>通过数值模拟方式,针对特大跨铁路隧道穿越断层破碎带开展减震技术研究,认为通过在断层破碎带内注浆的方式,可以起到良好的减震效果;袁勇等<sup>[12]</sup>通过试验研究证实了注浆加固可以有效减小跨断层隧道的加速度放大效应与变形差异;杨琪<sup>[13]</sup>通过试验研究认为,采用沥青-水泥(A-C)抗减震注浆材料能够显著提升软硬交接地层的抗震性能;黄好江等<sup>[14]</sup>提出了橡胶-水泥基复合注浆材料,并通过试验和数值模拟分析方式,验证了该材料的减震效果。然而,传统的单液惰性浆液存在强度低、易流失的问题,单液硬性浆液存在堵塞问题,有一定的流失现象,双浆液虽然强度高,

不流失,但易堵管、成本高,因此有必要对现有注浆浆液进行进一步改进。

现有的研究表明,通过设置刚度小,密度低的减震层可以明显降低隧洞在地震作用下的响应<sup>[15]</sup>,目前关于橡胶减震隔震层的研究还还处于探索阶段,借鉴此思想,利用橡胶粉、PVA纤维等材料制备一种同步注浆减震层,以期能为高烈度地震区地铁隧道盾构设计施工提供借鉴。

## 1 试验概况

## 1.1 原材料

水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,平均烧失量为1.28%,比表面积为346 m<sup>2</sup>/kg,初凝和终凝时间分别为118和320 min,28 d抗压和抗折强度分别为48.5、7.7 MPa;粉煤灰为I级粉煤灰,平均烧失量1.28%;膨润土为钠基膨润土,层间距1.2 nm,2 h吸水率为300%;闭孔珍珠岩粒径1~2 mm,堆积密度为0.103 g/cm<sup>3</sup>,体积吸水率为43%,筒压强度为1.58 kPa,体积漂浮率为84%,表面玻璃化闭孔率为85%;橡胶颗粒由废旧橡胶通过机械磨碎制成,颗粒粒径范围2~4 mm;聚乙烯醇纤维平均直径20 μm,长度为9 mm,弹性模量为35 GPa,抗拉强度为1 800 MPa,断裂伸长率为7%,平均密度1 285 kg/m<sup>3</sup>。

## 1.2 浆液配合比方案设计

根据T/CECS 563—2018《盾构隧道同步注浆材料应用技术规程》中关于配合比的相关规定,配制的浆液性能指标需达到表1要求。采用橡胶颗粒等体积替代骨料的方式掺入,研究橡胶掺比、水胶比、粉胶比、纤维掺量对注浆层材料的影响,其中:橡胶掺比分别为0、20%、40%、60%和80%,编号为S2~S5;水胶比分别为0.65、0.70、0.75、0.80和0.85,编号为S6~S10;粉胶比(粉煤灰与胶凝材料之比)分别为0、0.2、0.4、0.6和0.8,编号为S11~S15;纤维掺量分别为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%和1.0%,编号为S16~S20。试验方案见表2。

表1 浆液性能指标要求

稠度 /mm	流动度 /mm	泌水率 /%	结石率 /%	凝结 时间/h	28 d 抗压 强度/MPa
90~130	≥160	<3.5	5	10~24	≥2.5

表 2 试验配合比  
Table 2 Test mix

编号	水	水泥	粉煤灰	闭孔珍珠岩	橡胶	膨润土	PVA 纤维掺量
S1	1.000 0	1.667 0		0.190 0			
S2	1.000 0	1.667 0		0.152 0	0.264 0		
S3	1.000 0	1.667 0		0.114 0	0.528 0		
S4	1.000 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0		
S5	1.000 0	1.667 0		0.038 0	1.057 0		
S6	1.080 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0	0.054 0	
S7	1.170 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0	0.058 0	
S8	1.250 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0	0.063 0	
S9	1.330 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0	0.067 0	
S10	1.420 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0	0.071 0	
S11	1.000 0	1.667 0		0.114 0	0.528 0	0.050 0	
S12	1.000 0	1.334 0	0.333 0	0.114 0	0.528 0	0.050 0	
S13	1.000 0	1.000 0	0.667 0	0.114 0	0.528 0	0.050 0	
S14	1.000 0	0.667 0	1.000 0	0.114 0	0.528 0	0.050 0	
S15	1.000 0	0.333 0	1.334 0	0.114 0	0.528 0	0.050 0	
S16	1.000 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0		0.008 6
S17	1.000 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0		0.017 2
S18	1.000 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0		0.025 9
S19	1.000 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0		0.034 6
S20	1.000 0	1.667 0		0.076 0	0.792 0		0.043 4

