

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.10.005

聚氨酯软质泡沫的制备、孔结构和排油性能^{*}

魏徵^{1,2}, 王源升^{1,2}, 杨孟春¹, 王方超¹

(1. 海军工程大学理学院, 武汉 430033; 2. 海军工程大学舰船工程系, 武汉 430033)

摘要:以聚醚多元醇 PPO330 和甲苯二异氰酸酯为原料,采用一步法发泡工艺,制备了两种催化剂用量不同的聚氨酯软质泡沫 (PUF),研究了它们的孔结构和排油性能。结果表明,PUF 的泡孔结构较为规整且泡壁表面光滑均匀。其中 PUF-1 的孔径较大且开孔率较高,两种 PUF 的孔隙率都在 97% 以上;PUF-1, PUF-2 对喷气燃料和军用柴油的吸油倍率均随着时间的增大而增大,最后达到最大吸油倍率 ($Q_{\max}$);对喷气燃料的 $Q_{\max}$ 分别为 29.48 g/g 和 23.76 g/g,对军用柴油的 $Q_{\max}$ 分别为 32.62 g/g 和 25.24 g/g;PUF 对军用柴油的离心排油率均达到 25% 左右,但 PUF-2 对喷气燃料的离心排油率达 35.39% 以上;PUF 对喷气燃料和军用柴油的排油速率均随压强增大逐渐增大,油残存率则逐渐降低。当压强增大到 6.23 kPa 时,PUF 对两种油品的排油速率达到最大,油残存率均保持在 40% 以下。

关键词:聚氨酯软质泡沫;孔径;最大吸油倍率;离心排油率;排油速率;油残存率

中图分类号: TQ 323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)10-0022-05

Preparation, Pore Structure and Oil Discharge Performance of Polyurethane Soft Foam

Wei Zheng^{1,2}, Wang Yuansheng^{1,2}, Yang Mengchun¹, Wang Fangchao¹

(1. College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract : Based on polyether polyol PPO330 and toluene diisocyanate as raw material, two kinds of polyurethane soft foam (PUF) with different catalyst dosage were prepared by using one-step foaming process, and their pore structure and oil discharge performance were studied. The results show that the PUF bubble pore structure is regular and the bubble wall surface is smooth and uniform. The PUF-1 has larger pore diameter and higher porosity, and the porosities of the two kinds of PUF are more than 97%; With the increase of time, the oil absorption rate of PUF-1 and PUF-2 to jet fuel and military diesel oil all increase, and finally reach the maximum absorption rate ($Q_{\max}$). $Q_{\max}$ of jet fuel are 29.48 g/g and 23.76 g/g respectively, $Q_{\max}$ of military diesel are 32.62 g/g and 25.24 g/g respectively. The centrifugal oil discharge rate of PUF to military diesel oil is about 25%, but the rate of PUF-2 to the jet fuel is 35.39%. The oil discharge rate of PUF for jet fuel and military diesel increased gradually with the increase of pressure, and the residual oil rate decreased gradually. When the pressure increases to 6.23 kPa, the oil discharge rate of PUF for the two kinds of reached the maximum, the oil residual rate remained below 40%.

Keywords : polyurethane soft foam ; pore diameter ; maximum oil absorption ; centrifugal oil discharge rate ; oil discharge rate ; oil residual rate

聚氨酯软质泡沫 (PUF) 经过阻燃改性和网化处理后,可以填充于舰船或飞机油箱中,起到阻燃抑爆作用^[1],这要求 PUF 孔径要适当,便于吸收较多的油品,同时泡沫材料在外界压力作用下,释放油品的性能也要好,因此制备孔结构较好且具有一定排油性能的 PUF 十分重要^[2-3]。魏徵等^[4-5]以聚醚多元醇 PPO330 和甲苯二异氰酸酯为原料,制备了一种泡沫孔结构好且对柴油的吸油倍率可达 14 g/g 的 PUF,且保油率达到 90% 以上。刘海东等^[6]采用全水发泡工艺,研制了一种具有一定耐压强度和较好吸油性能的 PUF,可以吸收 25 倍的柴油。杜峰等^[7]

