

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.251284

# 异氰酸酯与水玻璃的质量比对隧道用新型聚氨酯/水玻璃复合注浆材料性能影响研究

肖依桃<sup>1</sup>, 文新华<sup>1</sup>, 冉启航<sup>2</sup>

(1. 四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610000; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610000)

**摘要:** 为提升复杂地层注浆效果, 解决传统水泥基材料可注性差、固化慢等问题, 研究异氰酸酯与水玻璃质量比(0.1~1.2)对聚氨酯/水玻璃复合材料性能的影响。通过单因素试验, 测试聚氨酯/水玻璃复合材料的凝胶时间、固化时间、反应温度和单轴抗压强度, 结合扫描电子显微镜, 分析该材料的微观结构。结果表明, 当异氰酸酯与水玻璃的质量比为0.6~0.9时, 材料的综合性能最优, 抗压强度最高, 达到57.3 MPa, 且拥有快速的凝胶时间和固化时间, 可满足堵漏和围岩加固的需求; 当质量比小于0.4时, 该材料难以固化; 当质量比大于1.0时, 该材料的抗压强度下降。微观分析显示, 适宜的质量比, 可促进硅酸盐微球的形成与均匀分布, 从而增强材料的力学性能与固化性能。因此, 建议在实际工程应用中, 将异氰酸酯与水玻璃的质量比控制在0.6~0.9, 以平衡强度性能、施工可行性与材料经济性。

**关键词:** 隧道工程; 破碎岩体; 注浆加固; 聚氨酯/水玻璃复合材料

**中图分类号:** TU45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2026)09-0053-06

## Study on Effect of Mass Ratio of Isocyanate to Water Glass on Performance of New Polyurethane/Water Glass Composite Grouting Materials for Tunnels

XIAO Yitao<sup>1</sup>, WEN Xinhua<sup>1</sup>, RAN Qihang<sup>2</sup>

(1. Sichuan Transportation Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** To enhance the grouting effectiveness in complex geological formations and address the issues of poor injectability and slow curing of traditional cement-based materials, the influence of the mass ratio (0.1~1.2) of isocyanate to water glass on the performance of polyurethane/water glass composite materials is studied. Single-factor experiments are conducted to measure the gel time, curing time, reaction temperature and uniaxial compressive strength of polyurethane/water glass composites. The microstructure of the material is analyzed in combination with a scanning electron microscope. The results show that the comprehensive performance of the material is the best, and the compressive strength is the highest, reaching 57.3 MPa when the mass ratio of isocyanate to water glass is 0.6~0.9, and it has a fast gel time and curing time, which can meet the requirements of leak sealing and surrounding rock reinforcement. When the mass ratio is less than 0.4, the material is difficult to cure. When the mass ratio is greater than 1.0, the compressive strength of the material decreases. Microscopic analysis shows that an appropriate mass ratio can promote the formation and uniform distribution of silicate microspheres, thereby enhancing the mechanical and curing properties of the material. Therefore, it is recommended that in practical engineering applications, the mass ratio of isocyanate to water glass be controlled at 0.6~0.9 to balance strength performance, construction feasibility and material economy.

**Keywords:** tunnel engineering; fractured rock mass; grouting reinforcement; polyurethane/water glass composite material

收稿日期: 2025-12-31

作者简介: 肖依桃(1976—), 女, 学士, 高级工程师, 从事公路、桥梁、隧道施工管理工作。

通信作者: 文新华(1982—), 女, 学士, 高级工程师, 从事公路、桥梁、隧道施工管理工作。电子信箱: 82517723@qq.com

## 0 引言

隧道注浆是围岩加固与渗水封堵的核心工程技术, 已在各类隧道施工中得到广泛应用。当前, 水泥基材料在隧道注浆工程领域仍占据主流地位。然

而,该类材料在实际应用中存在明显的局限性:一方面,水泥基材料在水中固化的速率较慢,难以有效渗透至微观裂隙中;另一方面,在动水条件下,水泥基材料易受水流冲刷而流失,可注性总体较差,难以满足隧道施工中应对突发涌水等灾害的快速治理要求<sup>[1-4]</sup>。以沪定至石棉高速公路(沪石高速)为例,该路线隧道的地质条件复杂,涌水状况频发,传统水泥基注浆材料往往无法满足工程需求。

