

文章编号:1007-9629(2024)07-0645-08

隧道衬砌背后小尺寸空洞用聚氨酯注浆材料探究

曹卓颖¹, 侯 勇², 杜 鹏², 雷 杨², 崔圣爱^{1,*}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘要:为探索适用于隧道衬砌背后小尺寸空洞的高性能注浆材料,制备了11组聚氨酯注浆材料,研究了其力学性能,提出了改进本构方程,并采用灰色关联进行综合评价.结果表明:1.16%~1.94% 催化剂、3.80%~5.60% 扩链剂可有效提高聚氨酯的力学性能;高相对分子质量多元醇的引入降低了聚氨酯的压缩强度和拉伸强度,却显著改善了其黏结强度;基于唯象模型提出的本构模型可准确表征聚氨酯的压缩变形;基于灰色关联得到聚氨酯的最佳配合比为异氰酸酯、相对分子质量为8 000 的多元醇及500 的多元醇质量比25:2:23,催化剂掺量1.16%,扩链剂掺量1.94%,此配合比下聚氨酯综合性能最佳.

关键词:隧道衬砌空洞;聚氨酯注浆材料;力学性能;本构模型;灰色关联

中图分类号:U454

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.010

Exploration of Polyurethane Grouting Materials for Small-Size Cavity behind Tunnel Lining

CAO Zhuoying¹, HOU Yong², DU Peng², LEI Yang², CUI Sheng'ai^{1,*}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Chuanjiao Road and Bridge Co., Ltd., Guanghan 618300, China)

Abstract: In order to explore high-performance grouting materials suitable for small-size cavity behind tunnel lining, 11 groups of polyurethane grouting materials were prepared, and their mechanical properties were studied. An improved constitutive equation was proposed, and the grey correlation was used for comprehensive evaluation. The results show that 1.16 %-1.94 % of catalyst and 3.80%-5.60% of chain extender can effectively improve the mechanical properties of polyurethane. The introduction of high molecular weight polyols reduces the compressive strength and tensile strength of polyurethane, but significantly improves its bonding strength. The constitutive model based on the phenomenological model can accurately characterize the compressive deformation of polyurethane. Based on the grey correlation, the optimal mix proportion of polyols, isocyanates and a relative molecular weight of 8 000 and 500 is 25:2:23, with a catalyst content of 1.16% and a chain extender content of 1.94%. Under this optimal mix ratio, the polyurethane has the best comprehensive performance.

Key words: tunnel lining cavity; polyurethane grouting material; mechanical property; constitutive model; grey correlation

随着中国经济与社会的蓬勃发展,隧道交通建设在区域社会和经济中日益重要.由于隧道运营数量增加、其所处环境复杂等,隧道病害的治理成为研究的重点,其中隧道衬砌空洞已成为隧道病害最普

收稿日期:2023-09-18;修订日期:2023-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278277);成都市科技计划项目(2021-YF05-00138-SN)

第一作者:曹卓颖(1998—),女,山西太原人,西南交通大学硕士生.E-mail:1595087474@qq.com

通讯作者:崔圣爱(1981—),女,山东费县人,西南交通大学教授,博士生导师,博士.E-mail:shengai_cui@126.com

遍的现象之一^[1].为确保隧道的安全运营,及时发现并治理隧道衬砌空洞问题变得至关重要^[2].

隧道衬砌空洞的成因复杂多样,尺寸小的空洞对于工程的稳定性非常不利,即使隧道未出现明显的结构破损,但隧道承载能力下降,并具备一定的破坏条件.注浆对于解决隧道背后的小尺寸空洞具有显著效果.常见的水泥浆注浆材料稳定性相对较差,易沉淀离析,难以进入细小裂缝及孔隙中^[3];聚氨酯弹性体类高聚物注浆材料则可以深入裂缝内部填充,相比传统的发泡型聚氨酯具有更优的力学性能和可控的凝结时间等优势^[4].然而,目前采用聚氨酯弹性体作为小尺寸空洞加固材料的研究相对较少.

本文针对隧道衬砌背后小尺寸空洞的补强,制备了新型聚氨酯注浆材料,探索了影响其力学性能的因素,提出的改进本构方程可准确表征聚氨酯注浆材料的压缩变形行为,结合灰色关联得出聚氨酯的最佳配合比.

1 试验

1.1 原材料

聚氨酯由双组分A、B液混合制备:A液为多亚甲基多苯基异氰酸酯(PAPI);B液由聚醚多元醇(PEP)及辅助剂组成.聚醚多元醇(始剂为甘油)的相对分子质量为500、8 000,辅助剂采用含33%(质量分数,文中涉及的掺量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)三乙烯二胺和67%二丙二醇的催化剂(A33),扩链剂为1,4-丁二醇(BDO).

