

单壁碳纳米管对微穿孔板吸声体吸声性能的影响

钱玉洁^{1,2}, 孔德义², 高 钧²

(1. 中国科学技术大学自动化系, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 实验研究了单壁碳纳米管对微穿孔板吸声体吸声性能的影响。使用单壁碳纳米管对传统的微穿孔板吸声体进行表面修饰, 得到复合微穿孔板吸声体, 在阻抗管中测量得到其垂直入射吸声系数, 并与复合之前的实验结果进行对比发现, 经单壁碳纳米管表面修饰后的复合微穿孔板吸声体的吸声性能在低频范围内有明显的改进, 吸声系数最大可提高约 39.6%。对基于单壁碳纳米管表面修饰的复合微穿孔板吸声体的吸声机理进行探讨时发现, 复合吸声体在微穿孔板吸声体共振吸声的基础上引入了单壁碳纳米管与微穿孔板界面的摩擦振动作用等辅助吸声机制使得其吸声性能变优。该研究结果为微纳复合吸声降噪结构的设计提供了研究思路。

关键词: 微穿孔板吸声体; 单壁碳纳米管; 微纳复合; 吸声性能

中图分类号: TB5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-02-0154-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.02.012

Improvement of sound absorption characteristics for micro-perforated panel absorber using single-walled carbon nanotubes

QIAN Yu-jie^{1,2}, KONG De-yi², GAO Jun²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: Effect of single-walled carbon nanotubes on the sound absorption performance of micro-perforated panel (MPP) absorbers is experimentally studied in this article. Composite MPP absorbers can be obtained by surface modification of MPP absorbers based on single-walled carbon nanotubes. Their normal absorption coefficients are tested in the impedance tube. Experimental results show that the sound absorption performance of composite MPP absorbers improves obviously in low-frequency range compared with the experimental results obtained before the surface modification, some can be achieved even by about 39.6%. It is found that the composite MPP absorbers introduces the interfacial friction and vibration effect between the single-walled carbon nanotubes and MPP which results in better absorption capability. The results provide a thinking of research for the design of micro-nano composite sound absorption structure.

Key words: micro-perforated panel absorbers; single-walled carbon nanotubes; micro-nano compound; sound absorption performance

0 引言

微穿孔板(Micro-Perforated Panel, MPP)吸声体的系统理论^[1-4]最先由我国著名声学专家马大猷教授提出。作为新一代的吸声结构, 微穿孔板吸声体具有结构简单、无污染、防潮、耐高温等优点, 但它的一个显著缺点是吸声频带较窄, 为 1~2 个倍频程。为改进微穿孔板吸声体的吸声性能, 很多学者

做了大量研究。如同济大学声学所的蔺磊等人研究了微穿孔板吸声体空腔中吸声材料的作用^[5], 并建立了理论预测模型, 与实验结果吻合得较好。同是同济大学声学所的盛胜我教授研究了在微穿孔板表面覆盖一层薄膜及背面紧贴吸声薄层的吸声结构^[6,7], 并对它们的声学特性进行了理论分析与计算, 与实验结果进行比较, 发现理论与实验结果较吻合, 且吸声薄层对微穿孔板吸声体的吸声性能有一定的改善。西北工业大学的何立燕、徐颖等人研究了孔截面变化^[8]和孔中介质^[9,10]对厚微穿孔板吸声体吸声性能的影响。对于孔截面, 主要分析了小锥形孔、大锥形孔和台阶孔三种不同孔截面的微穿孔板吸声体的吸声性能; 对于孔中介质, 主要研究

收稿日期: 2013-01-21; 修回日期: 2013-03-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目计划(973 计划)资助项目(2011CB302104)。

