

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.01.002

航空级超细玻璃纤维棉毡的制备及隔音隔热性能研究

陈照峰 吴 操 杨 勇 李斌斌 陈 舟 邱金莲 苏 丹

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,210016)

摘要:航空级超细玻璃纤维是一种无机质纤维,具有体积小、热导率低、保温绝热、吸音性能好、耐腐蚀以及化学性能稳定等优点,是大型客机保温隔音的关键材料。本文通过火焰喷吹法制备出航空级超细玻璃纤维,并涂覆酚醛树脂黏结剂,在获得优异憎水性能的同时还具有优异的阻燃性能。然后采用扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)、光学显微镜、导热分析仪、驻波管以及接触角测试仪分别对棉毡的结构、声学性能以及憎水性能进行测试,结果表明:纤维直径在 $1.2\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 之间呈正态分布,棉毡的接触角为 142° ,憎水性能高达 98.9% ,阻燃性能优异且无滴落现象;棉毡隔音隔热性能优良,随着棉毡的容重增加,棉毡的导热系数降低,隔声量随之增加;层状结构的设计以及纤维直径的超细化有利于提高棉毡的保温隔音性能。

关键词:玻璃棉;隔音;隔热;纤维结构

中图分类号: TU55+1.32

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2016)01-0010-06

Preparation of Super-Fine Aviation Glass Wool and Its Property Study on Sound and Thermal Insulation

Chen Zhaofeng, Wu Cao, Yang Yong, Li Binbin, Chen Zhou, Qiu Jinlian, Su Dan

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Super-fine glass fiber is a kind of inorganic fibers, which has small volume density, low thermal conductivity, better sound absorbing performance, corrosion resistance and stable chemical properties, etc. In this paper, glass fibers are prepared by the flame blow process. Phenolic resin is used as a binder to obtain excellent flame retardancy and hydrophobic performance. The structure, acoustic performance and hydrophobic performance of glass fiber felts are characterized by scanning electron microscope (SEM), optical microscope, thermal conductivity analyzer, standing wave tube and contact angle tester. The results show that the fiber diameter presents normal distribution, mainly concentrated in $2.2\ \mu\text{m}$; The contact angle of glass fiber felt is 142° and the hydrophobic property is 98.9% . With the increase of density of glass fiber felts, the thermal conductivity reduces along with the increase of sound insulation. The design of the layered structure and refinement of glass fiber can improve the heat preservation and the sound insulation performance of glass fiber felts.

Key words: glass fiber felt; sound insulation; heat insulation; fiber structure

收稿日期: 2016-01-15; 修订日期: 2016-02-05

作者简介: 陈照峰,男,教授,博士生导师。主要研究方向为超细玻璃棉等超级绝热材料,该材料可用作真空绝热板芯材、气凝胶毡骨架、PM2.5 过滤网等。

通信作者: 陈照峰, E-mail: czf_msc@nuaa.edu.cn.

引用格式: 陈照峰,吴超,杨勇,等. 航空级超细玻璃纤维棉毡的制备及隔音隔热性能研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(1): 10-15. Chen Zhaofeng, Wu Chao, Yang Yong, et al. Preparation of super-fine aviation glass wool and its property study on sound and thermal insulation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 10-15.

超细玻璃纤维棉材料因其轻质、耐高温、耐腐蚀和保温隔声性能优异等特点被广泛应用于航空、航天、船舶等高新技术领域,是飞机、火箭及航母等高端运载工具必不可少的隔音隔热功能性材料,也是一个国家玻璃纤维工业发展水平的重要标志^[1]。中国制造的玻璃纤维棉丝产品直径大、棉毡容重高并且耐水性差,保温隔声效果一般,只能作为建筑墙体和热力管道的保温隔音材料^[2],广泛应用于民用领域,每吨仅 2 000~5 000 元。然而中国客机、高铁等民用高端领域所用的节能降噪玻璃纤维棉毡均从美国约翰曼文公司进口,每吨高达 20 余万元,且对中国军工产品实行禁运。因此,研究玻璃纤维棉毡制备工艺,探讨玻璃纤维棉毡结构对保温隔声性能的影响,开发航空级超细玻璃纤维棉毡,对于发展中国航空航天事业具有重要的战略意义。

