

# 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板 静电植绒工艺及隔声性能

姚正军\*, 姚一波, 袁明

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 211106)

**摘要:** 为研究不同植绒工艺条件下尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的植绒性能与隔声性能, 首先, 采用静电植绒工艺将 6061 铝合金板与尼龙 66 纤维复合, 制成隔音复合板; 然后, 研究了植绒时间、植绒电压、极板间距以及胶黏剂涂覆量等工艺参数对植绒面密度和植绒纤维耐磨性能的影响; 最后, 利用混响室-消声室法研究了尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板在不同入射声频下和不同纤维结构参数时的隔声性能。结果表明: 在 0~40 s 植绒时间范围内, 随着植绒时间的延长, 植绒面密度持续增大, 而后保持不变; 同时, 在 0~90 kV 电压范围内, 随着电压的增加, 植绒面密度连续增大, 而后因极板间距不同植绒面密度增大或减小; 植绒纤维的耐磨性能随胶黏剂涂覆量的增加而提高, 但当涂覆量超过 155 g/m<sup>2</sup> 后会产生气泡; 当植绒时间为 40 s、植绒电压为 90 kV、极板间距为 11.5 cm 且胶黏剂涂覆量为 155 g/m<sup>2</sup> 时, 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的性能最好。该复合板具有较高的中高频隔声性能, 隔声量在 500~1 600 Hz 频率范围内满足 6 dB/倍频程规律; 在 2 000 Hz 后出现吻合效应。提高植绒面密度以及减小尼龙 66 纤维直径均可增大该尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的隔声量。研究结论可为建筑用新型隔音复合材料的开发与应用奠定基础。

**关键词:** 静电植绒; 尼龙 66 纤维; 植绒面密度; 混响室-消声室法; 隔声性能

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2015)06-1625-08

21 世纪以来, 人类城市化进程不断加快, 而人口密度集中的趋势也越来越明显。与此同时, 城市噪声污染已经成为严重影响居民生活质量与身心健康的重大问题。因此, 开发一种性能优异的隔音材料, 从而有效控制噪声污染已成为全世界范围内的一个重要课题。

6061 铝合金板由于耐蚀性好、强度高且加工性能好<sup>[1]</sup>, 常被用作建筑墙板; 但由于其材料单一, 在隔音性能上尚不能满足要求。近些年来, 纤维增强复合隔声材料由于其优异的性能以及成本优势, 已经成为国内外研究者们关注的重点<sup>[2-4]</sup>。Seepersad 等<sup>[5]</sup>提出采用铝蜂窝复合结构, 即铝合金基板-铝蜂窝芯材-铝合金基板结构制备复合材料, 并通过实验证明了该结构对声波的阻隔效果; 但是该方法制备工艺复杂, 成本较高, 目前还无法普及。Ayub 等<sup>[6]</sup>通过在铝合金基板表面冲孔后添加纤维

集合体的方法增强了隔音效果, 但该方法破坏了铝合金板表面的耐蚀涂层, 缩短了该材料的使用寿命。除此之外, Narang<sup>[7]</sup>利用在轻质墙体内部填充聚酯纤维的方法制造了隔音墙, 但该方法目前还处于研究阶段。

针对上述工艺成本高及破坏耐蚀层等缺陷, 笔者利用静电植绒<sup>[8]</sup>技术将尼龙 66 纤维与 6061 铝合金板复合, 制成隔音复合板。尼龙 66 纤维除具备隔音性能外, 耐磨性与强度较高<sup>[9]</sup>、来源广泛且价格低廉; 同时, 静电植绒技术也不会影响铝合金基板的耐蚀性。

由于静电植绒技术多用于家纺用品<sup>[10-12]</sup>, 目前中国对该技术应用于金属复合的报道尚不多见。同时, 根据李鸿顺等<sup>[13]</sup>和傅雅琴<sup>[14-15]</sup>等的研究可知, 纤维结构对于纤维增强复合隔声材料的性能具有重要的影响, 而纤维结构又由该复合板的制造工艺所

收稿日期: 2014-12-04; 录用日期: 2015-02-03; 网络出版时间: 2015-02-10 08:48

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20150210.0848.001.html

基金项目: 江苏省科技支撑计划(BE2013124); 江苏省科技成果转化基金(BA2013063); 江苏高校优势学科建设工程

通讯作者: 姚正军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型金属材料及表面工程。 E-mail: yaozj@nuaa.edu.cn

引用格式: 姚正军, 姚一波, 袁明. 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板静电植绒工艺及隔声性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(6): 1625-1632.

