

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.09.010

降低辐射制冷膜光泽度研究

夏兆路¹, 吕乐², 蔡梦丹², 冯海燕², 王明辉²

(1. 宁波瑞凌新能源科技有限公司, 浙江宁波 315500; 2. 宁波瑞凌新能源材料研究院有限公司, 浙江宁波 315500)

摘要: 针对辐射制冷膜的高反射率易产生“光污染”从而应用范围被限制的问题, 采用降低光泽度的方法以避免辐射制冷膜“光污染”产生, 分别通过对表层基材乙烯-四氟乙烯共聚物添加 SiO₂ 消光粉、聚碳酸酯 (PC) 微球粉和表面压花处理的方式对辐射制冷膜进行处理, 分别测试未改性辐射制冷膜以及不同处理方式的辐射制冷膜表面光泽度、太阳能反射比、大气窗口 (8~13 μm) 发射率、实际制冷效果性能, 研究不同处理方式对光泽度、辐射制冷性能的影响。结果表明, 添加 PC 微球粉是最优的处理方式, 可以将辐射制冷膜光泽度从 631.4 降到 78.7, 同时太阳能反射比从 94.3% 降低至 93.2%, 大气窗口发射率从 92.9% 提升至 93.4%; 添加 PC 微球粉的辐射制冷膜仍保持了良好的降温性能, 在正午 12 点时仍比环境温度低 2.4℃。

关键词: 辐射制冷; 光泽度; 太阳能反射比; 发射率

中图分类号: TK511.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)09-0056-05

Study on Reducing Gloss of Radiative Cooling Films

Xia Zhaolu¹, Lyu Le², Cai Mengdan², Feng Haiyan², Wang Minghui²

(1. Ningbo Ruiling Advanced Energy Materials Institute Co., Ltd., Ningbo 315500, China;

2. Ningbo Ruiling Advanced Energy Technology Co., Ltd., Ningbo 315500, China)

Abstract : Due to “light pollution”, the application of the high-reflectivity radiative cooling films are limited in some situation. The gloss of the film is reduced to avoid “light pollution”. SiO₂ matting powder, polycarbonate (PC) microsphere powder addition, and surface embossing treatment on ethylene-tetra-fluoro-ethylene copolymer are used to reduce the gloss of the radiative cooling films, respectively. The surface gloss, solar reflectivity, atmospheric window (8–13 μm) emissivity, and actual radiative cooling performance of the unmodified radiative cooling film and the radiative cooling films treated by different treatments were tested respectively to study the effects of different treatments on the gloss and radiative cooling performance. The results show that among three methods, PC microsphere powder addition is the best one, which can reduce the gloss of radiative cooling film from 631.4 to 78.7. It slightly reduces the solar reflectivity from 94.3% to 93.2%, and the emissivity in atmospheric window range can be increased from 92.9% to 93.4%. The radiative cooling film with PC microsphere powder addition still maintains a good cooling performance and is lower than the ambient temperature by 2.4 °C at 12 noon.

Keywords : radiative cooling ; gloss ; solar reflectivity ; emissivity

辐射制冷是在不吸收太阳辐射能量的同时将自身热量透过大气窗口 (8~13 μm) 辐射至深空冷源, 可以不耗能实现制冷降温, 是一种具有巨大潜在应用价值的新型制冷方法^[1-3]。辐射制冷材料的太阳能反射比和大气窗口波段发射率成为评估辐射制冷性能的重要指标^[4-5]。近期报道的辐射制冷膜具

有高达 97% 的太阳能反射比, 同时大气窗口发射率达到 94%, 具有优异辐射制冷性能, 可将温度降低到比环境温度低 7.5℃^[6]。然而高反射率往往同时伴随着表面高光泽度, 易引起“光污染”, 造成头晕目眩、精力分散, 导致引起驾驶事故、视力损害等危害^[7-8], 因此难以在机场及周边建筑表面、道路两旁

基金项目: 宁波市科技计划体系项目 (2019B10136)

通讯作者: 王明辉, 高级工程师, 博士, 主要从事功能材料改性研究 E-mail: minghui.wang@radi-cool.com

收稿日期: 2020-06-22

引用格式: 夏兆路, 吕乐, 蔡梦丹, 等. 降低辐射制冷膜光泽度研究 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(9): 56–60, 66.

