文章编号：1006-1355(2018)03-0167-05

PVC/$CaCO_3$复合材料的隔声及应用特性

张立平

（佛山科学技术学院 机电工程学院，广东 佛山 528225）

摘 要：针对$CaCO_3$含量不同的聚氯乙烯(PVC)复合材料在空调隔音过程中出现的一些现象和问题，对PVC复合材料的隔音量、撕裂强度和折弯性能开展试验研究，分析$CaCO_3$含量对PVC复合材料隔音及应用特性的影响，探索PVC复合材料的撕裂机理。结果表明：PVC复合材料属于各向异性材料，随$CaCO_3$含量增加，PVC复合材料的隔音量先增加后减小，撕裂强度和折弯寿命均逐渐降低，作为空调隔音材料，PVC中$CaCO_3$的含量最好控制在50 %左右；与密度相近的氯丁橡胶相比，PVC复合材料的隔音、抗撕裂和折弯性能均较好，因此完全可以替代氯丁橡胶作为空调的隔音材料，从而降低成本。在此基础上提出PVC复合材料在空调隔音应用中的割缝准则和判定其抗撕裂性能的试样类型。

关键词：声学；PVC/ $CaCO_3$复合材料；空调隔音；撕裂强度；折弯性能

中图分类号：TB535.1；TB657.2 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2018.03.032

Acoustic Insulation and Applicable Characteristics of PVC/$CaCO_3$ Composites

ZHANG Liping

(Mechanical and Electrical Engineering College Foshan University, Foshan 528225, Guangdong China)

Abstract : The acoustic insulation, tear strength and banding performance of the PVC/$CaCO_3$ composites with different content of $CaCO_3$ are studied experimentally. Influence of the content of $CaCO_3$ on the acoustic insulation and applicable characteristics of the composites is analyzed. The tearing mechanism of the composites is detected. Results show that the PVC / $CaCO_3$ composite material is anisotropic. With the increasing of $CaCO_3$ content, the sound insulation effect of the composite increases first and then decreases, and its tear strength and fatigue lifespan of bending deformation decrease. As an acoustic insulation material for air conditioners, the PVC/$CaCO_3$ composite has an optimal $CaCO_3$ content of 50 %. It is found that the sound insulation effect, tear strength and bending performance of the PVC/$CaCO_3$ composite are all better than those of chloroprene rubber. Furthermore, the PVC/$CaCO_3$ composite material has nearly the same density as the chloroprene rubber but lower cost than the chloroprene rubber. So, for the acoustic insulation and economic purposes, the chloroprene rubber can be replaced by the PVC/$CaCO_3$ composite material completely. Finally, the cutting criterion and the sample type for tear performance testing of the PVC / $CaCO_3$ composite are proposed for the application in acoustic insulation of air conditioners.

Keywords : acoustics; PVC/$CaCO_3$ composite material; acoustic insulation for air conditioners; tear strength; bending performance

近年来，以聚氯乙烯为基体，添加不同填充剂的聚氯乙烯(PVC)复合材料得到广泛应用。在空调行业，软质的聚氯乙烯(PVC)复合材料主要用于压缩机隔音降噪，为了降低成本并提高制品的密度、硬度、耐磨性和防老化性等，$CaCO_3$和$BaSO_4$被添加到PVC基体中[1]，其中$CaCO_3$比$BaSO_4$价格低廉，原材料供应充足，因此被广泛采用。添加$CaCO_3$后形成的PVC复合材料的一些特性发生变化，Banovac I等[2]研究了$CaSO_4$和$CaCO_3$对PVC材料热降解动力学特性的影响。Guermazi N等[3]研究发现填充剂和气候条件会影响PVC/$CaCO_3$复合材料的力学性能。Kong X等[4]研究发现添加两种碳酸钙，当用量较大时，明显影响PVC-U材料配方的塑化性能，对热稳定性、拉伸性能和抗冲性能影响较大。国内学者近些年也对PVC复合材料的特性展开了相关的研究，

收稿日期：2017-08-16

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51405083)；
校级优秀青年培养计划资助项目(fsyq201409)

