

DOI: 10.7672/sgjs2026100151

不同改性固化剂掺量下高聚物注浆性能试验研究

周扬¹, 曾洋², 王乐², 师连政²

(1. 中国安能集团第三工程局有限公司成都分公司, 四川 成都 611130;

2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

[摘要] 针对传统注浆材料存在黏度高、可注性差、扩散加固效果不足等问题,以改性胺类固化剂掺入水性环氧树脂制备的高聚物作为新型注浆材料,通过凝结时间试验、黏度试验、无侧限抗压强度试验及注浆扩散试验,分析高聚物的注浆性能,并采用无侧限抗压强度试验、劈裂抗拉试验和 SEM 试验,评价高聚物对砂样力学性能及微观结构的改善效果。试验结果显示:高聚物 Pb100 表现出最低的初始黏度、最长的可操作时间和最大的 28d 抗压强度;其扩散半径、扩散高度及有效注浆量均优于超细水泥和水玻璃;高聚物固化砂的抗压强度随掺量增加呈先增大后减小趋势,最优掺量为 20%;劈裂抗拉强度随掺量增加持续增长,最优掺量为 30%。经高聚物胶结填充后,整体结构更稳定牢固。

[关键词] 注浆;高聚物;力学性能;微观机理;试验

[中图分类号] TU441.5

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0151-07

Experimental Study on the Grouting Properties of Polymers at Different Dosages of Modified Curing Agents

ZHOU Yang¹, ZENG Yang², WANG Le², SHI Lianzheng²

(1. Chengdu Branch of China Anneng Group Third Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611130, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: Aiming at the problems of high viscosity, poor injectability and insufficient diffusion reinforcement effect of traditional grouting materials, the polymer prepared by adding modified amine curing agent into waterborne epoxy resin was used as a new grouting material. The grouting performance of the polymer was analyzed by setting time test, viscosity test, unconfined compressive strength test and grouting diffusion test. The unconfined compressive strength test, splitting tensile test and SEM test were used to evaluate the improvement effect of polymer on the mechanical properties and microstructure of sand samples. The test results show that the polymer Pb100 exhibits the lowest initial viscosity, the longest operable time and the maximum 28d compressive strength. Its diffusion radius, diffusion height and effective grouting amount are better than those of superfine cement and water glass. The compressive strength of polymer solidified sand increases first and then decreases with the increase of dosage, and the optimal dosage is 20%. The splitting tensile strength continues to increase with the increase of the content, and the optimal content is 30%. After polymer cementation filling, the overall structure is more stable and firm.

Keywords: grouting; polymers; mechanical properties; microscopic mechanism; tests

0 引言

松散砂层是隧道修筑过程中常遭遇的不良地质类型,广泛分布于滨海、沿河、平原等区域,其变

形破坏形式常表现为地层的松动崩解和滑移坍塌^[1]。降雨入渗或地下水侵入下,砂层饱和程度加剧,强度迅速衰减劣化,此时砂层破坏更具突然性与不可逆性^[2]。因此,提升松散砂层的力学性能对于保证隧道施工的安全性具有重要意义。注浆通过填充孔隙、胶结颗粒,形成颗粒、浆体互锁结构,

使围岩整体性提高,地层承载能力改善,因此大量应用于不良地层加固中^[3-4]。注浆材料很大程度上决定了注浆效果,目前,注浆材料分为颗粒类和无颗粒类材料。颗粒类材料中,水泥基材料应用最广泛,来弘鹏等^[5]以水泥单液和水泥-水玻璃双液结合地表预注浆进行注浆治理,加固后围岩强度显著提高,渗水涌砂现象得到有效遏制,隧道成拱效果明显改善。张健儒^[6]针对断层破碎带围岩破碎易突水的特点,采用水泥浆液进行超前预注浆,处理后围岩强度提升,渗水情况得到有效控制。但水泥基材料受颗粒尺寸限制,在小孔洞、微裂隙密布的砂层环境中难以有效扩散^[7-8]。为改善水泥可注性,水泥颗粒被进一步研磨成超细水泥。虽然超细水泥可注性得到一定的提高,但实际渗透扩散效果有限^[9]。颗粒类材料中,环氧树脂材料强度高、固化快、耐久性好,多被用于建筑物补强、道路维护和大坝修复,而土体注浆加固的研究应用较匮乏^[10]。一方面由于环氧树脂材料结构高度交联,导致脆性明显,缺乏韧性,对裂纹萌生和扩展的抵抗力较差^[11]。另一方面,受材料本身高黏度影响,环氧树脂难以渗入微裂缝或微孔。Signorini 等^[12]考虑以丙酮作为稀释剂,按不同质量比掺入环氧树脂中,得出环氧树脂黏度随丙酮含量的增加而降低的结论。Wang 等^[13]利用复合有机稀释剂制备了超低黏度的环氧树脂,其脆性行为得到显著改善,材料自身的韧性明显提升。有机溶剂虽降低了环氧树脂的黏度,但其潜在的污染风险仍限制了其大范围的使用。Anagnostopoulos 等^[14-15]以水作为稀释剂制备了水性环氧树脂,改善黏度的同时降低了对环境的污染。但在环氧树脂与水质量比为 0.5 时,固化砂的 30d 强度不足 1MPa,力学性能欠佳。

