

飞机隔音棉包覆层热封参数优化研究

何立冬, 曹恒, 方明周, 陈诚

(华东理工大学, 上海 200237)

摘要: **目的** 研究飞机隔音棉制造过程中包覆层的最佳热封参数。**方法** 分析不同的热封工艺参数(热封温度、热封压力、热封时间)对隔音棉包覆层热封强度的影响,建立主要热封参数与热封强度的数学模型。在此基础上,利用 LabVIEW 对材料进行热封强度仿真计算和热封参数优化设计,并对数学模型得出的最佳热封工艺参数进行实验验证。**结果** 模型的理论计算值与实验结果基本一致,验证了模型的正确性。**结论** 实现了隔音棉材料热封参数的优化,为某飞机制造公司在隔音棉热封中热封参数的设定提供了参考。

关键词: 热封强度; 工艺参数; 仿真计算; 参数优化

中图分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)19-0046-06

Cladding Layer Heat-seal Parameters Optimization of Aircraft Sound Insulation Cotton

HE Li-dong, CAO Heng, FANG Ming-zhou, CHEN Cheng

(East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

ABSTRACT: Objective To study the optimal heat-seal parameters of the cladding layer in the manufacturing process of the aircraft sound insulation cotton. **Methods** The effects of different heat-seal processing parameters (heat-seal temperature, time and pressure) on the cladding layer heat-seal intensity of sound insulation cotton were analyzed, and mathematical models were established for main heat-seal parameters and heat-seal intensity. Based on this, heat-seal intensity was simulated and heat-seal parameters were optimized by LabVIEW software, in order to verify the mathematical models. **Results** The model calculated data was essentially identical to the experimental data, and the accuracy of the model was verified. **Conclusion** The optimization of heat-seal parameters was realized, which provides reference for setting the seal-heat parameters in the sound insulation cotton heat-seal processing of an aircraft manufacturing company.

KEY WORDS: heat-seal intensity; process parameter; simulation calculation; parameter optimization

热封是软塑材料成型、封合最主要的技术方法和手段,通过在一定温度下施加压力使 2 层聚合物熔融在一起完成热封,同时要求冷却后热封处要保持一定的热封强度^[1-2]。在包装材料的应用中,热封处最容易发生破损,热封性能的优劣将直接影响产品的质量。由此可见,包装材料的热封性能和热封强度是影响包装质量的重要因素^[3-4]。

隔音棉热封材料的实际热封效果和热封强度受到很多因素的影响,一是热封机本身的热封参数,它直接影响材料最后的热封强度,如热封温度、压力和时间;另一类就是隔音棉热封材料本身的化学和物理特性,如熔点、密度、表面结构、厚度等^[5-7]。由于隔音棉材料目前主要依靠进口,其热封工艺参数还是未知数,所以研究隔音棉材料的最佳热封参数对隔音棉包

收稿日期: 2014-04-14

作者简介: 何立冬(1989—),男,浙江绍兴人,华东理工大学硕士生,主攻包装机械与工艺。

通讯作者: 曹恒(1954—),男,上海人,博士,华东理工大学教授,主要研究方向为包装机械设计与制造、嵌入式控制系统与动力学仿真。

覆层的热封效果和强度具有重要意义。文中通过实验分析不同热封工艺参数对隔音棉包覆层材料热封强度的影响,建立热封强度的数学模型,并验证模型的合理性,确定隔音棉热封材料的最佳热封参数,为隔音棉材料热封提供理论依据。

1 实验

1.1 材料

实验材料:耐火焰蔓延包覆层,型号为TEREL9和TEREL10,厚度分别为0.07 mm和0.09 mm;耐火焰烧穿包覆层,型号为TERFLAME29和TERFLAME30,厚度分别为0.1 mm和0.12 mm。

1.2 设备

实验设备:CR4500型隔音棉脉冲式热封机,由华东理工大学传感测控研究所研制,用于隔音棉材料的热封;微机控制电子拉力试验机,由深圳市新三思材料检测有限公司生产,用于隔音棉材料的热封强度的测试。