聚氨酯/水玻璃(PU/WG)复合体系作为一种有机-无机复合材料,不仅具备良好的流动性与渗透性,还表现出优异的热稳定性和力学性能。同时,它具备较好的材料经济性,在隧道注浆工程领域具有显著的应用潜力<sup>[5-7]</sup>。研究表明,通过优化水玻璃的模数、浓度和催化剂,可有效调控该复合材料的凝胶时间与早期强度,以应对不同工程的需求<sup>[8-9]</sup>。然而,目前聚氨酯/水玻璃复合材料的配比方案仍较为单一,对隧道工程中多变的灾害形式与复杂地质条件的适应能力有限。该材料虽展现出良好的应用潜力,但在隧道灾害应急处置领域的实际工程应用案例仍较为缺乏,现有相关研究的系统性与深度也有待加强<sup>[10]</sup>。因此,开展适用于隧道注浆工程的聚氨酯/水玻璃材料配比优化研究具有重要的意义。

异氰酸酯与水玻璃的质量比例会影响聚氨酯的合成过程。其配比对材料的凝胶行为、固化过程和最终力学性能起到决定性影响。然而,当前学界针对异氰酸酯与水玻璃质量比对注浆材料固化性能与力学性能的影响规律,仍缺乏系统性研究,尤其是在微观结构层面,既有研究对质量比作用机制的解释尚不深入<sup>[11-12]</sup>。微观研究证实,异氰酸酯组分的过量或不足,均会影响复合材料内部有机相与无机相的界面结合状态与网络互穿程度,从而决定其宏观力学性能与耐久性<sup>[13-15]</sup>。

本文通过调控异氰酸酯与水玻璃的质量比例,系统分析该变量对聚氨酯/水玻璃复合材料宏观性能(包括凝胶时间、固化时间、反应温度和单轴抗压强度)的影响规律,并结合扫描电子显微镜(SEM)与能量色散光谱(EDS)等微观分析手段,揭示质量比影响材料性能的微观机理,弥补异氰酸酯与水玻璃质量比对复合注浆材料性能影响的研究空白,为隧道注浆材料的配合比优化与工程应用提供理论依据。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

随着水玻璃模量的提升,其密度降低而含水量

增加。模量的改变,会对灌浆材料的所有性能参数产生显著影响。更高模量的水玻璃虽能提升材料的流动性,但也会降低其机械强度,并增大产品出现分层和离析的风险。既有文献<sup>[8-9]</sup>已经证实,当水玻璃模量为2.23时,可在保证灌浆材料良好流动性的同时获得较高的力学强度。因此,该模量是注浆材料常用的优选区间,也是本试验选取的水玻璃模量。

常用的异氰酸酯化合物包括二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)、甲苯二异氰酸酯(TDI)及聚合型亚甲基二苯基二异氰酸酯(PAPI)。其中,TDI具有高挥发性、刺激性和毒性。PAPI虽同样具有毒性,但其蒸气压约为TDI的1/1 000,因此其挥发性显著降低,可大幅降低有毒蒸汽经呼吸道进入人体的风险,提升了操作人员的安全性。此外,相较于MDI,PAPI在商业可获得性和成本效益方面更具优势,且PAPI与水玻璃的相容性较好,反应过程可控。因此,本文选用PAPI作为异氰酸酯组分<sup>[5,7]</sup>。

2种常用的催化剂是二甲基苄胺(BDMA)和二丁基锡二月桂酸酯(DBTDL)。当使用DBTDL与水玻璃混合制备组分A时,所得混合物的流动性较差,不适用于隧道注浆应用。相比之下,使用BDMA制备的组分A,表现出优异的稳定性和流动性。因此,本文最终选定BDMA作为催化剂。