以改性胺类固化剂与水性环氧树脂混合制备的高聚物作为注浆材料,通过凝结时间、黏度、无侧限抗压强度和注浆扩散试验分析高聚物的注浆性能。以无侧限抗压强度、劈裂抗拉和 SEM 试验,探讨不同高聚物掺量下固化砂的力学性能与微观结构变化规律。

1 试验材料

1.1 试验用砂

以机制砂为试验砂样,并考虑筛去颗粒粒径>2mm 的砾石,保留颗粒粒径 2mm 以下的颗粒。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,对机制砂进行晾晒、烘干、筛分。试验用砂粒径级配累积曲线如图 1 所示,该砂样的不均匀系数为 3.8,曲率系数为 1.67,属于级配不良砂,因此该砂样可模拟

不良砂层,砂样密度为 1 460kg/m³,孔隙率为 40%,含水量为 11%。

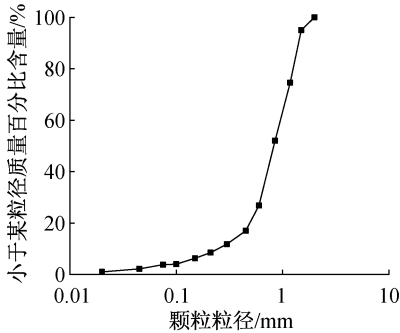


图 1 试验用砂粒径级配累积曲线
Fig.1 Accumulation curve of sand diameter gradation for test

1.2 注浆材料

试验采用的高聚物包含 4 个组分。组分 A 为 ZKAT-101 水性环氧树脂,具有 183~194g/mol 的环氧当量,110℃,3h 条件下的挥发份不超过 0.2%,其在 25℃下黏度为 10~13Pa·s,无机氯含量不超过 0.001 当量/100g。组分 B 为 ZKAT-L301 改性胺类固化剂,密度为 (1.06±0.03) g/cm³,25℃下黏度<2 000mPa·s,水稀释 10 倍后 pH 值为 8.03±0.5,苯含量不超过 0.3%,活泼氢当量为 (200±20) g/mol,不挥发物含量为 (75±5)%。组分 C 为稀释剂,成分为普通自来水。组分 D 为促凝剂(苯酚),25℃下密度为 0.98g/cm³,黏度为 190mPa·s,胺值为 600~630mg KOH/g。

2 试验方法

2.1 试验方案

本试验主要讨论改性胺类固化剂掺量变化对高聚物性能的影响,故高聚物配合比中以改性胺类固化剂含量为自变量,其他组分含量不变。高聚物浆液配合比设计如表 1 所示。

表 1 高聚物配合比设计				
Table 1 Polymer ratio design				%
试验编号	组分 A	组分 B	组分 C	组分 D
Pb70	100	70	200	4
Pb100	100	100	200	4
Pb130	100	130	200	4
Pb160	100	160	200	4

2.2 试验设计

1) 凝结时间试验

采用倒杯法测定凝结时间^[16-18]。各组分按表 1 配合比混合,使用高速搅拌机搅拌 3min 至均匀;倒入烧杯进行观测,测定时间间隔为 5min。测定时轻轻倾斜烧杯,直至烧杯倾斜至 90°,若高聚物试样表

