

囊式分子弹簧隔振器力学性能分析*

金 阳, 陈卫东, 陈 前, 滕汉东

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 结合囊体变形分析和水分子侵入疏水微孔的过程,建立了囊式分子弹簧隔振器的力学模型,推导了隔振器受力过程的力-位移关系,采用准静态试验验证了力学模型,并通过仿真和试验分析了隔振器性能的影响因素。结果表明:理论与试验结果一致性较好;囊式分子弹簧隔振器表现出高-低-高的分段刚度特性,且阶段 II 刚度较阶段 I 有极大降低;微观层面的孔径、接触角、孔容积以及宏观层面的材料用量和氯化钠溶液浓度等参数均会对隔振器阶段 II 产生影响,调整这些参数可以灵活调节隔振器性能,适应不同的工程需求。

关键词 囊式;分子弹簧;分段刚度;隔振

中图分类号 TB535

1 问题的引出

气囊隔振器是一种优良的隔振原件,其固有频率低,广泛应用于商用汽车、轨道车辆及船舶等领域^[1];但是其工作压力不高,且存在慢撒气,一般需要配置气压监测设备和充气装置,尺寸较大,难以满足重载隔振领域对尺寸的要求。为了更好地应用于重载领域,隔振器需要提高内压,减小尺寸。高压下空气体积的压缩比例大,慢撒气问题更加突出,而分子弹簧隔振器作为一种新型隔振器,其采用液固混合物为工作介质,相较于空气,有效降低了泄漏风险,且同时具有高-低-高的分段刚度特性,特别适用于重载隔振领域^[2-4]。

笔者参考空气弹簧的结构,设计了一种囊式分子弹簧隔振器,如图 1 所示。首先,假设囊体母线长度不变,分析隔振器囊体受压缩的变形过程,以

Laplace-Washburn 方程^[5]为基础推导水大量侵入微孔的过程,结合两者得到囊式分子弹簧隔振器的力-位移关系;其次,仿真分析不同材料的囊式分子弹簧隔振器力学性能;最后,试验测试囊式分子弹簧隔振器的准静态特性,通过对比试验和理论结果验证本研究理论的准确性,同时通过试验分析部分宏观因素对隔振器力学性能的影响。

2 囊式分子弹簧隔振器建模

2.1 囊体变形过程

图 2 为囊式分子弹簧隔振器变形剖面图,为了对相关参数进行标注,分子弹簧混合介质没有在右半部分表示。

在内压 p 的作用下,囊式分子弹簧隔振器的承载能力为

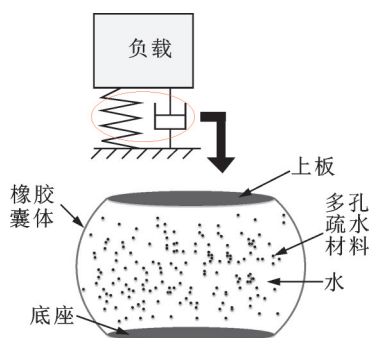


图 1 囊式分子弹簧隔振器示意图

Fig.1 Schematic diagram of bag-type molecular spring isolator

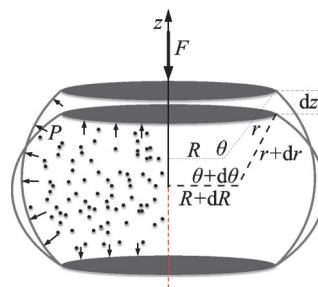


图 2 囊式分子弹簧隔振器变形剖面图

Fig.2 Deformation profile of bag-type molecular spring isolator

* 国家自然科学基金资助项目(11472127)