作者简介：张立平（1979–），女，石家庄市人，副教授，主要研究方向为机械振动与噪声控制以及机械系统动力学。
E-mail: lpzhangok@163.com

何杰等[5]研究发现改性的微米重质$CaCO_3$能明显提高PVC基复合材料的缺口冲击强度，当填充质量分数20 %后，该复合材料的冲击强度比纯PVC材料的提高了49.9 %，且在一定程度上抑制了复合材料的分解。杨炳训等[6]指出棒状$CaSO_3$和球状重质$CaCO_3$的质量比为2 : 1时，PVC复合材料的冲击强度比纯PVC材料提高了64 %。刘慧[7]将氯化聚乙烯(CPE)、BaSO4、云母、旧橡胶等分别加入PVC基隔声复合材料中，研究结果表明，各填充物的含量增加时，材料的加工性能、断裂伸长率和刚柔性都变差，并指出添加云母和旧橡胶对复合材料的隔声性能有一定的影响。刘忠科[8]仅对当前PVC材料的物理性能、电性能、加工性能进行了评述，指出该材料可应用于制造日常用品、管材、薄膜、垫子等。

当前的研究主要集中于$CaCO_3$的含量或类型对PVC复合材料机械性能的影响。但将PVC复合材料用于空调压缩机隔音降噪，其隔音特性是衡量材料优劣的最关键指标，因此在应用过程中要将压缩机底角包住并避开配管和压缩机接线，通常要在材料上开槽口、孔或者割缝，应用中发现此时PVC复合材料易撕裂或折断，由此说明这些特殊结构会影响材料的性能，但与其机械性能关系不大，为此，本文针对含$CaCO_3$的PVC复合材料在空调应用中的隔音特性、撕裂强度、割缝类型和折弯性能等展开研究，从而为制定空调压缩机隔音材料的性能指标提供依据。

1 试验部分

1.1 原材料

试验材料是直接从生产厂家购买的工业原料，试验中采用傅立叶红外谱分析仪和热分析仪对材料成份进行测试。以PVC的质量为计量标准，测得实验中PVC复合材料的主要成分如表1所示。

表1 PVC复合材料主要成分/(%)

成分	PVC	$CaCO_3$	ESO	石蜡	DOP	无机物总和
质量	27～48	42～63	1	1	5	53～74

1.2 PVC复合材料试样

隔声量测试中，将PVC复合材料和氯丁橡胶剪裁为150 mm×150 mm×2 mm的胶片。为了研究PVC复合材料抗撕裂性能，选用裤形试样和直角形试样进行撕裂实验，试样结构与尺寸如图1所示，厚度均为1 mm。两个试验中每种试样取5个。

折弯特性测试实验过程中两种材料的试样尺寸均为50 mm×50 mm×1 mm。

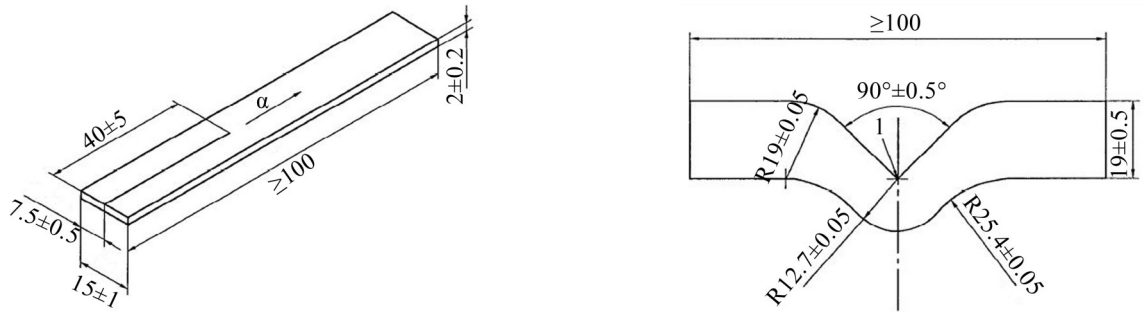
1.3 试验过程

在空调压缩机中隔声量大小是衡量隔声材料的关键因素，隔声量可表示为$N_R=L_1-L_2$，其中L_1为隔声前噪声，L_2为隔声后噪声。为了排除压缩机稳定性、装配误差等对隔声效果的影响，对隔声材料单体进行隔声特性测试，为了模拟实际压缩机噪声下隔声材料的综合隔声效果，选择变频机83 Hz运行的录音作为声源，放置在半消声室内，声源通过声管道传入全消声室。为防止声音在管道内产生共振而影响最终隔声效果，在管道内增加了一层阻尼材料。将PVC复合材料或氯丁橡胶制成胶皮安置在全消声室内，用防震胶粘贴密封在声管道的另外一端，拾音器距被测胶皮100 mm。