塑化剂用于改善聚氨酯组分的加工流动性和固结体的柔韧性,其类型直接影响浆液的可注性、固化速度及工程成本。DBP分子链较短,塑化效率高,塑化速度快,可显著加快浆液的固化速度,使浆液在地下水冲刷前快速成型。本研究使用DBP作为聚氨酯/水玻璃复合注浆材料的塑化剂。所有材料的具体参数如表1所示。

### 1.2 工况设计

为探究异氰酸酯与水玻璃的质量比对聚氨酯/水玻璃复合注浆材料性能的影响,本文采用控制变量法展开分析。本文对PAPI的质量进行分组设计,以10 g为步长,从10 g递增至120 g,共设置12组,同时保持水玻璃(100 g)、催化剂(0.4 g)和增塑剂(5 g)的质量不变,共形成12种工况条件,对应的质量比分别为0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1和1.2。

### 1.3 注浆材料制备

组分A的制备方法如下(见图1):将水玻璃试样依次加入容积为200 mL的玻璃烧杯中,随后在600 r/min的机械搅拌下持续搅拌5 min,逐滴加入催

表 1 原材料及参数

| 成分   | 参数                                                        |
|------|-----------------------------------------------------------|
| PAPI | NCO 含量/%:31.22                                            |
|      | 黏度(25℃)/(mPa·s):200                                       |
|      | 密度(25℃)/(g·cm <sup>-3</sup> ):1.233                       |
|      | 酸度(HCl):0.004                                             |
| 水玻璃  | SiO <sub>2</sub> 与Na <sub>2</sub> O的比值:2.3                |
|      | 波美度(20℃,°Bé):50.2                                         |
|      | Na <sub>2</sub> O/%:14.34                                 |
|      | SiO <sub>2</sub> /%:32                                    |
| BDMA | 密度(25℃)/(g·cm <sup>-3</sup> ):1.532                       |
|      | 密度(25℃)/(g·cm <sup>-3</sup> ):0.9                         |
|      | 分子量:135.21                                                |
|      | 沸点(765 mmHg)/℃:184                                        |
| DBP  | 水分/%:0.048                                                |
|      | 密度(25℃)/(g·cm <sup>-3</sup> ):0.982                       |
|      | 酸度(C <sub>8</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ):0.002 5 |
|      | 纯度/%:99.5                                                 |

化剂和增塑剂。组分B为单独盛放于另一个200 mL玻璃烧杯中的PAPI试剂。使用配备4叶螺旋桨的机械搅拌器,以600 r/min的转速,将2组分混合搅拌至均质状态并持续搅拌1 min。本文所有试验操作均在恒温水浴(25.0±0.5)℃中进行,以减少温度变化对试验结果的影响。组分A和组分B混合后,须记录材料的凝胶时间、固化时间,以及反应过程中的温度变化情况。随后,研究人员将混合浆液注入标准试验模具中并养护至其固化成型;脱模后,将试件置于25℃条件下静置养护14 d,最终制得用于强度测试的样品。



图 1 注浆材料制备

#### 1.4 凝胶时间和固化时间

凝胶时间的测定按以下步骤操作:组分A与组分B充分混合后启动计时,每隔1 s,将盛有反应液的烧杯自杯口预设标记处倾斜90°,观察浆液的流动状态。操作时,须确保烧杯每次倾斜的方向与角度一致。若烧杯倾斜时,材料沿杯壁流动,则表明其尚未完全凝胶,将烧杯恢复原位后继续观察。若连续5次倾斜烧杯,材料表面均无流动迹象,则判定其已完全凝胶,此时停止计时,所记录总时长即为凝胶

时间。

固化时间的测定,自组分A和组分B充分混合后开始计时。材料凝胶后,由经统一培训的操作人员,使用直径为5 mm的玻璃棒进行检测:玻璃棒从距离试样表面2 cm的固定高度垂直落下,以约1 Hz的频率,轻触试样表面。为降低人为操作的误差,玻璃棒下落高度与敲击力度保持一致。完全固化的判定标准为:连续3次敲击后,试样表面不出现可见凹痕,且玻璃棒回弹后不留印迹。当试样满足该条件时,停止计时,所得总时长即为固化时间。

