

<http://pmse.scu.edu.cn>

微粉特性和热处理对聚四氟乙烯车削膜均匀性的影响

姜梦瑶¹, 孟庆文², 徐文玉¹, 侯明鹏¹, 李秋影¹

(1. 华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237; 2. 浙江巨化股份有限公司氟聚合物事业部, 浙江衢州 324004)

摘要:在聚四氟乙烯(PTFE)车削膜的制备过程中, 因PTFE原料微粉形态、粒径和相对分子质量的不同, 可能会出现云斑现象, 导致其结晶度、密度和透光率的均匀性较差。对具有云斑缺陷的2种PTFE车削膜进行了热处理, 通过密度测试发现热处理后其密度均匀性得到提高; 通过差示扫描量热仪对其结晶度进行了表征, 结果表明, 经过热处理后, 其结晶度之差分别由2.22%和12.79%降至0.38%和0.47%, 几乎可以忽略不计; 通过紫外-可见分光光度计对其透光率进行了表征, 结果表明, 其透光率之差分别由18.04%和8.28%降至0.54%和1.08%, 云斑膜的均匀性得到明显改善。

关键词:聚四氟乙烯; 车削膜; 结晶; 均匀性; 热处理

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1000-7555(2025)01-000

聚四氟乙烯(PTFE)是一种高性能有机氟材料, 属于热塑性塑料, 具有“塑料王”之称。PTFE中的氟原子围绕碳骨架形成保护鞘, 氟鞘和碳骨架通过强C—F键相互连接。这种独特的结构决定了其具有优异的性能, 如高化学稳定性、极强的耐高低温性能、疏水性、高润滑不粘性和电绝缘性等^[1]。在润滑、轴承球、聚合物齿轮等机械用途方面, 可作为耐高温循环的不粘涂层材料; 其介电性能提供了绝缘方面的应用, 如电缆外壳、电池隔膜等; 在临床应用中, 由于其惰性, PTFE涂层可用于植入物、支架等生物医疗器械^[2]。

与其他聚合物不同, PTFE由于相对分子质量、熔点和熔体黏度高, 用常规方法加工纯PTFE是一项具有挑战性的任务^[3]。挤出成型需要将PTFE与大量润滑油共混, 才能实现膏状挤出^[4]; 纯PTFE的低熔体流动速度使其通过注射成型加工也十分困难^[5]。加工纯PTFE最常用的方法是冷压烧结法, 尤其是用于PTFE车削膜的制备。这种方法的灵感来自粉末冶金加工技术, 首先将原料混合均匀, 通过模压成型, 然后在高于其熔点的温度烧结, 最后在车床中车削

得到PTFE车削膜^[6]。

烧结是PTFE车削膜制备的关键步骤。在烧结过程中, 树脂颗粒开始聚结并形成坚固的均匀结构^[7]。有研究者指出, PTFE的物理特性高度依赖于烧结温度, 在380℃烧结可获得良好的力学性能和耐化学性^[8-10]。Hambir等^[11]选用牌号H71和81G的PTFE细粉在365℃和380℃的不同温度烧结, 发现PTFE的强度受多种工艺参数和粉末特性的影响, 如粉末粒度和烧结温度等。以上研究表明, 原料粉末特性和烧结过程中的热行为对最终产品质量具有显著影响, 如导致车削膜出现透光率不均匀的云斑现象。由于无定形区域中非常微小的空位(自由体积)允许聚合物链的重新配置^[12], 因此对其进行热处理, 使其熔融并重新均匀结晶是解决云斑现象的一种可行方法。

本文以出现云斑现象的PTFE车削膜和不同牌号的PTFE原料微粉为研究对象, 研究了原料的微粉形态、粒径、晶粒尺寸、相对分子质量及车削膜的结晶度、密度和透光率均匀性。从多个角度对车削膜的云斑成因进行了分析, 并通过热处理改善云斑现

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0248

收稿日期: 2023-12-27

通讯联系人: 孟庆文, 主要从事含氟聚合物的研发, E-mail: smqw@juhua.com;

李秋影, 主要从事聚合物基功能复合材料的研究, E-mail: liqiuying75713@163.com

象,讨论了微粉特性和热处理对膜结晶度、密度及透光率均匀性的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PTFE 微粉(1DB, 2DB, DF16); PTFE 车削膜(YBH2, YBH3, YW)是以 PTFE 微粉 1DB, 2DB 和 DF16 为原料,使用相同的加工工艺制备的车削膜,其中 YBH2 与 YBH3 为云斑膜, YW 为无云斑膜。实验原料均由浙江巨化股份有限公司提供。