### 1.3 浆液制备

按照试验配合比称取各组材料；将胶凝材料、水（如有纤维，先将纤维掺入水中分散）依次掺入，低速搅拌 1 min；再将骨料掺入浆液中，高速搅拌 1 min；再将附着在搅拌机叶片和锅壁的浆液刮入锅中，再继续高速搅拌 1 min；最后，分两层进行装模，第一层装入后先振动 1 min 再装入第二层，振动 1 min 后，取出分别进行相应的试验。

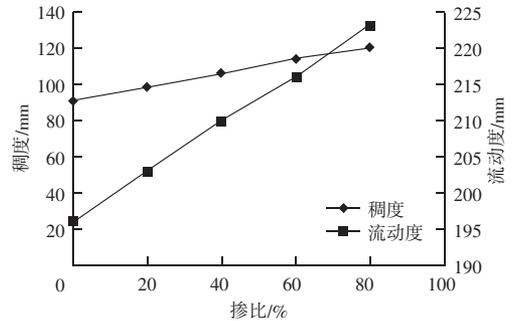
## 2 试验结果与分析

### 2.1 对工作性能的影响

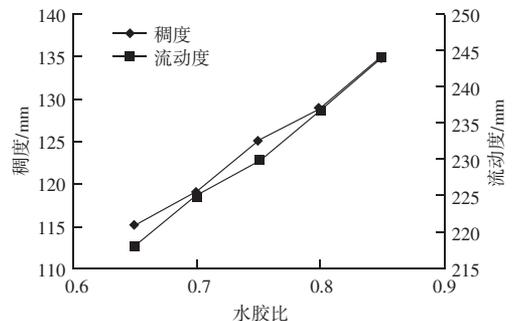
#### 2.1.1 稠度和流动度

不同配合比方案下减震层注浆材料稠度和流动度变化特征如图 1 所示。随着橡胶掺比和水胶比的增大，浆液的稠度和流动度逐渐增加。当橡胶掺比由 0 增加至 80% 时，浆液稠度增加了 31.9%，流动度增加了 13.8%；当水胶比从 0.65 增加至 0.85 时，浆液稠度增加了 17.4%，流动度增加了 11.9%。随着粉胶比和纤维掺量增加，浆液的稠度和流动度逐渐减小，掺入粉煤灰后会消耗大量的水分，因而流动性降低；而掺入纤维后，一方面由于纤维可以吸附大量的湿润水，另一方面随着纤维掺量增加，在浆液中出现团聚的现象也越多，因而流动性也会降低。当粉胶比由 0 增加至 0.8 时，浆液稠度降低了 7.3%，流动度降低了 12.1%；当纤维掺量由 0.2%

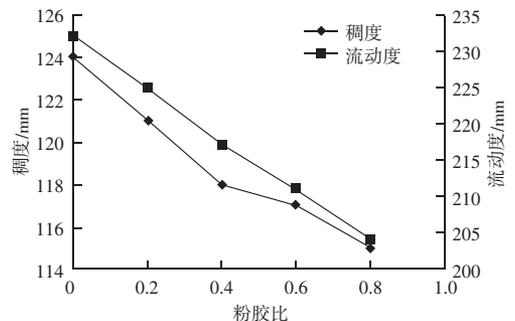
增加至 1.0% 后，浆液稠度降低了 55.8%，流动度降低了 36.1%。由此可知，粉胶比对浆液流动性的影响最小，纤维掺量对流动性的影响最大。