#### 1.5 反应温度

本文采用上海达灵科技有限公司生产的数字温度计(量程:−50~200℃),开展聚氨酯/水凝胶复合材料制备过程中的反应温度监测。组分A和组分B混合后,立即将探头浸入未凝胶化的混合物中,并保持至其完全固化冷却。以10 s为间隔,采集温度读数,并记录最高反应温度。

#### 1.6 抗压强度

在恒温环境条件下,采用WDW-20型万能试验机(济南恒瑞金仪器)进行抗压强度测定。依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)的规定,本文以5 mm/min的恒定加载速率,对圆柱试件(φ50 mm×100 mm)的抗压强度进行测试。试件破坏时终止试验,并同步记录应力—应变曲线。

### 2 试验结果

#### 2.1 材料固化性能

表2和图2展示了材料的凝胶时间、固化时间,以及最高反应温度随异氰酸酯与水玻璃质量比变化的趋势。当异氰酸酯与水玻璃的质量比小于0.2时,材料未发生固化反应。随着异氰酸酯与水玻璃的质量比增大,凝胶时间和固化时间总体呈现缩短趋势,但当质量比为1.0时,凝胶时间和固化时间出现显著延长。这种材料性能的非单调变化,可能源于质量比在极端区间下,两相之间的相互作用不足。最高反应温度呈现先升后降的趋势,在质量比为1.0时达到峰值。研究发现,合理减少异氰酸酯的用量,可显著降低反应温度,从而提高项目施工中材料的安全性。

#### 2.2 材料强度性能

本文研究了异氰酸酯与水玻璃的质量比对材料的抗压强度和破坏机制的影响。表3展示了压缩强度与异氰酸酯与水玻璃质量比的关系。图3揭示了

表2 不同异氰酸酯与水玻璃质量比条件下材料的凝胶时间、固化时间和最高反应温度

| 聚氨酯与水玻璃的质量比 | 凝胶时间/s | 平均凝胶时间/s | 固化时间/s | 平均固化时间/s | 最高反应温度/℃ | 平均最高反应温度/℃ |
|-------------|--------|----------|--------|----------|----------|------------|
| 0.1         | 775    |          | —      |          | 33.1     | 33.1       |
| 0.2         | 597    |          | —      |          | 36.9     | 36.9       |
| 0.3         | 475    |          | 1 065  |          | 49.9     |            |
|             | 512    | 470      | 1 179  | 1 082    | 51.1     | 50.1       |
|             | 424    |          | 1 001  |          | 49.2     |            |
| 0.4         | 423    |          | 789    |          | 67.2     |            |
|             | 472    | 436      | 823    | 797      | 65.6     | 66.7       |
|             | 412    |          | 779    |          | 67.4     |            |
| 0.5         | 421    |          | 599    |          | 79.1     |            |
|             | 462    | 455      | 642    | 640      | 78.9     | 78.4       |
|             | 483    |          | 678    |          | 77.1     |            |
| 0.6         | 386    |          | 487    |          | 84.9     |            |
|             | 351    | 380      | 445    | 482      | 86.2     | 85.1       |
|             | 403    |          | 513    |          | 84.1     |            |
| 0.7         | 345    |          | 586    |          | 96.6     |            |
|             | 331    | 349      | 573    | 587      | 87.3     | 90.0       |
|             | 372    |          | 601    |          | 86.1     |            |
| 0.8         | 352    |          | 481    |          | 103.2    |            |
|             | 361    | 358      | 493    | 499      | 102.1    | 102.5      |
|             | 362    |          | 523    |          | 102.2    |            |
| 0.9         | 322    |          | 453    |          | 111.1    |            |
|             | 341    | 332      | 482    | 469      | 110.2    | 110.7      |
|             | 333    |          | 472    |          | 110.8    |            |
| 1.0         | 370    |          | 597    |          | 120.3    |            |
|             | 381    | 371      | 601    | 595      | 120.1    | 120.3      |
|             | 361    |          | 587    |          | 120.4    |            |
| 1.1         | 397    |          | 667    |          | 117.3    |            |
|             | 412    | 396      | 690    | 665      | 116.2    | 117.0      |
|             | 380    |          | 637    |          | 117.4    |            |
| 1.2         | 414    |          | 696    |          | 111.2    |            |
|             | 477    | 442      | 753    | 693      | 110.9    | 110.8      |
|             | 435    |          | 631    |          | 110.2    |            |