面保持为平面,则认为试样凝结过程完成,记录凝结时间(取3组平行试验的平均值)。

2)黏度试验
将各组分按配合比混合、搅拌均匀后倒入烧杯,采用NDJ-5s型数字黏度计实时记录高聚物黏度。选用2号转子,转速为60r/min,测定时间间隔为5min,当黏度达到500MPa·s,试验结束。

3)无侧限抗压强度试验
高聚物试样按配合比混合搅拌后倒入模具,1d后脱模,并放置在温度25℃、湿度80%的恒定环境中养护,分别在1,3,7,14,28d取出高聚物试样,进行无侧限抗压强度试验,压力机加载速率为1.5kN/s。当样品表面出现明显开裂时,结束加载。

4)注浆扩散试验
为对比高聚物与传统注浆材料扩散效果的差异,分别以0.2,0.3,0.4MPa作为启动注浆压力进行注浆试验,并以超细水泥和水玻璃作为对照组。超细水泥浆液采用水灰比1:1进行注浆试验。水玻璃浆液采用质量分数7%的磷酸稀释液作为促凝剂与水玻璃以质量比1.5:1混合进行注浆试验。注浆前将浆液搅拌均匀,倒入储浆罐,3种浆液总质量均为4kg。当注浆压力稳定在设定值时,打开阀门开始注浆,并记录注浆时间及注浆量。当注浆时间达到2min或土体表面涌浆时试验终止,24h后挖出结石体进行尺寸测量。注浆设备如图2所示。

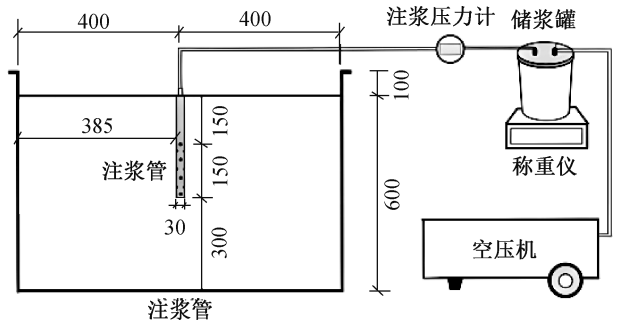


图2 注浆设备
Fig.2 Grouting equipment

5)固化砂力学性能试验
预试验表明,高聚物掺量超过35%时难以制样,故掺量设为15%,20%,25%和30%^[20-21]。各试样养护1d后脱模,将试样置于恒定环境中养护。试样按规定龄期取出后,进行无侧限抗压强度试验。压力机加载速率为1.5kN/s。当样品表面出现明显开裂时结束加载。抗压强度结果取3组平行试验的平均值。

劈裂抗拉试样的制作养护与抗压强度试样方法相同。于规定龄期取出固化砂开展劈裂抗拉试

验,选择带三角加载垫条的劈裂辅具固定试样。以1.5kN/s的加载速率施加压力至试样破坏。试验结果取3组平行试样的平均值作为固化砂抗拉强度。考虑土样在压裂破坏发生前可能存在塑性变形,试样的劈裂抗拉强度值采用修正后的劈裂抗拉强度公式计算^[19]。

6)SEM微观试验
对固化砂试样进行力学试验后,选取典型的块状样品用于微观电镜扫描,进行固化砂的微观结构对比分析。

3 试验结果及分析

3.1 改性胺类固化剂含量对高聚物浆液性能的影响

1)对高聚物凝结时间的影响
固化剂含量对高聚物凝结时间的影响如图3所示。由图3可知,固化剂含量为环氧树脂质量的70%时,高聚物凝结时间为320min,而当固化剂含量提升至160%时,凝结时间缩减至97min,缩减幅度近70%。这是由于高聚物凝结固化主要依靠环氧树脂中的环氧基团与固化剂中的活性基团发生反应,使环氧树脂形成三维网络结构。当高聚物中环氧树脂粒子总数一定时,固化剂含量增加,环氧树脂与固化剂分子间相互作用的概率大幅度上升,环氧基团更易开环并发生交联反应。当固化剂含量增加,可提供的催化活性位点随之增加,导致高聚物固化凝结反应速率大大增加,凝结时间缩短。