Yao Z J, Yao Y B, Yuan M. Electrostatic flocking technology and sound insulation properties of nylon 66 fibers/aluminum alloy 6061 composite plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(6): 1625-1632.

决定。

因此,笔者首先以植绒面密度与植绒纤维耐磨性能为标准,研究尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的加工工艺;然后,应用混响室-消声室法测试该尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的隔声性能;最后,分析入射声频与纤维结构参数对其隔声性能的影响,期望为尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的应用及推广提供理论依据。

## 1 实验材料及方法

通过 3 个阶段制备尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板。

第 1 阶段:6061 铝合金板(宁波钢发金属材料有限公司)的预处理。首先,利用 RC300 钝化剂(立邦公司)对该基板表面进行钝化处理,涂覆量为  $0.9 \text{ g/m}^2$ ;而后,将其置于  $60^\circ\text{C}$  的 101-1A 型电热鼓风干燥箱(上海双旭电子有限公司)中烘干 12 s。

第 2 阶段,植绒过程。所用的静电植绒装置如图 1 所示,高压静电发生器的正、负极分别与上、下极板相连接,漏斗中装有尼龙 66 纤维(泉州天宇化纤织造实业有限公司),6061 铝合金基板上涂覆有丙烯酸酯胶黏剂(上海唐泰化学品有限公司)。

当尼龙 66 纤维从供毛装置中下落到上极板时,发生接触带电;同时,由于极化作用使得尼龙 66 纤维靠近上极板一端聚集正电荷,另一端聚集负电荷。但由于正电荷与上极板的中和作用,使得尼龙 66 纤维最终带净负电荷,从而在静电力的作用下将尼龙 66 纤维以极大的动量植入 6061 铝合金基板上<sup>[16-17]</sup>。

第 3 阶段:植绒后处理。植绒后先将尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板送入 101-1A 型电热鼓风干燥箱中,在  $110^\circ\text{C}$  下干燥 5 min;而后,对其进行性

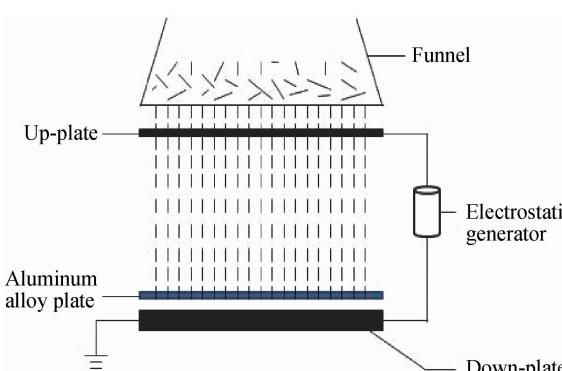


图 1 静电植绒装置

Fig. 1 System of electrostatic flocking

能检测。

(1) 植绒面密度:利用 CP214 型电子天平(上海洪纪仪器设备有限公司)测定尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的植绒面密度,作用方法为质量差法:

$$P = \frac{G_2 - G_1}{S} \quad (1)$$

式中:  $P$  为植绒面密度;  $G_2$  为植绒后 6061 铝合金基板 + 丙烯酸酯胶黏剂 + 尼龙 66 纤维的质量;  $G_1$  为植绒前 6061 铝合金基板 + 丙烯酸酯胶黏剂的质量;  $S$  为植绒区域的面积。取测量 5 次后的平均值作为实验数据。

(2) 植绒纤维耐磨性能:参照 GB/T 21196—2007<sup>[18]</sup>,利用 YG(B)401D 型织物平磨仪(温州际高检测仪器有限公司)测定试样在  $9 \text{ kPa}$  下的耐磨次数,以试样露底为实验终点。

(3) 隔声性能:利用 BSWAVS302USB 型双声道声学分析仪(北京声望声电技术有限公司)对尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板进行隔声性能测试。图 2 为混响室-消声室法隔声测试系统。测试以传声损失(即隔声量)来表征该尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的隔声性能。参照 GB/T 19889—2005<sup>[19]</sup>,选择 A 计权网络、声压级为  $80 \text{ dB}$  的粉红背景噪声源,静音箱尺寸为  $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ ,声音的取样频率取 48 000,快速傅里叶变换样本数取 4 096。测试样的尺寸为  $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 。测试中采用 1/3 倍频程,分别测定该尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板在中心频率分别为  $200$ 、 $250$ 、 $315$ 、 $400$ 、 $500$ 、 $630$ 、 $800$ 、 $1000$ 、 $1250$ 、 $1600$ 、 $2000$ 、 $2500$ 、 $3150$ 、 $4000$ 、 $5000$  及  $6300 \text{ Hz}$  时的隔声量。