1.2 PTFE 微粉的特征

1.2.1 微粉形态与粒径分析:使用场发射扫描电镜(FESEM, S4800, 日本 Hitachi)对 PTFE 微粉的微观形貌进行表征。首先取适量样品加入无水乙醇中,超声分散,然后用毛细玻璃管取适量超声分散后的悬浊液滴于铜箔上,于 80 °C 烘箱中进行干燥,除去无水乙醇,然后进行喷金处理,在加速电压 15 kV、电流 10 μ A 的条件下进行观察。

通过激光粒度粒形分析仪(Microtrac S3500SI, 美国 Microtrac)对 PTFE 微粉的粒度分布进行测试。取适量样品加入无水乙醇中,超声处理,样品分散均匀后进行测试。

1.2.2 晶粒尺寸测试:通过 X 射线衍射仪(XRD, D/max-2550VB/PC Rigaku, 日本)对样品的晶粒尺寸进行表征。测试条件为 Cu-K α 射线,工作电压为 40 kV,电流为 100 mA, 2θ 角的测试范围为 5°~75°。晶粒尺寸通过谢乐公式计算,

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta_{hkl}} \quad (1)$$

式中: D_{hkl} ——晶面法线方向的晶粒大小; β ——半峰宽度,即衍射强度为极大值的峰一半处的宽度,单位为弧度; k ——形状因子,此处取 1; λ ——X 射线波长 0.154056 nm; θ_{hkl} ——布拉格衍射角。

1.2.3 相对分子质量测定:分别通过标准比重法(S.S.G, ASTM D1457-56T)和差示扫描量热仪(DSC, DIAMOND, 美国 Perkin-Elmer)间接表征样品的相对分子质量。标准比重法基于美国测试和材料协会发布的 ASTM D1457-56T 标准中给出的式(2),由 S.S.G 值计算得到样品的相对分子质量^[13],

$$S.S.G = -0.0579 \lg M_n + 2.6113 \quad (2)$$

用于 DSC 法分析的样品质量为 6.0 mg 左右,在 N₂ 气氛中以 10 °C/min 的速率进行升降温扫描,利用实验测得的结晶焓,根据式(3)计算样品的相对分子质量^[14],

$$M_n = 2.1 \times 10^{10} (4.185 \times \Delta H_c)^{-5.16} \quad (3)$$

式中: ΔH_c ——结晶焓, J/g。

1.3 PTFE 车削膜的热处理

在马弗炉中,采用程序控温的方法对云斑膜进行热处理,以改善云斑现象,并释放加工过程中产生的残余应力。通过逐步调整参数缩短热处理时间,如减少保温时间、加快升降温速率等,简化控温程序,节约能耗。热处理程序为升温速率 10 °C/min,最高热处理温度 380 °C,降温速率 0.5 °C/min,程序控温终点温度由 DSC 测得的结晶结束温度来确定,为 310 °C,在 310 °C 保温 30 min,最后使样品随炉冷却至 60 °C 以下取出。云斑膜 YBH2 和 YBH3 经过热处理后分别命名为 S-YBH2 和 S-YBH3。

1.4 PTFE 车削膜的表征

1.4.1 结晶度测定:通过差示扫描量热仪(DSC, DIAMOND, 美国 Perkin-Elmer)对原始车削膜和热处理后 PTFE 膜的结晶度进行表征,在 N₂ 气氛中以 10 °C/min 的加热速率进行升温扫描。初始样品质量保持在 6.0 mg 左右。样品的结晶度由式(4)计算得出,

$$\text{Crystallinity} = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \quad (4)$$

式中: ΔH_m 和 ΔH_0 ——分别为 PTFE 膜样品的熔融焓和 100% 结晶 PTFE 的理论熔融焓,取 82 J/g^[8, 15, 16]。

1.4.2 密度测定:使用分析天平(AL/AB-N, 瑞士 Mettler-Toledo)的密度测定组件测量原始车削膜和热处理后 PTFE 膜的密度。将样品切成 10 mm \times 10 mm 大小,分别测出样品在空气中的质量 m_a 和在水中的质量 m_w 。水的密度用 ρ_w 表示,所测样品的密度(ρ)由式(5)计算得出^[17],

$$\rho = \frac{\rho_w m_a}{m_a - m_w} \quad (5)$$

1.4.3 透光率测试:采用紫外-可见分光光度计(UV-VIS, Lambda 950, 美国 VARIAN)对原始车削膜和热处理后 PTFE 膜样品的透光率进行测试,测试范围为 200~800 nm。

2 结果与讨论

2.1 PTFE 微粉的特性

2.1.1 微粉形态与粒径: Fig.1 是 3 种 PTFE 微粉 1DB, 2DB 和 DF16 的 SEM 图像。从图中可以明显看出, 1DB 和 2DB 粒子之间粒径差别较大, 分散不均匀, 且粒子大多呈现团聚的不规则大块状。相比之下, DF16 的粒径大小更均匀, 分散效果更好, 大部分粒子呈现比较均匀的类型球形。在相同的放大倍数