Xia Zhaolu, Lyu Le, Cai Mengdan, et al. Study on reducing gloss of radiative cooling films[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9): 56–60, 66.

建筑表面以及办公生活区建筑物表面等场景使用。

降低薄膜光泽度常用的方法是增加漫反射效果,常用的手段是使用机械压花或添加消光粉的方式在薄膜表面制造出微小的凹凸不平^[9],如杭州福膜和苏州佳尔特等公司在流延过程中利用雾面辊或压花辊流延出聚偏氟乙烯(PVDF)亚光膜;顾方明等^[10]在薄膜配方中加入1~10份的消光粉可将PVDF膜光泽度降到30以下;周福龙等^[11]将消光粉添加到黑色聚酰亚胺(PI)中,当消光粉含量添加到6%时,黑色PI膜光泽度从118降低到25,含量达到13%时,其光泽度可低至5。但是,表面压花或者添加消光粉等方式提高漫反射能力可能会引起二次光入射过程,引入额外的热吸收,减小了辐射制冷膜的太阳能反射比,从而降低了膜的辐射制冷功效。尽可能减少额外热吸收成为降低辐射制冷膜光泽度的关键,目前运用在光扩散膜领域^[12-14]且通常具有较低热吸收的有机粒子为制备低光泽度辐射制冷膜提供了新方法。

辐射制冷膜通常在户外使用,需考虑其耐候性问题。乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)具有非常优异的耐候性能,且具有透明性好、自身热吸收低等特点^[15]。笔者以辐射制冷膜为研究对象,分别对表层的耐候保护层 ETFE 基材进行添加 SiO₂ 消光粉、聚碳酸酯(PC)和表面压花处理,对辐射制冷膜的辐射制冷性能进行研究,探寻在保持较好的辐射制冷性能同时降低辐射制冷膜表面光泽度的最佳方式。

1 实验部分

1.1 主要原材料

ETFE: 207, 美国科慕有限公司;

SiO₂ 消光粉: SYLYSIA530, 日本富士硅化学株式会社;

PC 微球粉: WXH-20, 深圳和颜悦色塑胶颜料助剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

流延机: BL-6175-B 型, 东莞宝轮精密检测仪器有限公司;

双螺杆挤出机: TSE-35B 型, 南京海思基础设施有限公司;

光泽度仪: HG268 型, 深圳三恩时科技有限公司;

紫外可见近红外分光光度计: Lambda950 型, 美国珀金埃尔默有限公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪: Nvenior 型, 德

国布鲁克有限公司;

温度自记录仪: WYZ-1 型, 北京天建华仪科技发展有限公司。

1.3 样品制备

将 ETFE 粒料在 100℃ 的干燥箱中干燥 4 h, 分别添加质量分数为 2% 的 SiO₂ 消光粉或 PC 微球粉, 在双螺杆挤出机中挤出、造粒, 备用。挤出参数: 螺杆转速为 180 r/min, 挤出机 1 区、2 区、3~7 区和模头温度分别为 280, 290, 300, 300℃。

将纯 ETFE 粒料和上述改性粒料在 100℃ 的干燥箱中干燥 4 h, 使用带有镜面辊的流延机流延 25 μm 厚的薄膜; 另外对纯 ETFE 粒料同时使用带有压花辊的流延机流延 25 μm 厚的压花薄膜, 压花深度为 0.8 μm。流延参数: 螺杆转速 60 r/min, 挤出机 1 区、2 区、3 区、模头温度分别为 280, 300, 300, 300℃。