作者简介: 钱玉洁(1987-), 女, 安徽合肥人, 博士研究生, 研究方向为噪声振动与控制。

通讯作者: 钱玉洁, E-mail: qianyujie88@126.com

了羊毛纤维和超细不锈钢纤维对厚 MPP 吸声体吸声性能的影响。日本神户大学的学者 Kimihiro Sakagami^[11]及挪威大学的 Rolf Tore Randeberg^[12]也试图通过孔型设计对微穿孔板吸声性能进行改进，他们主要针对喇叭形孔进行了分析研究，并建立了一系列理论分析模型。日本东京工业大学的 I Made MIASA、Masaaki OKUMA^[13]等人希望通过使用组合孔拓宽微穿孔板吸声体的有效吸声频带。还有诸多学者对微穿孔板吸声体的空腔进行设计改造以期获得理想的吸声性能，如采用蜂窝状空腔^[14]、不规则空腔^[15]、分离空腔^[16]和多频带变空腔^[17]等。

以上对于微穿孔板吸声体吸声性能的改进中均没有涉及纳米材料，但在多孔吸声材料吸声性能的改善中已有学者做过此类研究，如英国帝国理工大学的 R.Verdejo、R.Stampfli^[18]等人通过在轻质聚氨酯泡沫塑料中填充碳纳米管增强其声学阻尼以达到改善其吸声性能的目的，并获得较好的效果。国内通过碳纳米管对微穿孔板吸声体的吸声性能进行改进的研究目前尚未见报道，因此本文率先对此进行了实验研究。将单壁碳纳米管(Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNT)与微穿孔板吸声体进行复合，并在驻波管中进行实验测试。实验结果表明，复合微穿孔板吸声体的吸声性能在低频范围内有明显的改进。

1 微穿孔板吸声体的马氏理论

微穿孔板吸声体是由穿以大量孔径小于 1 mm 微孔的薄板，加上板后的空腔组成，其结构和等效电路图如图 1 所示。

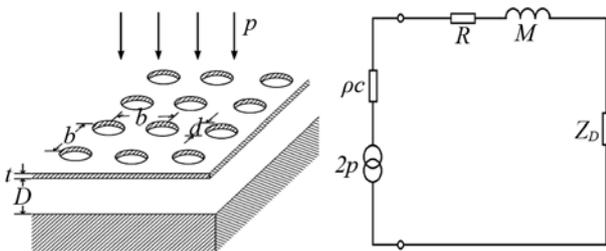


图 1 微穿孔板吸声体及其等效电路

Fig.1 Construction and equivalent electrical circuit of micro-perforated panel absorber

图 1 中， d 为穿孔直径， b 为孔间距， t 为穿孔板的厚度， D 为板后空腔深度， R 和 M 分别为微穿孔板的声阻和声抗， ρc 为空气的特性阻抗(ρ 是空气的密度， c 为声波在空气中传播的速度)。微穿孔板吸声体为共振吸声结构， Z_D 为板后空腔的声阻抗率， Z_D 的值一般为

$$Z_D = -j\rho c \cdot \cot(\omega D/c) \quad (1)$$

微穿孔板吸声体的声阻抗率为

$$Z = R + j\omega M + Z_D \quad (2)$$

相对声阻抗率(用空气中的特性阻抗 ρc 进行归一化)为

$$z = \frac{Z}{\rho c} = r + j\omega m - j\cot(\omega D/c) \quad (3)$$

其中： σ 表示穿孔率；相对声阻 r 和相对声质量 m 可表示为：

$$r = \frac{32\mu t}{\sigma c d^2} \cdot k_r, \quad k_r = \sqrt{1 + \frac{k^2}{32} + \frac{\sqrt{2}k}{8} \cdot \frac{d}{t}} \quad (4)$$

$$m = \frac{t}{\sigma c} \cdot k_m, \quad k_m = 1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \quad (5)$$

式中： k_r 和 k_m 为相对声阻常数和声质量常数； μ 为空气的运动粘度系数($1.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)； k 为穿孔常数：

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{\mu} \cdot \frac{d}{2}} = \sqrt{\frac{2\pi f}{\mu} \cdot \frac{d}{2}} \quad (6)$$

在正入射条件下，吸声系数^[1]为

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + (\omega m - \cot(\omega D/c))^2} \quad (7)$$