收稿日期:2022-08-17;修回日期:2022-09-26

$$F = pS_e \quad (1)$$

其中: S_e 为囊式分子弹簧隔振器的有效面积。

在对囊式分子弹簧隔振器加载的过程中,其囊体外形发生变化,有效面积、内部压力和囊体内工作介质的体积发生改变并达到新的平衡。假设在载荷 F 的作用下,囊式分子弹簧隔振器发生微小位移 dz , 根据虚位移原理^[6],有

$$Fdz + p dV = 0 \quad (2)$$

$$F = -p dV/dz \quad (3)$$

联立式(1)和式(3),得到隔振器有效面积为

$$S_e = -dV/dz \quad (4)$$

囊体内的体积如图 3 所示,可以采用积分计算,取微元 dz ,微元部分体积为

$$dV = \pi(R + r \cos \theta)^2 dz \quad (5)$$

囊体母线的竖直方向位置可以表示为

$$z = 2r \sin \theta \quad (6)$$

计算其微分,得到

$$dz = 2r \cos \theta d\theta \quad (7)$$

联立式(5)和式(7),得到囊体内总体积为

$$V = 2 \int_0^\theta \pi(R + r \cos \theta)^2 r \cos \theta d\theta \quad (8)$$

通过积分计算,得到囊体内的总体积为

$$V = 2\pi r \left((R^2 + r^2) \sin \theta - \frac{1}{3} r^2 \sin^3 \theta + rR\theta + \frac{1}{2} dr \sin 2\theta \right) \quad (9)$$

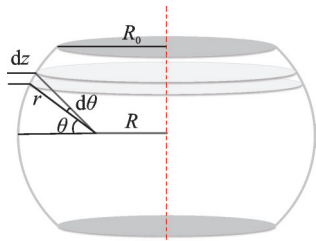


图 3 囊体体积

Fig.3 Bladder volume

囊体采用芳纶骨架,芳纶弹性模量高^[7]。假设在囊式分子弹簧隔振器工作过程中囊体母线长度 S_0 不变,囊体变形时,上盖板下移 dz ,囊体达到新的平衡,所以有

$$2r\theta = S_0 \quad (10)$$

囊体母线曲率半径为 $r = S_0/2\theta$,其与曲率中心及旋转中性轴的距离关系为

$$R_0 = R + r \cos \theta \quad (11)$$

联立式(9)~(11),可以得到囊体体积为

$$V = \frac{\pi S_0}{\theta} \left(\left(R_0 - \frac{S_0}{2\theta} \cos \theta \right)^2 + \frac{S_0^2}{4\theta^2} \right) \sin \theta -$$

$$\frac{1}{3} \frac{S_0^2}{4\theta^2} \sin^3 \theta + \frac{S_0}{2} \left(R_0 - \frac{S_0}{2\theta} \cos \theta \right) + \left(R_0 - \frac{S_0}{2\theta} \cos \theta \right) \frac{S_0}{4\theta} \sin 2\theta \quad (12)$$

联立式(6)和式(10),得到

$$z = S_0 \frac{\sin \theta}{\theta} \quad (13)$$

两端微分得到

$$dz = S_0 \frac{\theta \cos \theta - \sin \theta}{\theta^2} d\theta \quad (14)$$

有效面积 S_e 可以表达为

$$S_e = -dV/dz = -\frac{dV}{d\theta} \frac{d\theta}{dz} \quad (15)$$

囊式分子弹簧隔振器的刚度为

$$K = \frac{dF}{dz} = \frac{dp}{dz} S_e + p \frac{dS_e}{dz} = \frac{dp}{dV} \frac{dV}{dz} S_e + p \frac{dS_e}{dz} = -\frac{dp}{dV} S_e^2 + p \frac{dS_e}{dz} \quad (16)$$

$$\frac{dS_e}{dz} = \frac{dS_e}{d\theta} \frac{d\theta}{dz} \quad (17)$$

联立式(12)、式(14)和式(16),得到囊式分子弹簧隔振器的刚度表达式,式中除 dp/dV 没有确定外,其他参数均可由 θ 确定。因此,为了得到囊式分子弹簧隔振器的刚度,就需要分析囊式分子弹簧隔振器的内压与体积的关系。