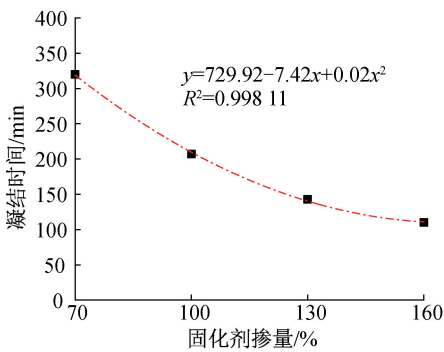


图3 固化剂掺量对高聚物凝结时间的影响
Fig.3 Effect of curing agent content on the setting time of polymer

2)对高聚物黏度的影响
高聚物在不同固化剂掺量下的黏度时变曲线如图4所示。

由图4可知,增加固化剂含量对高聚物初始黏度提高明显。Pb130和Pb160中的固化剂含量较高,环氧树脂分子与固化剂分子接触程度大幅度增加,早期化学反应迅速,导致初始黏度较高。Pb70

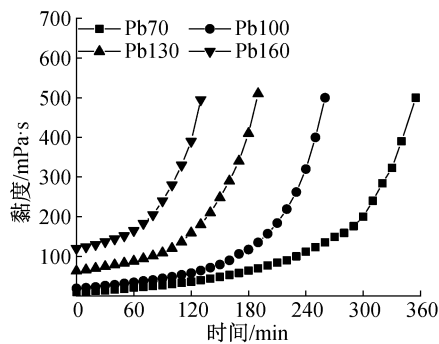


图 4 固化剂掺量对高聚物黏度的影响

Fig. 4 Effect of curing agent content on the viscosity of polymer

和 Pb100 的固化剂浓度较低,分子间相互接触概率降低,化学反应程度相对较低,初始黏度较小。

3) 对高聚物无侧限抗压强度的影响

各配合比下高聚物无侧限抗压强度与龄期增长的变化关系如图 5 所示。由图 5 可知,在 1,3,7d 时,高聚物抗压强度随固化剂含量的增加而持续增大,Pb160 的抗压强度最大。随着养护龄期的增加,Pb70,Pb100 和 Pb130 试样抗压强度持续增加,Pb160 抗压强度在养护 14d 时达到峰值。Pb100 抗压强度最大,且养护时间越长,Pb100 的抗压强度优势越明显;Pb130 和 Pb160 的抗压强度在养护后期增长缓慢。

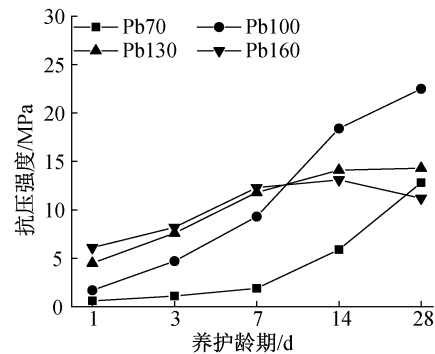


图 5 高聚物抗压强度随龄期变化曲线

Fig. 5 Curve of the polymer compressive strength with curing time

低含量固化剂试样 (Pb70),虽强度持续增长,但峰值强度有限,仅为 Pb100 峰值强度的 55%。这是因为低固化剂含量下,环氧树脂与固化剂之间的相互作用不足,固化剂反应消耗完后,仍存在部分环氧树脂未反应,内部交联密度程度低,在宏观力学上表现为较低的抗压强度。而高含量固化剂掺入下,固化剂分子和环氧树脂分散相粒子接触反应概率大大增加,环氧树脂分子与固化剂分子迅速反应,内部交联网络密度大,所以在早期表现出较高

的强度。但过多加入固化剂会导致高聚物脆性增加,抗变形能力削弱,故 Pb130 和 Pb160 的抗压强度在后期表现为增长疲软甚至劣化。当环氧树脂与固化剂质量比为 1 : 1 时 (Pb100),分子间反应充分,高聚物内部交联密度高,故抗压强度表现最优。

4) 不同注浆材料注浆扩散结果对比

结合各配合比高聚物的凝结时间、黏度及抗压强度可知,Pb100 的黏度低、可操作时间长、抗压强度高,故注浆扩散试验采用 Pb100 试样进行测试。高聚物、超细水泥及水玻璃在不同注浆启动压力下的扩散高度、扩散半径及注浆量如图 6 所示。