已知微穿孔板吸声体的结构参数，就可应用此理论对微穿孔板吸声体的吸声性能进行预测，也可应用此理论对微穿孔板吸声体的结构进行设计。

2 单壁碳纳米管与微穿孔板复合工艺

单壁碳纳米管粉体的参数如表 1 所示。

表 1 单壁碳纳米管粉体的参数
Table 1 Parameters of single-walled carbon nanotubes powder

材料	纯度 /%	直径 /nm	长度 / μm	比表面积 /(m^2/g)	导热系数 /($\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$)
SWCNT	90	<2	5~15	500~700	~4000

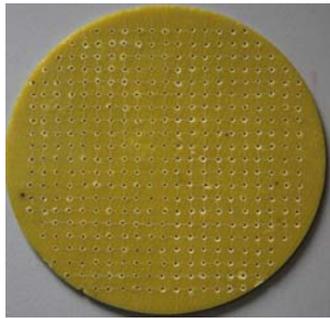
实验测试了三种不同材料加工的微穿孔板(如图 2 所示)与单壁碳纳米管复合吸声体的吸声性能，采用不同材料主要是为了研究板材对复合微穿孔板吸声体的吸声性能是否有影响。微穿孔板吸声体的结构参数是基于马氏理论设计的，如表 2 所示。

单壁碳纳米管粉体与微穿孔板吸声体的复合过程如下：

- (1) 清洗微穿孔板：先用 5%稀盐酸超声清洗 5 min，再用 5% NaOH 溶液超声清洗 5 min；
- (2) 干燥微穿孔板：将其放置于干燥箱，温度置于 60℃，干燥 10 min；
- (3) 降至室温，冷却；
- (4) 用真空密封胶或凡士林均匀涂覆微穿孔板；
- (5) 称取单壁碳纳米管，按照 0.002 g/cm² 的面



(a) 铝合金



(b) 环氧树脂



(c) 聚四氟乙烯

图 2 不同材料的微穿孔板

Fig.2 MPPs made of different materials

表 2 微穿孔板的材料及结构参数

Table 2 Materials and construction parameters of micro-perforated panels

材料	d/mm	t/mm	D/mm	$\sigma /%$
铝合金	0.58	2	40	2.53
环氧树脂	0.69	2	40	2.04
聚四氟乙烯	0.60	2	40	1.54

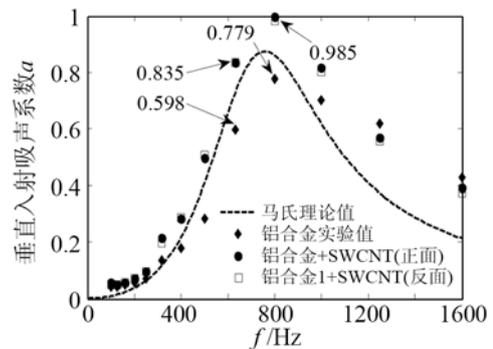
密度均匀覆盖在微穿孔板上;

(6) 用针穿通被碳纳米管堵上的孔洞。

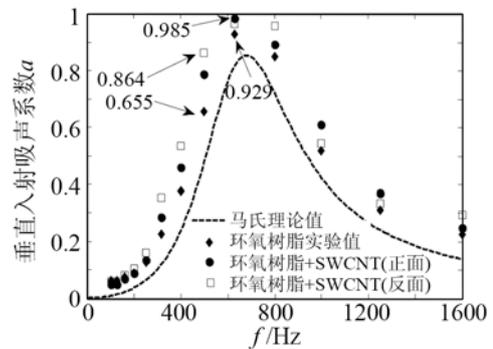
3 实验结果

微穿孔板吸声体的垂直入射吸声系数是在阻抗管中测试获得的,测试过程中用润滑油涂抹微穿孔板与驻波管的接触面,避免产生缝隙造成漏声。对于复合微穿孔板吸声体,分别测试了其正面(有 SWCNT 的一面)和反面(无 SWCNT 的一面)的垂直入射吸声系数,并与复合前的实验结果进行比较,