1.2 配合比设计

设置异氰酸酯与聚醚多元醇的质量比为1:1,控制温度为 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$,制备了11组聚氨酯注浆材料,其配合比见表1(表中 $m_{8\,000}:m_{500}$ 为相对分子质量为

8 000和500 PEP的质量比; w_{A33} 为催化剂掺量; w_{BDO} 为扩链剂掺量).

1.3 测试方法

根据GB/T 2567—2021《树脂浇铸体性能试验方法》进行抗压强度^[5]和拉伸强度测试.黏结强度参照JGT 333—2011《混凝土裂缝修补灌浆材料技术条件》以及GB/T 16777—2008《建筑防水涂料试验方法》进行测试.

成型11组标准八字模试块,标准养护3 d后放置室温中24 h.除去试模表面浮粉,将搅拌至清澈的聚氨酯试剂,均匀且薄地涂抹至试块连接面.迅速连接2块砂浆块断面并压紧,竖直静止30 min后,放置室温24 h,进行八字模拉伸试验.

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

聚氨酯用于隧道衬砌背后小尺寸空洞补强时,会受到隧道围岩挤压、滑坡及车辆振动等影响而被压缩变形.承受较小的外部荷载时,材料受压发生弹性变形,荷载消除时恢复其原始状态;承受超过材料抗压强度的外部荷载时,材料发生塑性变形,内部结构被破坏,发生不可恢复的变形.因此聚氨酯的抗压强度可以作为隧道衬砌背后小尺寸空洞补强的质量指标之一.聚氨酯的压缩应力-应变曲线见图1.由图1可见,聚氨酯的压缩应力-应变曲线分为3个阶段:第1阶段(AB段),材料内部分子链之间作用力足以抵抗外界压缩应力,表现为线弹性特征,应变为7%以内;第2阶段(BC段),材料内部少数链段及分子之链间的连接开始被破坏,并发生协同运动,表现为塑性屈服特征,应变为7%~30%;第3阶段(C点之后),非线性上升阶段,应变大于30%,材料被压缩挤密导致应力上升^[6].

聚氨酯的抗压强度 f_c 和抗压弹性模量 E_c 见表2.由表2可见:(1)随着催化剂用量的增加,聚氨酯的抗压强度先增大后减小,抗压弹性模量影响不显著,这是因为催化剂A33的有效成分为叔胺类催化剂三乙烯二胺,该类催化剂可以加速异氰酸酯-聚醚多元醇体系的凝胶反应,促进聚合物相对分子质量增大,提高泡沫网络骨架强度,从而改善抗压强度;当催化剂掺量为1.16%时,抗压强度达到最大值90.16 MPa;当催化剂掺量过大时,凝胶反应速率过快,导致泡孔结构无法均匀分布,抗压强度下降;催化剂A33对材料自身性质影响较小,因此聚氨酯抗压弹性模量变化较小^[7].(2)随着扩链剂掺量的增加,聚氨酯的抗压

表1 聚氨酯的配合比
Table 1 Mix proportions of polyurethanes

Specimen	m_{A33}/g	m_{BDO}/g	$w_{A33}/\%$	$w_{BDO}/\%$	$m_{8\,000}:m_{500}$
PU-A-1	0.2	1.0	0.39	1.94	0:25
PU-A-2	0.4	1.0	0.78	1.94	0:25
PU-A-3	0.6	1.0	1.16	1.94	0:25
PU-A-4	0.8	1.0	1.54	1.94	0:25
PU-B-1	0.6	0	1.16	0	0:25
PU-B-2	0.6	2.0	1.16	3.80	0:25
PU-B-3	0.6	3.0	1.16	5.60	0:25
PU-B-4	0.6	4.0	1.16	7.33	0:25
PU-C-1	0.6	1.0	1.16	1.94	2:23
PU-C-2	0.6	1.0	1.16	1.94	4:21
PU-C-3	0.6	1.0	1.16	1.94	6:19

