

不同密度高聚物注浆材料受压应力应变本构模型研究

龚泰龙¹ 刘洋¹ 李翔¹ 张林波²

1 中交一公局集团有限公司重庆运营区域总部, 重庆, 404699;

2 重庆锦程工程咨询有限公司, 重庆, 401121;

摘要: 道路沉降严重影响行车平顺性及行车安全, 如何快速有效处治道路病害, 最大限度降低对道路通行的影响是道路运营阶段亟待解决的重要问题。高聚物注浆非开挖沉降修复技术利用注浆材料混合后迅速膨胀固化的特点, 能达到快速填充脱空、顶升结构、修复沉降的目的。对于修复后道路而言, 高聚物的受压应力应变本构模型是准确模拟道路动力响应的重要条件。基于此, 本文探讨了不同密度高聚物注浆材料在单轴压力作用下的破坏过程, 通过开展不同密度的高聚物单轴压缩试验, 得到了高聚物弹性模量、屈服强度、屈服应变与受压应力应变曲线随高聚物密度的变化规律, 并提出了高聚物注浆材料在单轴压力作用下的应力应变本构模型, 结果表明预测值与实验数据吻合良好。

关键词: 高聚物; 密度; 应力应变曲线; 单轴压缩

DOI: 10.69979/3029-2727.24.06.007

引言

随着我国经济建设的快速增长, 近些年道路工程基础设施建设迅猛发展, 截至2022年底, 我国已建成公路总里程为535.5万公里(其中高速公路通车总里程达17.7万公里), 公路总里程位居世界前列。当前投入运营道路, 针对深层病害引起的沉降等缺陷问题, 由于缺乏有效的处治技术, 在病害的初期一般不进行处理, 任其发展。待病害发展到一定程度进行罩面或加铺。等到病害严重后, 再采取进一步方式处治, 进入局部甚至全面大修状态。据不完全统计, 我国目前已建成公路, 每年至少有10%因道路病害问题进入局部甚至全面大修状态, 运营维护造价非常高。受交通车流量大、重载车辆通行频繁等因素影响, 随着运营时间推移, 路面及下方路基深层结构, 逐步产生一定裂缝、变形甚至损坏, 在桥头、涵顶等与路基搭接处, 局部跳车现象较为明显, 较大地影响了行车平顺性, 若处理不当将进一步对行车安全造成一定隐患, 同时降低道路、桥梁结构的使用寿命, 增加养护维修费用^[1-7]。

高聚物注浆技术是一种基于聚氨酯注浆材料的非开挖道路沉降快速修复新技术。根据工程病害特征, 将固定比例的异氰酸酯、多元醇充分混合后灌入待修复区, 利用浆液发生聚合反应后快速膨胀固化, 实现填充空隙、挤密土体、修复沉降的目的, 聚合反应不需要水的参与, 既适用于无水环境, 又适用于富水条件。近年来, 该技术被广泛应用于道路沉降、排水管道脱空、渗漏修复中^[8-14]。

近些年, 针对不同材料抗压性能的研究主要集中在

水泥砂浆, 各类混凝土(地聚物混凝土, RAC-RCBA, 橡胶混凝土等)^[15-17]方面。雷建华等通过引入温度特征参数, 同时结合试验结果, 提出温度影响下改性聚氨酯混凝土材料的单轴受压本构模型^[18]。薛刚等通过开展橡胶混凝土材料单轴压缩试验和仿真模拟, 研究结果表明了砂浆与橡胶颗粒的界面区很大程度上影响着橡胶混凝土材料的抗压强度及其破坏过程^[19], 此外, 目前许多研究已经研究了压缩应力-应变关系, 例如, Gibson^[20]使用微力学模型来描述聚合物泡沫在压缩载荷下的变形。Keivan等人^[21]和Kim等人^[22]研究了加载速率对压缩响应的影响, 并提出了本构模型来模拟泡沫材料的硬化和软化行为。Rusch等人^[23]和Avalle等人^[24]使用两个分量描述了压缩应力随应变的变化: 第一个分量用于描述弹性和塑性阶段, 第二个分量用于描述致密化阶段。刘等人^[25]应用扫描电子显微镜(SEM)研究了聚合物微结构在不同加载阶段的变化。虽然, 现有研究对高聚物的受压应力应变本构模型有了初步探讨, 但是现有模型大多集中于受压曲线的上升段, 对于不同密度高聚物受压应力应变全曲线模型的研究仍不完善。