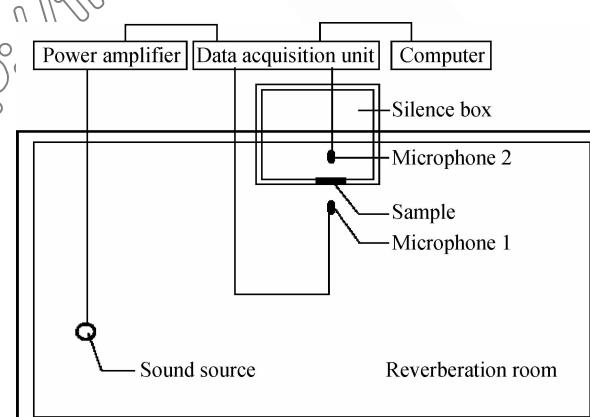


图 2 混响室-消声室法隔声测试系统

Fig. 2 Measuring system of reverberation-anechoic chamber method

## 2 结果与讨论

### 2.1 植绒时间对植绒面密度的影响

图 3 为植绒时间对尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板植绒面密度的影响。可知, 曲线都呈现相似的变化趋势, 即随着植绒时间的延长, 植绒面密度先在 0~20 s 范围内迅速增大, 而后在 20~40 s 范围内缓慢增大, 最后在 40 s 后趋于平缓。

当尼龙 66 纤维进入静电场中后, 由于静电感应, 其端部慢慢集聚电荷。随着时间的延长, 其端部集聚的电荷量越来越多。尼龙 66 纤维受到的静电力为

$$F = EQ \quad (2)$$

式中:  $E$  为上下极板间电场强度;  $Q$  为纤维聚集的电荷量。由式(2)可知, 尼龙 66 纤维受到的静电力随着电荷量的增加而增大, 因此在开始的 20 s 内植绒面密度急剧上升。

但当充电时间达到一定数值、绒毛端部集聚电荷所产生的场强达到其周围空气电离的场强后, 便会对空气放电, 使端部电荷量减少; 因此在随后的 20~40 s 内, 静电植绒面密度的增长速度明显低于前 20 s 内的增长速度。随着时间的继续延长, 当纤维端部的电荷量下降到一定数值后, 纤维没有足够大的动量抵抗基板表面胶黏剂的表面张力。在此情况下, 尼龙 66 纤维便会成为浮毛, 在植绒时间为 50 s 时尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的表面浮毛如图 4 所示。

同时, 根据图 3 可知, 在相同的植绒时间下, 植绒电压越大, 植绒面密度也越大。对于 105 kV 的高电压, 在植绒时间为 50 s 时的植绒面密度与

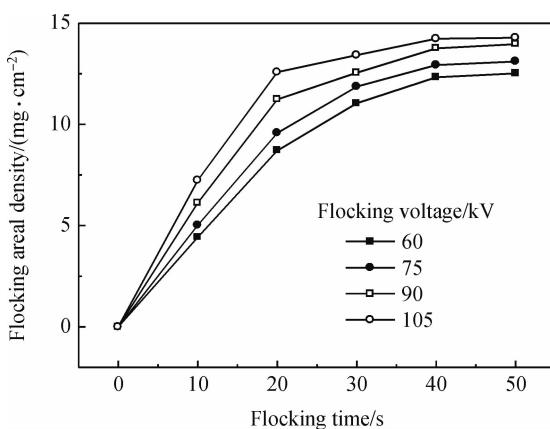


图 3 植绒时间对尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板植绒面密度的影响

Fig. 3 Effects of flocking time on flocking areal densities of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates

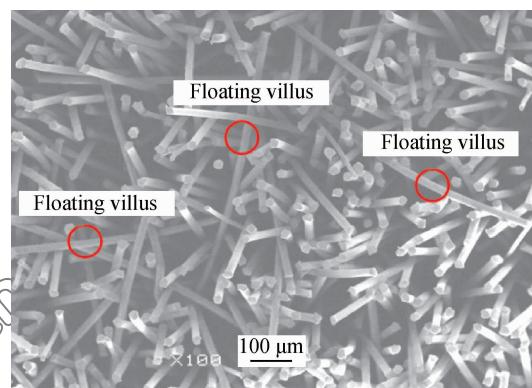


图 4 在植绒时间为 50 s 时尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的表面浮毛

Fig. 4 Floating villus on surface of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plate when flocking time is 50 s