2.2 工作介质宏观力学模型

图 4 为水侵入微孔受力图,水在外压强作用下侵入单条微孔的过程遵循 Laplace-Washburn 方程,纳米疏水微孔中液体界面受到的附加力为

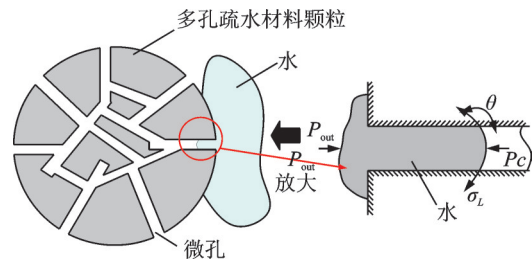


图 4 水侵入微孔受力图

Fig.4 Water intrudes into a hydrophobic pore

$$P_c = -4\sigma_L \cos \theta / d \quad (18)$$

其中: σ_L 为液体表面张力; d 为微孔直径; θ 为液固接触角^[8]。

当囊式分子弹簧隔振器被压缩时,水分子大量侵入疏水微孔,由于微孔的孔径及疏水性不尽相同,因此需要结合材料的统计学规律进行宏观力学建模。分子弹簧在加载阶段隔振器内部容积变化量与外加压强之间的关系分为 3 个阶段^[9]:阶段 I,外压

力不足以迫使水分子进入疏水微孔,但液体在外界压力下具有一定的可压缩性,随着压力的增加,液体体积变化微小;阶段Ⅱ,外界压强达到水分子进入微孔的临界压强,开始迫使水分子大量进入纳米疏水微孔,此后较小的压力增加将引起分子弹簧隔振器内部的容积大幅度减小;阶段Ⅲ,纳米疏水微孔已经完全达到饱和,水分子无法进入纳米微孔,继续加压过程中,液体在高压下的可压缩性使分子弹簧隔振器内部容积继续减小,但变化微小。

设外加压强为 P ,分子弹簧混合介质的总体积变化量为 $V(P)$ 。多孔疏水材料颗粒孔径最大值为 d_{\max} ,孔径最小值为 d_{\min} ,接触角最大值为 π ,最小值为 θ_{\min} ,多孔疏水材料质量为 m ,单位质量多孔疏水材料有效容积为 V_{pore} ,水的体积为 V_w 。 $\beta(P)$ 为水的压缩率, $q_1(d)$ 为孔径的概率密度函数, $f_1(\theta)$ 为接触角的概率密度函数,疏水材料的孔径在特定范围内服从正态分布,接触角也服从正态分布,则有

$$\beta(P) = 4.5 \times 10^{-4} (P \times 10^{-6} - 0.1) \quad (19)$$

$$q_1(d) = \frac{q(d)}{Q(d_{\max}) - Q(d_{\min})} \quad (20)$$

$$q(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta} e^{-\frac{(d-\mu)^2}{2\eta^2}} \quad (21)$$

$$Q(d) = \int_{-\infty}^d q(t) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta} \int_{-\infty}^d e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\eta^2}} dt \quad (22)$$

$$f_1(\theta) = \frac{f(\theta)}{F(\theta'_{\max}) - F(\theta'_{\min})} \quad (23)$$

$$f(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\vartheta} e^{-\frac{(\theta-\mu)^2}{2\vartheta^2}} \quad (24)$$

$$F(\theta) = \int_{-\infty}^{\theta} f(t) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\vartheta} \int_{-\infty}^{\theta} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\vartheta^2}} dt \quad (25)$$