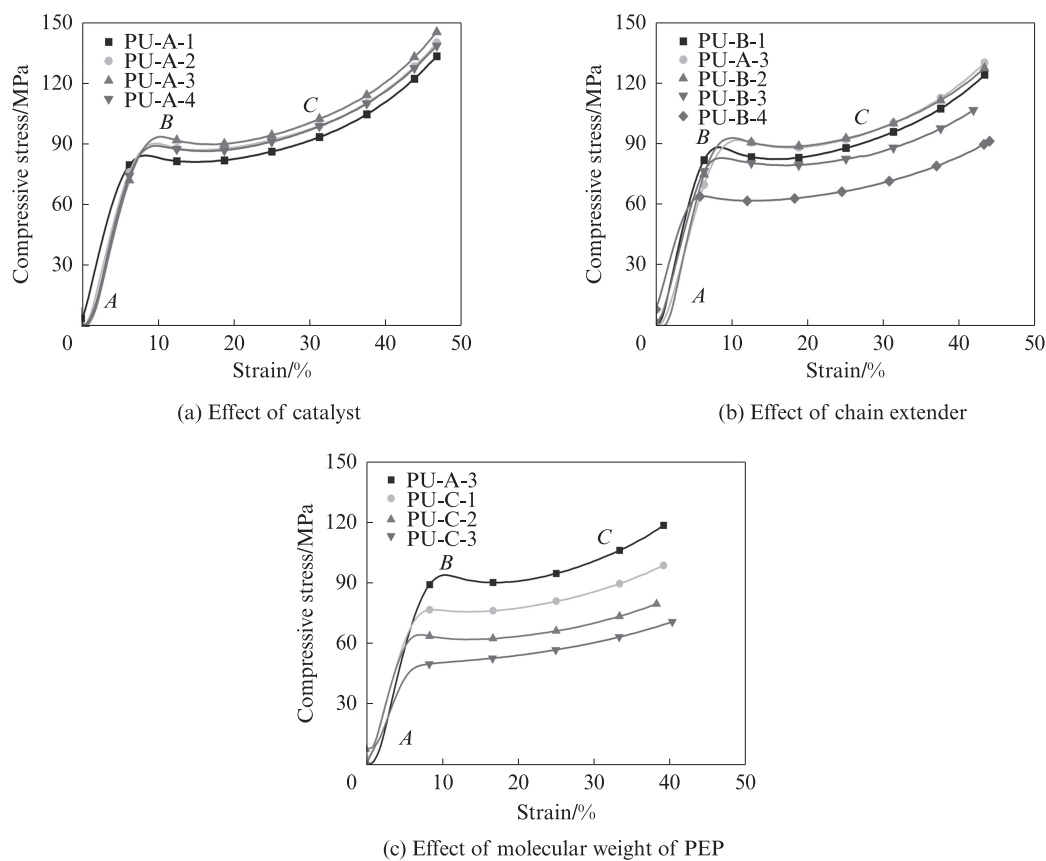


图1 聚氨酯的压缩应力-应变曲线

Fig. 1 Compressive stress-strain diagram of polyurethanes

表2 聚氨酯的抗压强度和抗压弹性模量

Table 2 Compressive strength and compressive elastic modulus of polyurethanes

Specimen	f_c /MPa	E_c /MPa	Specimen	f_c /MPa	E_c /MPa
PU-A-1	81.59	502.36	PU-B-3	76.62	454.99
PU-A-2	86.76	527.26	PU-B-4	62.02	227.62
PU-A-3	90.16	580.15	PU-C-1	75.69	488.22
PU-A-4	86.77	539.19	PU-C-2	62.31	414.21
PU-B-1	82.78	565.81	PU-C-3	50.69	345.53
PU-B-2	88.91	559.88			

强度和抗压弹性模量均先增加后减小,抗压弹性模量逐渐减小;扩链剂掺量为1.94%时,聚氨酯的抗压强度达到最大值.这是因为聚氨酯是一种由硬段和软段构成的嵌段共聚物,硬段内聚能较大,软链段有较强的挠曲作用,而扩链剂是通过改变分子链结构进而影响材料强度的,其在延长聚氨酯分子链时,增大了材料内部硬段之间的距离,提升了硬段含量及交联度,增大了硬段之间的作用力,从而使聚氨酯抗压强度增大、抗压弹性模量降低.当扩链剂用量过多时,体系中柔性结构不连贯,形成不均匀的力学网络,使整个体系承受的压力不能均匀分散到硬段上,导致抗压强度降低^[8].(3)随着高相对分子质量多元

醇掺量的增加,聚氨酯的抗压强度及抗压弹性模量明显下降.高相对分子质量多元醇掺量越大,分子链段中的软段以及醚键所占比例越高,软硬段之间的作用力越小,相分离程度越大,从而使聚氨酯抗压强度降低.醚键可改善分子链的柔顺性,容易产生更多的结晶,减小分子链之间距离,提升材料韧性,增强弯曲性能.韧性强的材料软度高,其硬度以及抗压弹性模量会相对降低^[9].