合成了可降解的高吸油泡沫,并研究了木粉添加量对泡沫吸油倍率的影响。这些研究只是从制备的配方对吸油性能的影响角度入手,研究 PUF 的吸油性能。孙冬冬等^[8]以聚醚多元醇与 TM300 体系反应,制备了一种高回弹聚氨酯泡沫,通过分析催化系统对泡沫孔结构和性能的影响,探讨了孔径对力学性能的关系。梁书恩^[9]通过改变配方和工艺条件制备了不同泡孔结构的硬质聚氨酯泡沫塑料,利用二

^{*} 海军工程大学自然科学基金项目 (HGDQNJ13156)

联系人: 魏徵,博士研究生,讲师,主要从事高分子材料的研究

收稿日期: 2016-07-15

维图像分析测定方法对材料的孔结构进行了表征。这些研究主要侧重于泡沫合成配方对其发泡工艺、泡沫孔结构以及吸油性能的影响,但对泡沫在外界作用下排油的性能,以及泡孔结构与排油性能关系等方面的研究涉及很少。

笔者采用一步法发泡工艺,制备了两种泡沫材料,研究了两种催化体系用量对泡沫孔结构的影响,表征了泡沫的孔结构,分析了泡孔结构与其吸油性能和排油性能的关系。研究结果对分析泡沫孔结构与其吸油和排油性能的影响具有一定理论实践意义。

1 实验方法

1.1 原材料

聚醚多元醇(PPO):分子量3000,羟值55.46 mgKOH/g,山东隆华化工科技有限公司;

甲苯二异氰酸酯(TDI):化学纯,武汉市江北化学试剂厂;

胺类催化剂(AN-33):化学纯,南京鑫叶高分子科技有限公司;

二丁基二月桂酸锡:化学纯,天津市科米欧化学试剂有限公司;

泡沫稳定剂(L-580):化学纯,美国迈图公司;

去离子水:自制;

喷气燃料、军用柴油:军用品。

1.2 仪器

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:Spectrum BX II型,美国Perkin Elmer公司;

扫描电子显微镜(SEM):Tecnai G2 F20型,FEI香港有限公司;

电子分析天平:JY/YP型,精度为0.01 mg,上海越平科学仪器有限公司。

1.3 试样制备

采用一步法发泡工艺合成PUF。在塑料杯中,依次按照配比精确加入聚醚多元醇、泡沫稳定剂(用量占多元醇质量的1.0%,下同)、发泡剂去离子水(用量为3.0%)、胺催化剂AN-33和锡催化剂二丁基二月桂酸锡(质量比分别为2:1和1.5:1),分别记为PUF-1和PUF-2。反应温度控制在25℃,搅拌速度为1600 r/min。搅拌均匀,控制搅拌时间50 s,之后加入称量好的TDI,继续搅拌,当体系发白时,迅速将混合物平稳地转移到发泡箱中进行发泡,可以观察到整个发泡过程经历了体系发白,大量气泡出现,泡沫上升,最后表层开孔,几分钟内便

可完成。反应完成后,将泡沫连同发泡箱置于烘箱中熟化。在100℃下熟化30 min得到PUF,取出切割并进行观察和表征。

1.4 表观芯密度测试

表观芯密度按照GB/T 6343-2009测试。将PUF切成10 mm×10 mm×5 mm的立方体。在分析天平上精确称取试样的质量(精确到0.01 g)。用千分卡尺测量试样的尺寸(精确到0.1 mm)。每个试样测量3次,取5个试样,取其平均值,按照式(1)计算表观芯密度。

$$\rho = \frac{m}{V} \times 10^6 \quad (1)$$

式中: ρ ——表观芯密度,kg/m³;

m ——试样的质量,g;

V ——试样的体积,mm³。

1.5 泡孔结构表征

以PUF的SEM照片为依据,进行其泡孔结构的表征,主要泡孔参数有孔径大小、孔径分布、开孔率和孔隙率等。

(1) 孔径大小^[10]

采用数均平均直径来表示孔径大小。如式(2)所示:

$$d = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad (2)$$

式中: d ——泡孔的数均平均直径,mm;

d_i ——泡孔直径的某一可能取值,mm;

n_i ——泡孔直径 d_i 对应的泡孔个数。

(2) 开孔率。

选择SEM照片有代表性的面,统计面上的泡孔总数以及各种情况的泡孔数目,再由式(3)计算出泡沫体的开孔率。

$$p = \frac{N_{\text{open}} + (1/2)N_{\text{part}}}{N_{\text{open}} + N_{\text{part}} + N_{\text{pin}} + N_{\text{closed}}} \quad (3)$$