40 s 时的相差不大。

### 2.2 植绒电压对植绒面密度的影响

图 5 为植绒电压对尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板植绒面密度的影响。可见, 当植绒电压在 60~90 kV 范围内时, 曲线的变化趋势相同, 即随着植绒电压的增大, 其植绒面密度显著提高。而在 90~105 kV 电压范围间, 曲线的变化趋势则大不相同。对于极板间距为 13.5 cm 与 14.5 cm 的两组实验, 尼龙 66 纤维的植绒面密度呈现出随着植绒电压的增加继续增长的趋势; 然而, 当极板间距为 12.5 cm 时, 其植绒面密度虽也有所增大, 但增幅比极板间距为 13.5 cm 和 14.5 cm 时的小; 而对于极板间距为 11.5 cm 的情况, 其植绒面密度不增反降。

由于静电植绒机上下极板间形成的静电场为匀强电场, 电场强度为

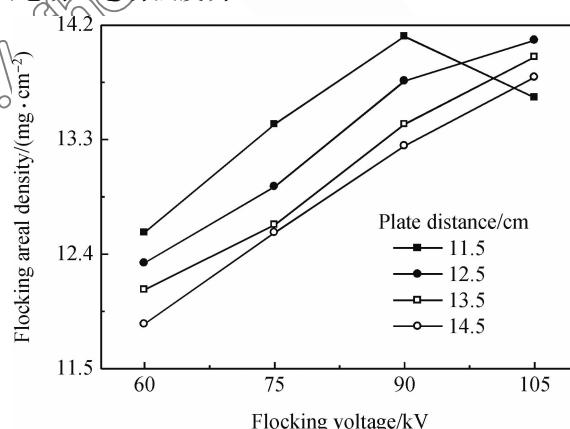


图 5 植绒电压对尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板植绒面密度的影响

Fig. 5 Effects of flocking voltage on flocking areal densities of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates

$$E = \frac{U}{D} \quad (3)$$

式中:  $U$  为植绒电压;  $D$  为上下极板间距。根据式(3)可知, 当极板间距不变时, 随着植绒电压的提高, 电场强度也随之增强。

因此, 当植绒电压在 60~90 kV 范围内时, 由于电场强度提高, 纤维在静电场中所受到的电场力不断提高, 纤维植绒面密度也显著上升; 但是, 随着电场强度的进一步提高, 纤维所受到的静电力很大, 导致纤维轴向尚未调整至电场线方向便从各方面向植入胶黏剂中, 在这种情况下, 容易发生纤维的缠结交错, 阻碍后续纤维的植入。不同植绒电压下尼龙 66 纤维的排列状态如图 6 所示。可以看出, 于 105 kV 条件下的尼龙 66 纤维缠结现象要比于 90 kV 条件下的严重得多。

而对于极板间距为 13.5 cm 和 14.5 cm 的情况而言, 由于其极板间距较大, 因此在同等电压下电场强度较小, 从而植绒面密度仍然随着植绒电压的增大而增大; 当极板间距为 11.5 cm 时, 其最佳的植绒电压为 90 kV, 此时的植绒面密度为  $14.11 \text{ mg/cm}^2$ ;

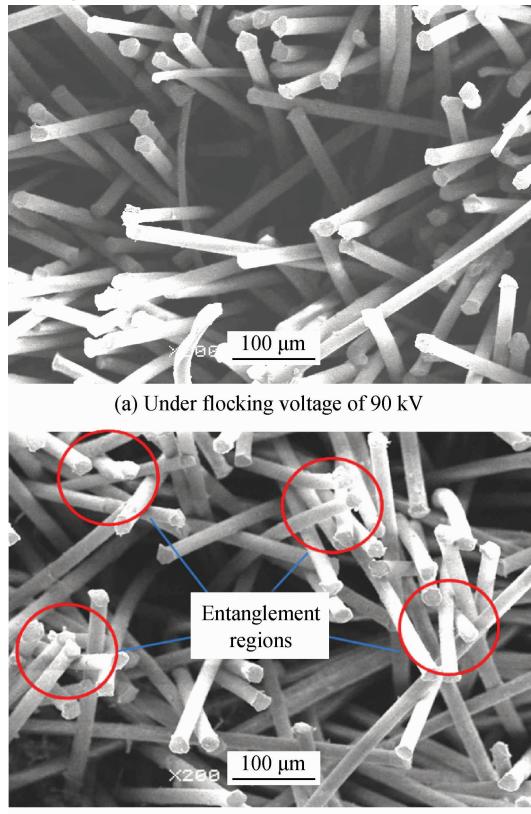


图 6 不同植绒电压下尼龙 66 纤维的排列状态

Fig. 6 Arrangement states of nylon 66 fibers under different flocking voltages

而对于极板间距为 12.5 cm 的情况而言, 其最佳的植绒电压为 105 kV, 此时的植绒面密度为  $14.08 \text{ mg/cm}^2$ 。两者植绒面密度的数值相差不大, 但从工业上节省成本与安全生产的角度来看, 选择植绒电压 90 kV 为最佳条件。