基于此, 本文开展了不同密度高聚物单轴受压试验, 分析了高聚物弹性模量、屈服强度、屈服应变及受压应力应变曲线随高聚物密度的变化规律, 提出了高聚物注浆材料受压应力应变本构模型, 研究成果可为注浆修复后道路受力变形分析提供重要条件。

1 聚氨酯注浆材料抗压试验

1.1 试件制备流程

试件的密度是控制初始注浆混合溶液注浆量的不同而有所变化,设计的试件密度范围在0.155 g/cm³至0.823 g/cm³之间。为便于准确测定抗压强度,参考检测砂浆强度时边长为70.7 mm的立方体的标准尺寸,最终确定采用70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的聚氨酯注浆材料试件尺寸。按照1:1的质量比,将万华化学集团有限公司生产的异氰酸酯和多异氰酸酯,即将多元醇和添加剂进行精确计量。随后,使用搅拌设备将这两种材料充分混合,确保混合均匀,为后续步骤奠定坚实基础。在注浆前,将钢制模具预先放置在注浆设备旁,以便快速操作。接着,使用注浆枪将混合好的温度为95℃的聚氨酯注浆材料迅速注入尺寸为10 cm×10 cm×10 cm的正方体钢制模具中。注浆完成后,迅速封住注浆口,确保材料在模具中充分反应和固化。注浆后的试件需要在模具中进行充分的冷却和固化。严格控制冷却时间,确保材料完全硬化。待试件冷却并硬化完成后,小心地将试件从钢制模具中取出,确保试件完整性不受损伤。脱模后,使用专业切割工具将试件切割成尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的立方体。随后,对所有切割好的试件进行筛选,根据密度大小进行排序,并仔细检查试件是否有损伤或缺陷。对于损伤的试件,及时记录并重新制作,以确保后续实验的准确性。

1.2 试验仪器

单轴压缩试验通过单轴流变试验机进行,功率3 kW,由加压钢板,压力传感器,液压控制系统,计算机显示系统等组成,其中力传感器规格为300 kN。试验过程中,首先将试件平稳地放置在测压装置的下压力板上。随后,缓慢调整上压力板的位置,直至其即将触及试件的顶部,此时完成调整工作。为保证单轴压缩设备量程允许范围之内,能够直接获得荷载-位移曲线,借助计算机控制系统选用0.1 mm/min的加载速率,启动加压系统。

2 结果分析

2.1 应力应变曲线

试验所记录不同密度聚氨酯注浆材料试件在单轴压缩下的荷载经公式(1)对试件的抗压强度做出计算,得到对应的应力-应变曲线:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中:

P—抗压强度 (MPa);

F—荷载 (kN);

A—试件表面积 (mm²);

图1为低密度聚氨酯注浆材料试件在单轴压缩作用

下的应力-应变曲线。初始受力阶段,曲线近似直线上升,随后逐渐增大直至屈服点,随后进入抗压强度稳定但应变持续增大的水平屈服阶段,且该阶段持续时间较长。当材料密度低于0.203 g/cm³时,屈服阶段的抗压强度几乎保持不变,然后当应变超过限值时,试件表现出应变硬化现象,受压应力迅速增加。当聚氨酯注浆材料密度从0.203 g/cm³逐渐上升至0.374 g/cm³时,应变硬化现象出现得更早。