式中: p ——开孔率,%;

N_{open} ——开孔泡孔的数目;

N_{part} ——半开孔泡孔的数目;

N_{pin} ——缺陷泡孔的数目;

N_{closed} ——闭孔泡孔的数目。

(3) 孔隙率。

孔隙率是指泡沫塑料中气体在总泡沫体积中所占的体积分数,根据泡沫的表观芯密度和聚合物基体密度计算可得,如式(4)所示:

$$f = 1 - \frac{\rho}{\rho_0} \quad (4)$$

式中: f ——孔隙率, %;

ρ ——泡沫的表观芯密度, kg/m^3 ;

ρ_0 ——泡沫基体的密度, $\rho_0 = 1\,200\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

1.6 吸油和排油性能实验

(1) 吸油倍率和最大吸油倍率。

将 PUF 切成为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的立方体, 称其质量, 将立方体试样装入铁丝网中, 在室温条件下分别浸入不同油品, 每隔 1 min 取出, 滴滴 2 min 后迅速称重, 根据式 (5) 计算树脂的吸油倍率 Q :

$$Q = \frac{W_t - W_m - W_0}{W_0} \quad (5)$$

式中: W_t ——PUF 吸油 t 时间后 PUF 和铁丝网的质
量, g ;

W_0 ——PUF 吸油前的质量, g ;

W_m ——铁丝网的重量, g 。

当 PUF 的质量达到 $W_{\max}$ 不再变化时, 此时的 Q 称之为最大吸油倍率 $Q_{\max}$, 达到最大吸油倍率的时间称之为最大吸油时间, 记为 $t_{\max}$ 。

(2) 离心排油率。

准确称取一定质量的 PUF, 将其浸入待测油品中达到饱和, 称取其质量并迅速转移到塑料离心管中, 在 $2\,000\text{ r}/\text{min}$ 的转速下离心 5 min , 迅速取出 PUF 材料并称重, 按照式 (6) 计算离心排油率 K 。

$$K = \frac{W_2 - W_3}{W_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中: W_2 ——PUF 离心前的质量, g ;

W_3 ——PUF 离心后的质量, g 。

(3) 压力排油性能。

将吸油后的 PUF 从油品中取出, 滴滴 1 min 后称重。然后将泡沫试样放在悬空的铁纱网上, 并在其上面分别放置质量为 $500, 1\,000, 2\,000, 3\,000\text{ g}$ 的重物, 当泡沫试样不再向外滴油时, 则认为从放上重物时起至该时刻的时间为排油时间, 称取泡沫试样排油后的质量。排油速率 γ 和油残存率 δ 按照式 (7) 和式 (8) 计算:

$$\delta = \frac{W_5 - W_0}{W_4 - W_0} \times 100\% \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{W_4 - W_5}{t_p} \quad (8)$$

式中: W_5 ——泡沫排油后的质量, g ;

W_4 ——泡沫排油前的质量, g ;

W_0 ——泡沫吸油前的质量, g ;

t_p ——泡沫的排油时间, s 。

2 结果与讨论

2.1 PUF 的 FTIR 表征

图 1 为制备的 PUF 的 FTIR 谱图。从图 1 可见, 在 $1\,099\text{ cm}^{-1}$ 附近处有醚键 ($\text{C}-\text{O}$) 的特征吸收峰。而在 $2\,270\text{ cm}^{-1}$ 附近处的 $-\text{NCO}$ 键的特征吸收峰几乎没有, 说明聚合反应基本完全。

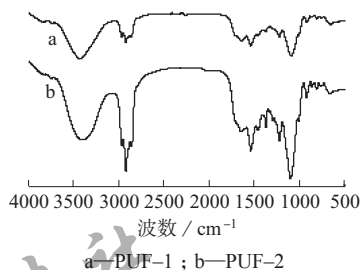
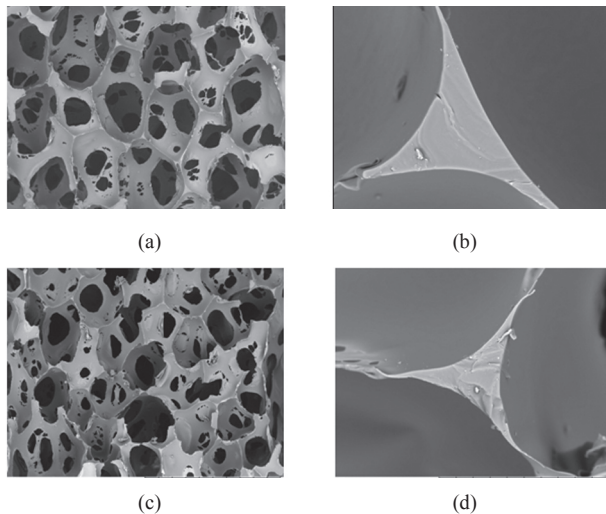