下, 可以明显发现 1DB 和 2DB 的粒子尺寸比 DF16 更大。在实际的加工过程中, 粒子粒径小更有利于加工, 且类球形粒子更加易于倾倒和混合。而大块状样品不利于加工, 可能会导致严重的团聚现象, 团聚的大块状样品堆积密度较高, 局部结晶度也较高, 可能是车削膜云斑形成的原因之一。

进一步对 3 种牌号的 PTFE 微粉进行了粒径分布测试, 结果如 Fig.2 所示, Tab.1 列出了其粒径分布

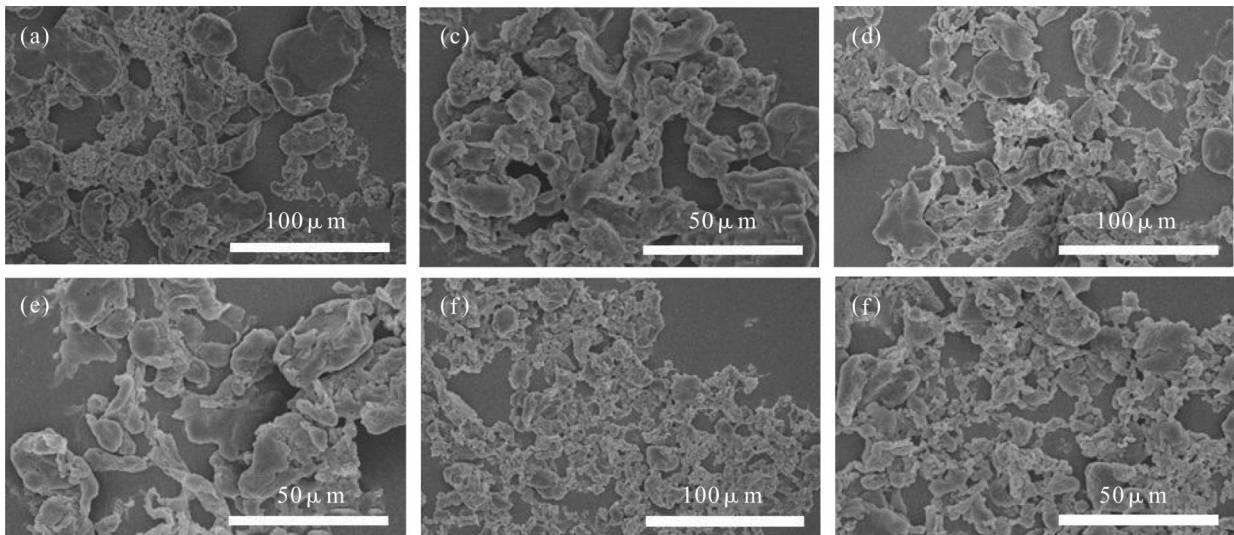


Fig. 1 SEM images of PTFE micropowder: (a), (b) 1DB; (c), (d) 2DB; (e), (f) DF16

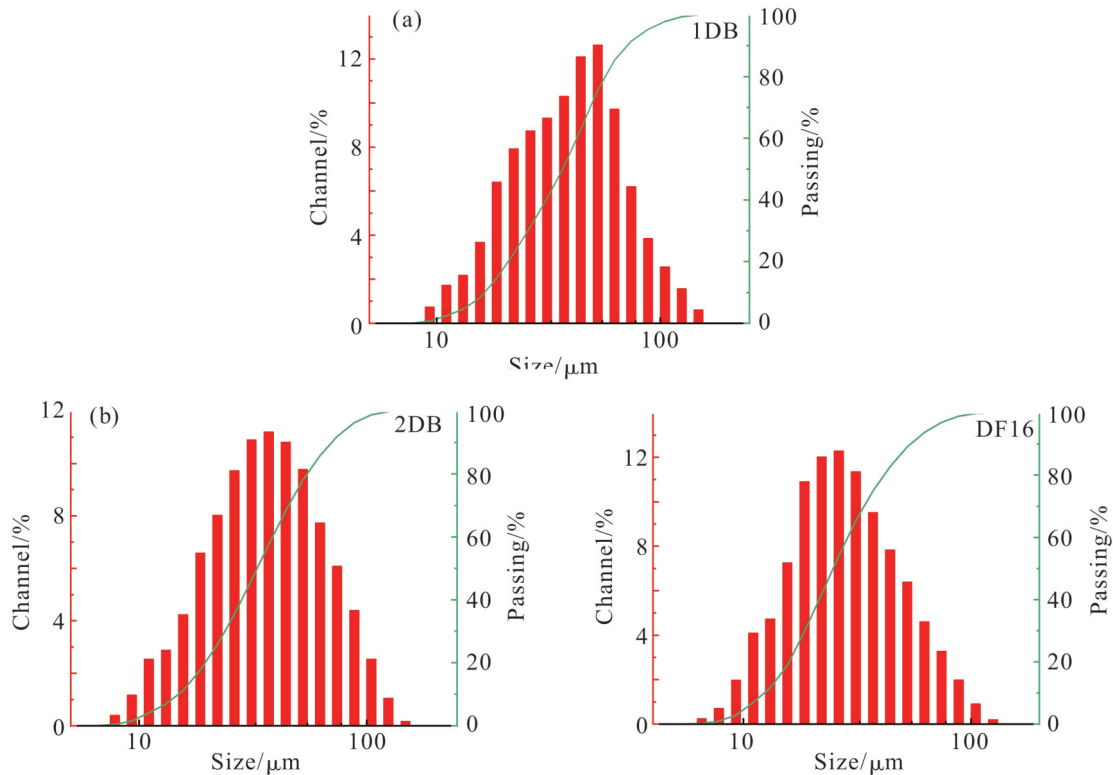


Fig. 2 Particle size distribution of PTFE micropowder: (a) 1DB; (b) 2DB; (c) DF16

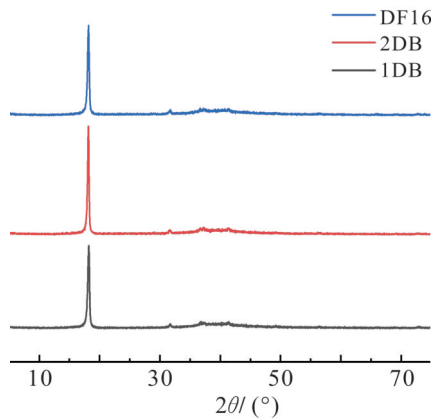
Tab. 1 Particle size of PTFE micropowder

Samples	Particle size range/ μm	$D_{(10)}$ / μm	$D_{(50)}$ / μm	$D_{(90)}$ / μm
1DB	9.25~148.0	16.42	36.49	70.44
2DB	7.78~148.0	14.95	32.92	69.74
DF16	6.54~124.5	12.38	24.69	53.93

范围、 $D_{(10)}$ 、 $D_{(50)}$ 和 $D_{(90)}$ 数据。