阶段Ⅰ和阶段Ⅲ是压缩纯水的阶段,在这两个阶段的分子弹簧混合介质的体积变化量可以通过水的压缩率来计算,即

$$\Delta V(P) = V_w \beta(P) \quad (26)$$

此时囊体内的体积为

$$V = V_w (1 - \beta(P)) \quad (27)$$

阶段Ⅱ的体积变化量可通过对水分子侵入疏水微孔的体积积分来计算。采用二重积分,积分变量为孔径 d 和接触角 θ ,积分区间分别为 $[d_{\min}, d_{\max}]$ 和 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 。随着压强的变化,积分区域将发生变化,因此将阶段Ⅱ分为 3 个步骤:①当压强继续增大,水分子

开始侵入大孔径小接触角的疏水微孔;②随着压强进一步增加,在接触角小于 $\arccos(-Pd_{\min}/(4\sigma_L))$ 的微孔,水分子已经完全侵入,接触角大于 $\arccos(-Pd_{\min}/(4\sigma_L))$ 的微孔中,孔径大于 $-4\sigma_L \cos \theta'_{\min}/P$ 的微孔也已完全饱和;③继续增大压强,接触角小于 $\arccos(-Pd_{\min}/(4\sigma_L))$ 的微孔全部被水侵入,仅在较小孔径、较大接触角的微孔中有水分子进入。

侵入微孔水的体积为

$$\Delta V_1(P) = V_w \beta(P) + m V_{\text{pore}} \int_{-\frac{4\sigma \cos \theta'_{\min}}{P}}^{d_{\max}} q_1(d) dd \cdot \int_{\theta'_{\min}}^{\arccos(-\frac{Pd}{4\sigma})} f_1(\theta) d\theta \quad (28)$$

$$\Delta V_2(P) = V_w \beta(P) + m V_{\text{pore}} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} q_1(d) dd \cdot \int_{\theta'_{\min}}^{\arccos(-\frac{Pd}{4\sigma})} f_1(\theta) d\theta \quad (29)$$

$$\Delta V_3(P) = V_w \beta(P) + V_{31}(P) + V_{32}(P) \quad (30)$$

式(30)中

$$V_{31}(P) = m V_{\text{pore}} \int_{\theta'_{\min}}^{\arccos(-\frac{Pd_{\min}}{4\sigma})} f_1(\theta) d\theta \cdot \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} q_1(d) dd \quad (31)$$

$$V_{32}(P) = m V_{\text{pore}} \int_{\arccos(-\frac{Pd_{\min}}{4\sigma})}^{\theta'_{\max}} f_1(\theta) d\theta \cdot \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} q_1(d) dd \quad (32)$$

当外加压强逐渐增加到临界压强时,水已经完全侵入疏水微孔;外加压强继续增加时,疏水微孔已经饱和。由于液体的可压缩性,分子弹簧体积的变化量为

$$\Delta V(P) = V_w \beta(P) + m V_p \quad (33)$$

$$V = V_w (1 - \beta(P)) - m V_p \quad (34)$$

综合式(26)~(33),以 Laplace-Washburn 方程为基础,可以得到囊式分子弹簧在加载阶段内部体积变化量与外加压强之间的关系。其中:式(26)和式(33)分别表示纯水压缩过程中的体积改变量;式(27)~(32)表示阶段Ⅱ水分子侵入疏水微孔过程的体积改变量。

2.3 囊式分子弹簧隔振器刚度模型

根据式(27)和式(34),两端微分,得到在阶段Ⅰ和阶段Ⅲ时,囊式分子弹簧隔振器内部体积和压强的关系为

$$dV = -V_w d(\beta(P)) \quad (35)$$

$$\beta(P) = 4.5 \times 10^{-4} (P \times 10^{-6} - 0.1) = \alpha(P - c) \quad (36)$$