图 1 PUF 的 FTIR 谱图

2.2 PUF 的形貌分析

图 2 是 PUF 泡孔和泡壁的 SEM 照片。由图 2 可以看出, PUF-1 和 PUF-2 的泡孔结构较为规整, 多为五边形或六边形, 且泡壁表面光滑均匀。PUF-1 和 PUF-2 孔径大小和开孔泡孔数目明显不同, PUF-1 的孔径普遍较大, 且开孔泡孔数目明显多于 PUF-2 的。这是因为 PUF-1 胺类催化剂用量较多, 发泡反应进行程度略大于凝胶反应程度, 泡沫孔径增大, 且开孔泡孔数目增多。



a—PUF-1 泡孔; b—PUF-1 泡壁; c—PUF-2 泡孔; d—PUF-2 泡壁

图 2 PUF 的泡孔和泡壁 SEM 图

2.3 PUF 的孔结构分析

表 1 为 PUF 的表观芯密度和孔结构参数。由表 1 可知, PUF-1 的表观芯密度较小, 主要是因为

其胺类催化剂 AN-33 用量较多,发泡反应相对凝胶反应进行程度大,相同模具下发气量相对较多,泡沫较软,故其密度较小。PUF-1 的孔径较大且开孔率较高,这也是由于 AN-33 用量较多,发泡反应过程中小气泡容易形成大的气泡,使得孔径和开孔率变大。PUF-1 和 PUF-2 的孔隙率都在 97% 以上,说明气体在总泡沫体积中所占的体积分数较高。

表 1 PUF 的表观芯密度和孔结构参数

项目	PUF-1	PUF-2
表观芯密度 / (kg · m ⁻³)	25.4	31.0
平均直径 / mm	0.90	0.65
开孔率 / %	54	33
孔隙率 / %	97.88	97.42

2.4 PUF 的吸油倍率和最大吸油倍率

图 3 是 PUF 对喷气燃料和军用柴油的吸油倍率随时间的变化图。由图 3 可知, PUF-1 和 PUF-2 对两种军用油品的吸油倍率均随着时间的增大而增大,到达一定时间后,它们的吸油倍率均保持基本不变,达到了最大吸油倍率。PUF-1 和 PUF-2 对军用柴油的吸油倍率高于对喷气燃料的。表 2 是 PUF 对喷气燃料和军用柴油的 $Q_{\max}$ 和 $t_{\max}$ 。

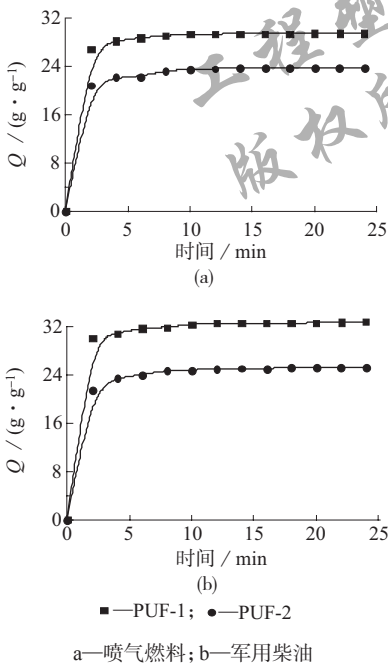


图 3 PUF 对喷气燃料和军用柴油的吸油倍率随时间的变化

表 2 PUF 对喷气燃料和军用柴油的 $Q_{\max}$ 和 $t_{\max}$

PUF	喷气燃料		军用柴油	
	$Q_{\max} / (\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	$t_{\max} / \text{min}$	$Q_{\max} / (\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	$t_{\max} / \text{min}$
PUF-1	29.48	20	32.62	16
PUF-2	23.76	18	25.24	20