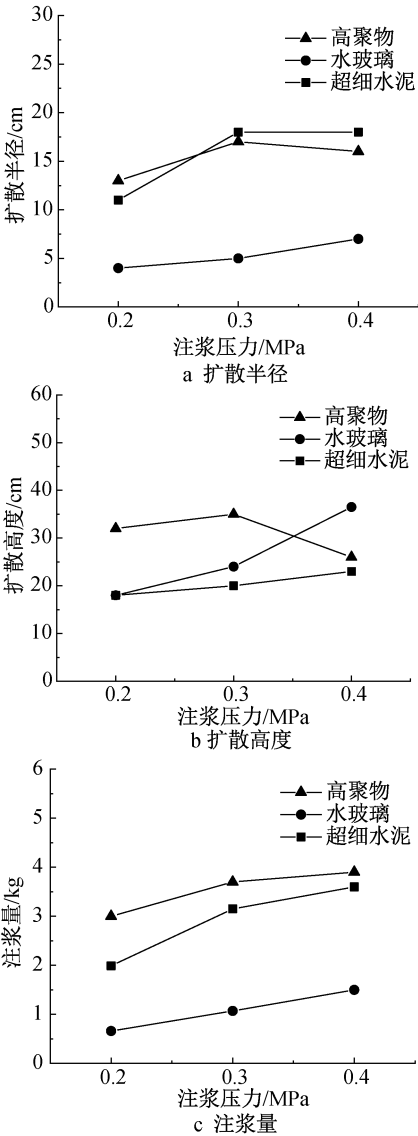


图 6 不同注浆材料下的注浆参数

Fig. 6 Grouting parameters of different grouting materials

高聚物不受颗粒粒径限制且自身黏度低、受砂体的阻碍程度小,故高聚物可在极低的压力下以渗透扩散的形式注入土壤孔隙,扩散过程中受土壤阻

碍程度较低且对土体结构扰动程度较小。高聚物结石体形态多呈柱形分布,验证了其扩散模式主要为渗透扩散。注浆压力为 0.4MPa 时,由于注浆管上覆砂体厚度较小,在压力积聚下会发生涌浆现象,故扩散高度有所下降。超细水泥颗粒扩散过程受到自身颗粒大小限制,在砂体的渗滤效应下难以进行有效扩散。浆液扩散受阻程度较大,浆液内部压力持续攀升,当内部压力大于砂体的劈裂临界值时,超细水泥浆液就会撕裂砂体发生劈裂扩散。通过观察超细水泥结石体形态发现,超细水泥结石体水平向尺寸大于竖向尺寸,故推断超细水泥劈裂扩散方向为水平向。水玻璃在 3 组注浆试验中均发生涌浆现象,这是由于水玻璃虽不受颗粒粒径限制,但由于自身黏度较高,在砂体孔隙中扩散运动时,易粘附堵塞颗粒孔隙,导致后续浆液扩散受阻,浆液内部压力持续增大。壁面效应影响下,浆液逐渐向注浆管壁与砂体的接触面发生劈裂扩散,故水玻璃结石体水平向尺寸远小于其他 2 种材料,但竖向尺寸较大。

相同的启动注浆压力下,高聚物的整体扩散效果更优。启动注浆压力的增加,使 3 种注浆材料获得了更高的初始动能,浆液单位时间内的扩散速度增加,3 种材料的扩散高度、扩散半径及注浆量均随注浆压力的增加表现出一定的提高。综合对比下,高聚物的扩散效果优于超细水泥和水玻璃。

3.2 高聚物掺量对固化砂力学性能的影响

1) 无侧限抗压强度

不同高聚物掺量下固化砂抗压强度曲线如图 7 所示。相关文献表明,当砂层的无侧限抗压强度达到 0.6MPa 以上即可顺利进行施工开挖^[22-23]。4 组高聚物掺量下的固砂体养护 1d 后,强度均达到 1MPa 以上,满足对于砂层加固的最低强度要求。

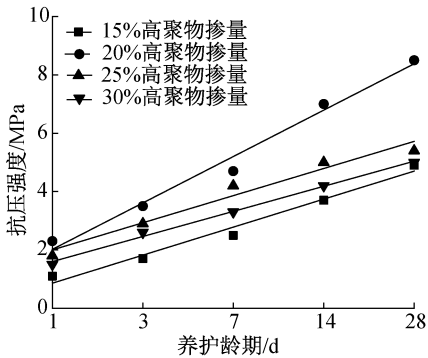


图 7 不同高聚物掺量下固化砂抗压强度曲线
Fig. 7 Compressive strength curve of solidified sand under different polymer content