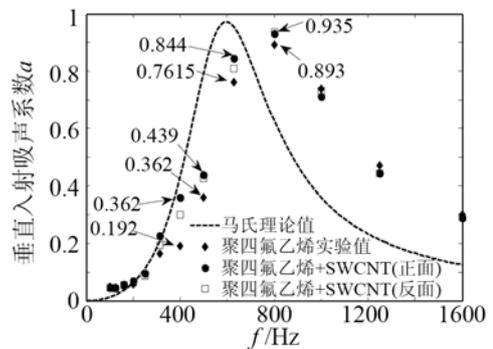
结果如图 3 所示。图 3 还给出了微穿孔板吸声体的马氏理论值作为对其吸声性能的预测。从比较结果来看,复合前微穿孔板吸声体的吸声系数的实验值与马氏理论预测值的吻合度随材料的不同而略有差异,尤其是聚四氟乙烯板微穿孔板吸声体的差异最明显。这可能是因为聚四氟乙烯材料比较柔软,声压引起的板振动对吸声性能也有影响,导致实验结果与马氏理论预测值的偏差。因为经典的马氏理论是基于刚性材料假设提出的,因此不同板材对复合前 MPP 吸声体的吸声性能是有一定影响的。从复合前后实验值的对比结果可以看出,经过单壁碳纳米管表面修饰后的复合微穿孔板吸声体的吸声性能在低频范围内明显提高。对于铝合金复合微穿孔板吸声体,如图 3(a)所示,在 200~1200 Hz 频率范



(a) 铝合金复合微穿孔板吸声体



(b) 环氧树脂复合微穿孔板吸声体



(c) 聚四氟乙烯复合微穿孔板吸声体

图 3 不同板材微穿孔板吸声体吸声系数的实验值与理论值的对比
Fig.3 Comparison between experimental values and theoretical values of absorption coefficients of MPP absorbers made of different materials

围内, 复合吸声体无论是正面的吸声系数还是反面的吸声系数, 都优于未复合的微穿孔板吸声体, 尤其在频率为 800 Hz 时, 复合前吸声系数 $\alpha=0.779$, 复合后的正面吸声系数 $\alpha=0.985$, 吸声系数提高 26.5%, 630 Hz 时提高了 39.6%。高频范围内, 吸声系数提高不明显。对于环氧树脂复合微穿孔板吸声体, 如图 3(b)所示, 在 1200 Hz 频率以下, 正反面吸声系数都有所提高。当频率为 500 Hz 时, 复合前吸声系数 $\alpha=0.655$, 复合后反面吸声系数 $\alpha=0.864$, 吸声系数提高 32%, 吸声性能的提高较为显著。对于聚四氟乙烯复合微穿孔板吸声体, 如图 3(c)所示, 当频率为 630 Hz 时, 复合前吸声系数 $\alpha=0.762$, 复合后正面吸声系数 $\alpha=0.844$, 吸声系数提高 11%。综合分析来看, 在 1200 Hz 频率范围以下, 复合微穿孔板吸声体相对于复合前的微穿孔板吸声体, 吸声系数均有所提高, 表明复合微穿孔板吸声体的吸声频带向低频扩展, 有效吸声频带展宽。

4 复合微穿孔板吸声体的吸声机理探讨与验证

以上实验结果表明, 经单壁碳纳米管表面修饰后的复合微穿孔板吸声体在低频范围内吸声系数均有所提高。盛胜我^[6]在研究加膜微穿孔板声学特性时指出, 微穿孔板加膜后主要为 MPP 吸声体提供一声质量抗, 由于空气层的等效声质量为复量, 其实部的作用使吸声结构的共振频率下降, 而虚部的作用为吸声结构提供所需要的声阻。因此采用加膜微穿孔板能使 MPP 吸声体的共振频率降至较低的频带范围, 同时具有较高的共振吸声系数。从本文的实验结果来看, 这与本文采用的微纳复合微穿孔板吸声体的吸声性能改善机理有所不同。复合微穿孔板吸声体的频带向低频展宽, 但共振频率并无明显偏移, 表明微纳复合微穿孔板吸声体上的单壁碳纳米管不只引入额外的声质量抗, 还引入了单壁碳纳米管与微穿孔板界面的摩擦振动作用等辅助吸声机制, 使得该复合吸声体的吸声性能变优, 吸声频带展宽, 吸声系数变大。为验证此结论, 就采用一块未穿孔的环氧树脂光板进行试验测试, 板后同样留有 40 mm 空腔, 获得了单壁碳纳米管对其表面修饰前后的吸声系数曲线, 结果如图 4 所示。