不同异氰酸酯与水玻璃质量比条件下材料强度的变化规律及典型断裂行为特征。随着异氰酸酯与水玻璃质量比的增大,材料的抗压强度呈现先增后减的规律,在质量比为0.9时达到峰值(抗压强度约为57.3 MPa)。这表明,在该配比下,2组分的内部交联反应最充分,可能形成了最优的复合交联结构。在质量比为0.6~0.9时,抗压强度平均值均超过40 MPa,且标准差相对较小。这表明,当配比处于该区间时,材料的抗压强度稳定性较好。基于材料损伤状态的观察结果,材料的脆性随异氰酸酯与水玻璃质量比的增大而逐渐降低。

本文将最优配比(异氰酸酯与水玻璃的质量比

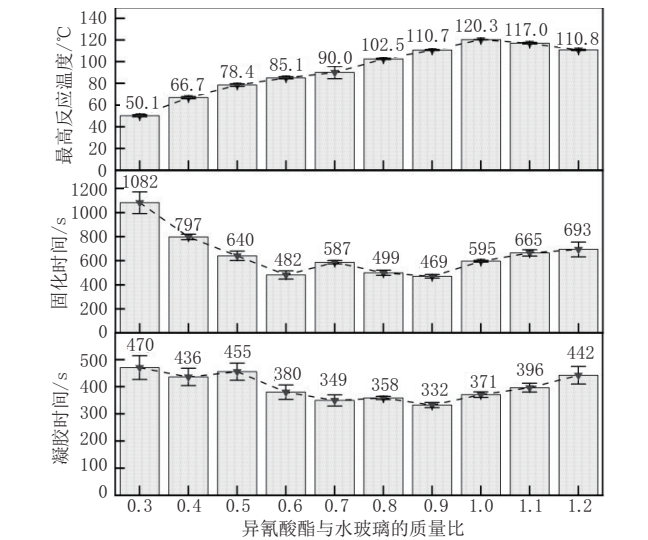


图2 异氰酸酯与水玻璃的质量比对材料固化性能的影响

表3 不同异氰酸酯与水玻璃质量比条件下材料的抗压强度

| 异氰酸酯与水玻璃的质量比 | 抗压强度/MPa |       |      | 平均抗压强度/MPa | 标准差 |
|--------------|----------|-------|------|------------|-----|
| 0.1          | —        | —     | —    | —          | —   |
| 0.2          | —        | —     | —    | —          | —   |
| 0.3          | —        | —     | —    | —          | —   |
| 0.4          | 7.9      | 14.1  | 5.6  | 9.2        | 4.4 |
| 0.5          | 24.2     | 15.8  | 12.3 | 17.4       | 6.1 |
| 0.6          | 44.4     | 34.5  | 42.9 | 40.6       | 5.3 |
| 0.7          | 47.1     | 50.9  | 50.8 | 49.6       | 2.1 |
| 0.8          | 56.9     | 51.4  | 48.5 | 52.3       | 4.3 |
| 0.9          | 54.9     | 59.3  | 57.7 | 57.3       | 2.2 |
| 1.0          | 58.1     | 53.1  | 52.4 | 54.53      | 3.1 |
| 1.1          | 47.3     | 51.24 | 55.5 | 51.35      | 4.1 |
| 1.2          | 41.4     | 44.7  | 47.4 | 44.5       | 3.0 |