泡沫材料的吸油过程是一个物理吸附的过程,聚氨酯泡沫的吸附过程实际上是多孔材料的液相吸

附过程。泡沫的网状结构使其不但具有很大的比表面积,内部还含有强大的毛细孔道,当泡沫材料吸附油品时,不仅存在材料表面的吸附作用,更是依靠泡沫材料孔结构的毛细凝结吸附^[11-14]。泡沫对不同油品的吸附能力主要取决于泡沫孔径大小与油品结构的组成和极性。PUF-1 泡沫孔结构分布均匀,开孔率较高,故其对喷气燃料和军用柴油的吸油倍率均较大。此外,军用柴油是直链的 C_{14} — C_{16} 的脂肪烃,分子直径较小,而喷气燃料中,环烷烃是其理想的组分,分子直径较大,因此泡沫材料对军用柴油的吸油倍率大于对喷气燃料的吸油倍率。

2.5 PUF 的排油性能

(1) 离心排油性能。

表 3 是 PUF 对喷气燃料和军用柴油的离心排油率。由表 3 可知, PUF 对军用柴油的离心排油率基本一致,均达到 25% 左右,但对喷气燃料不同, PUF-2 对喷气燃料的离心排油率达 35% 以上。这是因为离心排油率是 PUF 在离心作用下油分子的释放过程, PUF 对军用柴油的吸油倍率高,说明它们两者之间的毛细吸附较好,当对 PUF 进行离心作用时,军用柴油也较难从泡沫孔中离心出去。

表 3 PUF 对喷气燃料和军用柴油的离心排油率 %

油的种类	PUF-1	PUF-2
喷气燃料	26.48	35.39
军用柴油	24.99	25.01

(2) 压力排油性能。

分别在饱和吸收喷气燃料和军用柴油 PUF 上放置 400, 1 000, 1 400, 1 900 g 的重物,其压强分别是 1.32, 3.31, 4.63, 6.23 kPa,图 4 为压强大小对油残存率和排油速率的影响。由图 4 可知,随着施加在泡沫上的压强增大,泡沫材料对喷气燃料和军用柴油的排油速率逐渐增大,油残存率逐渐降低。当压强增大到 6.23 kPa 时, PUF 对两种油品的排油速率达到最大,这与泡沫的孔径和开孔率有直接关系, PUF-1 的孔径最大,开孔率最高,当给泡沫一个外力时,油分子容易从泡沫孔中挣脱出来。从油残存率分析,两种泡沫材料的油残存率均保持在 40% 以下,经过加工后可以作为填充于油箱中的材料使用^[15-16]。

3 结论

(1) FTIR 图谱分析显示, —NCO 键的特征吸收峰几乎没有,说明泡沫的聚合反应完全。

(2) SEM 照片和孔结构参数分析表明, PUF 泡

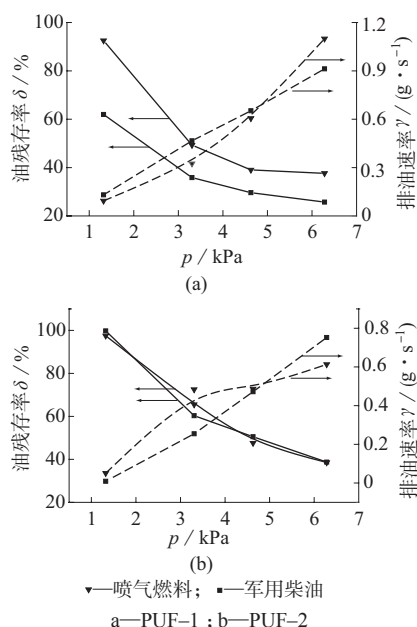


图4 PUF对喷气燃料和军用柴油的压力排油性能

孔结构较为规整,多为五边形或六边形,且泡壁表面光滑均匀。PUF-1的表观芯密度较小、孔径较大且开孔率较高。两种泡沫的孔隙率都在97%以上。

(3) PUF的吸油过程是依靠泡沫材料孔结构的毛细凝结吸附,也取决于泡沫孔径大小和油品结构的组成和极性。PUF-1和PUF-2对喷气燃料和军用柴油的吸油倍率均随着时间的增大而增大,到达一定时间后,达到了最大吸油倍率。它们对喷气燃料的 $Q_{\max}$ 分别为29.48 g/g和23.76 g/g,对军用柴油的 $Q_{\max}$ 分别为32.62 g/g和25.24 g/g。