### 2.3 极板间距对植绒面密度的影响

图 7 为极板间距对尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板植绒面密度的影响。可见, 随着极板间距的增加, 曲线呈现出下降趋势。

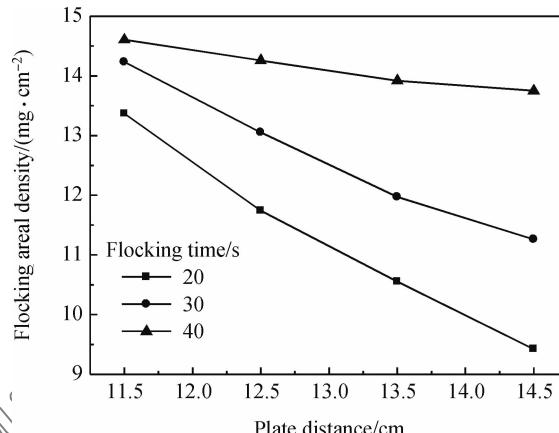


图 7 极板间距对尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板植绒面密度的影响

Fig. 7 Effects of plate distance on flocking areal densities of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates

根据式(3)可知, 当电压不变时, 随着极板间距的增大, 电场强度下降。因此, 无论对于哪一种情况而言, 其植绒面密度都是随着极板间距的增加而下降的。但是, 植绒时间越短, 其下降的幅度就越大; 植绒时间越长, 其下降的幅度就相对较小。这是由于前 20 s 是纤维充电最快的阶段, 此时增大极板间距对纤维植绒的影响要远远大于 40 s 时纤维充电已趋于饱和时对植绒所造成的影响。

### 2.4 胶黏剂涂覆量对植绒面密度与植绒纤维耐磨性能的影响

表 1 为不同胶黏剂涂覆量时尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的植绒面密度与耐磨性能。可以看出, 随着胶黏剂涂覆量的增大, 其植绒面密度与耐磨次数都是增大的。这是由于增大胶黏剂的涂覆量实际上是增加胶黏剂与尼龙 66 纤维之间的接触面积, 从而可增大尼龙 66 纤维与铝基板间的结合力。胶黏剂涂覆量达到  $165 \text{ g/m}^2$  时, 其植绒面密度与植绒纤维耐磨性能均比其他涂覆量下的好。但是在此胶黏剂涂覆量下的尼龙 66 纤维/6061 铝合金复

合板在植绒后的烘干过程中会出现气泡, 严重影响其外观与性能, 故  $165 \text{ g/m}^2$  不是最佳涂覆量。

由于在涂覆量处于  $140 \sim 165 \text{ g/m}^2$  范围内时, 植绒面密度与耐磨次数均随着涂覆量的增加有较大幅度的提高, 故在涂覆量为  $140 \sim 165 \text{ g/m}^2$  范围内进行补充实验。补充实验所用胶黏剂涂覆量分别为  $145$ 、 $150$ 、 $155$  和  $160 \text{ g/m}^2$ 。补充实验中不同胶黏剂涂覆量时尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的植绒面密度与耐磨性能如表 2 所示。

可见, 随着胶黏剂涂覆量的增加, 植绒面密度增大得比较缓慢, 耐磨次数增大幅度较大。由于在胶黏剂涂覆量为  $160 \text{ g/m}^2$  与  $165 \text{ g/m}^2$  的条件下复合板都存在烘干中出现气泡的问题, 因此笔者认为, 在保证不产生气泡的条件下, 最佳的胶黏剂涂覆量为  $155 \text{ g/m}^2$ 。

表 1 不同胶黏剂涂覆量时尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的植绒面密度与耐磨性能

Table 1 Flocking areal densities and wearability of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates with different adhesive coating amounts

Adhesive coating amount/(g · m <sup>-2</sup> )	Flocking areal density/(mg · cm <sup>-2</sup> )	Friction times before abrasion
90	12.54	600
115	14.11	1 100
140	15.38	1 800
165	15.52	2 400