由图 7 可知,高聚物掺量为 20% 的固化砂抗压强度最优。分析原因为当高聚物掺量较少时,砂颗粒间空隙并未得到有效填充,且颗粒间黏结作用较薄弱,整体性相对较低,故在外力作用下固化砂易受破坏,抗压强度较低。当高聚物掺量为 20% 时,颗粒间孔隙填充密实,且颗粒间距离保持良好,颗粒间摩擦力未被削弱,团聚体整体性强,在抗压强度上表现最优。

2) 劈裂抗拉强度

不同高聚物掺量下固化砂劈裂抗拉强度曲线如图 8 所示。由图 8 可知,4 组高聚物掺量的固化砂劈裂抗拉强度均随龄期的发展呈线性增长趋势,且增长速率基本一致。固化砂于龄期 28d 时达到峰值抗拉强度。养护 28d 后,固化砂内部高聚物化学反应完成,高聚物对砂样的填充黏结作用达到最佳。相比于传统脆性环氧树脂,高聚物固化形成的三维网络具备一定的韧性,所能承受荷载的能力更强,可对固化范围内的砂颗粒提供有效的约束力,限制砂颗粒的位移,砂样的抗拉强度明显提高。

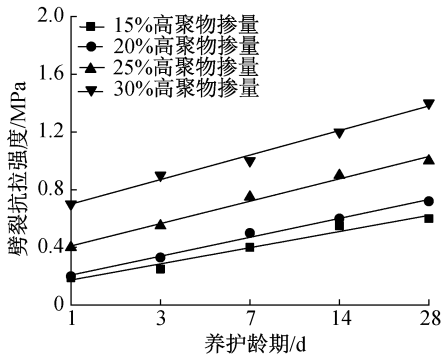


图 8 不同高聚物掺量下固化砂劈裂抗拉强度曲线
Fig. 8 Splitting tensile strength curve of solidified sand under different polymer content

在各养护节点,固化砂的劈裂抗拉强度均随高聚物掺量的增加持续增大。在高聚物掺量设定范围内,高聚物掺量为 30% 的固化砂试样劈裂抗拉强度最优。当高聚物掺量较低时,固化砂孔隙内高聚物填充程度不足,砂颗粒的黏结层较薄弱,高聚物三维网络强度不足,包覆范围小,团聚体整体性较差,抵抗拉裂能力较弱。随着高聚物掺量的增加,砂颗粒间孔隙得到大量填充,黏结层厚度得到一定补强,故固化砂抗拉能力显著增加。另外,砂样中高聚物掺量越大,高聚物可黏结影响的砂颗粒总数就越多,形成的团聚体整体性就更强。综上,当高聚物掺量为 30% 的固化砂试样劈裂抗拉强度最优。

3.3 高聚物掺量对固化砂微观结构的影响

高聚物掺量 15% 和 20% 固化砂的微观形貌如

图 9 所示。在放大 30 倍数下,高聚物掺量 15% 下的固化砂填充程度较弱,颗粒间多呈点接触,固化砂表面孔洞、裂隙分布相对较多且大小不一。试样放大 1 000 倍,发现砂颗粒表面的高聚物包覆层较薄弱,且包覆面积不大,颗粒间的高聚物未形成有效的黏结搭接。