开有过管孔或者割缝的隔声材料在应用中易发生撕裂破坏，因此在CMT6104型万能拉伸试验台上对两种材料的试样进行撕裂强度测试，拉伸速率为500 mm/min。分别测试不同方向的撕裂强度，其中延展方向定义为纵向，垂直延展方向定义为横向。

撕裂强度试验参照GBT 528-2009标准进行，裤形试样不同方向的撕裂断面，用VMS-3020型显微测量仪和Olympus BX51M型光学显微镜观察断面的微观形貌。

选择成分不同的试样进行折弯试验，模拟PVC复合材料应用中包裹压缩机时的折弯，试验中人工用手沿同一对折线往复180°对折10次，肉眼观察折痕状态。



(a) 裤形 (b) 直角形

图1 撕裂实验中试样的形状及尺寸(mm)

2　试验结果及讨论

2.1　$CaCO_3$含量对PVC复合材料隔声特性的影响

2 mm厚的PVC复合材料和氯丁橡胶对于压缩机噪声的隔声测试结果如表2所示。从表2可以看出，几种$CaCO_3$含量的PVC复合材料对压缩机噪声的隔声量均高于氯丁橡胶的，随着$CaCO_3$含量的增加，PVC复合材料的隔声量先增大后减小，存在一个隔音最佳值，即$CaCO_3$含量为50 %，但隔声量相差一般不超过2 dB。

2.2　$CaCO_3$含量对PVC复合材料撕裂性能的影响

2.2.1　不同试样的撕裂强度

对不同材料直角形和裤形试样的纵横向撕裂强度进行了测试，结果如表3所示。

由此看出$CaCO_3$含量较低的PVC复合材料直角形试样的撕裂强度比氯丁橡胶的高，裤形试样的强度略均低于氯丁橡胶，这说明从抗撕裂性能方面来看PVC复合材料可以代替氯丁橡胶作为空调隔声材料。对于两种隔声材料，直角形试样的撕裂强度远大于裤形试样，主要是裤形试样中间割缝顶部存在裂纹尖端，易产生应力集中，从而大大降低撕裂强度。PVC复合材料的横向撕裂强度均高于纵向撕裂强度，这说明PVC复合材料是各向异性材料，受力时分子链会沿外力发生取向，使得各个方向的力学性能不同。氯丁橡胶两个方向的撕裂强度相当，是各向同性材料，与相关研究结论一致[9]。

由表3可知，$CaCO_3$含量从45 %增加到60 %，PVC复合材料两个方向的撕裂强度均降低，且纵向撕裂强度的降幅较大，所以$CaCO_3$含量为60 %的PVC复合材料容易撕裂，这与实际应用的现象一致。主要是因为$CaCO_3$含量增加时，刚性粒子产生的空穴会削弱外力场的作用，材料受力时会形成应力不连续区，越来越多的空穴和银纹使PVC复合材料的韧性达到峰值，但$CaCO_3$填充剂周围的应力集中较严重，继续增加填料，银纹会相连形成较大的裂隙，过多的空穴相连变成多条空腔，使材料无法恢复形变，从而撕裂强度降低[9]。

2.2.2　不同试样的撕裂强度曲线

为了研究PVC复合材料的撕裂机理，绘制了2mm厚$CaCO_3$含量为60 %PVC复合材料的撕裂曲线，如图2所示，上部分5条曲线为横向撕裂强度，下部分5条曲线为纵向撕裂强度。

由图2可知，对于裤形试样，纵、横向的撕裂曲线相差很大。纵向撕裂时，当拉力到达一定值时，曲线斜率几乎不变，裂纹沿开缝方向扩展，最后曲线迅速下降，裂纹贯穿，试样被撕断，撕裂形状见图3(a)。主要是因为开缝沿延展方向，随着拉力的增加，破坏方向尖端的应力连续和基材本身结构都会发生变化，从而抑制了裂纹扩展的自选择性[9]，因此在相对小的拉力下便沿着纵向开缝方向快速撕裂。横向撕裂曲线斜率变化很大、撕裂曲线较短，在较大的拉力作用下试样来不及变形即被撕断，如图3(b)所示，是沿侧边撕裂的。