1.3 方法

按QB/T 2358—1998塑料薄膜包装袋热合强度实验方法,试样宽度(25.4 ± 0.1) mm,长度(150 ± 1) mm。

热封采用正交实验法^[8],考虑到材料厚度、热封时间、热封温度、热封压力等4个因素的相互作用,构造一个三水平四因素的正交实验。选用正交实验表L27(313),对每种材料先后做27次热封实验。热封后将试样放在相对湿度为常湿状态,温度为25℃的环境中调节24 h。试样经过24 h状态调节后,用电子拉力试验机测定其热封强度。如果热封处未剥离或试样断在夹具内,则重新测试。每种工况测试5次,取平均值。

2 热封参数分析

2.1 结果分析

在热封时间为3 s、热封压力为0.2 MPa、不同厚度的条件下,热封温度与热封强度的关系见图1。由图1可知,热封材料越厚,其相对应的热封强度就越大。

热封压力为0.2 MPa时,不同热封温度下热封时间与热封强度关系见图2。由图2可知,热封强度随温度的上升而增加,当热封温度较低时,热封时间对热封强度的影响较大,但是,随着温度的上升,这种影响逐渐变小。由图1—2可知,当热封温度达到一定值时,热封强度随温度的上升反而减小。热封压力分别为0.15 MPa和0.2 MPa时,在不同热封时间内,热封温度和热封强度关系见图3。由图3可知,当热封时间较短时,热封压力对热封强度影响较大;当热封时间变长,热封压力对热封强度的影响逐渐变小。由此,当热封时间较短时,增大热封压力能有效地提高热封强度。

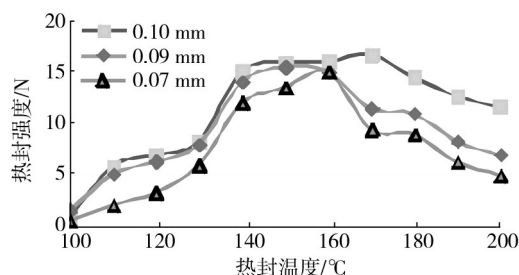


图1 不同材料厚度热封温度-强度曲线

Fig.1 Heat-seal temperature-intensity curve at different material thickness

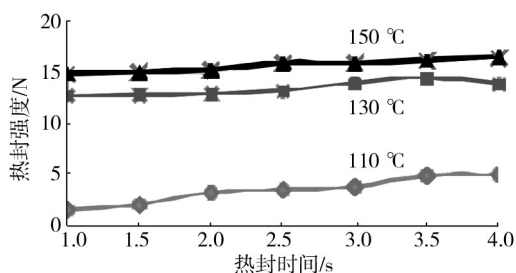


图2 TEREL9在不同热封温度下热封时间-强度曲线

Fig.2 Heat-seal time-intensity cure of TEREL9 at different heat-seal temperature

综上所述,热封温度、热封时间、热封压力、材料厚度对热封强度都有不同程度的影响。其中,热封温度对热封强度的影响最显著,时间、压力和材料厚度对热封强度的影响相对较小。

2.2 参数回归分析

根据实验结果,材料TEREL9的最佳热封参数为:热封温度为 (150 ± 5) ℃,热封时间为3 s,热封压力为0.15 MPa,厚度为0.07 mm。为了更好地分析热封强度和各参数之间的关系,利用Excel和统计学原理对实

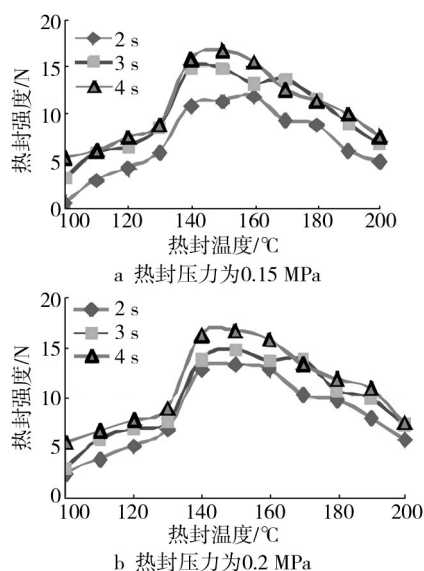


图3 TEREL9在不同热封时间下热封温度-强度曲线

Fig.3 Heat-seal temperature-intensity curve of TEREL9 at different heat-seal time