从Fig.2和Tab.1中可以看出,1DB和2DB的粒径分布宽度及粒径大小差别不大,粒径分布均较宽,粒径范围为7.8~148.0 μm 左右,90%的粒径小于70 μm 。而DF16的粒径分布相较前2种,均匀性有所改进,粒径更小,粒径范围为6.54~124.5 μm ,其中90%的粒径小于53.93 μm 。这与扫描电镜观察结果一致。由1DB和2DB制备的PTFE车削膜均出现云斑,而由DF16制备的PTFE车削膜未出现云斑,因此可以说明,微粉形态和粒径的差别是导致车削膜出现云斑问题的原因之一。

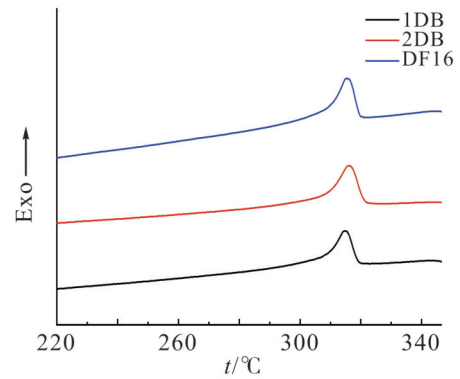
2.1.2 晶粒尺寸:通过XRD对样品的晶粒尺寸进行了分析。Fig.3所示为3种PTFE微粉的XRD图谱,Tab.2中列出了其(100)晶面对应的特征峰的 2θ 角、半高宽(FWHM)及通过谢乐公式计算的晶粒尺寸。

**Fig. 3 XRD patterns of PTFE micropowder****Tab. 2 FWHM and grain size obtained by XRD**

Sample	$2\theta / (^\circ)$	FWHM / ($^\circ$)	Grain size / nm
1DB	18.22	0.322	27.76
2DB	18.15	0.258	34.65
DF16	18.16	0.311	28.74

如Fig.3所示,3种样品均在 $2\theta=18.13^\circ$, 31.63° , 36.65° , 37.16° 和 41.34° 左右观察到峰。其中 $2\theta=18^\circ$ 左右的峰对应于PTFE的结晶相的(100)晶面^[18]。通