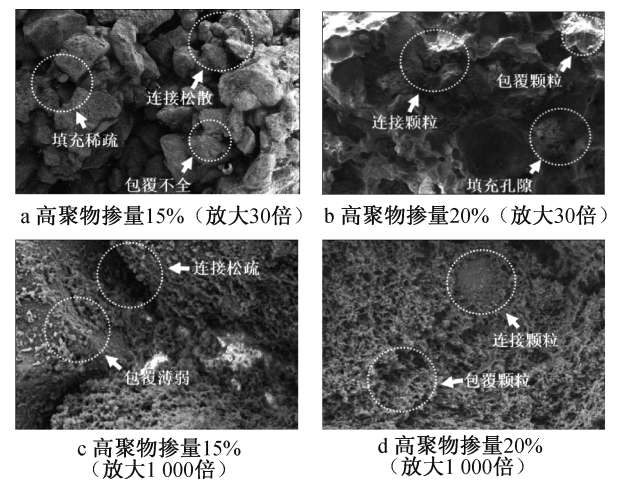


图 9 高聚物固化砂微观形貌

Fig. 9 Microstructure of polymer improved sand

高聚物掺量 20% 的固化砂完整程度较高,高聚物填充在微裂隙和空洞中,颗粒间接触方式由点接触过渡为面接触,接触面积与咬合程度显著提高,形成了较大的高聚物-砂颗粒团聚体。将高聚物掺量 20% 的固化砂试样放大到 1 000 倍,可观察到高聚物凝结后呈三维网络结构,紧紧攀附在颗粒表面,砂颗粒表面被大量高聚物包裹。高聚物网络约束有效限制砂颗粒受外部荷载作用引起的位移。砂样内部结构由松散转为密实,其均匀程度大大提高,并未出现明显的空洞与裂隙。高聚物的黏结填充作用有效改善了砂样的疏松结构,砂样整体性得到显著改善,承载能力得到有效提高。增加的高聚物掺量强化了高聚物的黏结填充效果,高聚物三维网络覆盖范围扩大,连接的孤立砂颗粒数量增加,高聚物-砂颗粒团聚体体积显著增加,固化砂整体性也明显提高。

4 结语

- 1) 高聚物的凝结时间随改性胺类固化剂含量的增加而减小,初始黏度上升,Pb100 试件兼具低黏度和合理可操作时间。
- 2) 高聚物抗压强度随改性胺类固化剂含量增加先升后降,Pb100 的 28d 抗压强度最大。
- 3) 注浆扩散试验表明,Pb100 的扩散半径、扩散高度及注浆量均优于水玻璃和超细水泥,且随注浆压力的增加优势更显著。

4) 固化砂无侧限抗压强度在 20% 高聚物掺量时达到峰值;劈裂抗拉强度在 30% 掺量时最高。考虑隧道围岩主要是以受压为主,推荐 20% 为合理掺量。

5) SEM 显示,高聚物通过桥接、填充和包覆作用有效加强砂颗粒间联系,形成大团聚体,显著改善了砂样的力学性能。

参考文献:

[1] 邱龔,杨新安,徐前卫,等. 富水砂层盾构隧道开挖面稳定性及其失稳风险的分析[J]. 中国铁道科学, 2015, 36 (6): 55-62.

QIU Y, YANG X A, XU Q W, et al. Analysis on stability and instability risk of excavation face of shield tunnel in water-rich sand layer[J]. China railway science, 2015, 36(6) : 55-62.

[2] 袁克阔,李雄伟,徐拴海,等. 巨厚富水松散砂层溃砂灾害现状与注浆固沙技术研究及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4) : 32-38.

YUAN K K, LI X W, XU S H, et al. Underground grouting-reconstruction technology for thick water-rich sand layer and its engineering practice [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2017, 15(4) : 32-38.

[3] LIU Y T, CHEN B. Research on the preparation and properties of a novel grouting material based on magnesium phosphate cement [J]. Construction and building materials, 2019, 214: 516-526.

[4] 沙飞,李术才,刘人太,等. 富水砂层高效注浆材料试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7) : 1420-1433.

SHA F, LI S C, LIU R T, et al. Performance and engineering application of effective microfine cement-based grout(EMCG) for water-rich sand strata[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(7) : 1420-1433.

[5] 来弘鹏,谢永利,杨晓华. 地表预注浆加固公路隧道浅埋偏压破碎围岩效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11) : 2309-2315.

LAI H P, XIE Y L, YANG X H. Treatment effect analysis of shallow-buried crushed surrounding rocks under unsymmetrical pressure reinforced with surface pregrouting technology in highway tunnel[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(11) : 2309-2315.

[6] 张健儒. 山岭隧道高压富水断层破碎带注浆施工技术[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(5) : 58-62.

ZHANG J R. Grouting technology for construction of mountain tunnel in high-pressure water-rich fault fracture zone[J]. Journal of railway engineering society, 2010, 27(5) : 58-62.

[7] ZHOU Q, HAO J P, LÜ P, et al. Study on a new adhesive of concrete cracks repairing [J]. Advanced materials research, 2010, 168-170: 1308-1312.