玻璃棉属于玻璃纤维中的一个类别,是一种人造无机纤维。其制备工艺是先采用石英砂、石灰石和白云石等天然矿石为主要原料,配合纯碱、硼砂等化工原料熔融成玻璃液,然后借助离心等特殊技术吹制成絮状细纤维棉。这种纤维棉与长的玻璃纤维不同,长度较短,在 10 cm 以下,且棉中纤维丝与纤维丝之间互相缠绕在一起,为立体交叉状态,因而在棉毡中呈现出许多细小的孔隙,把空气隔离成一个一个小的单胞。空气和玻璃都具有低导热系数,多层立体交错棉丝又限制了空气的快速流动和扩散,即降低了空气的热对流,因而使棉毡具有良好的绝热、吸声性能。

航空级超细玻璃纤维棉毡的研制是一个系统而复杂的工程,棉毡的隔音、隔热性能不仅取决于纤维丝的成份、直径与分布,还与棉毡的容重、组织形态和分布结构密切相关。而棉丝和棉毡的结构都受控于制备技术,如玻璃熔制方法、火焰喷吹方法、集棉方法、喷胶方法和固化方法等。因此玻璃棉的制备过程属于玻璃棉公司核心技术,一般由核心团队管理与控制。

玻璃纤维棉毡的制备工艺主要有 4 种:压缩空气垂直喷吹工艺、微旋风法工艺、火焰喷吹工艺和离心喷吹工艺,其中火焰喷吹工艺和离心喷吹工艺是目前较为成熟且广泛使用的方法。垂直喷吹工艺制备的棉纤维直径较大、长度短、棉毡撕裂强度非常低,已逐渐淘汰;微旋风工艺技术还处于实验室研发和工程验证阶段,尚未得到普及;离心喷吹工艺容易实现检测和自动化、工艺成熟稳定并且产量大,但是玻璃纤维平均直径很难做到 3 μm 以下,纤维结构排布较差,保温隔声性能很难提升;火

焰喷吹工艺能够生产纤维直径在 0.1 μm 以下的玻璃纤维棉毡,保温隔声性能优异。

南京航空航天大学针对航空级超细玻璃棉毡的制备工艺开展了大量的研究工作^[3-8],并将超细玻璃棉毡推广到真空绝热板和气凝胶领域。本文研究了火焰法制备超细航空级玻璃棉毡的制备工艺及其隔音隔热性能,并研制出纤维直径为 1.5~4.0 μm ,呈正态分布的,棉毡结构呈超层化的航空级超细玻璃纤维棉毡。这种棉毡密度低,回弹性好,在使用状态下能长期保持安全稳定和高效隔音隔热性能。

1 棉毡制备过程与测试表征

1.1 胶黏剂的制备

为了改善玻璃纤维棉毡的强度和憎水等性能,本文在研制过程中在玻璃纤维中喷洒三聚氰胺和尿素改性的酚醛树脂胶黏剂,该酚醛树脂是苯酚和甲醛在氢氧化钠催化作用下制得的水溶液。制备过程为:(1)用苯酚、甲醛、尿素和三聚氰胺制备成改性的酚醛树脂;(2)按比例混合氨水、硅油、硅烷、硫酸铵、软化水和柔软剂制备成添加剂;(3)用改性酚醛树脂、添加剂与软化水混合后制备成含量为 6%~8%的胶黏剂。

1.2 棉毡的制备

航空级超细玻璃纤维制备采用火焰喷吹工艺,原料为 253# 玻璃球,示意图见图 1。制备过程为:(1)在窑炉内通过电加热玻璃球至 1 280~1 420 $^{\circ}\text{C}$,待玻璃球熔融后,排除气泡和杂质,然后经过 200 孔镍镉合金漏板流出,形成直径为 $\varnothing 25\sim 38$ mm 的一次纤维;(2)一次玻璃丝经过线速度 3~6 m/min 胶辊伸直,出胶辊后再经过 1 400~1 550 $^{\circ}\text{C}$ 、280~320 m/s 的高温高速燃气流二次熔融、分裂和牵伸,形成直径为微米或亚微米的二次纤维;(3)二次纤维经过配有负压风频率 43.4~

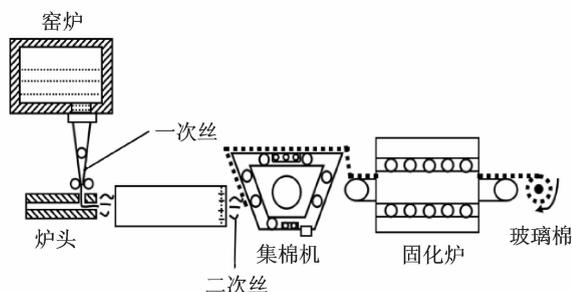


图 1 航空级超细玻璃纤维棉毡制备过程示意图
Fig. 1 Processing schematic of aviation superfine wool blanket