将未改性 ETFE 膜、压花 ETFE 膜、SiO₂ 消光粉和 PC 微球粉改性的 ETFE 膜使用聚氨酯胶水分别覆合在真空溅射金属 Ag 反射层的辐射制冷功能基材上, 制备不同类型的辐射制冷膜, 如图 1 所示, 分别命名为 RC, YH-RC, XG-RC, 和 PC-RC。

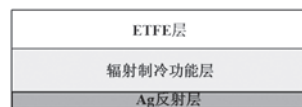


图1 辐射制冷膜结构示意图

1.4 性能测试与表征

光泽度测试: 用光泽度仪按照 GB/T 9754-2007 测试, 以 60° 入射角测试值作为光泽度值, 测试 5 次, 计算平均值和误差值。

太阳能反射比测试: 通过带有积分球的紫外可见近红外分光光度计直接测试辐射制冷膜的反射率, 按照 GB/T 25968-2010 计算辐射制冷膜的太阳能反射比, 测试 5 次, 计算平均值和误差值。

发射率测试: 通过 FTIR 仪的半球积分法测试辐射制冷膜红外波段 (2.5~25 μm) 的透射率 $T(\lambda)$ 和反射率 $R(\lambda)$, 计算出发射率 $\xi(\lambda)$ [$\xi(\lambda)=1-T(\lambda)-R(\lambda)$], 测试 5 次, 计算平均值和误差值。按照式 (1) 计算大气窗口 (8~13 μm) 发射率 (ξ_w):

$$\xi_w = \frac{\int_{8000}^{13000} I_{BB}(\lambda, T) \xi(\lambda) d\lambda}{\int_{8000}^{13000} I_{BB}(\lambda, T) d\lambda} \quad (1)$$

$$I_{BB}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (2)$$

式中: $I_{\text{BB}}(\lambda, T)$ ——具有温度和波长的黑体光谱辐射度;

λ ——辐射波长;

T ——黑体绝对温度;

h ——普朗克常数,其值为 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;

k ——玻尔兹曼常数,其值为 $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

c ——光速,其值为 $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同处理方式对辐射制冷膜光泽度的影响

4种辐射制冷膜的光泽度如图2所示,在太阳光下的实际效果照片如图3所示。

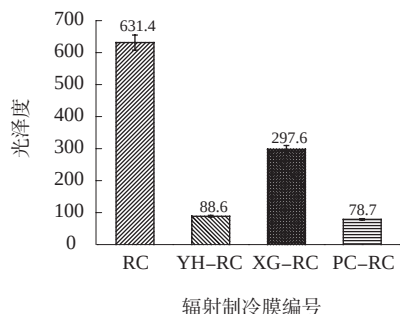
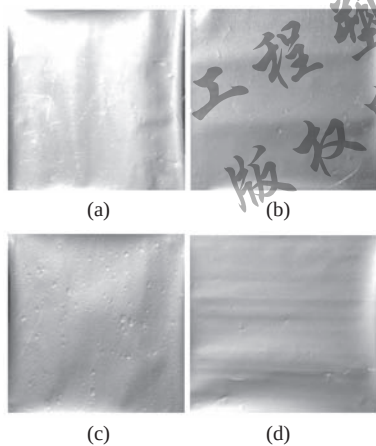


图2 4种辐射制冷膜的光泽度



a—RC膜; b—YH-RC膜; c—XG-RC膜; d—PC-RC膜

图3 4种辐射制冷膜在阳光下的实际效果照片

从图2可以看出,未改性辐射制冷膜RC的光泽度高达631.4,3种处理方式均可以有效降低辐射制冷膜的光泽度,其中PC-RC的光泽度降幅最大,可将光泽度降低到78.7。有机PC微球粉的折射率为1.58,与表面ETFE基材树脂的折射率(1.40)相差0.18,可有效增加光线漫反射而降低辐射制冷膜的光泽度。YH-RC的光泽度为88.6,表面压花同样是通过增加光线漫反射来降低光泽度,从测试结果来看,表面压花对降低辐射制冷膜光泽度效果略差于添加PC微球粉的效果, SiO_2 消光粉对降低辐射制冷膜的光泽度效果最差,XC-RC的光泽度