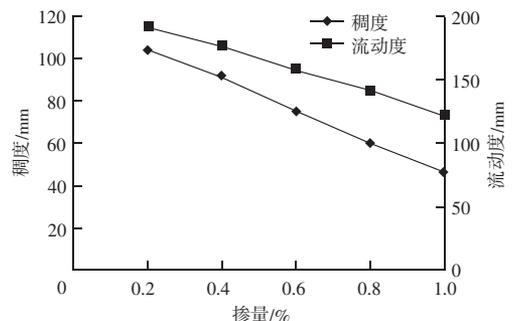
(a) 橡胶掺比



(b) 水胶比



(c) 粉胶比



(d) 纤维掺量

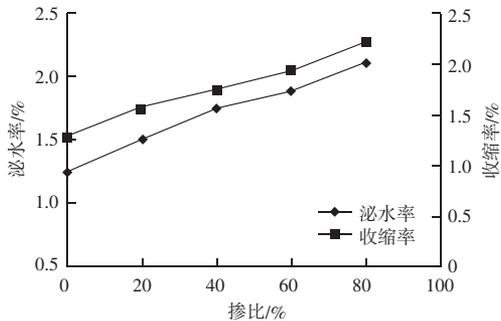
图 1 配合比对浆液稠度和流动度的影响

Fig. 1 Effect of mix ratio on slurry consistency and flowability

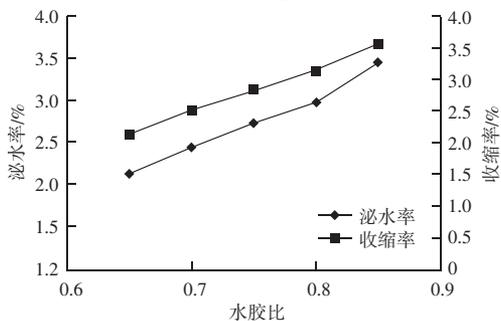
## 道桥技术

## 2.1.2 泌水率和固结收缩率

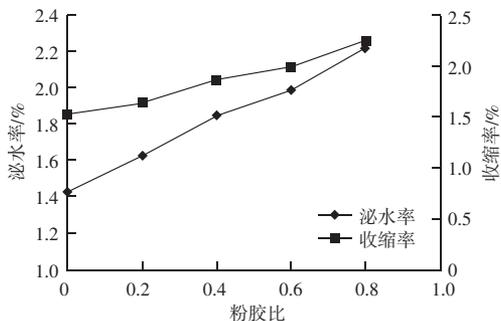
不同配合比方案下减震层注浆材料泌水率和固结收缩率变化特征如图2所示。随着橡胶掺比、水胶比和粉胶比的增大,浆液的泌水率和固结收缩率均呈逐渐增大的变化特征,橡胶颗粒等体积替代闭孔珍珠岩后,使原本吸附在孔隙中的浸润水释放出来,在增大水胶比、固体颗粒表面积不变的情况下,能够吸附的浸润水有限,粉煤灰的活性比水泥低,能够降低胶凝材料发生水化反应所消耗的水分,因此,泌水量和固结收缩率逐渐增大。当橡胶掺比由0增大至80%时,泌水率和收缩率分别增大了71.5%和74%;当水胶比由0.65增大至0.85时,泌水率和收缩率分别增大了61.8%和66.5%;当粉胶比由0增大至0.8时,泌水率和收缩率分别增大了55.6%和47.7%;相对而言,未掺入粉煤灰和膨润土的试验组



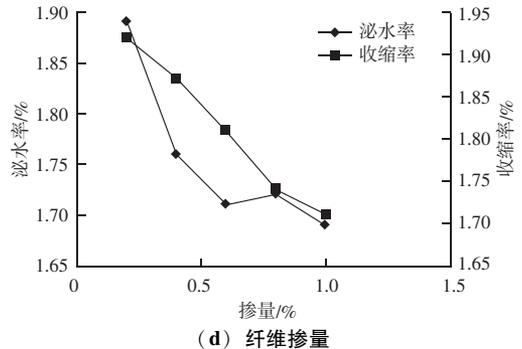
(a) 橡胶掺比



(b) 水胶比



(c) 粉胶比



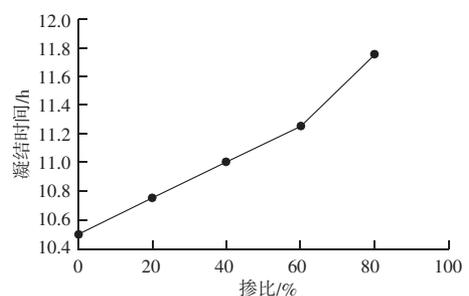
(d) 纤维掺量

图2 配合比对浆液泌水率和固结收缩率的影响  
Fig. 2 Effect of mix ratio on slurry bleeding rate and consolidation shrinkage rate