45.2 Hz 的集棉机收集,同时喷上尿素和三聚氰胺改性的憎水性酚醛树脂胶黏剂,再经过 180~210 °C 条件固化烘干 2~4 min 后形成连续玻璃棉毡;(4)经过切边和卷绕装置制成宽度为(0.914±12.7) m,厚度为 9.65~25.4 mm 的航空级超细玻璃纤维棉毡^[9-10]。

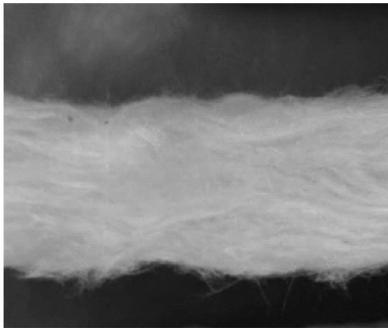
1.3 测试表征

本文用 HFM436/3/1E 热流法导热分析仪(德国耐驰)测量棉毡的导热系数;用 AWA6290T 传递函数吸声系数测试系统(杭州爱华仪器有限公司),依据 GB/T 18696.2—2002 测量棉毡隔声性能;用 L3230 金相显微镜(深圳市博视达),按照显微镜法测量棉毡纤维直径;用 SX2-6-14 马弗炉(常州市宏太成套纺织仪器有限公司)对棉毡进行除胶处理;依据 GB/T10299—2011 检测棉毡排水性;依据 CCAR/FAR25 测试棉毡 60 s 垂直燃烧性能。

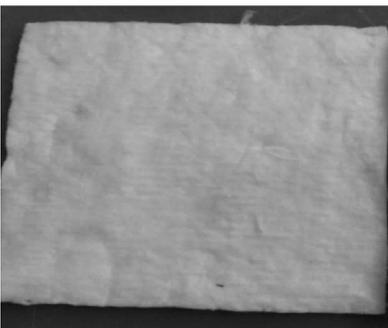
2 结果与讨论

2.1 棉毡的成份与组织结构

图 2 是航空级超细玻璃纤维棉毡产品结构图,其中图 2(a)是玻璃纤维棉毡实物剖面结构图,图 2(b)是玻璃纤维棉毡实物表面结构图。从图 2 可以看出航空级超细玻璃纤维棉毡剖面明显成层状分布结构,这种层状分布有利于提高棉毡的保温性



(a) Cross-section picture



(b) Surface picture

图 2 棉毡的产品结构图

Fig. 2 Structure pictures of glass wool blanket

能和隔声性能^[11],而沿着棉毡表面则一直呈现出杂乱无章分布状态,保证了平面方向空气单胞的分布均匀性。

图 3 是棉丝的剖面扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)照片。从图中可以看出,在 5 μm 的尺度时,棉毡剖面已经没有分层结构,纤维之间相互搭接分散,纤维直径也有一定差异,呈现出自由杂乱的分布结构。

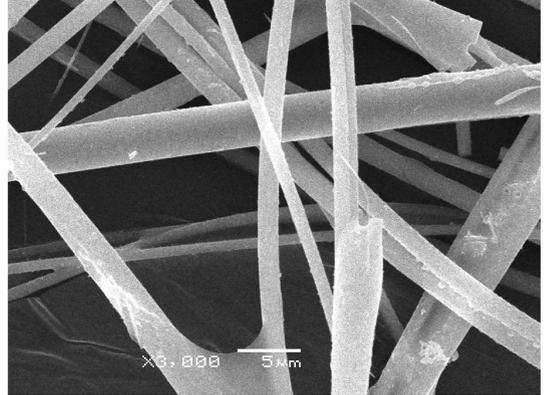


图 3 棉丝剖面的 SEM 图

Fig. 3 SEM micrograph of glass filament

图 4 是纤维直径分布图。从图 4 中可以看出,玻璃纤维直径分布呈现标准的正态分布,直径大于 1.2 μm 的玻璃纤维数量迅速增加,大于 2.2 μm 的玻璃纤维数量几乎直线下降。玻璃纤维直径分布主要集中在 1.2~3.2 μm,其他范围分布很少,计算得到玻璃纤维直径的平均值约为 2.2 μm。