达297.6, SiO_2 消光粉降低光泽度的原理是通过光散射和表面粗糙共同作用实现的,但由于其折射率(1.46)与表面基材树脂的折射率接近,且表面粗糙度($0.3 \mu\text{m}$)较小,故降低辐射制冷膜光泽度效果没有另外两种处理方式好。

从图3可以看出,RC和XG-RC在太阳光下都比较“炫目”,光反射能力强;而YH-RC和PC-RC均能有效降低“光污染”,太阳光下“炫目”现象得到了有效的改善。

2.2 不同处理方式对辐射制冷膜太阳能反射比的影响

4种辐射制冷膜在太阳辐射波段的反射率光谱如图4所示。

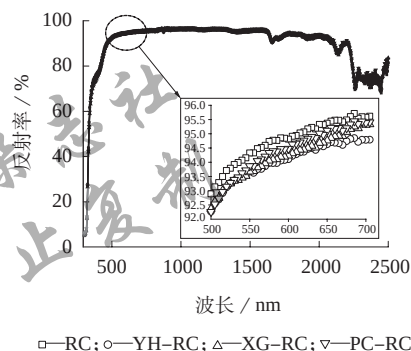


图4 4种辐射制冷膜太阳辐射波段的反射率光谱图

从图4可以看出,在紫外和可见光波段(300~780 nm),RC的反射率最高,PC-RC和XG-RC相对比较接近,其反射率稍小于RC,而YH-RC的反射率最小。

4种辐射制冷膜的太阳能反射比如图5所示。

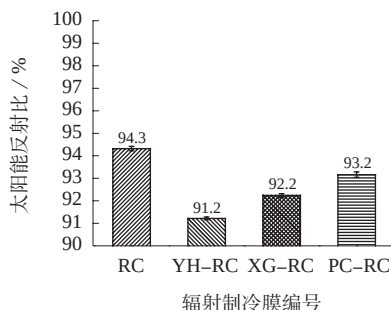


图5 4种辐射制冷膜的太阳能反射比

膜表面压花提高了光的散射能力,因散射引起的多次光线作用同时也增加了薄膜对光线的吸收,降低了辐射制冷膜的太阳能反射比。从图5可以看出,YH-RC的太阳能反射比最低,从RC的94.3%降低到91.2%,降低了3.1%;而PC-RC, XG-RC的太阳能反射比分别降低了1.1%,2.1%。太阳能反射比下降会降低辐射制冷膜的辐射制冷效果。

添加的 SiO_2 消光粉和 PC 微球粉均是透明粒子,且与表面基材树脂的折射率差值均大于 0.05,增加了光的散射能力,进而增加了光程,提高了辐射制冷膜对光线的吸收,从而降低了辐射制冷膜的太阳能反射比。由于无机的 SiO_2 粒子本身的热吸收高于有机的 PC 微球粉,故 XG-RC 的太阳能反射比小于 PC-RC。同时,添加粒子对光线散射造成的热吸收要远小于膜表面压花。故 PC-RC 的太阳能反射比降低最小。

2.3 不同处理方式对辐射制冷膜发射率的影响

4 种辐射制冷膜在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 大气窗口的发射率光谱图如图 6 所示。