[8] 柴肇云,刘绪,杨攀,等. 硅溶胶物性及其注浆改性泥岩的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1) : 2681-2691.

CHAI Z Y, LIU X, YANG P, et al. Experimental study on physical properties of silica sol and its grouting modification of mudstone [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2021, 40(S1) : 2681-2691.

[9] 李利平,李术才,张庆松,等. 一种新型高分子注浆材料的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3150-3156.
LI L P,LI S C,ZHANG Q S,et al. Experimental study of a new polymer grouting material[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2010,29(S1):3150-3156.

[10] 傅豪,王朝辉,刘鲁清,等. 路用水性环氧改性乳化沥青组成优化及耐久性能评价[J]. 材料导报,2023,37(18):278-286.
FU H,WANG C H,LIU L Q,et al. Composition optimization and durability evaluation of waterborne epoxy modified emulsified asphalt for road[J]. Materials reports,2023,37(18):278-286.

[11] MALAKOOTI M H,ANDERSON P L,SODANO H A. Toughening mechanism of heterogeneous aliphatic polyurethanes [J]. Polymer,2014,55(8):2086-2093.

[12] SIGNORINI C, NOBILI A, SOLA A, et al. Designing epoxy viscosity for optimal mechanical performance of coated glass textile reinforced mortar (GTRM) composites[J]. Construction and building materials,2020,233:117325.

[13] WANG W Z, ZHAO W Q, ZHANG J J, et al. Epoxy-based grouting materials with super-low viscosities and improved toughness [J]. Construction and building materials, 2021, 267:121104.

[14] ANAGNOSTOPOULOS C A, SAPIDIS G. Mechanical behaviour of epoxy resin-grouted sand under monotonic or cyclic loading [J]. Géotechnique letters,2017,7(4):298-303.

[15] ANAGNOSTOPOULOS C A, PAPALIANGAS T, MANOLOPOULOU S,et al. Physical and mechanical properties of chemically grouted sand[J]. Tunnelling and underground space technology,2011,26(6):718-724.

[16] LI S C, WANG P C, YUAN C, et al. Adaptability of polyurethane/water glass grouting reinforcement to subsea tunnels [J]. Construction and building materials,2021,311:125354.

[17] WANG X Y,WANG C,LI P F,et al. Experimental study on new grouting material of acidic sodium silicate and its properties of grouted-sand[J]. Construction and building materials,2023,392:131955.

[18] LI S C, ZHANG J, LI Z F, et al. Investigation and practical application of a new cementitious anti-washout grouting material [J]. Construction and building materials,2019,224:66-77.

[19] 李昊达,唐朝生,徐其良,等. 土体抗拉强度试验研究方法的进展[J]. 岩土力学,2016,37(S2):175-186.
LI H D,TANG C S,XU Q L, et al. Advances in experimental testing methods of soil tensile strength [J]. Rock and soil mechanics,2016,37(S2):175-186.

[20] 苏辉. 蒙华铁路万荣隧道粉细砂地层施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(S2):225-232.
SU H. Key construction technologies for Wanrong tunnel of Menghua railway crossing silty-fine sand stratum [J]. Tunnel construction,2020,40(S2):225-232.

[21] ZENG Q. 浅析隧道穿越干燥密实粉细砂层施工技术方案 [J]. China exploration & design,2013(4):79-81. 曾青. 浅析隧道穿越干燥密实粉细砂层施工技术方案[J]. 中国勘察设计,2013(4):79-81.

[22] 杨万精,陈峥,马川. 浅埋暗挖法区间富水砂层超前加固技术研究[J]. 工业建筑,2023,53(S1):465-468.
YANG W J,CHEN Z,MA C. Study on advanced reinforcement technology of water-rich sand layer in shallow buried and underground excavation method [J]. Industrial construction, 2023,53(S1):465-468.

[23] 王玥,徐启鹏,马召林. 郑州地铁粉细砂地层区间隧道扩挖注浆方案优化研究与实践[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(12):2140-2149.
WANG Y,XU Q P,MA Z L. Practice and optimization of grouting scheme for expansion excavation of tunnel in silty fine sand stratum of Zhengzhou metro[J]. Tunnel construction,2021,41(12):2140-2149.