泌水率和固结收缩率更小。随着纤维掺量的增加,浆液的泌水率和固结收缩率整体上呈逐渐减小的变化特征,纤维掺量越多,可以吸附的浸润水也就越多,同时纤维还可以降低浆液的孔隙率和连通性,因而能够从浆液中溢出的自由水也就越少,故而泌水率和固结收缩率降低,当纤维掺量由0.2%增加至1.0%后,泌水率和收缩率分别降低了10.6%和10.9%。综上所述,橡胶掺比对浆液泌水率和固结收缩率的影响最大,其次为水胶比,再次为粉胶比,影响最小的为纤维掺量。

## 2.1.3 凝结时间

不同配合比方案下减震层注浆材料凝结时间变化特征如图3所示。凝结时间随着橡胶掺比、水胶比和粉胶比的增大而逐渐增大,随着纤维掺量的增大而逐渐减小;浆液的凝结时间与胶凝材料用量和用水量有关,当浆液中自由水含量增多时,浆液的凝结时间延长,因此浆液凝结时间与泌水率呈正相关关系,泌水率越大,凝结时间也就越长。当橡胶掺比由0增大至80%时,凝结时间增长11.9%;当水胶比由0.65增大至0.85时,凝结时间增长26.1%;当粉胶比由0增大至0.8时,凝结时间增长20.5%;当纤维掺量由0增大至1.0%时,凝结时间降低



(a) 橡胶掺比

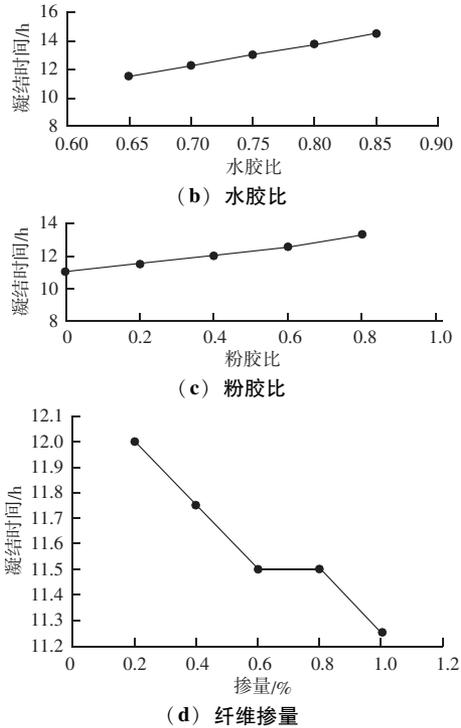


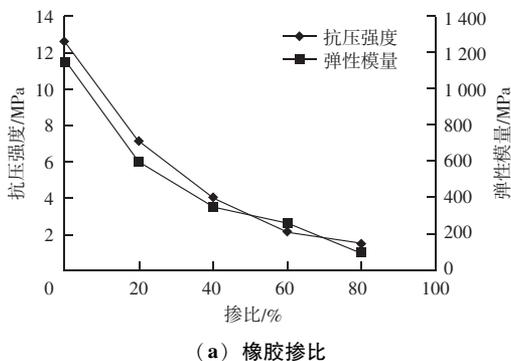
图3 配合比对浆液凝结时间的影响

Fig. 3 Effect of mix ratio on slurry setting time

6.3%。由此可见,水胶比对浆液的凝结时间影响最大,纤维掺量对浆液凝结时间的影响最小。

## 2.2 对力学性能的影响

不同配合比方案下减震层注浆材料力学性能变化特征如图4所示。随着橡胶掺比、水胶比和粉胶比的增大,浆液结石体28d单轴抗压强度和弹性模量呈逐渐减小的变化趋势。这是因为橡胶颗粒作为一种憎水材料,在等体积取代骨料后,会引入部分气体,导致孔隙率增加;而且橡胶颗粒本身弹性模量就更低,因而结石体强度和弹性模量均降低。而当同时掺入橡胶粉和PVA纤维后,结石体的弹性模量注浆增大,而强度也是呈先增大后减小的变化特征。当纤维掺量为0.8%时,强度达到最大值。