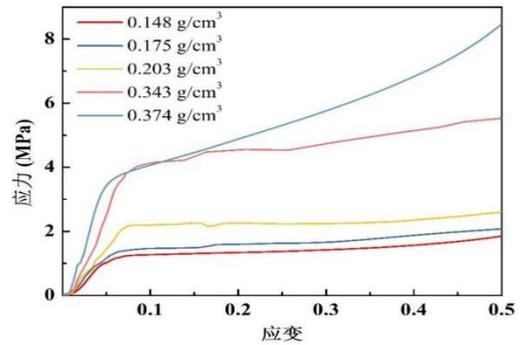


图1 低聚氨酯注浆材料的应力-应变曲线关系

图2为高密度聚氨酯注浆材料试件在单轴压缩作用下的应力-应变曲线变化特性。当聚氨酯注浆材料密度超过0.374 g/cm³时,如图所示,试件在达到峰值载荷前的快速上升阶段呈现出脆性特征,表面出现大量劈裂缝隙,随后强度随应变的增大而逐渐降低。实验观察发现,低密度试件在加载初期无明显宏观裂纹,但四周出现大量褶皱。随着密度进一步上升,褶皱数量增长缓慢,横向变形也趋于平缓,试件中部逐渐出现宏观裂纹。特别地,当材料密度处于0.343 g/cm³至0.399 g/cm³范围内时,试件的屈服现象几乎不可见。而当密度超过0.399 g/cm³时,试件在达到屈服强度后迅速崩裂,表现出明显的准脆性特征,且抗压强度随应变增大而下降。综上所述,聚氨酯注浆材料试件的力学特性与密度密切相关。聚氨酯注浆材料试件在密度高于0.399 g/cm³时表现出脆性特征,而在密度低于0.399 g/cm³时则展现出弹塑性特征。

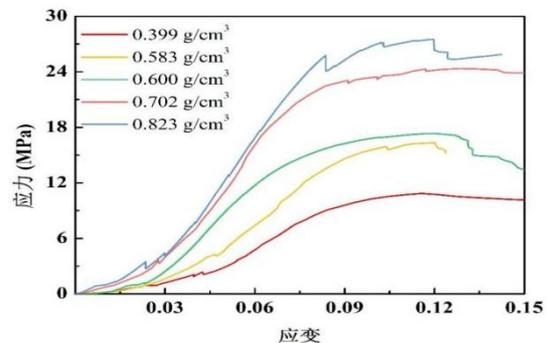


图2 高聚氨酯注浆材料的应力-应变曲线关系

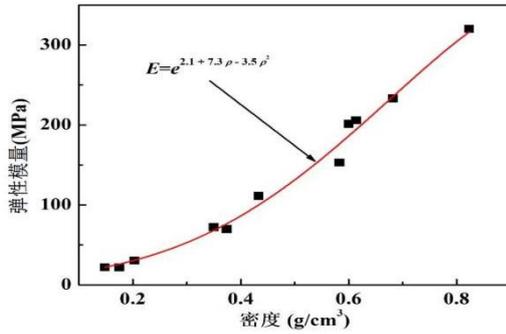


图3 弹性模量与密度的关系

聚氨酯注浆材料的应力-应变曲线上上升阶段的斜率随着密度的增加而增大，揭示了其弹性模量（上升阶段的斜率）与密度之间的关系。根据图4的曲线，可以清晰地看到聚氨酯注浆材料的弹性模量与其密度之间存在着明显的正相关关系，即随着密度的提升，弹性模量显著增大。具体而言看最小与最大密度情况，当材料密度达到0.148 g/cm³时，其弹性模量为21.97 MPa；而当密度升至0.823 g/cm³时，弹性模量则跃升至300.96 MPa，这一数值是低密度状态下的13.7倍。由此可见，聚氨酯注浆材料的弹性模量随着密度的增加呈现出了显著的上升趋势。