其中: $\alpha = 4.5 \times 10^{-10}$; $c = 10^5$ 。

代入式(35)得到

$$dV = -\alpha V_w dP \quad (37)$$

联立式(16)、式(17)和式(37),得到阶段 I 和阶段 III 的刚度为

$$K = \frac{1}{\alpha V_w} \left(\frac{\theta^2}{S_0(\theta \cos \theta - \sin \theta)} \right)^2 \left(\frac{dV}{d\theta} \right)^2 + \rho \left(\left(\frac{\theta^2}{S_0(\theta \cos \theta - \sin \theta)} \right) \frac{d^2V}{d\theta^2} + \frac{2\theta^2 \cos \theta - 2\theta \sin \theta + \theta^3 \sin \theta}{S_0^2(\theta \cos \theta - \sin \theta)^2} \frac{dV}{d\theta} \right) \cdot \frac{\theta^2}{S_0(\theta \cos \theta - \sin \theta)} \quad (38)$$

阶段 II 体积与压强关系复杂,无法用解析形式表达,所以对式(28)~(32)采用数值积分计算得到体积变化与压强的关系,再将数值计算的结果进行微分得到 dp/dV ,将相关结果代入式(16)得到囊式分子弹簧隔振器刚度表达式。

3 分子弹簧力学性能仿真

3.1 力学性能仿真

采用辛普森公式对二重积分进行数值积分计算,将表 1 中的仿真参数代入式(38)中,处理并化简后得到囊式分子弹簧隔振器理论结果,如图 5 所示。

由图 5 可知,3 种不同材料的囊式分子弹簧隔振器均表现出高-低-高的分段刚度特性:图(a)在 18 kN 左右时水分子侵入纳米疏水微孔中,21 kN 左右时疏水微孔趋于饱和,根据囊式分子弹簧隔振器这 2 个位置的有效面积,计算得到其侵入压强和饱和压强分别为 19.9 MPa 和 22.7 MPa,在曲线上取不同阶段端点计算其线性拟合刚度,分别为 2.06×10^6 , 1.3×10^5 和 2.04×10^6 N/m,在水大量侵入疏水微孔时,极大降低了隔振器刚度;图(b)在 37.2 kN

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	材 料		
	#1	#2	#3
$d_{\max}/10^{-10}$ m	9.5	7.5	4.0
$d_{\min}/10^{-10}$ m	8.5	4.5	2.0
$\mu'/10^{-10}$	9	6	3
θ_{\min}/rad	2.26	2.65	2.80
μ	2.71	2.89	2.97
m/g	70	70	70
$\eta/10^{-11}$	5	5	5
ϱ	0.5	0.5	0.5
$\sigma_L/10^{-3}$ Pa	13.9	13.9	13.9
$V_{\text{pore}}/\text{ml}$	0.31	0.31	0.31
V_w/ml	325	325	325

时水分子侵入纳米疏水微孔中,49.4 kN 时疏水微孔趋于饱和,根据囊式分子弹簧隔振器这 2 个位置的有效面积,可以得到侵入压强和饱和压强分别为 38.7 MPa 和 51.3 MPa,计算其 3 个阶段的线性拟合刚度分别为 2.05×10^6 , 3.8×10^5 和 2×10^6 N/m;图(c)在 67.6 kN 时水分子侵入纳米疏水微孔中,104.7 kN 时疏水微孔趋于饱和,根据这 2 个位置的有效面积,可以得到侵入压强和饱和压强分别为 70.1 MPa 和 108.5 MPa,计算其 3 个阶段的线性拟合刚度分别为 2.03×10^6 , 6.1×10^5 和 2.08×10^6 N/m。