选择环氧树脂板, 是因为其材质较硬, 可避免板振动的影响, 仅考虑单壁碳纳米管对其吸声性能的影响。图 4 表明, 经单壁碳纳米管表面修饰后的复合环氧树脂板的吸声性能有很大提高, 在频率大约为 300 Hz 时, 吸声系数高达 0.92, 相对于修饰前

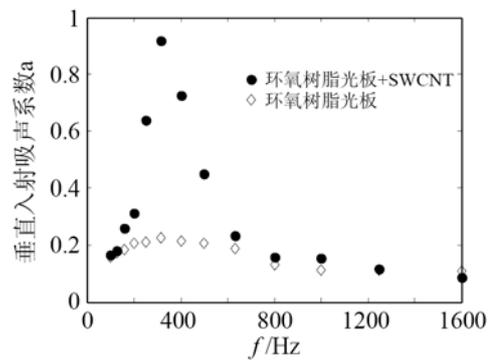


图 4 环氧树脂光板表面修饰前后吸声系数的实验结果对比
Fig.4 Comparison of normal absorption coefficients between before and after surface modification of epoxy resin panel

的最大吸声系数 0.214, 提高显著, 说明使用单壁碳纳米管对微穿孔板吸声体进行表面修饰可引入单壁碳纳米管与微穿孔板界面的摩擦振动作用等辅助吸声机制, 从而改善其吸声性能。

同时, 由图 3 可见, 不同材料的正反面引入这种吸声机制的强度可能不同, 导致它们的正反面吸声性能有所差异。如复合后的环氧树脂和聚四氟乙烯微穿孔板吸声体的正反面吸声系数差别较大。例如在频率为 500 Hz 时, 环氧树脂板复合微穿孔板吸声体的正面吸声系数 $\alpha=0.787$, 而反面吸声系数 $\alpha=0.864$; 800 Hz 时, 正面吸声系数 $\alpha=0.894$, 反面吸声系数 $\alpha=0.958$, 正反面吸声系数差异明显。同样, 对于聚四氟乙烯板复合 MPP 吸声体, 频率为 400 Hz 时, 正面吸声系数 $\alpha=0.362$, 反面吸声系数 $\alpha=0.302$; 630 Hz 时, 正面吸声系数 $\alpha=0.844$, 反面吸声系数 $\alpha=0.809$, 正反面吸声系数也有明显差异。而对于铝合金板复合微穿孔板吸声体, 正反面吸声系数基本一致。从分析结果来看, 不同板材对复合微穿孔板吸声体的吸声性能是有一定影响的。

5 结论

将单壁碳纳米管与不同材料的微穿孔板吸声体进行复合, 实验研究发现, 复合微穿孔板吸声体的吸声频带均向低频展宽, 吸声系数变大, 具体改善大小与板材有一定的关系, 在本实验中吸声系数最大可提高 39.6%。此外, 本文对复合吸声体的吸声机理进行探讨时发现, 微纳复合微穿孔板吸声体上的单壁碳纳米管不只引入额外的声质量抗, 还引入了单壁碳纳米管与微穿孔板界面的摩擦振动作用等辅助吸声机制, 从而改善了微穿孔板吸声体的低频吸声性能。单壁碳纳米管与微穿孔板的复合过程简单易行, 具有实际应用价值。本文的研究结果为微纳复合降噪结构的设计提供了研究思路。