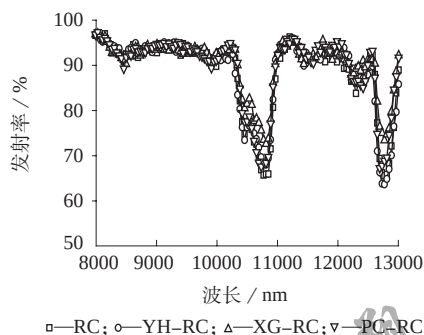


图 6 4 种辐射制冷膜在大气窗口的发射率光谱图

由图 6 可以看出, XG-RC 和 PC-RC 在大气窗口的发射率稍高于 RC 和 YH-RC。

4 种辐射制冷膜在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 大气窗口的发射率如图 7 所示。

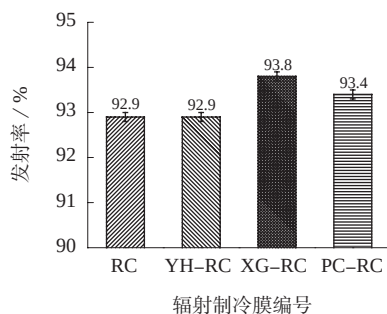


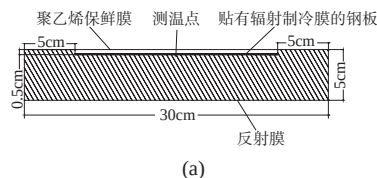
图 7 4 种辐射制冷膜在大气窗口的发射率

影响发射率的因素有基材的材质、基材的厚度、添加剂的类型及其含量等方式。表面压花的处理方式基本没有改变材质的厚度,故对辐射制冷膜的发射率基本没有影响。RC 膜在大气窗口的发射率为 92.9%, YH-RC 在大气窗口的发射率同样也为 92.9%。测试结果也验证了压花处理不会改变 RC 在大气窗口的发射率。 SiO_2 粒子是优异的辐射制冷填料,对提升发射率有较好的效果,添加质量分数为 2% 的 SiO_2 消光粉,可使辐射制冷膜大气窗口的

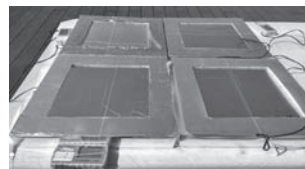
发射率从 92.9% 提高到 93.8%;虽然添加质量分数 2% PC 微球粉的辐射制冷膜在大气窗口的发射率提升没有 SiO_2 消光粉的效果好,但其发射率也提高了 0.5%,对辐射制冷功率的提高有一定的帮助。

2.4 不同处理方式对辐射制冷膜实际制冷效果的影响

将贴合辐射制冷膜的钢板放在测试装置内置于户外,通过测试钢板内表面温度来考察实际制冷效果。测试当天晴朗少云,正午温度在 29°C 左右。测试装置示意图和实际测试装置如图 8 所示,装置主体为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的泡沫方块(起隔热作用),在 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 表面挖出一个 0.5 cm 深的 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 方形凹槽,装置外表面贴合一层高反射率的辐射制冷膜以减少太阳辐照加热表面导致热量传入带来的影响。在正面贴有辐射制冷膜的钢板尺寸与凹槽的尺寸相同 ($20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$),采用温度记录仪测试钢板内表面温度,测温探头布置在非贴膜钢板面中间部位,在温度探头和钢板之间使用导热银浆增加热传导。将贴有辐射制冷膜的钢板面朝外放在凹槽中,表面用聚乙烯保鲜膜保护好以减少空气对流带来的影响。对 4 种辐射制冷膜同时进行测试,并在空气中布置一个测温探头测试环境温度,该探头放置在没有阳光直射的地方(本次测试放置在测试装置用桌子的下方)。5 个测温探头经校准温差不超过 0.1°C 。



(a)



(b)

a—测试装置示意图;b—实际测试装置

图 8 测试装置示意图和实际测试装置

2020 年 4 月 25 日(晴朗少云,温度为 $13 \sim 29^\circ\text{C}$),当日最大太阳辐照强度为 $950 \text{ W}/\text{m}^2$,对 4 种辐射制冷膜进行实际制冷效果测试,结果如图 9 所示,相应数据列于表 1。

从表 1 可以看出,在正午 12 点,贴有 RC, PC-RC, XG-RC 和 YH-RC 装置的测试温度分别为 $24.6, 25.6, 25.6, 25.9^\circ\text{C}$,比环境温度 28.0°C 分别