3.2 影响因素分析

通过分析囊式分子弹簧隔振器的工作过程,得到了材料微观参数和宏观力学特性的关系。在其他参数不变的情况下,分别分析孔径、接触角和孔容积等参数对力学性能的影响。

采用表 1 中材料 1 参数,对孔径、接触角和孔容积进行改变后,得到分子弹簧材料不同情况下的力-位移曲线,如图 6 所示。

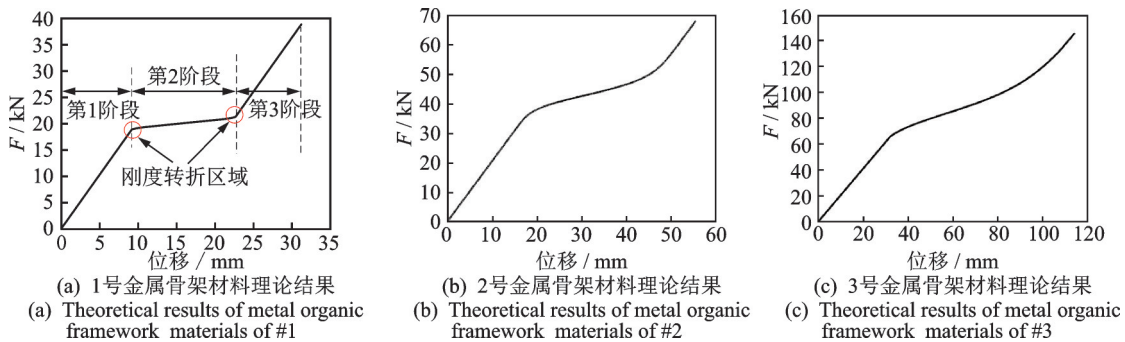


图 5 囊式分子弹簧隔振器理论结果

Fig.5 Theoretical results of bag-type molecular spring isolator

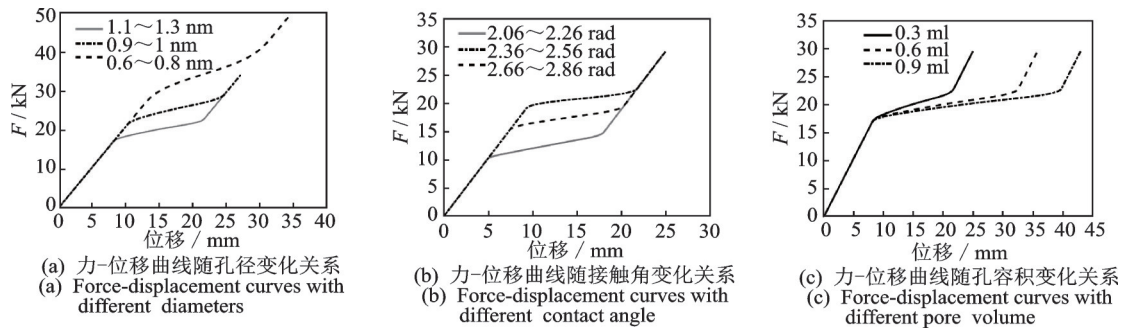


图 6 不同情况下力-位移曲线

Fig.6 Force-displacement curves with different conditions

单独改变分子弹簧材料某种参数,不影响分子弹簧隔振器的分段刚度特性,且阶段 I 和阶段 III 为压缩纯水阶段,刚度不受材料参数影响。由图 6(a) 可知,分子弹簧隔振器阶段 II 的负载随着孔径的减小而增大,因为孔径减小,侵入压强增大,所以负载增大,但阶段 II 的刚度变化不明显;由图 6(b) 可知,分子弹簧隔振器阶段 II 的负载随着接触角的增大而增大,这是由于接触角增大,材料的疏水性增强,水侵入微孔的压强增大,相对应的负载增大,阶段 II 刚度变化也不明显;由图 6(c) 可知,分子弹簧隔振器阶段 II 的负载不随材料孔容积的变化而变化,因为孔容积的变化并不影响水侵入微孔的压强,但随着材料孔容积的增大,阶段 II 刚度明显变小,这是因为材料的孔容积增大导致侵入微孔的水体积增加,隔振器在阶段 II 的行程增加,而其负载不变,故刚度降低。