验数据进行回归分析,建立回归数学模型^[9]。材料TEREL9的数学模型为:

$$y = -101.001 - 3682.43T + 1.247x_1 + 5.4398x_2 + 61.3709x_3 - 0.0056x_1x_2 - 21.0384x_2x_3 + 0.1488x_1x_3 + 52\,653.74T^2 - 0.0040x_1^2 + 0.0665x_2^2 - 6.31x_3^2 \quad (1)$$

材料TEREL10的数学模型为:

$$y = -67.0665 - 11.28T + 1.2059x_1 - 1.3235x_2 - 121.445x_3 - 0.0019x_1x_2 + 26.5932x_2x_3 + 0.1311x_1x_3 - 0.039x_1^2 + 0.4824x_2^2 - 10.32x_3^2 \quad (2)$$

材料TERFLAME29的数学模型为:

$$y = -83.535 - 6.13T + 1.2849x_1 - 3.3271x_2 - 111.737x_3 - 0.0012x_1x_2 + 27.51x_2x_3 + 0.1497x_1x_3 - 0.004x_1^2 + 1.3492x_2^2 - 0.42x_3^2 \quad (3)$$

材料TERFLAME30的数学模型为:

$$y = -77.8847 + 4.6724T + 1.0694x_1 + 1.5940x_2 - 20.3663x_3 - 0.0136x_1x_2 + 3.1716x_2x_3 + 0.9393x_1x_3 - 0.003x_1^2 + 0.0887x_2^2 + 6.21x_3^2 \quad (4)$$

式中: y 为热封强度; x_1 为热封温度; x_2 为热封时间; x_3 为热封压力; T 为材料厚度。且 $100 \leq x_1 \leq 200$, $2 \leq x_2 \leq 4$, $0.1 \leq x_3 \leq 0.2$ 。

2.3 拟合模型与实验结果比较

为了比较拟合模型和实验数据,根据式(1)计算

相对应的热封强度数值绘制对比折线,结果见图4。从图4可知,统计模型 y 和实验数据相近,曲线拟合较好。由于实验数据点较少,因此所建模型 y 稍有误差。如果能获得更多实验数据,那么所得到的模型将会更加准确。式(2)~(4)也可得类似结果。

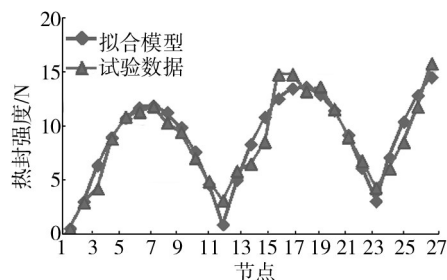


图4 拟合模型与实验数据比较

Fig.4 Comparison of fitting model and experimental data

3 热封参数优化设计

3.1 热封强度仿真

为了更好地比较不同热封参数对热封强度的影响,根据实验数据和式(1)~(4)拟合的数学模型,利用LabVIEW仿真建立热封强度计算可视化界面,见图5。该界面具有较好的人机交互性,只需选择相应的热封材料,并输入相应的热封参数(热封温度、热封压力、热封时间、材料厚度),点击启动,热封强度值就会通过计算显示。该界面还具有保存功能,可将各组数据保存在右侧的列表中,方便用户查看和比较。



图5 LabVIEW热封强度计算界面

Fig.5 Calculation interface of heat-seal intensity of LabVIEW

LabVIEW仿真界面显示的热封强度数值是建立在拟合模型基础上的,虽然和实验所得数据稍有差别,但是误差在允许范围之内。由此可见,仿真界面根据热封参数所得的热封强度是基本准确的。