(a) 橡胶掺比

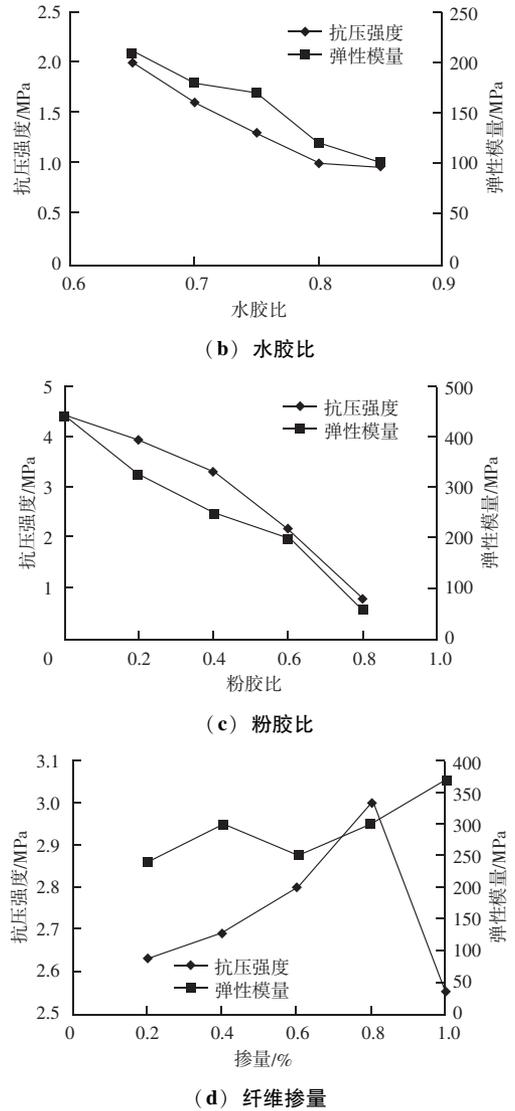


图4 配合比力学性能的影响

Fig. 4 Effect of mix ratio on mechanical properties

## 2.3 减震效果分析

### 2.3.1 浆液配合比方案选择

当单掺橡胶粉时,橡胶粉掺量低于40%时,强度满足规范要求;当高于40%时,强度不能满足要求。当同时掺入橡胶颗粒和膨润土时,浆液结石体28d抗压强度均不满足规范要求。当掺入橡胶粉+膨润土+粉煤灰时,粉胶比低于0.4时,28d强度满足规范要求;超过0.4以后,强度不满足规范要求。当掺入橡胶粉+PVA纤维时,纤维掺量不宜高于0.4,否则,浆液稠度会明显低于规范要求值。从三种配合比方案中选取综合性能指标最优的一组进行减震效果试验,即分别选取S1、S11和S17。

## 道桥技术

### 2.3.2 减震层有限元模型

首先构建盾构隧道模型,模型的长、宽、高分别为45、80和60 m,从上到下依次分为素填土层、粉砂质土层、全风化土层、强风化土层和中风化土层。模型隧道埋深20 m,隧道盾构管片的外径为6.7 m,管片的厚度为35 cm,减震层厚度均为0.1 m。模型采用实体单元,围岩采用摩尔-库仑本构,管片和注浆层采用弹性本构,地震波选用kobe地震波(地震波加速度峰值发生在第7 s,峰值为0.352g),动力计算采用瑞利阻尼,人工边界采用自由场边界。构建的数值模型如图5所示。模型土层参数见表3,材料参数根据实际情况和试验情况进行取值,见表4。

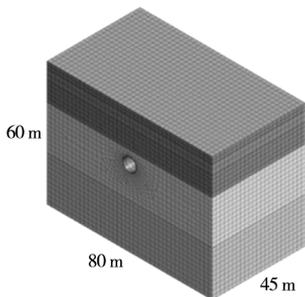


图5 盾构隧道有限元模型

Fig. 5 Finite element model of shield tunnel

表3 模型土层参数

Table 3 Model soil layer parameters

土层	弹性模量 /MPa	容重 /(kN/m <sup>3</sup> )	泊松比	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	厚度 /m
素填土	1.8	19.0	0.38	10	20	3.3
粉砂质土	50.0	18.8	0.36	16	18	4.6
全风化岩	550.0	20.0	0.35	25	25	9.3
强风化岩	1 560.0	20.7	0.32	30	38	21.0
中风化岩	2 470.0	21.0	0.30	40	38	21.8

表4 模型材料参数

Table 4 Model Material Parameters

材料	弹性模量/MPa	容重/(kN/m <sup>3</sup> )	泊松比
隧道管片	34 500	25.0	0.20
砂浆层	11 200	23.0	0.20
S1	1 150	14.5	0.30
S11	440	14.0	0.32
S17	300	13.5	0.35