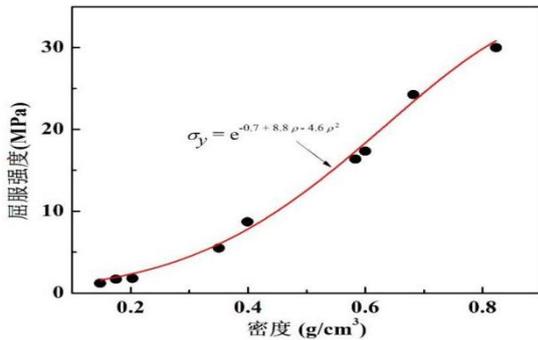


图4 屈服强度与密度的关系

图4为高聚物注浆材料密度与其屈服强度之间的关系。由图可知，屈服强度同样随着密度的增大而增大，这表明随着密度的增加，材料的力学性能也在逐步提升。

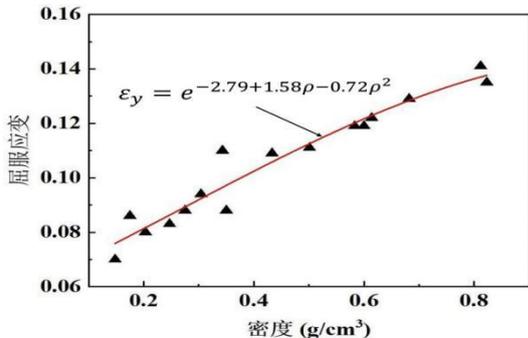


图5 屈服应变与密度的关系

图5为密度与屈服应变之间的关系。当聚氨酯注浆材料的密度低于0.374 g/cm³时，屈服强度 σ_y 所对应

的应变大部分小于0.1，材料形态变化不大。然而，随着密度的增加，当密度超过0.399 g/cm³时，屈服应变值开始大于0.1，此时试件在形态上发生了显著的变化。尽管实验结果存在一定的离散性，但屈服应变仍然是密度的增函数。此外，图7还反映出密度-屈服应变曲线的增速逐渐减小，这意味着在增加相同密度的情况下，低密度试件的屈服应变增加量大于高密度试件，这是因为低密度试件在力学性能上的提升空间更大。

3 本构模型

目前，描述低密度聚合物材料抗压强度与应变关系的模型主要有Gibson模型、Avalle模型和积分模型等几种较为成熟的模型。然而，这些模型在探讨高密度聚氨酯注浆材料的影响方面存在局限性，尚未充分考虑到其特性。通过观察图6，可知，随着密度的增加，聚氨酯注浆材料的弹性模量、屈服强度以及屈服强度处的应变值均呈现上升趋势。这进一步说明，简单使用直线来描述和评估不同密度的聚氨酯注浆材料的压缩响应是不够准确的。因此，对于高密度聚氨酯注浆材料，需要探索更为精确和适用的模型来更好地理解和预测其力学行为。

低密度情况下的聚氨酯注浆材料在单轴压缩过程中易产生形变，发生弹塑性变形，其应力-应变曲线如图6所示。

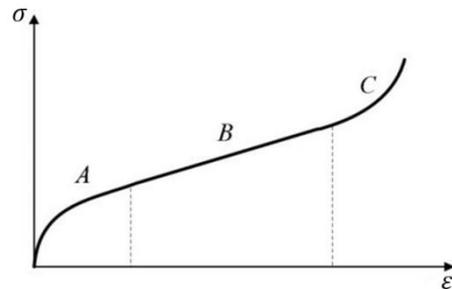


图6 低密度聚氨酯注浆材料应力-应变曲线示意图

单轴压缩试验过程中低密度聚氨酯材料试件的破坏现象，在试验过程中聚氨酯材料试件逐渐受荷载作用压缩密实，内部泡孔被挤压或者被破坏导致微裂缝产生，随后自身材料硬度先接近线性增长到达屈服点，过后有一水平段，过程中微裂缝继续扩展，强度继续递增，达到临界密实强度，最终形成破坏裂缝，破坏类型表现为均匀破坏。对于低密度聚氨酯材料的应力-应变曲线关系，选用双曲-幂函数公式表达：

$$\sigma = \frac{A(\epsilon)^D}{B + (\epsilon)^D} \quad (2)$$

式中：

σ —应力；

ϵ —应变；

A、B、D—常数；

借用该公式描述低密度情况下的高聚物注浆材料的应力-应变关系，结合双曲线函数和幂函数的特性，函数式中的常数通过实验数据拟合，最终得到关于低密度情况下的高聚物注浆材料的应力-应变关系的双曲-幂函数式：

$$\begin{cases} \sigma = \frac{300(\varepsilon - \varepsilon_0)^{0.6}}{(10 + (\varepsilon - \varepsilon_0)^{0.6})^C} \\ C = -0.32\rho^2 + 0.234\rho - 0.0226 \end{cases} \quad (3)$$