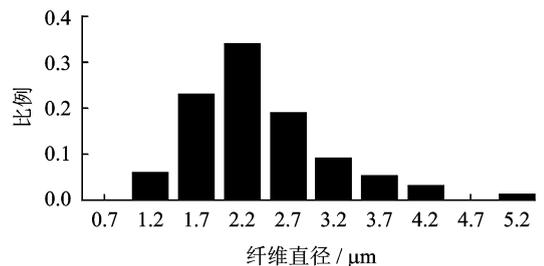


图 4 棉丝直径分布图

Fig. 4 Distribution picture of diameter of glass filament

2.2 棉毡的憎水性能

未喷胶的玻璃棉为开孔的多孔材料,具有极强的吸水储水能力,与水接触后迅速吸收并储存于其内部。因此,未喷胶的玻璃棉的吸水量极高。通过水平正交实验,开发了柔性憎水性胶黏剂。该黏结剂中的憎水剂硅油水解产生硅醇,硅醇与玻璃纤维表面的基团结合,在纤维表面形成一层憎水的硅氧

膜,可有效阻止水分子吸附在玻璃纤维表面,增加玻璃棉毡的憎水性能,使棉毡接触角达到 142° (如图 5 所示)。依据 GB/T10299—2011 检测,棉毡憎水率达到 98.9%,憎水性能优异^[12],达到了波音 BMS8-48 的相关指标。



图 5 棉毡接触角测试图

Fig. 5 Contact angle of glass wool

2.3 棉毡的阻燃性能

图 6 是棉毡 60 s 垂直燃烧后的图片。通过研发三聚氰胺和尿素改性酚醛树脂胶黏剂体系,使得棉毡胶黏剂内部形成大量的刚性基团,提高了胶黏剂的耐热性能。棉毡在 CCAR/FAR25, 60 s 垂直燃烧实验条件下无燃烧现象发生,火源移开之后,棉毡无续燃和燃烧物滴落现象。

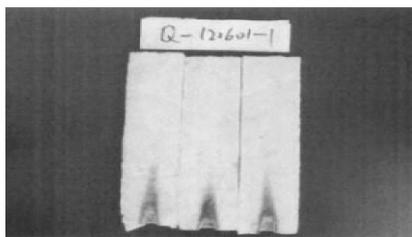


图 6 棉毡 60 s 垂直燃烧测试图

Fig. 6 60 s vertical burning results of glass wool

此外,航空级超细玻璃纤维棉毡按照 GB18580—2001《室内装饰装修材料人造板及其制品中甲醛释放限量》测试甲醛含量低于检出限 0.3 mg/L ,因此不散发甲醛、挥发性有机化合物 (Volatile organic compound, VOC) 及任何异味,是一种绿色环保产品。

2.4 纤维直径对棉毡隔声性能的影响

图 7 为不同纤维直径声音传输损耗对比图,由图可见纤维直径越小,传声损耗越小。随着声波频率的增加,棉毡隔声性能先降低后提高,总体上棉毡在高频率处的隔声性能优于低频处的隔声性能。

当声波入射到棉毡表面时,一部分声波在棉毡表面反射,另一部分声波在棉毡内部传播。而传入

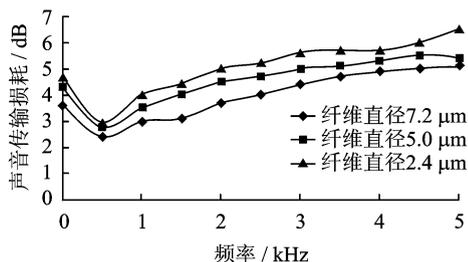


图 7 不同纤维直径棉毡的声音传输损耗对比

Fig. 7 Sound transmission loss of glass wool with different fibre diameters

棉毡内部的声波,只有部分在棉毡内部摩擦损耗掉,没有损耗掉的声波则会穿透棉毡,形成噪声。纤维直径越细,单位体积内部纤维含量也就越多,进入棉毡内部的声波与纤维之间的摩擦和引起的纤维自身的振动也就越剧烈,消耗的能量也就越大,声波的强度就大大降低。此外,纤维直径越细,纤维结构也就越致密,在纤维表面层处反射的声波比例也就越大,隔声性能提高。

2.5 棉毡密度对隔声性能的影响

图 8 是不同密度棉毡声音传输损耗对比图,由图可见容重越大隔声性能越好。隔音按照频率分成 2 个区域:低于 500 Hz 为阻尼控制区,高于 500 Hz 为质量控制区。