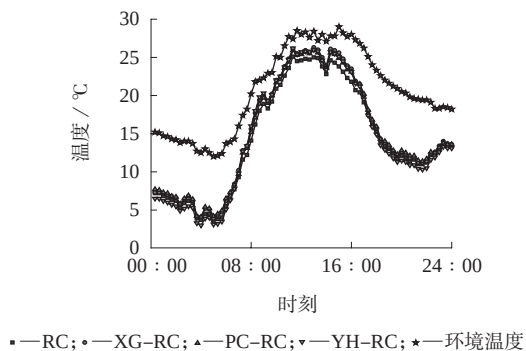


图9 4种辐射制冷膜日照下的温度测试结果

表1 不同时刻贴有4种辐射制冷膜装置的测试温度 °C

样品	时刻				
	00:00	06:00	12:00	18:00	24:00
RC	7.2	5.5	24.6	15.3	13.3
XG-RC	7.8	6.5	25.6	15.9	13.6
PC-RC	7.6	6.2	25.6	15.7	13.6
YH-RC	6.6	5.1	25.9	14.9	13.1
环境	15.2	13.7	28.0	23.3	18.2

低 3.4, 2.4, 2.4, 2.1 °C, RC 的实际制冷效果最好, PC-RC 和 XG-RC 表现一致, YH-RC 的实际制冷效果最差; 而在 4 月 25 日 0 点和 24 点, 贴有不同处理方式的辐射制冷膜的装置比环境温度分别低 8.0 °C 和 5.0 °C 左右, 不同处理方式的辐射制冷膜与未改性辐射制冷膜间的温差在 0.5 °C 以内。其中 YH-RC 在正午制冷效果略差, 可能是由于太阳能反射比降低引起的, 但在夜间却表现出比 RC 辐射制冷膜更好的制冷效果。

3 结论

(1) 添加有机 PC 微球粉的 PC-RC 降低光泽度的效果最好, 可将光泽度从 631.4 降到 78.7, 压花处理的 YH-RC 效果次之, 光泽度为 88.6, 而添加 SiO₂ 消光粉的 XG-RC 降低光泽度的效果最差, 光泽度达 297.6。

(2) 不同处理方式均会降低辐射制冷膜的太阳能反射比。添加 PC 微球粉和 SiO₂ 消光粉均能提高辐射制冷膜大气窗口的发射率, 但依旧会降低辐射制冷膜的辐射制冷效果。在正午 12 点, 贴有 RC, PC-RC, XG-RC 和 YH-RC 的内表面温度分别为 24.6, 25.6, 25.6, 25.9 °C, 分别比环境温度 28.0 °C 低 3.4, 2.4, 2.4, 2.1 °C, 未改性 RC 的实际制冷效果最好, 添加 PC 微球粉和 SiO₂ 消光粉均比表面压花的实际制冷效果好; 而在 0 点和 24 点, 不同处理方式的辐射制冷膜的内表面温度比环境温度分别低 8.0 °C 和 5.0 °C 左右, 不同处理方式的辐射制冷膜与未改性辐射制冷膜间的温差在 0.5 °C 以内, YH-RC