3.2 热封参数优化

材料热封参数优化可描述为求 $F(x)$ 的最大值,满足 $100\leq x_1\leq 200, 2\leq x_2\leq 4, 0.1\leq x_3\leq 0.2$ 。 $F(x)$ 为前面各种材料拟合的数学模型。LabVIEW热封强度优化界面见图6,该优化界面是基于LabVIEW软件包中的FindallMinimanD函数开发的,可用来求解有约束多元函数最优值。在进行参数优化时,只需输入材料厚度,并选择材料种类,点击优化,就能得到此种材料的最佳热封参数和相对应的热封强度。此界面可计算出多种材料的最佳热封参数,为用户在热封过程中选择最佳热封参数提供参考依据。通过此优化界面可以得到各材料的热封优化参数,见表1。

表1中所列各优化参数数值是基于拟合的数学模型,通过LabVIEW界面计算所得,与前面所得实验数据相比,热封强度数值都比实验数据高,说明优化结果正确。为了验证拟合模型的正确性,再对每种材料优化后的热封参数做3组对照实验。由前面分析可知

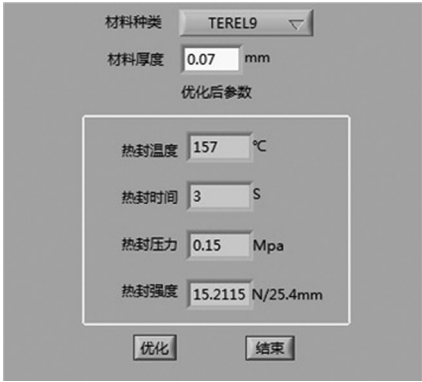


图6 LabVIEW热封强度优化界面
Fig.6 Optimized interface of heat-seal intensity of LabVIEW

对热封强度影响最大的是热封温度,所以只改变热封温度,其他参数不变,结果见表2。

从表2可知,各材料优化后参数所得的实验结果是最好的,只有具体的热封强度与优化后的结果稍有差异,这主要是由拟合和实验误差引起的,在可允许范围以内,因此拟合模型所得的优化参数是合理的。

表1 材料热封优化后参数
Tab.1 Heat-seal parameter of different material after optimization

材料牌号	材料厚度/mm	热封温度/℃	热封时间/s	热封压力/MPa	热封强度/N
TEREL9	0.07	157	3	0.15	15.21
TEREL10	0.09	162	3	0.12	15.93
TERFLAME29	0.10	165	3	0.20	16.55
TERFLAME30	0.12	173	4	0.20	18.30

表2 热封参数验证结果
Tab.2 Validation result of heat-seal parameters

材料牌号	厚度/mm	热封温度/℃	热封时间/s	热封压力/MPa	热封强度/N
TEREL9	0.07	155	3	0.15	13.80
		157	3	0.15	13.95
		160	3	0.15	13.75
TEREL10	0.09	160	3	0.12	14.91
		162	3	0.12	15.40
		165	3	0.12	15.26
TERFLAME29	0.10	160	3	0.18	16.03
		165	3	0.18	16.13
		170	3	0.18	16.03
TERFLAME30	0.12	170	4	0.20	17.74
		173	4	0.20	17.79
		175	4	0.20	17.50

4 结语

1) 通过实验分析了材料厚度、热封温度、热封时间、热封压力等对隔音棉热材料热封强度的影响。结果表明,热封温度对热封强度的影响最显著,热封时间、材料厚度与热封压力影响较小。

2) 建立了热封参数与热封强度的数学模型,利用LabVIEW对材料进行了热封强度仿真计算和热封参数优化设计,并对数学模型得出的最佳热封工艺参数进行实验验证。结果表明,模型的理论计算值与实验值基本一致,为飞机隔音棉材料热封提供了理论依据,可大大减少探索时间与实验次数,提高经济效益。

参考文献:

- [1] HASHIMOTO Y, TETUYA T, ISHIAKU U S, et al. The Effect of the Heat Sealing Temperature on the Properties of OPP or CPP Heat Seal. I. Mechanical Properties[J]. Polymer Engineering and Science, 2006, 46(2): 205—214.
- [2] TETUYA T, ISHIAKU U S, MACHIKO M, et al. Effect of the Heat Sealing Temperature on the Properties of OPP or CPP Heat Seals Part II: Crystallinity and Thermo Mechanical Properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 99: 513—519.
- [3] MUHLFELD L, LANGGUTH P, HUSLER H, et al. Influences of Heat Seal Lacquer Thickness on the Quality of Blister Packages[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2012, 45(1/2): 150—157.
- [4] MIHINDUKULASURIVA S, LIM L T. Effects of Liquid Contaminants on Heat Seal Strength of Low-density Polyethylene Film[J]. Packaging Technology and Science, 2012, 25(5): 271—284.
- [5] MICHAEL B, MIKE D, TOM D, et al. Polarized Light Stress Analysis and Laser Scatter Imaging for Non-contact Inspection of Heat Seals in Food Trays[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 112(3): 183—190.
- [6] AITHANI D, LOCKHART H, AURAS R, et al. Heat Sealing Measurement by an Innovative Technique[J]. Pack Technol Sci, 2006, 19(5): 245—257.
- [7] 孙智慧, 段青山, 李萌萌, 等. 包装塑料薄膜热封参数及强度的研究[C]// 2005年全国农产品加工、食品和包装工程学术研讨会论文集, 2005: 207—213.
SUN Zhi-hui, DUAN Qing-shan, LI Meng-meng, et al. Heat-seal Parameters and Intensity Research on Plastic Packaging Film Heat-seal Parameters[C]// The National Agricultural Products Processing, Food and Packaging Engineering Symposium Proceedings in 2005, 2005: 207—213.
- [8] 张勃, 吉洪湖, 杜发青, 等. 基于正交法的直通篦齿封严齿形几何参数对换热特性影响的实验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4): 134—139.
ZHANG Bo, JI Hong-hu, DU Fa-qing, et al. Orthogonal Design Experimental Investigation of Effect of Tip Geometrical Parameters Oil Heat Transfer of Straight through Labyrinth[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 134—139.
- [9] 徐克非, 孙智慧, 李萌萌. 塑料包装薄膜热封参数的仿真[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 194—196.
XU Ke-fei, Sun Zhi-hui, LI Meng-meng. Simulation Research on Plastic Packaging Film Heat-seal Parameters[J]. Agricultural Engineering, 2006, 37(8): 194—196.
- [10] 吴世青, 孟焯, 孙志军, 等. 裤袜包装袋热封切参数的优化研究[J]. 塑料工业, 2013, 41(3): 64—67.
WU Shi-qing, MENG Chuo, SUN Zhi-jun, et al. Optimization Study on Heating and Sealing Parameters of Pantyhose Packaging Bag[J]. China Plastic Industry, 2013, 41(3): 64—67.
- [11] 刘东芳, 于佳佳, 陈欣. PA/LDPE复合膜包装的热封性与热粘性研究[J]. 中国包装, 2013(3): 50—53.
LIU Dong-fang, YU Jia-jia, CHEN Xin. Study on PA/LDPE Heat Sealing and Heat Viscosity of Composite Film Packaging[J]. China Packaging, 2013(3): 50—53.
- [12] 王东升, 郭永健, 母军. PET/PE复合材料最佳热封工艺参数研究[J]. 包装工程, 2012, 33(19): 72—74.
WANG Dong-shen, GUO Yong-jian, MU Jun. Research on Optimal Heat-seal Processing Parameters of PET/PE Composite Material[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(19): 72—74.
- [13] 赵漫漫, 卢立新. 有关PET/AL/PE复合包装薄膜热封工艺参数的研究[J]. 塑料, 2008, 37(2): 87—91.
ZHAO Man-man, LU Li-xin. Heat-seal Processing Parameters of Packaging Laminated Film PET/AL/PE[J]. Plastic, 2008, 37(2): 87—91.
- [14] 杜玉宝. 牛奶黑白膜的热封参数对薄膜热封强度影响的理论与实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
DU Yu-bao. Theoretical and Experimental Research of the Heat-seal Parameters Impacts on the Heat-seal Strength of Black and White Film for Milk Packaging[D]. Xi'an: Xi'an

University of Science and Technology, 2007.