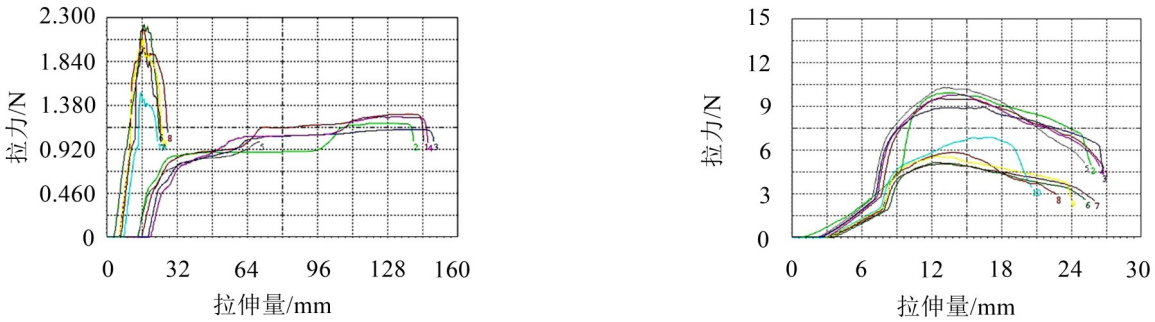
对于直角形试样，纵、横向撕裂曲线的规律相似，说明不同方向试样的撕裂方式相似。该结构的试样在拉力作用下首先发生弹性变形，此后其尖端应力逐渐向四周扩展，随拉力增大，割缝尖端处的应力首先超过强度极限，此时在开始阻力的影响下[9]，

表2　PVC复合材料和氯丁橡胶隔音前后的压缩机噪声

材　料	$CaCO_3$/(%)	厚度/mm	噪声值/dB(A)		隔音量/N_RdB(A)
			隔声前L_1	隔声后L_2	
氯丁橡胶	/	2	78.7	54.2	24.5
PVC复合材料	45	2	78.7	50.4	28.3
	50			49.65	29.05
	55			50.8	27.9
	60			52.0	26.7

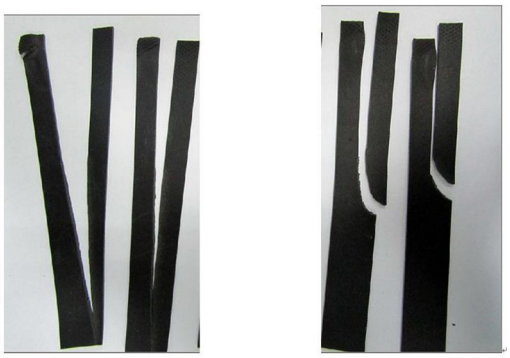
表3　不同试样的撕裂强度

材 料	$CaCO_3$/(%)	厚度/mm	直角形撕裂强度/(kN·m^{-1})		裤形撕裂强度/(kN·m^{-1})	
			横向	纵向	横向	纵向
PVC复合材料	45	1	12.76	10.36	3.14	2.05
	50		9.56	8.26	2.78	2.03
	55		9.55	7.92	2.42	1.59
	60		9.69	5.70	2.10	1.11
氯丁橡胶		1	9.10	8.90	3.20	3.04



(a) 裤形试样 (b) 直角形试样

图 2 $CaCO_3$含量为60 %时不同试样的撕裂曲线



(a) 纵向撕裂 (b) 横向撕裂

图 3 撕裂后裤形试样的形貌

撕裂曲线的曲率迅速增大，曲线出现鼓肚，拉力继续增大，试样产生裂纹，裂纹不断扩展直至试样被撕断。

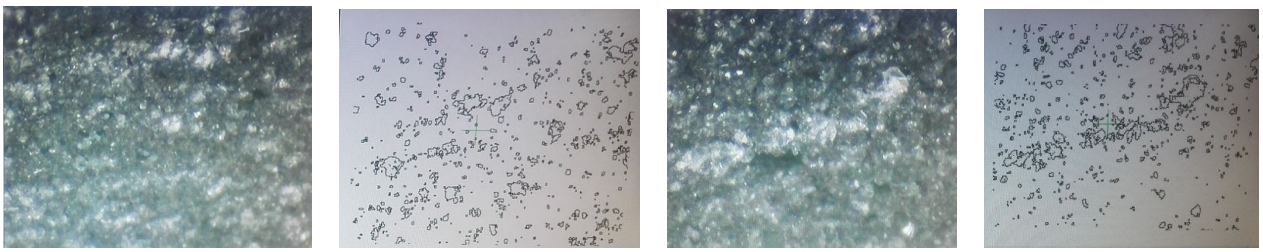
2.2.3 裤形试样撕裂断口形貌

撕裂强度测试结果表明裤形试样的抗撕裂性能较差，在实际应用中需要开缝的隔声材料结构与裤形试样类似，为了进一步研究其撕裂机理，观察撕裂断面的微观形貌，如图4、图5所示。