2.2 拉伸强度

聚氨酯注入小尺寸空洞后,受环境影响以及混凝土收缩性和风荷载往复循环等拉伸变形作用,影响隧道结构的稳定性.注浆材料拉伸性能的好坏影响修复工程的质量,对工程质量控制具有重要意义.聚氨酯的抗拉应力-应变曲线见图2.由图2可得聚氨酯的拉伸强度 f_t 和拉伸弹性模量 E_t ,结果见表3.由表3可见:(1)随着催化剂掺量的增加,聚氨酯的拉伸强度及拉伸弹性模量先增加后减小;当催化剂掺量为1.94%时,其拉伸强度达到最大值68.14 MPa,拉伸弹性模量为1 973.23 MPa,催化剂加速凝胶反应速率,改善孔结构,提高拉伸强度;过量的催化剂促使体系凝胶速率快于气泡成型速率,气泡分布不均匀,使拉伸强度低.(2)随着扩链剂掺

量的增加,聚氨酯的拉伸强度及拉伸弹性模量先增加后减小;当扩链剂掺量为 5.60% 时,聚氨酯的拉伸强度达到最大值 62.89 MPa,拉伸弹性模量为 2 153.19 MPa.扩链剂的碳-碳链长度适中,增强了分子链的运动能力,使软硬链段产生微区相分离,提升硬段的结晶度和定向排列性,聚氨酯在结晶阻旋作用和链段移动下,具有良好的拉伸强度.过量的

扩链剂延长了分子链长度,导致内部交联程度过大,软段占有比例较小,拉伸强度下降.(3)随着高相对分子质量多元醇掺量的增加,聚氨酯的拉伸强度先增加后减小,拉伸弹性模量减小.不同相对分子质量的多元醇可以调节聚氨酯软硬段比,高相对分子质量多元醇提升了聚氨酯软段的比例,导致其拉伸性能降低.

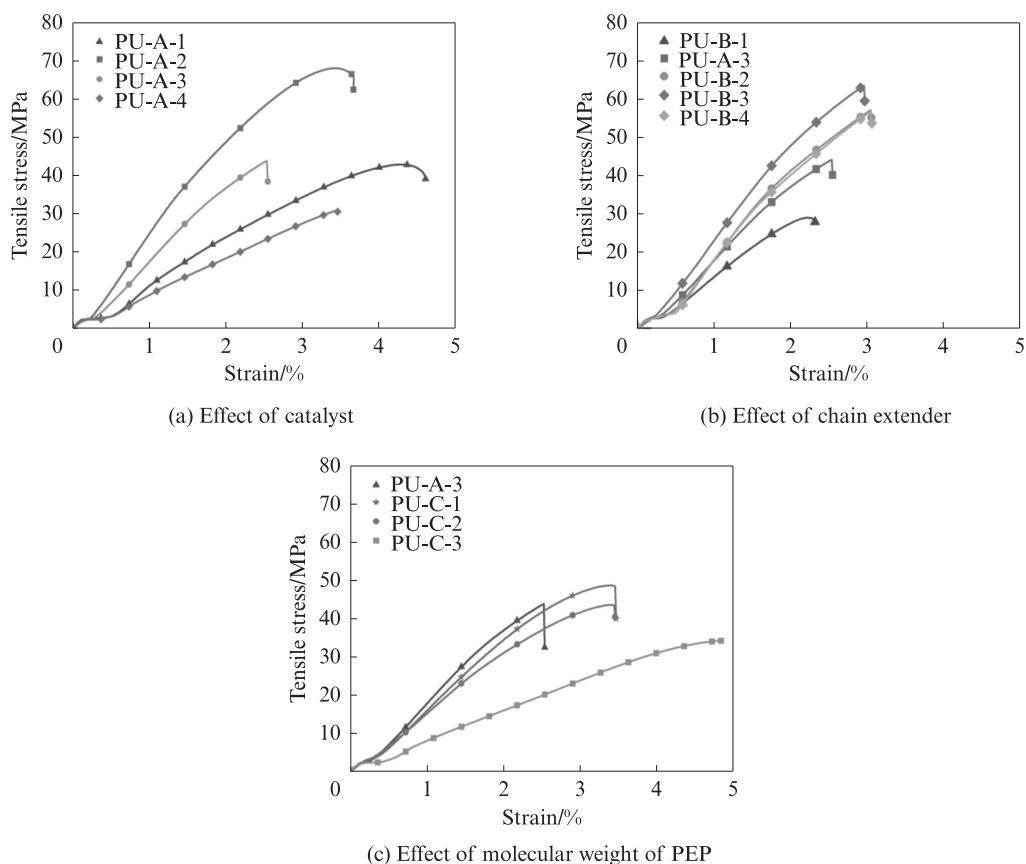


图2 聚氨酯的拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain diagram of polyurethanes