过该峰的半高宽,使用谢乐公式计算了样品的晶粒尺寸。结果如Tab.2所示,2DB的晶粒尺寸最大,DF16与1DB的晶粒尺寸基本相同。晶粒尺寸与材料的制备方法、热处理过程密切相关。不同的制备方法下,晶粒尺寸会有所不同。例如:通过快速凝固技术制备的材料通常有较小的晶粒尺寸,而传统的冶金方法制备的材料往往具有较大的晶粒尺寸。晶粒尺寸还会受热处理过程的影响,在高温下进行退火处理可以促进晶粒的生长,从而达到增大晶粒尺寸的效果,而快速冷却可以限制晶粒的生长,从而得到较小的晶粒尺寸。由DF16制备的车削膜未出现云斑,而由1DB制备的车削膜出现了云斑,但二者的晶粒尺寸相差不大,说明微粉的晶粒尺寸可能不是影响云斑形成的主要原因。

**Fig. 4 DSC curves of PTFE micropowder during cooling**

2.1.3 相对分子质量:采用DSC法和S.S.G(Standard Specific gravity)值间接表征了PTFE微粉的相对分子质量。结果如Tab.3, Fig.4和Tab.4所示。

由式(2)可知,S.S.G的值越大,PTFE的相对分子质量越小;反之,则PTFE相对分子质量越大。

由Tab.4可知,由结晶焓计算得到的相对分子质量与标准比重法得到的相对分子质量不同,但总体趋势相同,即DF16的相对分子质量小于1DB与2DB样品的相对分子质量。PTFE的相对分子质量越低,

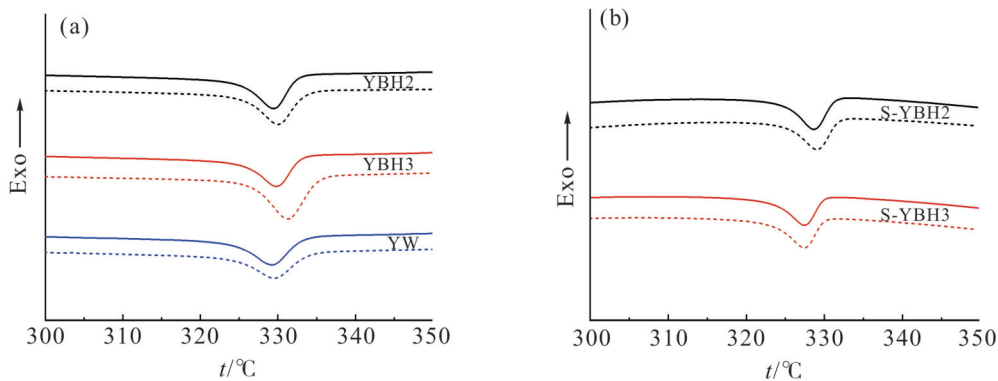


Fig. 5 DSC temperature rise curves of (a) original PTFE turning film and (b) PTFE film after heat treatment at different positions

粒子粒度越细且软,越容易分散。结合粒径分布数据可知,3种微粉中,DF16的粒径和相对分子质量均小于其他2种样品,表明DF16具有更好的分散性。另外,相对分子质量对制品的熔融黏度也有较大影响。一般相对分子质量越大熔融黏度越大,相对分子质量越低熔融状态下分子链间的运动越快,从而使得分子链之间的缠绕降低,分子之间的距离增大,从而使得黏度降低。车削膜的加工过程中,在熔融温度以上烧结是十分重要的一步,若相对分子质量过高,会导致熔融黏度增大,阻碍分子链的运动,从而导致制品内部结构不均匀,在降温过程中不均匀结晶,也可能导致云斑的形成。

Tab. 3 Standard specific gravity and molecular weight of PTFE micropowder

Samples	S.S.G	$M_n \times 10^7$
1DB	2.144	11.771
2DB	2.150	9.272
DF16	2.154	7.909

Tab. 4 Enthalpy of crystallization and molecular weight obtained by DSC

Samples	$\Delta H_c / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$M_n \times 10^{-6}$
1DB	16.819	6.146
2DB	17.799	4.589
DF16	18.432	3.836

2.2 PTFE车削膜

2.2.1 结晶度:通过对车削膜原料(PTFE微粉)的分析初步确定,PTFE车削膜云斑的成因主要与PTFE微粉的粒子形态与粒径和相对分子质量有关。两者的不同可能导致膜内部结晶不均匀。为了进一步验

证所得出的结论,对云斑膜、无云斑膜和热处理后的PTFE膜的不同位置取样,通过DSC法表征其结晶度。Fig.5为测得的DSC升温过程的曲线,Tab.5中列出了其熔融焓、结晶度及结晶度之差(ΔC)。