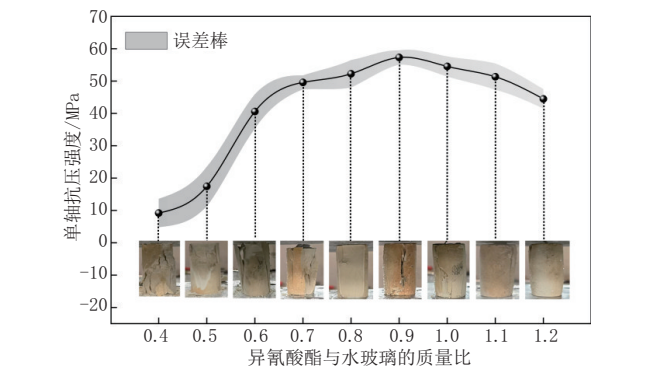


图3 异氰酸酯与水玻璃的质量比对材料强度性能的影响

为0.9时)下的材料性能,与既有文献中的纯聚氨酯注浆材料<sup>[6]</sup>及普通水泥基注浆材料<sup>[2,4]</sup>进行对比。纯聚氨酯注浆材料的凝胶时间极短(<30 s),但反应温度高(>150 ℃),且经济成本较高。水泥基材料虽然经济成本低,但凝胶时间长达数小时,且其抗压强度通常低于30 MPa。本文中的复合材料,在异氰酸酯与水玻璃的质量比为0.9时,其凝胶时间约为332 s,

抗压强度达到 57.3 MPa,反应温度可控(约为 110 ℃),兼具快速固化与高强度的特点,综合性能优于单一类型的材料,特别适用于隧道动水工况下的快速堵漏与围岩加固。

### 3 机理分析

本文采用 1 000 倍率电子显微镜,观察复合注浆材料的微观结构,结果如图 4 所示,其中异氰酸酯与水玻璃的质量比分别为 0.2、0.4、0.6 和 0.8。

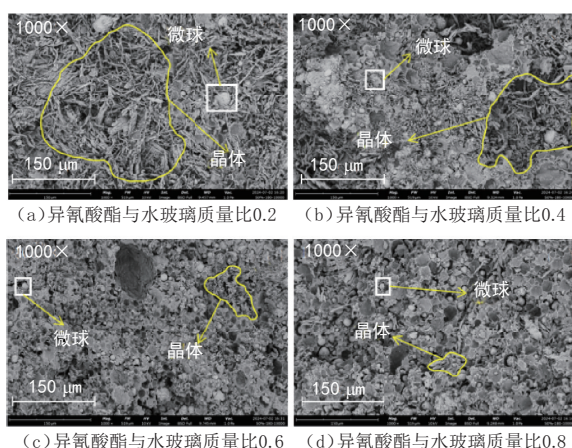


图 4 1 000 倍率电子显微镜图像

(1)当异氰酸酯与水玻璃的质量比小于 0.4 时,可观察到大量的硅酸盐晶体,但微球数量稀少。随着质量比增大,硅酸盐晶体的覆盖率降低 60%,微球的密度增加 6~8 倍。

(2)当异氰酸酯与水玻璃的质量比过低时,2 组分内部的交联反应严重不足,导致硅酸盐晶体呈现束状分布,难以生成硅酸盐微球。

(3)当异氰酸酯与水玻璃的质量比达到 0.6~0.9 时,异氰酸酯的水合反应可提供充足的二氧化碳,将水玻璃转化为硅酸,从而生成大量的硅酸盐微球。

(4)当异氰酸酯与水玻璃的质量比未达最优时,聚氨酯基体中出现细长、断裂且分布不均的硅酸盐晶体。而与之相反的是,基体中嵌入的硅酸盐微球,结构致密且排列规整。这是导致复合材料强度急剧衰减(80%~90%)的根本原因。

为进一步明确硅酸盐微球的化学组成,本文对异氰酸酯与水玻璃质量比为 0.8 的样品进行能量色散光谱分析。图 5 为能量色散光谱分析测点,表 4 和表 5 分别汇总了每个测量点主要元素的质量百分比和原子序数百分比。

测量点 1(微球)呈现高浓度的 O、Na 和 Si 元素,表明其成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{NaSiO}_3$  和硅酸。