参 考 文 献

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975, **18**(1): 38-50.
Maa D Y. Theory and design of micro-perforated-panel sound-absorbing constructions[J]. Scientia Sinica, 1975, **18**(1): 38-50.
- [2] Maa D Y. Design of microperforated panel constructions[J]. Acta Acustica, 1988, **13**(3): 174-180.
- [3] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, **23**(5): 21-29.
Maa D Y. General theory and design of microperforated-panel absorbers[J]. Acta Acustica, 1997, **23**(5): 21-29.
- [4] Maa D Y. Practical absorption limits of MPP absorbers[J]. Acta Acustica, 2006, **31**(6): 481-484.
- [5] 蔺磊, 王佐民, 姜在秀. 微穿孔共振吸声结构中吸声材料的作用[J]. 声学学报, 2010, **35**(4): 385-392.
LIN Lei, WANG Zuomin M, JIANG Z X. Effect of sound-absorbing material on a microperforated absorbing construction[J]. Acta Acustica, 2010, **35**(4): 385-392.
- [6] 盛胜我, 赵胜龄. 加膜穿孔板声学特性的研究[J]. 声学学报, 1994, **19**(1): 45-52.
SHENG Shenwo, ZHAO Shengling. Acoustical characteristics of perforated panels with cover membranes[J]. Acta Acustica, 1994, **19**(1): 45-52.
- [7] 盛胜我. 穿孔板背面紧贴吸声薄层时的声学特性[J]. 声学技术, 2001, **22**(1): 52-54.
SHENG Shenwo. Acoustic properties of perforated panels closely pasted with an absorptive thin layer[J]. 2001, **22**(1): 52-54.
- [8] 何立燕, 扈西枝, 陈挺. 孔截面积变化对微穿孔板吸声性能的影响[J]. 噪声振动与控制, 2011, **31**(1): 141-144.
HE Liyan, HU Xizhi, CHEN Ting. The influence of variable section of orifice on sound absorption characteristics of thick micro-perforated panel[J]. Noise and Vibration Control, 2011, **31**(1): 141-144.
- [9] 何立燕, 徐颖, 陈幸幸, 等. 孔中介质对厚微穿孔板吸声性能的影响[J]. 噪声振动与控制, 2009, **29**(1): 36-38.
HE Liyan, XU Ying, CHEN Xinxin, et al. The influence of pore's media on sound absorption characteristics of thick microperforated panel[J]. Noise and Vibration Control, 2009, **29**(1): 38-38.
- [10] 徐颖, 何立燕, 陈幸幸, 等. 超细不锈钢纤维对厚微穿孔板吸声性能的影响[J]. 噪声振动与控制, 2010, **30**(2): 146-151.
XU Ying, HE Liyan, CHEN Xinxin, et al. Improvement of sound absorption characteristics for thick microperforated panels using thin stainless-steel fibers[J]. Noise and Vibration Control, 2010, **30**(2): 146-151.
- [11] Kimihiro Sakagami, Masayuki Morimoto, Motoki Yairiet al. A pilot study on improving the absorptivity of a thick micro-perforated panel absorber[J]. Applied Acoustics, 2008, **69**(2): 179-182.
- [12] Rolf Tore Randeberg. Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design[D]. Norwegian: Norwegian University of Science and Technology, 2000.
- [13] I Made MIASA, Masaaki OKUMA, Gota KISHIMOTO, et al. An experimental study of a multi-size micro perforated panel absorber[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2007, **1**(2): 331-339.
- [14] LIU J, Herrin D W. Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity[J]. Applied Acoustics, 2010, **71**(2): 120-127.
- [15] WANG Chunqi, LI Cheng. Sound absorption of a micro-perforated panel backed by an irregular-shaped cavity[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2010, **127**(1): 238-246.
- [16] Masahiro Toyoda. Sound transmission through a micro perforated-panel structure with subdivided air cavities[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2008, **124**(6): 3594-3603.
- [17] 彭若龙, 孙立春, 贺才春. 多频带变空腔微穿孔板的吸声性能研究[C]// 2010 中国西部声学学术交流会论文集, 北京: 中国声学会, 2010: 1-3.
PENG Rruolong, SUN Lichao, HE Caichun. Sound absorption performance of the multiband micro-perforated panels with changed cavity depth[C]// 2010 Symposium on China's Western Acoustic Academic Exchange. Beijing: Acoustical Society of China, 2010: 1-3.
- [18] Verdejo R, Stampflib R, Alvarez-Lainezet M, et al. Enhanced acoustic damping in flexible polyurethane foams filled with carbon nanotubes[J]. Composites Science and Technology, 2009, **69**(10): 1564-1569.