Tab. 5 Enthalpy of fusion, crystallinity and difference of crystallinity between original PTFE turning film and PTFE film samples after heat treatment at different positions

Samples	$\Delta H_m / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	Crystallinity /%	$\Delta C / \%$
YBH2	37.82	46.12	2.22
	36.00	43.90	
YBH3	35.97	43.87	12.79
	46.46	56.66	
YW	35.61	43.43	0.39
	35.93	43.82	
S-YBH2	19.12	23.32	0.38
S-YBH3	18.81	22.94	0.47
	18.37	22.40	
	17.98	21.93	

从DSC分析结果可以看出,云斑膜YBH2和YBH3不同位置的结晶度差别较大,尤其是YBH3,结晶度之差高达12.79%,说明云斑膜样品内部结晶不均匀。而无云斑膜YW不同位置的结晶度仅相差0.39%,几乎可以忽略不计,说明其结晶均匀性较好,致密性良好。DSC结果进一步验证了云斑现象是由于样品内部结晶不均匀导致的。云斑膜经过热处理后,结晶度之差与无云斑膜相当,可以忽略不计,说明热处理可以很好地改善云斑膜的结晶均匀性。

2.2.2 密度:PTFE的密度通常为 2.2 g/cm^3 左右,结晶

不均匀势必会导致密度不均匀,且微粉形态不规则导致的局部堆积密度过高也会影响其密度,因此有必要对车削膜的密度进行测试。从原始车削膜样品中随机各取6个位置测试其密度,结果如图6所示。

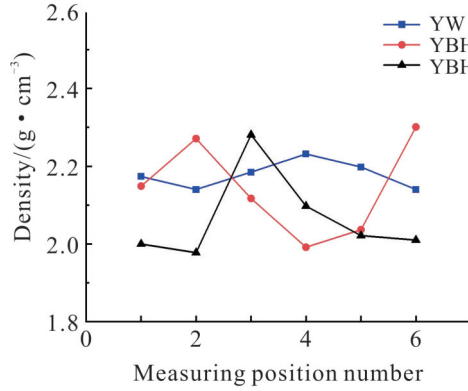


Fig. 6 Density of original PTFE turning film

从Fig.6中可以看出,无云斑膜YW的密度比较稳定,在 2.2 g/cm^3 左右,而云斑膜YBH2和YBH3的密度则随着选取位置的不同而上下波动较大,密度测试结果与结晶度测试结果可以相互佐证,证实了云斑的存在使得样品的密度不均匀,而密度是由于

样品内部结晶或堆积密度不均匀而引起的致密度不同。对热处理后的膜同样进行了密度测试,结果如图7所示。

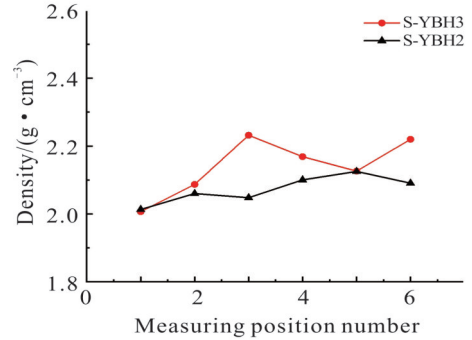


Fig. 7 Density of PTFE membrane after heat treatment

热处理后PTFE膜的密度测试结果显示,经过热处理后其密度均匀性良好,不同位置的密度上下波动不大。说明热处理很好地改善了样品的致密性,通过使其熔融重新结晶,控制降温过程,使样品充分均匀结晶,可以消除云斑现象,从而获得性质均一的PTFE薄膜。