测量点 2(晶体)以 C、O、Na 和 Si 元素为主,表明

其成分主要为  $\text{NaSiO}_3$  和  $\text{NaCO}_3$ 。

测量点 3(平面区域)和 4(凹陷处)主要含 C、N、O 和 Na 元素,并含微量 Si 元素,符合聚氨酯基质含少量  $\text{NaSiO}_3$  的特征。结合 SEM 图像,当异氰酸酯与水玻璃的质量比为 0.6~0.9 时,微球的粒径均匀(为 5~10  $\mu\text{m}$ )、分布密集,有效填充了聚氨酯网络,从而提升了材料的力学性能。

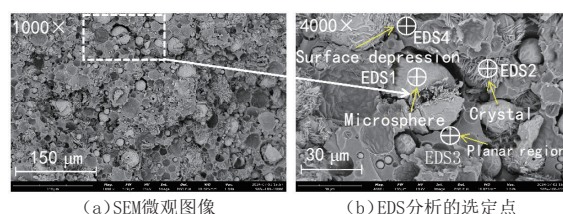


图 5 PU/WG 注浆材料样品的 SEM 微观图像

表 4 各测量点主要元素的质量百分比 单位:%

| 测量点  | C      | N      | O      | Na     | Si     |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| EDS1 | —      | —      | 48.052 | 10.190 | 41.758 |
| EDS2 | 22.927 | —      | 46.401 | 26.669 | 3.973  |
| EDS3 | 57.443 | 23.117 | 18.482 | 0.899  | —      |
| EDS4 | 54.845 | 31.868 | 11.688 | —      | 1.598  |

表 5 各测量点的原子序数百分比 单位:%

| 测点   | C      | N      | O      | Na     | Si     |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| EDS1 | —      | —      | 60.882 | 8.982  | 30.136 |
| EDS2 | 31.207 | —      | 47.463 | 18.999 | 2.331  |
| EDS3 | 62.674 | 21.678 | 15.136 | 0.512  | —      |
| EDS4 | 59.861 | 29.817 | 9.576  | —      | 0.746  |

## 4 讨论

### 4.1 当质量比小于 0.4 时,浆液难以固化的机理

当异氰酸酯与水玻璃的质量比小于 0.4 时,体系中 PAPI 的含量过低,其与水反应生成的  $\text{CO}_2$  量不足,无法将水玻璃充分转化为硅酸,并进一步缩聚形成硅酸盐微球。同时,聚氨酯预聚体生成量少,难以形成连续的有机网络包裹无机相,最终导致材料无法固化(图 4a)。如表 2 所示,当异氰酸酯与水玻璃的质量比为 0.3 时,材料浆液虽能固化,但固化时间长达 1 082 s,且抗压强度未检出,表明浆液内部的交联反应极不充分。

### 4.2 当质量比大于 1.0 时,材料抗压强度下降的机理

当异氰酸酯与水玻璃的质量比大于 1.0 时,过量的异氰酸酯会导致浆液内部的交联反应剧烈进行,在这一过程中,最高反应温度可达 120 ℃以上(见表 2),高温会导致聚氨酯发泡不均并产生微裂纹。同时,过量的 PAPI,会促使聚氨酯网络过度交联,导致固化体的脆性显著增加。此外,过量生成的  $\text{CO}_2$ ,可

能导致固化体内部形成大量气泡缺陷。从微观上看,硅酸盐微球被过度包裹,有机相与无机相的界面结合状态变差(图4d),导致材料的抗压强度下降(见表3)。这与文献<sup>[13]</sup>中关于过高异氰酸酯指数会破坏复合结构的结论一致。

#### 4.3 质量比适宜条件下,材料性能增强的机理

在异氰酸酯与水玻璃的质量比为0.6~0.9时,PAPI水解释放的CO<sub>2</sub>量适中,既能将水玻璃充分转化为硅酸盐微球(见图4c),又不会引发体系过度发泡。同时,聚氨酯网络与硅酸盐微球形成互穿网络结构,微球均匀分散,起到“颗粒增强”的作用,促使材料的抗压强度达到峰值。对材料的能量色散光谱分析证实,微球为硅酸盐,其高硬度和良好的界面结合状态是强度提升的关键。