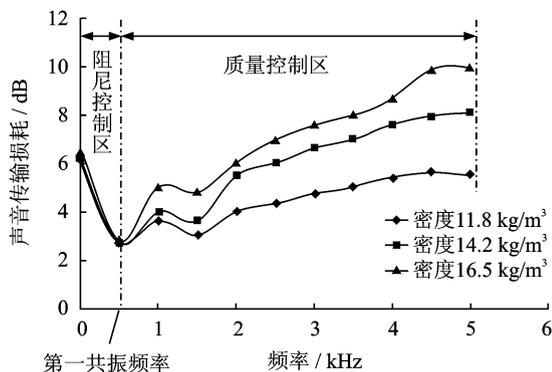


图 8 不同密度棉毡的声音传输损耗对比

Fig. 8 Sound transmission loss of glass wool with different densities

在阻尼控制区,同一密度的棉毡材料声音传输损耗值会随着频率的增大而逐渐下降。隔声性能高低主要取决于纤维材料的共振频率和刚度^[13],当入射波频率达到材料的自身固有频率时,会与材料本身发生共振,此时棉毡的声音传输损耗值降至最低,最低处的频率称为第一共振频率。

在质量控制区,棉毡的声音传输损耗值随着棉

毡密度的增加而增加。随着棉毡密度的增加,棉毡内部的空隙率和孔径都会变小,因而材料内部的比表面积就会变大,声音也就更容易在穿透棉毡材料的过程中形成反射和摩擦损耗,穿透材料的声波强度也就越小。因此容重越大,隔声性能越好^[14]。

2.6 棉毡容重对导热系数的影响

图9为不同容重棉毡的隔热性能。由图可见随着容重升高,玻璃棉毡的导热系数降低,说明棉毡的密度越大,棉毡的保温效果越好。

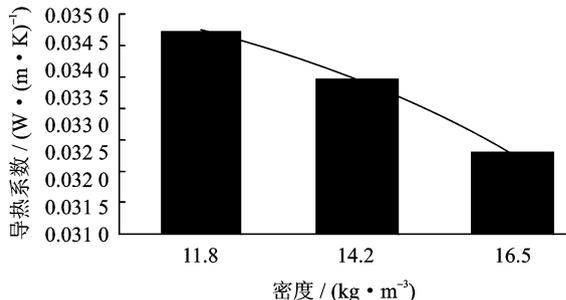
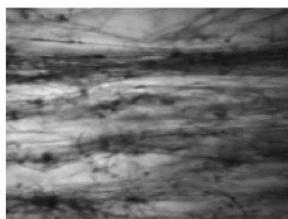
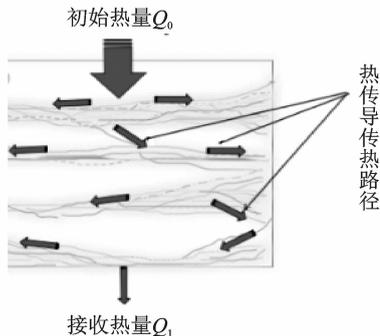


图9 不同容重对棉毡保温性能的影响

Fig. 9 Thermal insulation performance of glass wool with different densities



(a) Microscope photograph of layer structure



(b) Schematic of thermal conductivity of layer structure

图10 层状结构对导热系数的影响

Fig. 10 Effect of layer structure on thermal conductivity

3 结 论

(1)通过火焰法成功制备了航空级超细玻璃纤维棉毡,棉丝直径在 $1.2\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 之间正态分布,棉毡剖面呈现多层结构,从而使棉毡具有优异的隔音隔热性能。

(2)通过三聚氰胺、酚醛树脂和硅油等合成了高性能阻燃憎水航空级超细玻璃纤维棉毡粘结剂,憎水接触角为 142° ,60 s燃烧测试没有续燃和滴落物,燃烧过程没有甲醛释放,达到了波音BMS8-48的相关指标。

热量传递主要是通过热对流、热传导和热辐射的方式进行。航空超细玻璃纤维棉毡在自然状态下,空气引起的热对流起着主导作用。随着棉毡密度的增加,棉毡内部的空隙率和孔径减小,空气通过棉毡内部就变得不容易,因此导热系数大大减少。