式中：

ε_0 —应变的参考点；

C—聚氨酯密度相关的常数；

ρ —聚氨酯材料试件密度；

高聚物注浆材料与混凝土试件均在实验压缩过程中，到达峰值载荷前的陡峭上升区时，材料试件上出现了大量劈裂缝隙，发生局部破坏，之后强度随应变的增大而陡然下降。

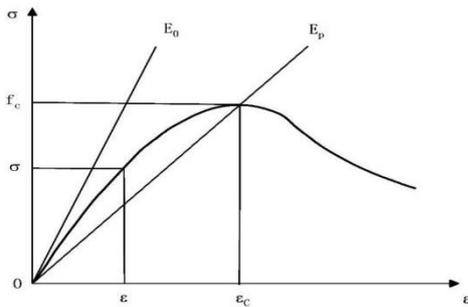


图7 混凝土单轴受压的应力-应变曲线图

当高聚物密度到达一定量值时(密度大于 0.399 g/cm³)，聚氨酯注浆材料的应力-应变曲线与混凝土压缩试验下的应力-应变曲线类似，从密度等于 0.501 g/cm³ 试件曲线开始，破坏过程类似于准脆性材料。如图7所示，采用了 Sargin 单轴受压方程：

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{-A \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} + (D-1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^2}{1 - (A-2) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} + D \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^2} \quad (4)$$

式中：

σ —应力；

f_c —峰值抗压强度；

ε —应变；

ε_c —峰值应变；

A、D—材料参数与常数；

材料参数 $A = E_0/E_p$ 由初始弹性模型比上割线弹性模量取得，D 的值由通过实验数据拟合得到，是与高聚物材料密度相关的常数。最后将高密度下高聚物注浆材料的单轴压缩实验数据整合，就可以得到高密度下聚氨

酯注浆材料的应力-应变关系。

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\left(A \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - (D-1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^2 \right) f_c}{1 - (A-2) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} + D \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^2} \\ D = -15.98\rho^2 + 22.7\rho - 6.56 \end{cases} \quad (5)$$

因此，通过公式(3)与公式(5)可以得到聚氨酯注浆材料的应力-应变曲线关系，根据其实验数据，拟合确定公式中的常数值，结合材料参数值，借助 origin 软件将其拟合结果与实验结果对比，如下图8所示。

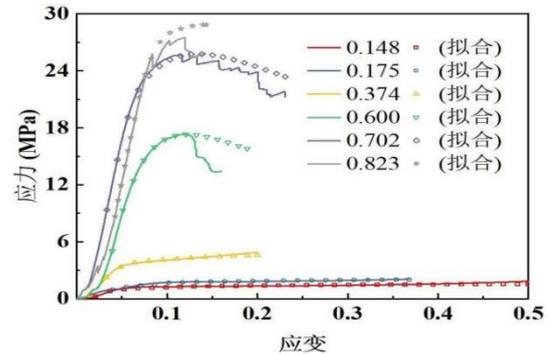


图8 高聚物的理论与实验应力-应变曲线图

4 结论

本文通过对不同密度高聚物单轴压缩响应分析，主要得到以下结论：

(1) 高聚物注浆材料的弹性模量、屈服强度和屈服应变均与密度成正相关。其中弹性模量与屈服强度随着密度的增加呈现出显著的上升趋势，当密度大于 0.399 g/cm³ 后的增长率进一步提升。在试件密度较小时，密度增减相同之间的屈服应变变化量更大，这是因为低密度试件更易被挤压密实。

(2) 当高聚物密度较低时(密度小于 0.399 g/cm³)，材料表现出塑性特征，应力-应变曲线分为线性上升阶段和屈服阶段。当高聚物密度较大时(密度大于 0.399 g/cm³)，注浆材料表现出准脆性特征，应力-应变曲线先线性上升，到达峰值后陡然下降，内部出现较大的裂纹，最终裂纹突然扩展导致破碎。