## 5 结 论

本文通过单因素试验,系统研究异氰酸酯与水玻璃的质量比对聚氨酯/水玻璃复合注浆材料性能的影响规律,并结合微观分析,揭示其内部结构机理,得出的主要结论如下。

(1)固化性能:异氰酸酯与水玻璃的质量比会显著影响材料的凝胶时间与固化行为。当质量比小于0.4时,材料浆液难以有效固化;当质量比为0.6~0.9时,凝胶时间为330~380 s,固化时间为460~500 s,反应温度适中,为85~110 ℃,施工可操作性强。

(2)力学性能:抗压强度随质量比增大而呈现先升后降的规律,当质量比为0.9时,抗压强度达到峰值,为57.3 MPa;当质量比大于1.0时,抗压强度显著下降。因此,本文推荐最佳质量比为0.6~0.9。

(3)微观机理:适宜的异氰酸酯与水玻璃质量比,可促进异氰酸酯的水合反应,并生成足量的CO<sub>2</sub>,将水玻璃充分转化为硅酸盐微球。对材料的能量色散光谱分析证实,微球的主要成分为Si、O、Na元素;微球均匀地分散于聚氨酯基体中,并形成互穿网络结构,从而显著增强材料的力学性能。质量比过低,

则内部交联反应不充分;质量过高,则会导致结构疏松与性能劣化。

(4)工程推荐:综合施工性能、力学强度和材料经济性,本文建议将异氰酸酯与水玻璃的质量比控制在0.6~0.9,可为类似地质条件下的隧道注浆材料的配比设计与工程应用提供重要依据。

#### 参考文献:

- [1] 张庆松,刘人太,张霄,等.水泥基注浆材料在动水条件下的抗冲刷性能与机理研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1158-1167.
- [2] 侯慧敏,张吉宁,郭鑫,等.地基基础处理用高分子灌浆材料研究进展与发展趋势[J].合成材料老化与应用,2025,54(3):79-82.
- [3] 付昱光,严秋荣.有机高分子材料土体灌浆试验研究[J].工程技术研究,2022,7(22):104-106.
- [4] 姜瑜,郭飞,孔恒,等.注浆材料的现状与发展策略[J].化工新型材料,2022,50(1):282-286.
- [5] 王梦想,袁亮,薛亚东,等.聚氨酯/水玻璃复合注浆材料研发与隧道堵水加固应用[J].中国公路学报,2021,34(6):214-224.
- [6] 康志鹏,余国锋,罗勇,等.聚氨酯/水玻璃破碎岩层注浆模型试验研究[J].科学技术与工程,2025,25(8):3521-3528.
- [7] 曾志鹏,宋小艳,孙勇,等.聚氨酯/水玻璃注浆材料固化过程中的微观结构和力学性能[J].材料研究学报,2022,36(11):855-861.
- [8] 李术才,刘斌,王琦,等.改性水玻璃对聚氨酯复合注浆材料性能影响的试验研究[J].土木工程学报,2019,52(增刊1):65-71.
- [9] 张豫,柏广峰,王玉超,等.水玻璃模数对聚氨酯/水玻璃注浆材料性能的影响[J].聚氨酯工业,2021,36(6):28-31.
- [10] 汪波,何川,吴德兴,等.复杂地质隧道突涌水灾害治理技术与工程案例[M].北京:科学出版社,2020:156-180.
- [11] 徐奴文,唐春安,杨天鸿,等.异氰酸酯指数对聚氨酯/硅酸盐复合材料固化动力学与力学性能的影响[J].高分子材料科学与工程,2022,38(3):88-94;102.
- [12] 朱合华,夏才初,闫治国.隧道工程注浆技术研究现状与展望[J].现代隧道技术,2019,56(4):1-12.
- [13] 刘鹏,李克钢,秦鸿哲,等.基于SEM和EDS的聚氨酯/水玻璃复合材料微观结构与性能关联性分析[J].材料导报,2023,37(10):181-188.
- [14] 王雷雨,邵晓妹,胡靖宇,等.水玻璃改性聚氨酯灌浆材料制备与性能研究[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(6):1152-1158.
- [15] 崔亚平,沙丽荣,陈文龙.水玻璃改性聚氨酯的制备及性能研究[J].塑料科技,2021,49(5):12-15.