表3 聚氨酯的拉伸强度和拉伸弹性模量
Table 3 Tensile strength and tensile elastic modulus of polyurethanes

Specimen	f_t /MPa	E_t /MPa	Specimen	f_t /MPa	E_t /MPa
PU-A-1	42.98	1 296.32	PU-B-3	62.89	2 153.19
PU-A-2	68.14	1 973.23	PU-B-4	56.31	1 864.41
PU-A-3	43.99	1 738.31	PU-C-1	48.38	1 427.23
PU-A-4	30.69	889.57	PU-C-2	43.71	1 120.53
PU-B-1	28.81	1 263.36	PU-C-3	34.49	689.23
PU-B-2	56.91	1 897.52			

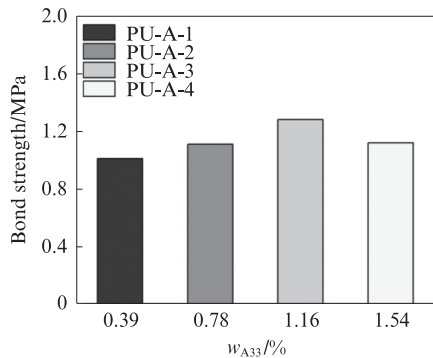
2.3 黏结强度

修补隧道衬砌背后小尺寸空洞过程中,聚氨酯被注入小尺寸空洞内发生聚合反应后,其体积迅速膨胀并固化,从而实现对空洞和裂隙的快速填充以及粘结挤密,达到修复病害的目的.聚氨酯黏结强度对实际

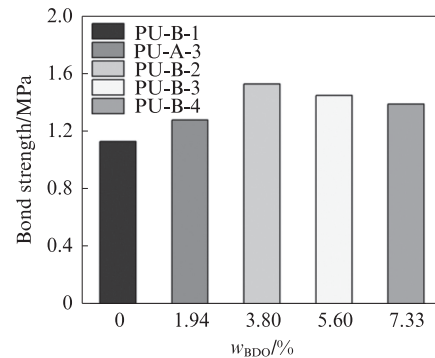
工程中修补隧道衬砌背后小尺寸空洞具有重要意义.聚氨酯的黏结强度见图3.由图3可见:(1)随着催化剂掺量的增加,聚氨酯的黏结强度先增加后减小;当催化剂掺量为 1.16% 时,其黏结强度达到最大值 1.28 MPa.这是因为催化剂通过调节凝胶反应速率来提升聚氨酯的黏结强度,过量催化剂导致体系破泡、塌泡,从而降低聚氨酯的黏结强度.(2)随着扩链剂掺量的增加,聚氨酯的黏结强度先增加后减小;当扩链剂掺量为 3.80% 时,聚氨酯的黏结强度达到最大值 1.53 MPa;扩链剂促进体系内部交联,加速体系内部形成网状结构,提高体系黏性;过量的扩链剂会影响分子链长度以及软硬段微区分离,从而降低聚氨酯的黏结强度.(3)随着高相对分子质量多元醇掺量的增加,聚氨酯的黏结强度先增加后减小.当相对分子质

量为8 000、500的多元醇质量比为4:21时,聚氨酯的黏结强度达最大值1.78 MPa.高相对分子质量多元醇结构具有规整性,提高体系中软段以及醚键的含量,

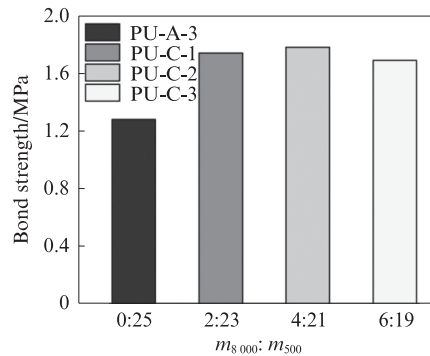
软段分子链之间更加紧密,从而提高了聚氨酯的黏结强度;过量高相对分子质量多元醇使体系黏稠度增加,导致反应不充分,从而降低了聚氨酯的黏结强度.



(a) Effect of catalyst



(b) Effect of chain extender



(c) Effect of molecular weight of PEP

图3 聚氨酯的黏结强度

Fig. 3 Bond strength of polyurethanes

2.4 本构模型

聚氨酯作为隧道衬砌背后小尺寸空洞的补强材料,具有受到外力作用下发生变形,去除外力后恢复至初始状态的高弹性特性.掌握其在变形过程中应力-应变本构关系,可以更好地确保隧道结构的稳定性,为实际工程的有限元数值模拟计算提供依据.通过对比选取参数较少且拟合准确度高的唯象本构模型,描述聚氨酯线弹性阶段以及进入屈服阶段的前段,可以评估聚氨酯注浆材料的加固效果,从而指导实际工程施工.