2.7 棉毡层状结构对导热系数的影响

图10为层状结构对导热系数的影响。李承东等人^[15]针对层状结构对玻璃纤维导热性能的影响进行了研究,发现层状结构的玻璃纤维棉有利于纤维之间致密搭接和均匀分散,减少热对流。此外,由于热传导只能沿固体之间传导,而棉毡呈层状结构分布,层与层之间的通过热传导传递的热量只能通过层与层之间少数的纤维进行传递。因此在层状结构下,当热量 Q_0 从第1层传递到第4层时,传递的路径大大增加,这就需要耗散大量热传导传递的热量,接收到的热量 Q_1 就大大减小,因此航空超细玻璃纤维棉毡层状结构有利于提高其保温性能。同时在厚度方向减少贯穿纤维丝,即减少了热桥音桥效应,提高了隔热隔音效果。

(3)航空级超细玻璃纤维棉毡吸音性能随着纤维直径的减小而增加,随着棉毡密度的增加而增加,层状结构减少了棉丝在厚度方向的热桥效应,因而棉毡性能具有可设计性。

致谢

本文作者感谢军品配套项目和上海飞机设计研究院的支持。

参考文献:

- [1] Lewis A. Glass fiber binder for aircraft insulation: USA, US20120205571[P]. 2012.
- [2] 张耀明,李巨白,姜肇中. 玻璃纤维与矿物棉全书

- [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001:1-4.
- Zhang Yaoming, Li Jubai, Jiang Zhaozhong. Glass fiber and mineral wool encyclopedia[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001:1-4.
- [3] 陈照峰. 一种集棉用均匀化负压风机装置及操作方法: 中国,104843991A[P]. 2015-08-19.
- Chen Zhaofeng. A set of cotton with homogenization of suction fan device and method of operation: China, 104843991A[P]. 2015-08-19.
- [4] 陈照峰. 一种超层结构超细玻璃棉毡: 中国, 104626666A[P]. 2015-05-20.
- Chen Zhaofeng. A superfine glass wool blanket layer structure: China, 104626666A [P]. 2015-05-20.
- [5] 陈照峰. 一种超层结构超细玻璃纤维棉毡制备方法: 中国, 104630985A[P]. 2015-05-20.
- Chen Zhaofeng. A super layer structure of super fine glass fiber cotton blanket preparation methods: China, 104630985A[P]. 2015-05-20.
- [6] 陈照峰. 一种低容重隔音隔热玻璃纤维棉毡及其制备方法: 中国,104746235A[P]. 2015-03-24.
- Chen Zhaofeng. A low bulk density noise insulation glass fiber cotton blanket and its preparation methods: China, 104746235A[P]. 2015-03-24.
- [7] Shoshani Y, Yakubov Y. Numerical assessment of maximal absorption coefficients for nonwoven fiberwebs[J]. Applied Acoustics, 2000,59:77-87.
- [8] Li B, Chen Z, Qiu J, et al. Effect of service time of centrifugal pan on glass wool[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012,27(11):1213-1216.
- [9] 丁九福, 朱志付, 谢景林. 2000 吨/年火焰法与离心法玻璃棉生产线工艺比较[J]. 广东建材, 2000(3): 11-12.
- Ding Jiufu, Zhu Zhifu, Xie Jinglin. 2000 tons/year flame method compared with centrifugal glass wool production line process[J]. Guangdong Building Material, 2000(3):11-12.
- [10] 吴淑荣, 孙文权. 离心喷吹玻璃棉工艺研究[J]. 玻璃纤维, 1985(5):33-36.
- Wu Shurong, Sun Wenquan. Centrifugal blowing wool technology research[J]. Journal of Glass Fiber, 1985(5):33-36.
- [11] Li C D, Duan Z C, Chen Q, et al. The effect of drying condition of glass fiber core material on the thermal conductivity of vacuum insulation panel[J]. Materials & Design, 2013,50:1030-1037.
- [12] Yang Y, Chen Z, Chen Z, et al. Processing technique and uniformity affecting tensile strength and hydrophobicity properties of glass wool felt[J]. Fibers and Polymers, 2015,16(7):1587-1594.
- [13] Seddeq H S, Aly N M, Ali M A, et al. Investigation on sound absorption properties for recycled fibrous materials[J]. Journal of Industrial Textiles, 2013,43(1):56-73.
- [14] Jaouen L, Renault A, Deverge M. Elastic and damping characterizations of acoustical porous materials: Available experimental methods and applications to a melamine foam[J]. Appl Acoust, 2008, 69(12): 1129-1140.
- [15] Li C D, Chen Z F, Boafu F E, et al. Effect of pressure holding time of extraction process on thermal conductivity of glass fiber VIPs[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014,214(3):539-543.