(4) PUF-1和PUF-2对军用柴油的离心排油率基本一致,均达到25%左右,但对喷气燃料有所不同,PUF-1对喷气燃料的离心排油率只有26.48%,PUF-2对喷气燃料的离心排油率达35.39%。

(5) 随着压强的增大,PUF-1和PUF-2对喷气燃料和军用柴油的排油速率逐渐增大,油残存率逐渐降低。当压强增大到6.23 kPa时,PUF对两种油品的排油速率达到最大,油残存率均保持在40%以下。

参考文献

- [1] 魏徵,王源升,余红伟. 飞机油箱用网状聚氨酯泡沫的研究进展[J]. 聚氨酯工业,2013,28(4):1-4.
Wei Zheng, Wang Yuansheng, Yu Hongwei. Research progress in reticulated polyurethane foam for aircraft fuel tanks[J]. Polyurethane Industry, 2013, 28(4):1-4.
- [2] 郑爽中,高永庭,李美玉. 网状聚氨酯泡沫塑料在飞机燃油箱中的应用[J]. 工程塑料应用,2002,30(6):26-28.

- Zheng Shuangzhong, Gao Yongting, Li Meiyu. Application of reticulated polyurethane foam in aircraft fuel tank[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(6):26-28.
- [3] 王松,陈朝辉,陈红梅,等. 网状聚氨酯泡沫应用进展[J]. 材料科学与工程学报,2003,21(2):298-301.
Wang Song, Chen Chaohui, Chen Hongmei, et al. Progress in application of reticulated polyurethane foam[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2003, 21(2):298-301.
- [4] 魏徵,王源升,文庆珍,等. 聚氨酯泡沫的制备及吸油性能[J]. 高分子材料科学与工程,2010,26(11):118-121.
Wei Zheng, Wang Yuansheng, Wen Qingzhen, et al. Preparation of the polyurethane foam and its oil absorption property[J]. Polymer Material Science and Engineering, 2010, 26(11):118-121.
- [5] 魏徵,王源升,余红伟,等. 聚氨酯软质泡沫吸油性能的研究[J]. 聚氨酯工业,2011,26(5):44-46.
Wei Zheng, Wang Yuansheng, Yu Hongwei, et al. Study on the structure and its oil absorption of the flexible polyurethane foam[J]. Polyurethane Industry, 2011, 26(5):44-46.
- [6] 刘海东,徐建辉,刘红文,等. 聚氨酯软质泡沫的制备及泡孔结构和吸油性能的研究[J]. 聚氨酯工业,2009,24(6):17-20.
Liu Haidong, Xu Jianhui, Liu Hongwen, et al. Study on the preparation of polyurethane soft foam and study on the structure and oil absorption properties of polyurethane foam[J]. Polyurethane Industry, 2009, 24(6):17-20.
- [7] 杜峰,项尚林,邹巍巍,等. 高吸油聚氨酯泡沫的制备[J]. 塑料工业,2014,42(2):126-129.
Du Feng, Xiang Shanglin, Zou Weiwei, et al. Preparation of high oil absorption polyurethane foam[J]. Plastics Industry, 2014, 42(2):126-129.
- [8] 孙冬冬,顾尧,孔壮,等. 催化体系对聚氨酯泡孔结构及其力学性能的影响[J]. 聚氨酯工业,2011,26(5):23-26.
Sun Dongdong, Gu Yao, Kong Zhuang, et al. Effect of catalyst system on cellular structure and properties of Polyurethane foam[J]. Polyurethane Industry, 2011, 26(5):23-26.
- [9] 梁书恩. 聚氨酯泡沫塑料泡孔结构与力学性能关系的研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2005.
Liang Shuen. Study on the relationship between pore structure and mechanical properties of polyurethane foam[D]. Mianyang:China Academy of Engineering Physics, 2005.
- [10] Rhodes D. The validity of making cellular measurements on polymeric foams[J]. Polymer Preprint, 1996, 37(2):775-776.
- [11] Bohlin P, Audy O, Skrdlikova L. Evaluation and guidelines for using polyurethane foam(PUF) passive air samplers in double-dome chambers to assess semi-volatile organic compounds(SVOCs) in non-industrial indoor environments[J]. Environmental Science Processes & Impacts, 2014, 16:2 617-2 626.