(3) 根据不同密度高聚物应力应变曲线特征及特征参数，本文提出的高聚物注浆材料单轴压缩应力应变本构模型能较好模拟不同密度高聚物单轴压缩全应力应变曲线。

参考文献

- [1] 李会安. 非开挖式地聚合物注浆技术研究与应用[D]. 2015.
- [2] 马雪, 王复明, 郭成超, 张继春. 聚氨酯高聚物隧道

- 注浆材料抗剪强度试验研究[J]. 交通科技, 2020(06): 93-96.
- [3] 祝争艳, 周文, 刘海婷, 詹从明. 半刚性基层裂缝注浆材料性能及其机理研究[J]. 公路工程, 2020, 45(06): 185-189.
- [4] 王安辉, 丁选明, 章定文. 在役高速公路软基不均匀沉降病害注浆处治技术[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(02): 397-403.
- [5] 张磊, 问鹏辉, 王朝辉, 狄升贯, 殷卫永. 道路非开挖注浆加固补强材料研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(21): 98-105.
- [6] 黄瑞, 胡晓勇. 公路隧道衬砌病害原因分析及处治方法的探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(05): 30-32.
- [7] 张森. 公路隧道结构破损原因及加固效果分析[D]. 贵州大学, 2015.
- [8] Wisconsin Department of Transportation. Evaluation of The URETEK Method of Pavement Lifting[R]. 2007.
- [9] SHI Mingsheng, WANG Fuming, LUO Jing. Experimental Research on Compressive Strength of Polymer Grouting Material under Different Temperatures[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2010, 25(6): 962-965.
- [10] University of Hanover, Germany. Technical Information about Uretek Chemical Resistance to Aging[R]. 2009.
- [11] Buzzi O, Fityus S, Sasaki Y, et al. Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil[J]. Mechanics of Materials, 2008, (40): 1012-1021.
- [12] 王复明. 大坝技术及长效性能研究进展[C], 北京, 中国水利水电出版社, 2011, 381-385.
- [13] URETEK Technical Staff in collaboration with Padua University IMAGE Department. Technical notes and laboratory test results on the latest generation of the Uretek Geoplus expanding resin[R]. 2004.
- [14] 石明生, 王复明, 刘恒, 等. 堤坝高聚物定向劈裂注浆试验与有限元模拟[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 1087-1092.
- [15] Shen Y, Wang Y, Yang Y, Sun Q, Luo T, Zhang H. Influence of surface roughness and hydrophilicity on bonding strength of concrete-rock interface[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 156-166.
- [16] Li B, Lam E. Influence of interfacial characteristics on the shear bond behavior between concrete and ferrocement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 462-469.
- [17] Shi J, Zhu H, Wu Z, Wu G. Experimental study of the strain rate effect of FRP sheet-concrete interface[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (12): 99-107.
- [18] 雷建华, 徐斌, 何旭辉. 改性聚氨酯混凝土受压性能及本构关系研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022.
- [19] 薛刚, 孙立所, 侯玮华, 董伟. 橡胶混凝土抗折强度及细观破坏机理研究[J]. 混凝土, 2021, (07), 48-52.
- [20] L. J. Gibson, M. F. Ashby, Cellular Solids: Structures and Properties, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [21] K. H. Safari, J. Zamani, F. J. Ferreira, R. M. Guedes, Constitutive modeling of polycarbonate during high strain rate deformation, Polym. Eng. Sci. 53 (4) (2012) 752 - 761.
- [22] T. R. Kim, J. K. Shin, T. S. Goh, H. S. Kim, J. S. Lee, C. S. Lee, Modeling of elastoviscoplastic behavior for polyurethane foam under various strain rates and temperatures, Compos. Struct. 180 (2017) 686 - 695.
- [23] K. C. Rusch, Load-compression behavior of brittle foams, J. Appl. Polym. Sci. 14 (1970) 1263 - 1276.
- [24] M. Avallè, G. Belingardi, A. Ibba, Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests, Int. J. Impact Eng. 34 (2007) 3-27.
- [25] K. Liu, W. Liang, F. Ren, J. Ren, F. Wang, H. Ding, The study on compressive mechanical properties of rigid polyurethane grout materials with different densities, Constr. Build. Mater. 206 (2019) 270-278.