试样沿纵向撕裂时，如图4所示，$CaCO_3$颗粒抱团和排列有序，与延展方向趋于平行，裂纹扩展方向与延展方向一致，在外力作用下空穴和银纹得到了放大和扩展，所以在较小且恒定的外力下试样沿开缝方向被撕裂。横向撕裂时(如图5)，$CaCO_3$颗粒无规则排列，抱团大颗粒的长度方向与外力接近垂直，尖端裂纹遇到刚性$CaCO_3$颗粒后受阻，无法继续延伸，而是沿着颗粒与基材的边界绕行，这样裂纹扩展所需动力增加，因此横向撕裂强度较大。对比图4和图5可以看出，$CaCO_3$含量越高，颗粒抱团和有序排列更明显，空穴和微裂纹增多，甚至呈连续状，材料容易被撕裂，因此随$CaCO_3$含量的增加撕裂强度降低。

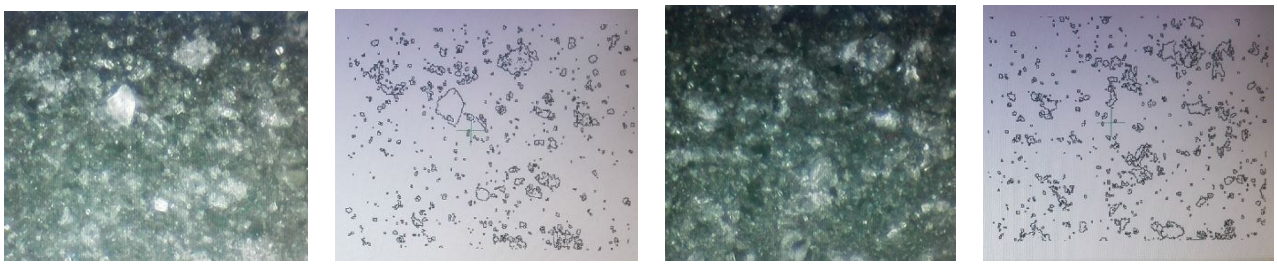
2.2.4 PVC复合材料的开缝设计

对于空调隔声材料，为了获得良好的隔声效果，应用过程中需要在材料上开过管孔或者割缝。对于PVC复合材料，由撕裂强度的测试结果可知，开缝后



(a) $CaCO_3$含量50 % (b) $CaCO_3$含量60 %

图 4 不同$CaCO_3$含量的试样的纵向撕裂断口形貌



(a) $CaCO_3$含量50 % (b) $CaCO_3$含量60 %

图 5 不同$CaCO_3$含量的试样的横向撕裂断口形貌

形成裤形结构，其撕裂强度大大降低，因此，在设计中，为了减少撕裂破坏，过管孔和割缝不能设置在PVC复合材料的延展方向(纵向)，尤其是当$CaCO_3$含量超过55 %时，割缝和过管孔要放置在垂直于延展的方向(横向)；另一方面若须开缝，应在缝的末端开圆孔，以避免尖端应力集中，如图6。



图6 PVC复合材料割缝和过管孔设计示意图

2.3 PVC复合材料的折弯性能

由图7可以看出，$CaCO_3$含量为60 %的PVC复合材料出现4处明显龟裂，55 %的只出现一个，50 %和45 %无明显龟裂，而氯丁橡胶的龟裂连续，出现断开现象。由此说明与氯丁橡胶相比，PVC复合材料具有非常优越的抗折弯能力，但当$CaCO_3$含量增多，尤其是存在大颗粒时，填料会与基体聚氯乙烯在结合处形成裂纹而发生折弯断裂，因此为确保隔声材料的装配质量和外观，$CaCO_3$的含量不能超过60 %，最好不要超过55 %。