2.4.1 优化本构模型

结合G'Sell等^[10]的半结晶聚合物唯象本构模型(见式(1))和Matsuoka模型的玻璃态高聚物唯象本构模型^[11](见式(2)),潘旺等^[12]提出的模型见式(3).

$$\sigma_T = C_1 \exp(C_2 \epsilon_T^2) \times \epsilon_T^C \times [1 - \exp(-C_3 \epsilon_T)] \quad (1)$$

$$\sigma_T = C_1 \exp(-C_2 \epsilon_T) \times \epsilon_T \times \exp(-C_3 \epsilon_T^C) \quad (2)$$

$$\sigma_T = C_1 [1 - \exp(-C_2 \epsilon_T^C)] \times \exp(\epsilon_T^C) \quad (3)$$

式中: σ_T 为模型应力; ϵ_T 为本构应变; C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 为模型参数.

对PU-A-3的数据进行拟合,结果见图4.由图4可见:G'Sell、Matsuoka模型拟合度 R^2 分别为0.987 6、0.995 8,2条曲线刚进入屈服阶段后迅速下降,屈服平台短,与实际有偏差;而潘旺等提出的模型拟合度为0.993 2,线弹性阶段的曲线偏差较大.结合新型聚氨酯压缩应力-应变曲线的规律,提出了新本构模型:

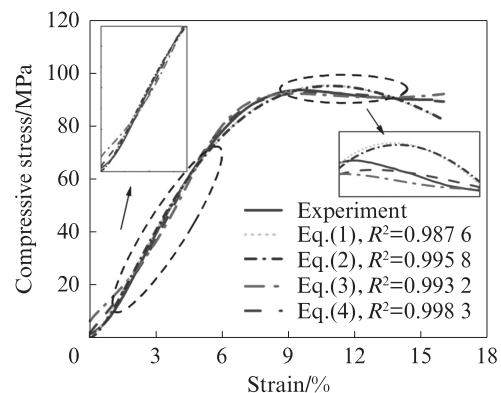


图4 模型拟合结果

Fig. 4 Model fitting results

$$\sigma_T = C_1 [1 - \exp(-C_2 \epsilon_T^{C_3})] \times [\exp(\epsilon_T^{C_4})]^3 \quad (4)$$

由图4还可见,本文提出的新本构模型的拟合度达0.998 3,精确拟合了线弹性阶段以及刚进入屈服阶段的平台。

2.4.2 本构模型的验证

为进一步验证提出的新型聚氨酯本构模型的适用性,从前文催化剂掺量、扩链剂掺量以及相对分子质量为8 000和500的多元醇质量比中分别选取1个代表性配合比聚氨酯的压缩应力-应变曲线,应用新型本构模型进行拟合,结果见图5。由图5可见:3条曲线的拟合度均在0.99以上,模型拟合度较高,能精确描述聚氨酯线弹性阶段以及屈服阶段。

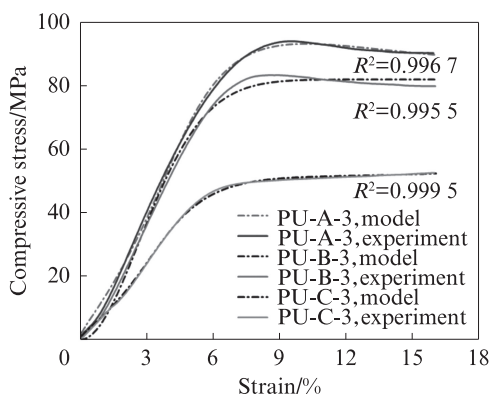


图5 新本构模型拟合聚氨酯压缩应力-应变曲线

Fig. 5 Compressive stress-strain curves of polyurethane fitted by new constitutive model