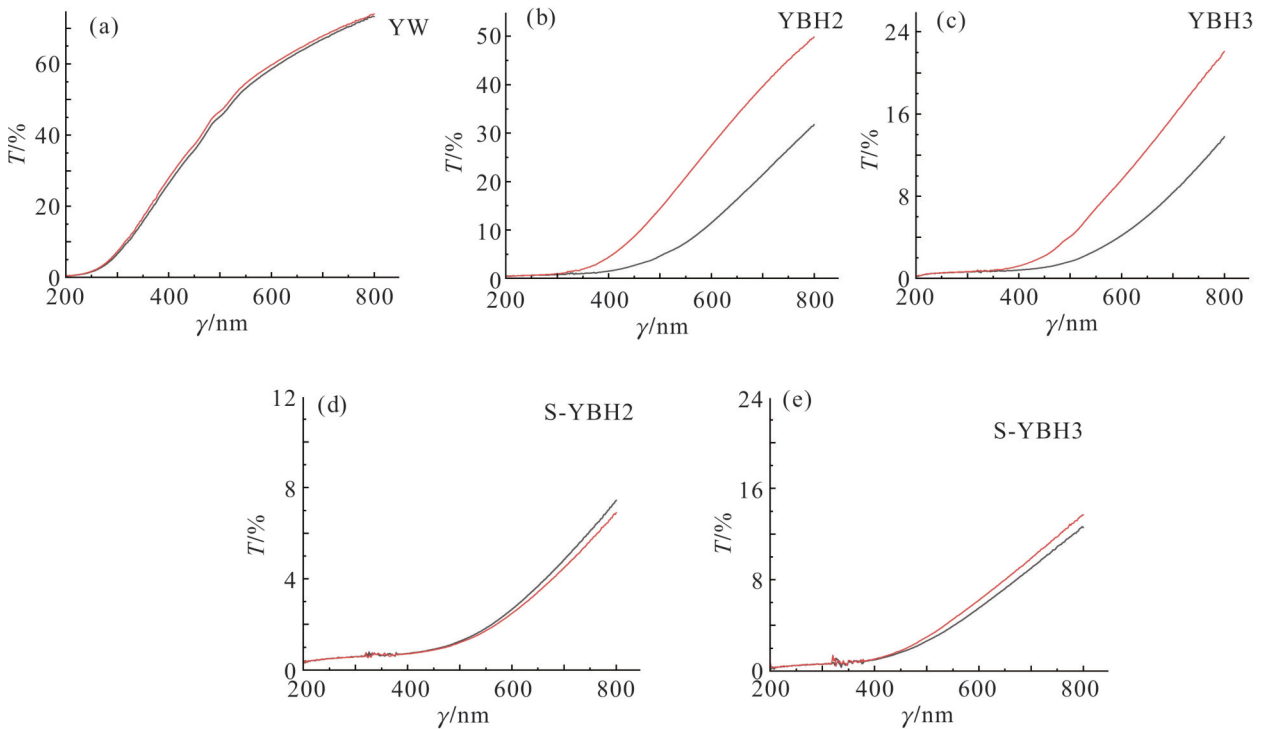


Fig. 8 Transmission spectra of PTFE membranes at different positions
(a): YW; (b): YBH2; (c): YBH3; (d): S-YBH2; (e): S-YBH3

2.2.3 透光率:云斑的外在表现为透光率不同,对原始PTFE车削膜和热处理后的膜进行了紫外可见透光率测试,得到的透射光谱如图.8所示。

从Fig.8中可以看出,云斑膜YBH2和YBH3在其不同位置取样测得的透光率差别很大,而无云斑膜YW不同位置的透光率差别很小,几乎可以忽略不计。证实了云斑导致的结晶度不均匀的外在表现即为透光率不均匀。将热处理后S-YBH2,S-YBH3与云斑膜YBH2,YBH3的透射光谱进行对比发现,经过热处理的PTFE薄膜透光率均匀性得到明显改善。将热处理前后样品在800 nm处的透光率(T_{800})进行对比,计算同一样品不同位置在800 nm处的透光率之差(ΔT),结果如Tab.6所示。

Tab. 6 Light transmittance (T_{800}) and light transmittance difference (ΔT) at 800 nm of the original turned film and PTFE film after heat treatment at different positions

Samples	$T_{800}/\%$	$\Delta T/\%$
YBH2	31.79	18.04
	49.83	
YBH3	13.81	8.28
	22.09	
YW	73.30	0.73
	74.03	
S-YBH2	7.44	0.54
	6.90	
S-YBH3	12.58	1.08
	13.66	

从Tab.6中可以明显看出,热处理前云斑膜样品YBH2和YBH3的不同位置在800 nm处的透光率之差 ΔT 较大,分别为18.04%和8.28%,而无云斑膜YW和热处理后的S-YBH2,S-YBH3的不同位置在800 nm处的透光率之差 ΔT 很小,分别为0.73%,0.54%和1.08%,几乎可以忽略不计,且热处理后的膜与无云斑膜的透光率之差相当。从云斑膜的不同位置取样测得的透射光谱差别很大,说明样品的内部结构不均匀,造成了不同位置对光的透射率不同。而热处理后样品的透光率均匀性得到明显改善,且与无云斑膜相当,说明热处理很好地改善了样品内部结构不均的情况。因此可以得出结论,热处理是改善

PTFE车削膜云斑现象的一种简便有效的方法。

3 结论

对3种PTFE微粉的粒子形态与粒径、晶粒尺寸和相对分子量进行了测试和分析,结果表明云斑的成因与微粉形态、粒径和相对分子量有关。PTFE膜的结晶度、密度和透光率分析结果表明,由于样品的不均匀结晶,云斑膜不同位置的结晶度、密度和透光率的均匀性较差;热处理后膜的结晶度、密度和透光率均匀性得到明显改善,且与无云斑膜相当,说明热处理可以有效地改善车削膜的云斑现象。该方法为含氟行业内消除云斑,获得性质均一的薄膜,提供了一种简便易行的方法。