表 2 补充实验中不同胶黏剂涂覆量时尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的植绒面密度与耐磨性能

Table 2 Flocking areal densities and wearability of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates with different adhesive coating amounts in supplemental experiments

Adhesive coating amount/(g · m <sup>-2</sup> )	Flocking areal density/(mg · cm <sup>-2</sup> )	Friction times before abrasion
140	15.38	1 800
145	15.41	2 050
150	15.45	2 200
155	15.47	2 290
160	15.50	2 350
165	15.52	2 400

## 2.5 入射声频与纤维结构对隔声性能的影响

为研究入射声频与纤维结构对尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板隔声性能的影响, 选取以不同参数制备的样品进行隔声测试, 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的结构参数如表 3 所示。

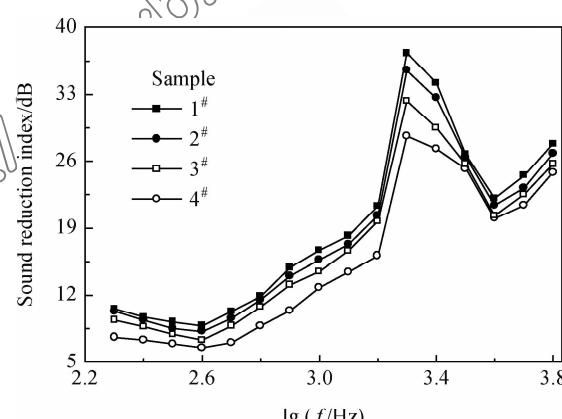
表 3 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的结构参数

Table 3 Structural parameters of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates

Sample	Flocking density/(mg · cm <sup>-2</sup> )	Plate thickness/cm	Fiber diameter/ $\mu\text{m}$
1#	15.47	0.11	20
2#	14.11	0.10	20
3#	12.54	0.12	20
4#	10.76	0.11	20
5#	15.45	0.11	18
6#	15.43	0.12	22

图 8 为不同结构参数的尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的隔声量曲线。可知, 该尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板在不同频率下皆有一定的隔声能力。当频率处于  $10^{2.3} \sim 10^{2.6} \text{ Hz}$  (即  $200 \sim 400 \text{ Hz}$ ) 范围内时, 不同面密度的尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的隔声量均随入射声频的提高而有所下降, 这是由于在低频率下, 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的刚度对隔声起主要作用, 此时低频比高频容易衰减, 因而频率越高, 隔音量越低。当频率在  $10^{2.7} \sim 10^{3.2} \text{ Hz}$  (即  $500 \sim 1600 \text{ Hz}$ ) 范围内时, 随着频率的增大, 复合板的隔音量增加。对于 1#、2#、3# 和 4# 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板, 当入射声频增加 1 倍后, 隔声量平均增幅分别为  $6.4$ 、 $6.1$ 、 $6.0$  和  $5.7 \text{ dB}$ 。这与工程中常用质量定律的  $6 \text{ dB}/\text{倍频程}$  的规律相符合。

同时, 从图 8 中还可以看出, 在该频率范围内, 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板面的植绒面密度



$f$  — Frequency of incoming audio.

图 8 不同结构参数的尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板的隔声量曲线

Fig. 8 Sound reduction index curves of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates with different structural parameters

越高,隔声量也就越大;这是由于植绒面密度越大,纤维之间越密实,当声波入射到纤维表面时,其反射量也大大增加,因此其隔声性能随之提高。随着入射声频继续增大,在频率为 $10^{3.3}$  Hz(即2 000 Hz)时,该尼龙66纤维/6061铝合金复合板的隔声量达到最大;而后由于吻合效应的出现,声能大量透过复合板,使隔声量迅速降低。在频率为 $10^{3.6}$  Hz(即4 000 Hz)处,出现隔声低谷。之后,由于吻合效应的减弱,其隔声量又随着入射声频的增大而提高。

当植绒面密度与厚度均相同时,不同纤维直径的尼龙66纤维/6061铝合金复合板的隔声量曲线如图9所示。可知,在面密度与厚度相近的情况下,随着纤维直径的减小,尼龙66纤维/6061铝合金复合板的隔声性能增强。