拟合参数 C_1 和 C_4 可用来描述材料第1阶段线弹性变形的变化, C_1 值由材料自身属性决定, C_4 值越大,线弹性斜率越大,聚氨酯弹性模量越大。拟合参数 C_2 和 C_3 可用来描述第2阶段刚进入屈服平台阶段聚氨酯在应变初始时短时间的黏弹性流动。忽略速率依赖性得出黏弹性项定义 $[1 - \exp(-C_2 \epsilon_T^{C_3})]$, C_2 值越小,进入屈服平台强度下降速率越缓慢,曲线越趋于平缓,屈服强度越高; C_3 值越小,进入屈服平台的抗压强度曲线下降速率越快,屈服强度越低。新本构模型表征聚氨酯压缩应力-应变的拟合参数见表4。由表4可见:PU-A-3、PU-B-3的 C_1 值相近,这是因为辅助剂对材料自身性质影响小,而PU-C-3中高相对分子量多元醇的掺量较大,降低了聚氨酯的抗压强度, C_1 值降低;PU-A-3、PU-B-3的拉伸弹性模量较高, C_4 值较小,而PU-C-3拉伸弹性模量较低, C_4 值较大;PU-A-3、PU-B-3的 C_2 和 C_3 值相近,这是因为两者只是改变了辅助剂的掺量,而辅助剂对材料力学性能改变较小;PU-C-3中增加了高相对分子量多

元醇的掺量,降低了聚氨酯的抗压强度,其 C_2 和 C_3 值相差较大。

表4 新本构模型表征聚氨酯压缩应力-应变的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of new constitutive model of compressive stress-strain of polyurethanes

Specimen	C_1	C_2	C_3	C_4
PU-A-3	3.795	0.006 06	2.874	3.24×10^{-7}
PU-B-3	4.074	0.007 75	1.897	2.34×10^{-14}
PU-C-3	0.374	59.710 00	-2.173	3.03×10^{-1}

2.5 灰色关联

灰色关联法通过确定理想最优方案的指标效果来评价向量,并计算各个方案对理想最优方案的灰色关联程度,从而得出各个线路方案的优劣程度排序。本文采用灰色关联法比较了11种配合比聚氨酯的性能,综合评判后得出其最佳配合比,从而确保隧道结构的稳定性,并指导实际工程应用。

采用Matlab的 $\text{eig}(A)$ 指令,求解矩阵的特征值和对应的特征向量。考虑各个指标之间的相对重要性,赋予其不同的权重值来反映各准则层和指标在不同配合比中的优劣性^[13]。定义检验一致性指标 C_R 为:

$$C_R = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)R_1} \quad (5)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为最大特征根; R_1 为平均随机一致性指标; n 为矩阵阶数。

聚氨酯作为隧道衬砌背后小空洞的补强材料,要求其工程性能的同时还需要保证足够的强度,故将各组材料的抗压强度、拉伸强度、拉伸弹性模量、黏结强度组合形成了 11×4 个指标参数的标准矩阵。利用层次分析法计算权重 α ,构建指标的判断矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/7 & 1/9 \\ 5 & 1 & 1/4 & 1/6 \\ 7 & 4 & 1 & 1/3 \\ 9 & 6 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

判断矩阵为4阶矩阵, R_1 取0.9,进行一致性检验得出 $C_R=0.087(\leq 0.1)$,该矩阵具有满意一致性,最终计算得到各组配合比与理想最优方案的灰色关联度向量 H 。 H 值越大,表明综合评判下该配合比越优。各组聚氨酯的灰色关联度向量见表5。由表5可见:PU-C-1组聚氨酯的灰色关联度向量值最大,其综合性能最佳。综上,聚氨酯的最佳配合比为异氰酸酯、相对分子量8 000及500的多元醇质量比25:2:23,催化剂掺量1.16%,扩链剂掺量1.94%。

表 5 各组聚氨酯的灰色关联度向量			
Table 5 Grey correlation degree vector of each group of polyurethanes			
Specimen	<i>H</i>	Specimen	<i>H</i>
PU-A-1	0.445	PU-B-3	0.733
PU-A-2	0.617	PU-B-4	0.612
PU-A-3	0.556	PU-C-1	0.783
PU-A-4	0.431	PU-C-2	0.766
PU-B-1	0.452	PU-C-3	0.601
PU-B-2	0.682		

3 结论

(1) 催化剂在提升聚氨酯力学性能上存在最优掺量:当催化剂掺量为 1.16% 时,抗压强度、黏结强度最大,分别为 90.16、1.28 MPa;当催化剂掺量为 1.94% 时,拉伸强度达到最大值 68.14 MPa,弹性模量 1 973.23 MPa。

(2) 扩链剂在提升聚氨酯力学性能时存在最优掺量:当扩链剂掺量为 1.94% 时,抗压强度达到最大值 90.16 MPa;当扩链剂掺量为 3.80% 时,黏结强度达到最大值 1.53 MPa;当扩链剂掺量为 5.60% 时,拉伸强度达到最大值 62.89 MPa,弹性模量为 2 153.19 MPa。

(3) 高相对分子质量的多元醇含量在降低聚氨酯压缩及拉伸强度的同时可以改善其黏结强度,相对分质量为 8 000、500 的多元醇质量比为 4:21 时,聚氨酯的黏结强度达到最大值 1.78 MPa。