- [15] 李晓燕,孙智慧. 包装机中塑料薄膜常热式热封参数的实验研究[J]. 包装工程, 2003, 24(6): 32—34.

LI Xiao-yan, SUN Zhi-hui. Research on the Film Heat-sealing Course in Heated-continuously Packing Machine through Experiments[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6): 32—34.

- [16] 潘道津,孟宪文,寇金宝,等. 冠盒式容器包装及其成型工艺的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(11): 75—77.

PAN Dao-jin, MENG Xian-wen, KOU Jin-bao, et al. Research on Top Carton Bottle Packaging and Its Forming Technology[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(11): 75—77.

(上接第41页)

参考文献:

- [1] TANNER R L. Radio Interference from Corona Discharges[R]. Menlo Park: Standard Research Institute, 1963: 33—106.
- [2] 李宇明,孙永卫. 包装材料的防静电设计[J]. 包装工程, 2011, 32(10): 73—75.
- LI Yu-ming, SUN Yong-wei. Anti-electrostatic Design of Packing Material[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(10): 73—75.
- [3] 宣兆龙,易建政,于新龙. 防静电封存封套材料研究[J]. 包装工程, 2007, 28(3): 37—38.
- XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng, YU Xin-long. Study of Antistatic Envelope Materials[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(3): 37—38.
- [4] 张晓玉,袁玉珍. 微电子产品防静电包装材料的研究进展[J]. 包装工程, 2013, 34(13): 117—122.
- ZHANG Xiao-yu, YUAN Yu-zhen. Development Progress of Anti-static Packaging Material for Microelectronic Products[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(13): 117—122.
- [5] GUNN R. Army-Navy Precipitation Static Project[J]. Proc IRE, 1946, 34(4/5): 247—254.
- [6] TERHASEBORG J L, TRINKS H. Electric Charging and Discharging Processes of Moving Projectiles[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980(2): 227—233.
- [7] 郑会志,胡小锋,杜照恒,等. 飞行器表面材料沉积静电的初步研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2612—2616.
- ZHENG Hui-zhi, HU Xiao-feng, DU Zhao-heng, et al. The Primary Research of Precipitation Static on Aerial Vehicle Surface Material[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2612—2616.
- [8] 刘尚合. 静电理论与防护[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999.
- LIU Shang-he. Electrostatic Theory and Protection[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1999.
- [9] 孙可平,宋广成. 工业静电[M]. 北京: 中国石化出版社, 1994.
- SUN Ke-ping, SONG Guang-cheng. Industry Electro-static[M]. Beijing: Chinese Petrification Press, 1994.
- [10] 杨有启. 静电安全技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1983.
- YANG You-qi. Safety Technology of Electrostatic[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 1983.
- [11] 鲍重光. 静电技术原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- BAO Chong-guang. Technology Principle of Electrostatic[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993.
- [12] PECHACEK R E, GREIG J R, MURPHY D P. Electrostatic Charging of the CH-53E Helicopter[R]. Washington: Naval Research Laboratory, 1985.
- [13] ANDERSON R V. Electrostatic Theory Applied to Helicopter Charging[J]. Lightning Technology Round-up, 1983(8): 60—69.
- [14] JUAN D L C, HERBERT J. Theoretical Analysis of Aircraft Electrostatic Discharge[R]. U S. ARMY Aviation Materiel Laboratories Fort Eustis, 1965.
- [15] DALZIEL C F, LEE W R. Lethal Electric Currents[J]. IEEE Spectrum, 1969, 34: 44—50.
- [16] 菅义夫. 静电手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- JIAN Yi-fu. Electrostatic Manual[M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [17] 吉林化学工业公司设计院. 静电安全手册[M]. 北京: 劳动出版社, 1978.
- Institution of Jilin Chemistry Industry Company. Electrostatic Safety Manual[M]. Beijing: Labor Press, 1978.