### 2.3.3 减震效果分析

不同减震层材料在kobe地震波下的位移变化情况如图6所示。地震作用下,隧道的最大位移均出现在拱顶位置,普通砂浆层X方向和Z方向拱顶的最大位移分别达到了80.0和63.7 mm;而采用S1减震层材料时,X方向和Z方向最大位移分别为78.2和62.5 mm,相比普通砂浆层下降了2.25%和1.88%;

采用S11减震层材料时,X方向和Z方向最大位移分别为77.7和62.2 mm,相比普通砂浆层下降了2.88%和2.36%;采用S17减震层材料时,X方向和Z方向最大位移分别为77.5和62.0 mm,相比普通砂浆层下降了3.13%和2.67%。

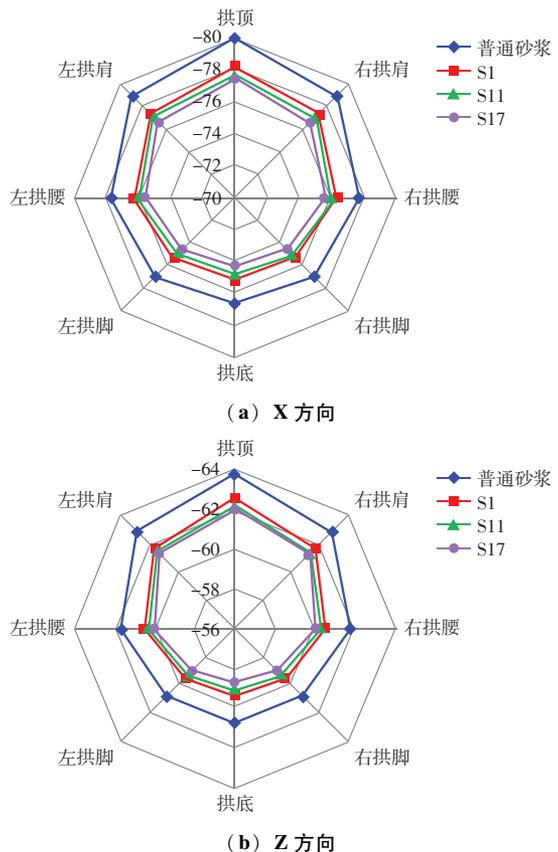


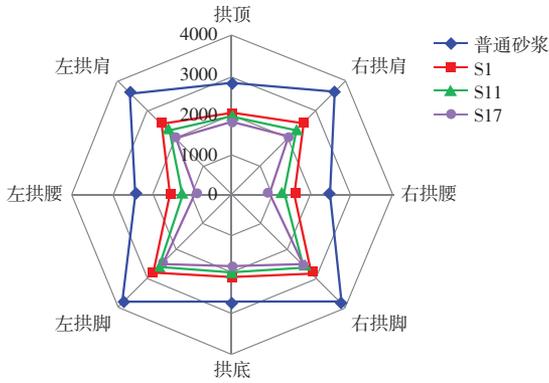
图6 地震作用下管片的位移情况

Fig. 6 Displacement of pipe segments under earthquake action

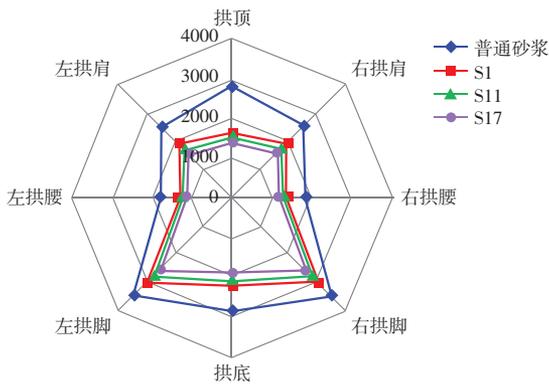
不同减震层材料在kobe地震波下的应力变化情况如图7所示。地震作用下,隧道的最大应力均出现在隧道的拱脚位置,普通砂浆层X方向和Z方向拱脚的第一主应力分别为3 850和3 500 kN;而采用S1减震层材料时,X方向和Z方向最大第一主应力分别为2 800和3 000 kN,相比普通砂浆层降低27.3%和14.3%;当采用S11减震层材料时,X方向和Z方向最大第一主应力分别为2 600和2 800 kN,相比普通砂浆层降低32.5%和20%;当采用S17减震层材料时,X方向和Z方向最大第一主应力分别为2 450和2 550 kN,相比普通砂浆层降低36.4%和27.1%。