通过对分子弹簧材料孔径、接触角和孔容积的调节,可以实现隔振器不同负载、不同工作刚度的调整,灵活应对工程需求。



图 7 囊式分子弹簧隔振器装置图

Fig.7 Bag-type molecular spring isolator device diagram



图 8 ZIF-8 多孔疏水材料

Fig.8 ZIF-8 porous hydrophobic materi

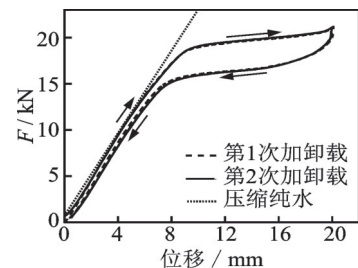


图 9 准静态试验结果

Fig.9 Quasi-static experimental result

将理论结果和试验结果进行对比,如图 10 所示。由图可知,二者几乎吻合,卸载阶段是加载阶段的逆过程。

对于选定的分子弹簧材料,微观参数无法变动,要实现分子弹簧隔振器性能的调节就需要对其宏观影响因素进行调整,下面分析分子弹簧材料量和液体表面张力的变化对分子弹簧隔振器力学性能的影响。

4 准静态试验验证

笔者设计了一种囊式分子弹簧隔振器,其装置如图 7 所示,来验证计算模型的正确性。将一定量的水和 ZIF-8 多孔疏水材料组成的分子弹簧混合介质置于隔振器的囊体中,形成囊式分子弹簧隔振器;通过疲劳试验机(MTS)进行加载和卸载,得到准静态力-位移曲线,测试方法参照 GB/T 15168—2013。图 8 为该装置所用的 ZIF-8 多孔疏水材料。

图 9 给出了囊式分子弹簧隔振器的准静态试验结果,表明分子弹簧具有明显的分段刚度特性。阶段 I 斜率较大,水分子没有侵入微孔,为压缩纯水过程;阶段 II 水分子开始大量侵入疏水微孔,曲线斜率极大降低;阶段 III 在试验结果中没有完整显现,这是因为囊式分子弹簧隔振器的设计行程不足,阶段 III 也是压缩纯水,其曲线斜率大幅增加,达到与阶段 I 相同的状态。卸载阶段是加载阶段的逆过程。前后 2 次加卸载结果几乎重合,说明囊式分子弹簧隔振器在多次加卸载后,材料的性能保持稳定。

图 11 为不同材料量的试验结果,表明阶段 II 的刚度随分子弹簧材料用量的增加而显著降低,而阶段 I 的刚度没有变化。这是因为材料量的增加会显著增加材料微孔体积,可侵入微孔的水体积增加,从而降低阶段 II 的刚度;而阶段 I 是压缩纯水阶段,不受材料用量影响。分别取点计算不同材料量下的分子弹簧隔振器的刚度可知:材料用量为 30 g 的隔振