(4) 提出的新型聚氨酯注浆材料的压缩应力-应变本构模型,拟合度在 0.99 以上,可为实际工程隧道衬砌背后小空洞补强提供科学依据。

(5) 基于灰色关联得到聚氨酯的最佳配合比为异氰酸酯、相对分子质量为 8 000 的多元醇及 500 的多元醇质量比 25:2:23,催化剂掺量 1.16%,扩链剂掺量 1.94%,此配合比下聚氨酯综合性能最佳。

参考文献:

[1] 孙博,郭成超,陈震,等.非水反应高聚物喷涂材料动力特性试验研究[J].建筑材料学报,2023,26(5):492-498.
SUN Bo, GUO Chengchao, CHEN Zhen, et al. Experimental study on dynamic properties of non-aqueous reactive polymer spraying materials [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26 (5):492-498. (in Chinese)

[2] 朱兆荣,赵守全,秦欣,等.探地雷达隧道衬砌空洞探测效果模型和现场实体试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(增刊 1):132-137.
ZHU Zhaorong, ZHAO Shouquan, QIN Xin, et al. Study on

effect model and field solid test of cavity detection in tunnel lining with GPR [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(Suppl 1):132-137. (in Chinese)

[3] HAO Y J, GUO C C, SHI M S, et al. Application of polymer split grouting technology in earthen dam: Diffusion law and applicability[J]. Construction and Building Materials, 2023, 369: 130612.

[4] 李嘉,王博,张景伟,等.高聚物注浆材料动力特性试验研究[J].建筑材料学报,2017,20(2):198-203.
LI Jia, WANG Bo, ZHANG Jingwei, et al. Experimental study on dynamic properties of polymer grouting materials [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2):198-203. (in Chinese).

[5] 余自森.不发泡型高聚物注浆材料力学特性试验研究[D].郑州:郑州大学,2020.
YU Zisen. Experimental study on mechanical properties of non-foaming polymer grouting materials [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese)

[6] 丁芳,张欢,丁明明,等.聚合物弹性体材料应力-应变关系的理论研究[J].高分子学报,2019,50(12):1357-1366.
DING Fang, ZHANG Huan, DING Mingming, et al. Theoretical study on stress-strain relationship of polymer elastomer materials [J]. Journal of Polymers, 2019, 50(12):1357-1366. (in Chinese)

[7] 徐培林,张淑琴.聚氨酯材料手册[M].2版.北京:化学工业出版社,2011:10-16.
XU Peilin, ZHANG Shuqin. Polyurethane materials manual [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 10-16. (in Chinese)

[8] 袁涌,许笑星.共聚酯二醇对叠层聚氨酯支座耐低温性能的影响[J].建筑材料学报,2023,26(7):792-799.
YUAN Yong, XU Xiaoxing. Effect of copolyether diol on low temperature resistance of laminated polyurethane bearing [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26 (7) : 792-799. (in Chinese)

[9] 刘琳,王晓俊.含阻燃特性原子多元醇对硬质聚氨酯性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(5):1011-1017.
LIU Lin, WANG Xiaojun. Effect of atomic polyols containing flame retardant properties on properties of rigid polyurethane [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24 (5) : 1011-1017. (in Chinese)

[10] G'SELL C, ALY-HELAL N A, JONAS J J. Effect of stress triaxiality on neck propagation during the tensile stretching of solid polymers [J]. Journal of Materials Science, 1983, 18: 1731-1742.

[11] BROSTOW W, FLEISSNER M, MÜLLER W F. Slow crack propagation in polyethylene: Determination and prediction [J]. Polymer, 1991, 32(3):419-425.

[12] 潘旺,夏洋洋,张超,等.新型聚氨酯弹性体注浆材料的压缩尺寸效应及应变率效应[J].材料导报,2023,37(15):273-279.
PAN Wang, XIA Yangyang, ZHANG Chao, et al. Compression size effect and strain rate effect of novel polyurethane elastomer grouting materials [J]. Materials Reports, 2023, 37(15):273-279. (in Chinese)

[13] 崔圣爱,夏戴,徐李麟,等.基于灰色关联理论的 PP-SACC 修

复材料弯曲性能研究[J/OL].西南交通大学学报, 2023:1-9
[2023-05-06]. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.
U.20230506.0858.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230506.0858.002.html).
CUI Sheng'ai, XIA Wei, XU Lilin, et al. Study on bending

properties of PP-SACC repair materials based on grey correlation
theory [J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023:
1-9 [2023-05-06]. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.
U.20230506.0858.002.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230506.0858.002.html).(in Chinese)