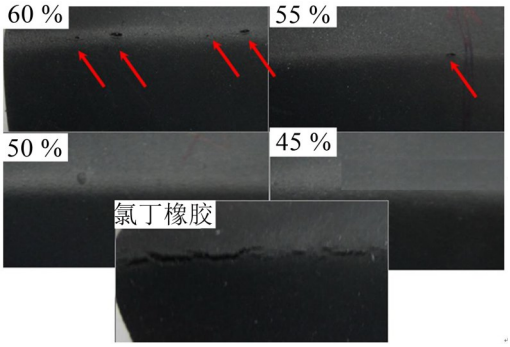


图7 PVC复合材料和氯丁橡胶试样折弯后的外观

3 结 语

(1) PVC复合材料的隔音量与同密度的氯丁橡胶接近，其撕裂强度高，折弯特性好，易加工，成本低，因此软质的PVC复合材料完全可以代替价格昂贵的氯丁橡胶作为空调的隔声材料，但$CaCO_3$含量最好控制在50 %左右。

(2) PVC复合材料对裂纹极为敏感，尤其是$CaCO_3$含量超过55 %时，应用中尽量避免线性割缝，若必须开缝，要在缝的末端开圆孔，并且保证过管孔和割缝设置在垂直材料延展方向的横向。

(3) PVC复合材料的裤形结构抗撕裂能力较低，但能真实反映隔声材料的应用特性，因此建议将裤形试样作为衡量空调隔声材料抗撕裂性能的判定试样。

参考文献：

[1] 于文杰，李杰，郑德. 塑料助剂与配方设计技术[M]. 北京：化学工业出版社，2010. 21-40.

[2] BANOVAC I, STIPANELOV VRANDEČIĆ N, ČURKOVIĆ, LUKA. The influence of $CaSO_4$ and $CaCO_3$ on thermal degradation kinetics of PVC[J]. **Wcc Publication**, 2014, 156(2): 149-153.

[3] GUERMAZI N, HADDAR N, ELLEUCH K, et al. Effect of filler addition and weathering conditions on the performance of PVC / $CaCO_3$ composites[J]. **Polymer Composites**, 2015, 37(7): 2171-2183.

[4] KONG X, ZHANG X, LI C, et al. Effect of two kinds of $CaCO_3$ on properties of PVC-U material[J]. **Qilu Petrochemical Technology**, 2015.

[5] 何杰，吴香发，贾仁广. PVC/ $CaCO_3$复合材料的结构和性能研究[J]. **现代塑料加工应用**，2007，19(4)：5-8.

[6] 杨炳训，宋汝鸿，曾子恒，等. $CaSO_3$ 晶须和重质$CaCO_3$复合改性PVC的研究[J]. **塑料科技**，2010，38(11)：31-33.

[7] 刘慧. 填充物对聚氯乙烯基柔性隔音复合材料性能影响的研究[D]. 杭州：浙江理工大学，2012.

[8] 刘忠科，雍奎刚，武文，等. PVC塑料的性能与应用研究进展[J]. **塑料科技**，2014，42(5)：128-131.

[9] 张留成. 高分子材料基础[M]. 2版. 北京：化学工业出版社，2011：76-123.

（上接第140页）

[20] 刘灿昌，岳书常，许英姿，等. 参数激励非线性振动时滞反馈最优化控制[J]. **振动与冲击**，2015，34(20)：6-9.

[21] 孙艺瑕，徐鉴. 时滞动力吸振器的控制参数对其减振效果的影响[C]. 第十届动力学与控制学术会议摘要集. 成都，2016.

[22] 孙洪鑫，李建强，王修勇，等. 基于磁致伸缩作动器的拉索主动控制时滞补偿研究[J]. **振动与冲击**，2017，36(14)：208-215.

[23] 陈茂生，王修勇，孙洪鑫，等. 考虑时滞的结构AMD系统控制方法与效果分析[J]. **噪声与振动控制**，2015，35(6)：17-21.

[24] 彭剑，赵珧冰，孙测世，等. 磁流变阻尼器—斜拉索控制系统中的时滞效应[J]. **工程力学**，2014，31(4)：155-159.

[25] NAYFEH A H, MOOK D T. Nonlinear oscillations[M]. NewYork: JohnWiley & Sons, 1979.

[26] REGA G, LACARBONARA W, NAYFEH A H, et al. Multiple resonances in suspended cables: direct versus reduced-order models[J]. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, 1999, 34(5): 901-924.