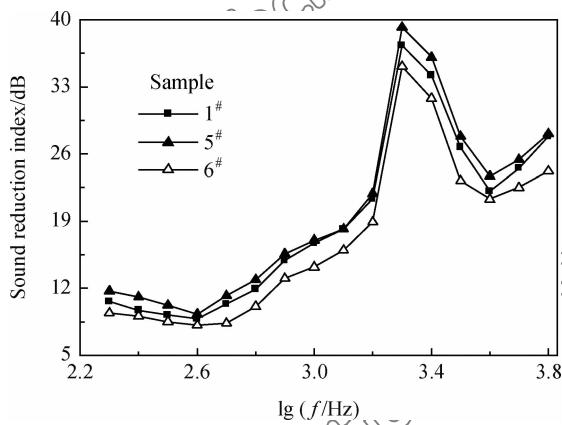


图9 不同纤维直径的尼龙66纤维/6061铝合金复合板的隔声量曲线

Fig. 9 Sound reduction index curves of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates with different fiber diameters

这是因为当声波入射时,一部分声波被纤维表面反射,另一部分则会进入纤维内部继续传播。由于植绒面密度相近,声波入射时的反射声波量相近。但是,纤维直径越小就越柔软,在声波入射时更容易发生振动,因此可将部分声能转化为振动能;同时,纤维直径越小,纤维间的空隙也就越小,声波透过时更容易与纤维发生摩擦,产生热能。由于纤维直径越小,声能就越容易转化为纤维的振动能与热能,故随着纤维直径减小,材料的透声量降低,隔声量增大。

### 3 结 论

#### (1) 尼龙66纤维/6061铝合金复合板植绒面密

度受到纤维静电力与纤维缠结量的影响。当植绒场强小于90 kV/11.5 cm时,纤维缠结量较少,植绒面密度随纤维静电力的增大而增大;反之,则纤维缠结量较多,面密度随纤维静电力的增大而减小。植绒的最佳工艺参数为:植绒电压90 kV、极板间距11.5 cm、植绒时间40 s。

(2) 尼龙66纤维/6061铝合金复合板植绒纤维的耐磨性能随胶黏剂涂覆量的增大而增大,但在不产生气泡的前提下,胶黏剂涂覆量不应超过 $155 \text{ g/m}^2$ 。

(3) 尼龙66纤维/6061铝合金复合板具有较高的中高频隔声性能。隔声量在500~1 600 Hz频率范围内满足6 dB/倍频程规律,而在2 000 Hz后将出现吻合效应,在4 000 Hz处出现隔声低谷。

(4) 通过提高尼龙66纤维/6061铝合金复合板植绒面密度来增加反射声量以及通过减小纤维直径增加声能吸收均可提高尼龙66纤维/6061铝合金复合板的隔声性能。

#### 参 考 文 献:

- [1] Viveros K C, Ambriz R R, Amrouche A, et al. Cold hole expansion effect on the fatigue crack growth in welds of a 6061-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2606-2616.
- [2] Rana A K, Mandal A, Bandyopadhyay S. Short jute fiber reinforced polypropylene composites: Effect of compatibiliser, impact modifier and fiber loading[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(6): 801-806.
- [3] Lu E, Kufahashi N, Ni Q Q, et al. Development of flexible soundproof materials[J]. Journal of the Society of Materials Science, 2006, 55(6): 583-588.
- [4] Niu B, Olhoff N, Lund E, et al. Discrete material optimization of vibrating laminated composite plates for minimum sound radiation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(16): 2097-2114.
- [5] Seepersad C C, Dempsey B M, Allen J K, et al. Design of multifunctional honeycomb materials[J]. AIAA Journal, 2004, 42(5): 1025-1033.
- [6] Ayub M, Fouladi M H, Ghassem M, et al. Analysis on multiple perforated plate sound absorber made of coir fiber[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2014, 19(3): 203-211.
- [7] Narang P P. Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption[J]. Applied Acoustics, 1995, 45(4): 335-358.
- [8] Coldwell R L, Hersh S P. The influence of processing varia-