在夜间的实际制冷效果最好。

参考文献

- [1] Aili A, Weizhi Yuan, Chen Yizhou, et al. Selection of polymers with functional groups for daytime radiative cooling[J]. Materials Today Physics, 2019, doi:10.1016/j.mtphys.2019.100127.
- [2] Zhao Dongliang, Aili A, Zhai Yao, et al. Subambient cooling of water: toward real-world applications of daytime radiative cooling[J]. Joule, 2019(3):111-123.
- [3] Zhao Dongliang, Aili A, Zhai Yao, et al. Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(2), doi:10.1063/1.5087281.
- [4] Hossain M M, Gu Min. Radiative cooling: Principles, progress, and potentials[J]. Advanced Science, 2016:3(7), doi:10.1002/advs.201500360.
- [5] Li Tian, Zhai Yao, He Shuaiming, et al. A radiative cooling structural material[J]. Science, 2019, 364(6442):760-763.
- [6] Zhai Yao, Ma Yaoguang, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. Science, 2017, 355(6329):1062-1066.
- [7] 李雄武, 姚峰, 刘彦星, 等. SBS 在低光泽 ABS 材料中的应用研究[J]. 中国塑料, 2013, 27(4):57-61.
- [8] 李斌, 陈平绪, 魏金钢, 等. SEBS 在低光泽耐候 ASA 材料中的应用及其性能研究[J]. 广东化工, 2015, 42(21):35-37.
- [9] Li Bin, Chen Pingxu, Wei Jingang, et al. Application and performance study of SEBS on the low gloss and high weather resistance ASA material[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(21):35-37.
- [10] 李叶. 红外/可见光复合隐身橡胶涂层材料的制备与研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [11] Li Ye. Preparation and research of infrared/visible composite stealthy rubber coating materials[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [12] 顾方明, 刘会举. 一种低表面光泽度聚偏氟乙烯薄膜及其制备方法: CN104893188A[P]. 2018-10-19.
- [13] Gu Fangming, Liu Huiju. A low surface gloss poly(vinylidene fluoride) film and its preparation method: CN104893188A[P]. 2018-10-19.
- [14] 周福龙, 唐夏军, 易嘉惠, 等. 黑色 PI 薄膜亚光度降低对薄膜性能的研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(5):18-21.
- [15] Zhou Fulong, Tang Xiajun, Yi Jiahui, et al. Effect of matt degree reduction on properties of black PI film[J]. Insulating Materials, 2018, 51(5):18-21.
- [16] 陈建国, 周志恒, 邝志辉. 一种改性聚碳酸酯材料在汽车换挡面板上的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2019(9):21-24.
- [17] Chen Jianguo, Zhou Zhiheng, Kuang Zhihui. The application of a modified polycarbonate material in car shift panel[J]. Automobile

渐降低,烧结程度逐渐提高。

烧结程度对于 PTFE 材料性能具有较大影响,烧结程度过低或过高,均会导致坯料结晶度和数均分子量的异常变化,造成坯料拉伸性能的下降。DSC 分析表明,较理想的 PTFE 烧结工艺参数为:烧结温度 370℃,保温时间 20~140 min,升温速率 50~100℃/h。此时,材料的结晶度和数均分子量降低率均保持在较低水平,坯料烧结程度较理想,不会出现“欠烧”或“过烧”现象。