为0.2%,纱宽的误差约为0.1%,符合缠绕线型的基本要求。该实验验证了参数化缠绕工艺设计的合理性也体现了该缠绕软件的实用性。

5 结论

以基本缠绕理论为依据,提出了回转体制品参数化线型的设计方法并编写了缠绕软件。通过对缠绕软件的设计、容器实例的推导与配套缠绕机的实验,参数化的纤维缠绕工艺设计可大大减少在回转体线型设计中人工繁琐及重复的计算工作,缩短设计周期,提高了工作效率。缠绕软件产生的缠绕代码可以在机器人等设备上应用,不但实现线型的快速设计还可以利用机器人等缠绕设备对芯模进行精确缠绕。

参考文献

- [1] 张增超. 基于嵌入式运动控制器的四轴缠绕机控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
Zhang Zengchao. The design of four-axis winding machine control system based on embedded motion controller[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013.
- [2] 许家忠, 乔明, 尤波. 纤维缠绕复合材料成型原理及工艺[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Xu Jiazhong, Qiao Ming, You Bo. Forming principle and technology of fiber winding composite material[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [3] 祖磊. 纤维缠绕环形容器结构设计及损伤检测[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
Zu Lei. Structural design and damage identification of filament-wound toroida vessels [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [4] 申涛. 组合回转体缠绕运动控制程序开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Shen Tao. The program empolder on filament winding locomotion control of combined revolution surface [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [5] 王显峰. 异型件面片缠绕成型轨迹规划的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
Wang Xianfeng. Research on the abnormal form patch winding trajectory design[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [6] 娄小杰. 球型封头压力容器的结构层次设计及缠绕成型工艺的研究[J]. 纤维复合材料, 2011(1): 23-26.
Lou Xiaojie. Structure level design and winding forming process of pressure vessel with spherical head[J]. Fiber Composites, 2011(1): 23-26.
- [7] 韩振宇, 王永章, 富宏亚. 复合材料纤维缠绕成型 CAD/CAM 相关技术研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003(5): 32-34.
Han Zhenyu, Wang Yongzhang, Fu Hongya. Research on CAD / CAM related technology of composite fiber winding[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2003(5): 32-34.
- [8] 白侠, 李辅安, 李崇俊, 等. 纤维单向缠绕成型锥形壳体的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2007(5): 39-42.
Bai Xia, Li Fuan, Li Congjun, et al. Research on the shape of the tapered shell by unidirectional filament winding[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2007(5): 39-42.
- [9] 高立业. 船用玻璃钢管道生产线控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
Gao Liye. The design of control system for marine FRP pipe production line[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [10] 冷兴武. 纤维缠绕原理[M]. 济南: 山东科学出版社, 1990.
Leng Xingwu. Filament winding principle[M]. Jinan: Shandong Science Press, 1990.
- [11] 杨红红. 回转体缠绕线型设计及轨迹规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
Yang Honghong. The design of winding pattern and the planning of the motion trajectory for revolution[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [12] 杜志强, 张毅. CAD/CAM 技术在筒形压力容器缠绕成型工艺中的应用[J]. 制造业自动化, 2001, 23(8): 43-46.
Du Zhiqiang, Zhang Yi. Application of CAD / CAM technique in winding process of the tube-shaped pressure vessel[J]. Manufacturing Automation, 2001, 23(8): 43-46.
- [13] 刘益军. 聚氨酯树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
Liu Yijun. Polyurethane resin and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [14] 王紫潇, 文庆珍, 朱金华. 用于聚氨酯材料的无卤添加型阻燃剂研究进展[J]. 聚氨酯工业, 2015, 30(3): 31-34.
Wang Zixiao, Wen Qingzhen, Zhu Jinhua. Research progress of halogen free additive flame retardant for polyurethane materials[J]. Polyurethane Industry, 2015, 30(3): 31-34.
- [15] David H M, Alex P F. Method of improving fuel tank safety: EP, 2212144A2[P]. 2010-08-04.
- [16] 王宝仁. 油品分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Wang Baoren. Oil Analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.

(上接第 26 页)