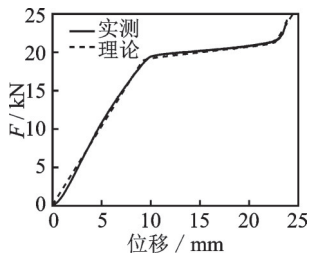


图10 试验结果与理论结果对比

Fig.10 Comparison between the experimental and theoretical results

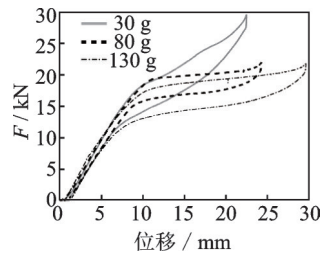


图11 不同材料量的试验结果

Fig.11 Experimental results with different material quantities

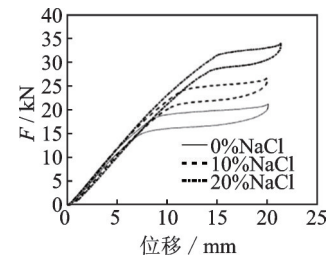


图12 不同氯化钠浓度时的试验结果

Fig.12 Experimental results with different concentrations of NaCl

器刚度为 2.18×10^6 和 7.5×10^5 N/m; 材料用量 80 g 的隔振器刚度为 2.12×10^6 和 1.12×10^5 N/m; 材料用量为 130 g 的隔振器刚度为 2.02×10^6 和 1.25×10^5 N/m。虽然材料量的增加可以有效降低分子弹簧隔振器阶段 II 的刚度, 但对于固定的隔振器而言, 能降低阶段 II 刚度的分子弹簧材料用量是有上限的, 如图 11 中 130 g 材料的隔振器阶段 II 刚度相比 80 g 材料的阶段 II 刚度不降反增, 这是因为随着材料量的增加, 分子弹簧混合介质中水的比例降低, 导致混合介质中部分分子弹簧材料无法参与工作, 所以阶段 II 的刚度没有再降低。

图 12 为不同氯化钠浓度时的试验结果, 表明分子弹簧隔振器的阶段 II 负载随着氯化钠溶液浓度的增加而增大, 刚度则无明显变化。阶段 II 的负载增加, 说明侵入压强增大, 这是由于氯化钠溶液表面张力随着浓度增加而增大; 阶段 II 的刚度无明显变化, 这是由于氯化钠溶液浓度只会影响液体表面张力, 对材料参数无影响, 所以不会改变阶段 II 的刚度。

5 结 论

1) 根据气囊隔振器和分子弹簧的特点, 设计了一种囊式分子弹簧隔振器, 通过囊体变形分析和模拟水侵入微孔的过程, 建立了囊式分子弹簧隔振器的力学模型, 准静态条件下的试验结果与理论结果有很好的—致性, 表明了本研究理论方法的合理性与有效性。

2) 囊式分子弹簧隔振器具有高—低—高的分段刚度特性, 且阶段 II 的刚度相较阶段 I 和阶段 III 有数量级上的降低, 该刚度特性使其特别适用于低频重载隔振领域。

3) 通过改变分子弹簧材料的用量和分子弹簧工作介质溶液的浓度等宏观参数, 可以实现分子弹簧隔振器性能的调节, 灵活应对工程需求。

参 考 文 献

[1] 李芾, 戚壮. 轨道车辆空气弹簧悬挂系统应用与研

究[J]. 中国铁路, 2014, (4): 42-47.

LI Fu, QI Zhuang Application and research of air spring suspension system for railway vehicles[J] China Railway, 2014, (4):42-47.(in Chinese)

[2] SOULARD M, PATARIN J, EROSHENKO V, et al. Molecular spring or bumper: a new application for hydrophobic zeolitic materials[J]. Studies in Surface Science and Catalysis, 2004, 154(4):1830-1837.

[3] YU M C, GAO X, CHEN Q. Nonlinear frequency response analysis and jump avoidance design of molecular spring isolator[J]. Journal of Mechanics, 2016, 32(5):527-538.

[4] YU M C, CHEN Q, GAO X. Theoretical and experimental investigation of molecular spring isolator[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(2):285-292.

[5] TZANIS L, TRZPIT M, SOULARD M, et al. High pressure water intrusion investigation of pure silica 1D channel AFI, MTW and TON-type zeolites[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2011, 146: 119-126.

[6] 金江, 袁继峰, 葛文璇, 等. 理论力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2019:277-299.

[7] 何琳, 吕志强, 赵应龙, 等. 高压大载荷空气弹簧: 中国, CN201013822Y[P]. 2008-01-30.

[8] 张福田. 分子界面化学基础[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2006: 348-359.

[9] 余慕春, 陈前, 高雪, 等. 分子弹簧的隔振机理与力学性能研究[J]. 力学学报, 2014, 46(4): 553-560.

YU Muchun, CHEN Qian, GAO Xue, et al Study on vibration isolation mechanism and mechanical properties of molecular springs[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46 (4) :553-560. (in Chinese)



第一作者简介: 金阳, 男, 1992年3月生, 博士生。主要研究方向为工程系统振动控制。

E-mail: Yjin_detec@nuaa.edu.cn