参考文献

- [1] 钱知勉,包永忠.氟塑料加工与应用[M].北京:化学工业出版社,2010.
Qian Zhimian, Bao Yongzhong. Fluorine plastics processing and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [2] Ye Sujuan, Yu Quan, Li Kunquan, et al. The tribological and sealing properties of PFA composites[J]. International Journal of Polymer Science, 2018, 2018, doi:10.1155/2018/2302407.
- [3] 叶素娟,禹权,李国一,等.密封用 PTFE 复合材料的压缩蠕变性能[J].工程塑料应用,2019,47(2):88-92.
Ye Sujuan, Yu Quan, Li Guoyi, et al. Research on compressive creep properties of PTFE composites used for sealing[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):88-92.
- [4] 李红波,赖亮庆,黄艳华,等.聚酰亚胺填充聚四氟乙烯密封材料的性能[J].工程塑料应用,2019,47(11):30-35.
Li Hongbo, Lai Liangqing, Huang Yanhua, et al. Performance of PI filled PTFE sealing materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):30-35.
- [5] 柏栋予,白红伟,傅强.高分子材料烧结成型研究进展[J].高分子通报,2017(10):13-22.
Bai Dongyu, Bai Hongwei, Fu Qiang. Research progress of polymer material sintering[J]. Polymer Bulletin, 2017(10):13-22.
- [6] 李国一,涂刚,赵开贤,等.冷却工艺对填充聚四氟乙烯结晶度和性能的影响[J].润滑与密封,2017,42(2):111-115,123.
Li Guoyi, Tu Gang, Zhao Kaixian, et al. Effect of cooling process on degree of crystallinity and properties of filled polytetrafluoroethylene composites[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(2):111-115, 123.
- [7] Sciuti V F, Melo C, Canto L B, et al. Influence of surface crystalline structures on DSC analysis of PTFE[J]. Materials Research, 2017, doi:10.1590/1980-5373-mr-2017-0326.
- [8] Wang Haifu, Geng Baoqun, Guo Huanguo, et al. The effect of sintering and cooling process on geometry distortion and mechanical properties transition of PTFE / Al reactive materials[J]. Defence Technology, 2020, 16(3):720-730.
- [9] Takeshi Suwa, Masaaki Takehisa, Sueo Machi. Melting and crystallization behavior of poly(tetrafluoroethylene). New method for molecular weight measurement of poly(tetrafluoroethylene) using a differential scanning calorimeter[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1973, 17(11):3 253-3 257.
- [10] Canto R B, Schmitt N, De Carvalho J, et al. Experimental identification of the deformation mechanisms during sintering of cold compacted polytetrafluoroethylene powders[J]. Polymer Engineering & Science, 2011, 51(11):2 220-2 235.
- [11] Radusch H J. Analysis of reversible melting in polytetrafluoroethylene[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2005, 79(3): 615-621.
- [12] do Vale J L, da Silva C H, da Silva Cruz C M G. Assessment of tribological behavior and physicochemical properties alterations of polytetrafluoroethylene imposed by wear test[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2017, 69(4):550-558.
- [13] Sciuti V F, Melo C C, Canto L B, et al. Influence of surface crystalline structures on DSC analysis of PTFE[J]. Materials Research, 2017, 20(5):1 350-1 359.
- [14] Zattini G, Mazzocchetti L. Investigating the degradation phenomena of teflon exposed to acidic environment[J]. Key Engineering Materials, 2017, 754:7-10.
- [15] 崔毓仁,钟朝位,袁颖. PTFE / SiO₂ 复合材料的 DSC 分析及其结晶行为研究[J].材料开发与应用,2013(6):29-33.
Cui Yuren, Zhong Chaowei, Yuan Ying. DSC analysis and crystallization behavior of the PTFE / SiO₂ composites[J]. Development and Application of Materials, 2013(6):29-33.
- [16] Song Fuzhi, Wang Qihua, Wang Tingmei. The effects of crystallinity on the mechanical properties and the limiting PV (pressure × velocity) value of PTFE[J]. Tribology International, 2016, 93:1-10.
- [17] 蒋中原,王峰,朱海霖,等.热处理工艺对 PTFE 微孔带蠕变性能的影响研究[J].浙江理工大学学报:自然科学版,2018, 39(3):273-277.
Jiang Zhongyuan, Wang Feng, Zhu Hailin, et al. Study on influence of heat treatment on creep behavior of PTFE microporous zone[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University: Natural Sciences Edition, 2018, 39(3):273-277.

(上接第 60 页)

Technology & Material, 2019(9):21-24.

- [13] 樊志国,王冰,章坚.有机硅光扩散剂的制备及表征[J].有机硅材料,2015,29(5):389-391.
Fan Zhiguo, Wang Bing, Zhang Jian. Preparation and characteristics of silicone light scattering agent[J]. Silicon Materials, 2015, 29(5):389-391.
- [14] 沈超,高跃生,聂鑫,等.有机硅微球粒径对 PC 光扩散板性能的影响[J].塑料工业,2018,46(6):120-123.

影响[J].塑料工业,2018,46(6):120-123.

Shen Chao, Gao Yuesheng, Nie Chu, et al. The Effect of organic silicon microspheres on the properties of PC light diffusion slab[J]. China Plastics Industry, 2018, v.46 ; No.373(6):120-123.

- [15] Lamnatou C, Moreno A, Chemisana D, et al. Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) material: Critical issues and applications with emphasis on buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82:2 186-2 201.