- les on the properties of flocked fabrics[J]. IEEE Transactions on Industry, 1978, IA-14(2): 175-182.
- [9] Li C H, Lin X W, Cheng X S. Research of nylon66 composites[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2012, 40(22): 34-36 (in Chinese).
- 李灿浩, 林星五, 程新生. 尼龙 66 复合材料研究进展[J]. 广州化工, 2012, 40(22): 34-36.
- [10] Yang S Z, Yu J Y, Liu L F, et al. Investigation on electrostatic flocking process of sea-island fiber[J]. Journal of Textile Research, 2007, 28(7): 9-18 (in Chinese).
- 杨书珍, 俞建勇, 刘丽芳, 等. 海岛纤维静电植绒工艺研究[J]. 纺织学报, 2007, 28(7): 9-18.
- [11] Qin C F, Guo X L, Li Y. Investigation on electrostatic flocking process of activated carbon fiber[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2010, 24(1): 9-12 (in Chinese).
- 秦妙芳, 郭晓玲, 李勇. 活性炭纤维静电植绒工艺研究[J]. 西安工程大学学报, 2010, 24(1): 9-12.
- [12] Liu Z Q, Yu J Y, Yang J S. A fabric flocking density analysis[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2005, 33(10): 19-20 (in Chinese).
- 刘智清, 俞建勇, 杨纪松. 植绒织物植绒密度的分析研究[J]. 上海纺织科技, 2005, 33(10): 19-20.
- [13] Li H S, Qian K, Cao H J, et al. Experimental study on the sound insulation property of integrated hollow core sandwich composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(4): 167-170 (in Chinese).
- 李鸿顺, 钱坤, 曹海建, 等. 整体中空复合材料隔声性能的实验研究[J]. 复合材料学报, 2011, 28(4): 167-170.
- [14] Fu Y Q, Zhu C Y, Yu L M, et al. Experimental study on effects of arrangement of reinforcements on acoustic insulation property of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 68-72 (in Chinese).
- 傅雅琴, 朱春燕, 俞来明, 等. 增强材料的排列形式对复合材料隔声性能影响的实验研究[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 68-72.
- [15] Fu Y Q, Ni Q Q, Yao Y F, et al. Sound insulation performance of a glass fabric/PVC composite material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 94-99 (in Chinese).
- 傅雅琴, 倪庆清, 姚跃飞, 等. 玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料隔声性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 94-99.
- [16] Cui B X. Motion of the short fibre in the electric field[J]. Journal of Liaocheng Teachers University: Natural Science Edition, 1998, 11(3): 43-46 (in Chinese).
- 崔宝欣. 短纤维在静电场中的力学行为[J]. 聊城师院学报: 自然科学版, 1998, 11(3): 43-46.
- [17] Zhang Q, Xu Y. Motion pattern of fibers in electric field[J]. Journal of China Textile University, 1989, 15(2): 14-21 (in Chinese).
- 张渠, 徐盈. 纤维在电场中的运动规律[J]. 中国纺织大学学报, 1989, 15(2): 14-21.
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 21196—2007 Textiles—Determination of the abrasion resistance of fabrics by the Martindale method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 21196—2007 纺织品 马丁代尔法织物耐磨性的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [19] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 19889—2005 Acoustics—Measurement of sound insulation in buildings and of building elements[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 19889—2005 声学 建筑和建筑构件隔声测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

## Electrostatic flocking technology and sound insulation properties of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates

YAO Zhengjun\*, YAO Yibo, YUAN Ming

(School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and  
Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to investigate the flocking performances and sound insulating properties of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates under different flocking technology conditions, aluminium alloy 6061 plates and nylon 66 fibers were composited to prepare the sound insulation composite plates by electrostatic flocking technology. Then, the effects of processing parameters such as flocking time, flocking voltage, plate distance and adhesive coating amount et al on flocking areal density and wearability of flocking fibers were investigated. Finally, the sound insulation properties of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates under different frequencies of incoming audio and with different structural parameters of fibers were investigated by reverberation-anechoic chamber method. The results show that in the flocking time range of 0-40 s, the flocking areal density increases continuously with the flocking time increasing and then remains unchanged. While in the voltage range of 0-90 kV, with the increasing of voltage, flocking areal density increases continuously and then increases or decreases for the difference of plate distance. Wearability of flocking fibers increases with the increasing of adhesive coating amount, but after the coating amount surpasses 155 g/m<sup>2</sup>, the gas bubbles generate. When the flocking time is 40 s, flocking voltage is 90 kV, plate distance is 11.5 cm and adhesive coating amount is 155 g/m<sup>2</sup>, the nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates have the best properties. The composite plates have preferable sound insulating properties at medium and high frequencies, sound reduction index goes with the rule of 6 dB/octave within the frequency range of 500-1 600 Hz, and the tally effect occurs after 2 000 Hz. The sound reduction index of the nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates can be enhanced by increasing the flocking areal density and decreasing the nylon 66 fiber diameter. The research conclusions can lay the foundation for the development and application of new sound insulating composites used in architecture.

**Keywords:** electrostatic flocking; nylon 66 fiber; flocking areal density; reverberation-anechoic chamber method; sound insulation property