由不同材料注浆层的减震效果可知,采用S17的配合比时,注浆减震层的减震效果最好,即采用

橡胶粉和 PVA 纤维复掺的方式，能够显著增强抗震能力，注浆减震层的刚度越小，柔性越强，起到的减震隔震效果越好。



(a) X 方向



(b) Z 方向

图7 地震作用下管片的第一主应力受力情况

Fig.7 Stress distribution of the first principal stress of the segment under earthquake action

### 3 结论

为了提高高强度区盾构隧道在强震作用下的安全性，采用多种材料制备同步注浆减震层，通过数值模拟分析减震层减震效果，得到以下主要结论：

(1) 对浆液流动性影响排序为：纤维掺量 > 橡胶掺比 > 水胶比 > 粉胶比，对泌水率和固结收缩率的影响排序为：橡胶掺比 > 水胶比 > 粉胶比 > 纤维掺量，对凝结时间的影响排序为：水胶比 > 粉胶比 > 橡胶掺比 > 纤维掺量。

(2) 掺入橡胶粉、增大水胶比和粉胶比，均会影响浆液结石体强度，浆液结石体强度随着纤维掺量增加呈先增大后减小的变化特征，当纤维掺量为 0.8% 时，浆液结石体力学强度最高。

(3) 选取符合要求的三种性能相对最优的配合比注浆层材料进行数值模拟，发现当减震层注浆材料的刚度越小时，减震层的减震隔震效果越好，能够降低盾构管片最大第一主应力约 36.4%，同时还能一定程度上减小管片位移变形。

(4) 根据试验和减震模拟结果，地铁盾构隧道同步注浆减震层的最佳配合比方案为：水：水泥闭孔珍珠岩：橡胶：PVA 纤维掺量 = 1 : 1.667 : 0.076 : 0.792 : 0.0172。

### 参 考 文 献

- [1] 王志恒, 李晓昭, 潘进礼, 等. 城市地铁建设与社会经济因素的相关性研究 [J]. 都市轨道交通, 2022, 35 (1): 17-27.
- [2] 朱建才, 徐敏, 孙樵, 等. 既有地铁影响区前大直径盾构试验段监测研究 [J]. 科技通报, 2022, 38 (9): 91-95.
- [3] 许冲. 第一代中国地震震坡概率分布图勘误 [J]. 工程地质学报, 2020, 28 (5): 1066-1068.
- [4] 李向辉, 李永波, 王志宇. 天津软土地区盾构隧道地震响应分析及影响因素研究 [J]. 天津建设科技, 2021, 31 (4): 34-37.
- [5] 彭飞. 沿海地区地铁盾构施工注浆材料设计研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (5): 65-70.
- [6] 荆永波, 武敖杰, 孙星亮, 等. 富水粉细砂层盾构同步注浆复合浆液配比试验 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (4): 53-58.
- [7] 郝彤, 李鑫箫, 冷发光, 等. 郑州市地铁粉质黏土层中盾构渣土制备同步注浆材料特性 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2020, 40 (3): 53-62.
- [8] 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.
- [9] 朱先发, 宋普涛, 杜峰, 等. 高性能同步注浆材料的耐久性与抗水分散性能研究 [J]. 混凝土, 2021 (12): 157-160.
- [10] 朱先发, 宋普涛, 杜峰, 等. 富水砂层高性能盾构同步注浆材料的配制及现场注浆性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48 (3): 98-101.
- [11] 彭斌, 杜泽辉, 余鹏, 等. 穿越断层破碎带特大跨度铁路隧道减震技术研究 [J]. 铁道技术标准 (中英文), 2023, 5 (10): 15-21.
- [12] 袁勇, 黎若寒, 赵旭. 断层破碎带注浆加固对跨断层隧道减震效果的试验研究 [J]. 震灾防御技术, 2023, 18 (2): 243-251.
- [13] 杨琪. 基于浆液充填渗透扩散形态的盾构隧道壁后注浆抗减震机理与应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [14] 黄好江, 沈杰, 王亚东. 盾构隧道新型注浆层减震性能研究 [J]. 西部交通科技, 2024, (2): 143-147.
- [15] 李鹏宇, 崔光耀, 王明胜. 强震区跨断层隧道局部接触注浆抗震效果研究 [J]. 高速铁路技术, 2019, 10 (4): 61-65.