参考文献:

- [1] Li L, Bowler N, Kessler M, *et al.* Dielectric response of PTFE and ETFE wiring insulation to thermal exposure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17: 1234-1241.
- [2] Dhanumalayan E, Joshi G M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)- a review[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2018, 1: 247-268.
- [3] Guenoun G, Faou J Y, Regnier G, *et al.* PTFE crystallization mechanisms: insight from calorimetric and dilatometric experiments[J]. Polymer, 2020, 193: 122333.
- [4] Ochoa I, Hatzikiriakos S G, Mitsoulis E. Paste extrusion of polytetrafluoroethylene: temperature, blending and processing aid effects[J]. International Polymer Processing, 2006, 21: 497-503.
- [5] Tzeng C J, Yang Y K, Lin Y H, *et al.* A study of optimization of injection molding process parameters for SGF and PTFE reinforced PC composites using neural network and response surface methodology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63: 691-704.
- [6] Than V T, Wang C C, Ngo T T, *et al.* Thermal behavior of polytetrafluoroethylene in the sintering process[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 30: 101247.
- [7] Frick A, Sich D, Heinrich G, *et al.* Classification of new melt-processable PTFE: comparison of emulsion- and suspension-polymerized materials[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2012, 297: 329-341.
- [8] El Aboudi I, Mdarhri A, Lame O, *et al.* Analyzing the microstructure and mechanical properties of polytetrafluoroethylene fabricated by field-assisted sintering[J]. Polymer, 2020, 203: 122810.

- [9] Feng Y, Xiong T, Jiang S, *et al.* Mechanical properties and chemical resistance of electrospun polytetrafluoroethylene fibres [J]. *RSC Advances*, 2016, 6: 24250-24256.
- [10] Xu H, Jin W, Wang F, *et al.* Formation and characterization of polytetrafluoroethylene nanofiber membranes for high-efficiency fine particulate filtration[J]. *RSC Advances*, 2019, 9: 13631-13645.
- [11] Hambir S S, Jog J P, Nadkarni V M. Strength development in powder processing of poly(tetrafluoroethylene) [J]. *Polymer Engineering and Science*, 2004, 34: 1065-1069.
- [12] Guenoun G, Faou J-Y, Regnier G, *et al.* Thermal cycling of cold-pressed PTFE compacts: reversible and irreversible behavior[J]. *Polymer Testing*, 2019, 75: 99-106.
- [13] Xu Y, Huang C, Jin X. A comparative study of characteristics of polytetrafluoroethylene fibers manufactured by various processes [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133: 43553.
- [14] Suwa T, Takehisa M, Machi S. 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: 3253-3257.
- [15] Henri V, Dantras E, Lacabanne C, *et al.* Thermal ageing of PTFE in the melted state: influence of interdiffusion on the physicochemical structure[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 171: 109053.
- [16] Yassien K M, El-Zahhar A A. Investigation on the properties of gamma irradiated of polytetrafluoroethylene fibers[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2019, 82: 2054-2060.
- [17] 孙乐文. 高性能聚四氟乙烯薄膜的制备与性能[D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
- Sun L W. Fabrication and performances of high-performance PTFE membranes[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2019.
- [18] Sato K, Tominaga Y, Imai Y, *et al.* Deformation capability of poly (tetrafluoroethylene) materials: estimation with X-ray diffraction measurements[J]. *Polymer Testing*, 2022, 113: 107690.

Effect of Powder Characteristics and Heat Treatment on Uniformity of Polytetrafluoroethylene Turning Film

Mengyao Jiang¹, Qingwen Meng², Wenyu Xu¹, Mingpeng Hou¹, Qiuying Li¹

(1. School of Material Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. Zhejiang Juhua Company Limited Fluoropolymer Division, Quzhou 324004, China)

ABSTRACT: In the preparation process of polytetrafluoroethylene (PTFE) turning film, cloud spots may appear due to the different morphology, particle size and molecular weight of PTFE raw materials, resulting in poor uniformity of crystallinity, density and light transmittance. Two kinds of PTFE turning films with cloud spot defects were heat treated. Through density test, it is found that the density uniformity is improved after heat treatment. The crystallinity was characterized by differential scanning calorimetry (DSC). The results show that the difference of crystallinity decreases from 2.22% and 12.79% to 0.38% and 0.47% respectively after heat treatment, which is almost negligible. The transmittance was characterized by ultraviolet-visible spectrophotometer (UV-vis) spectrophotometer, and the results show that the difference of transmittance decreases from 18.04% and 8.28% to 0.54% and 1.08% respectively, and the uniformity of the cloud spot films is obviously improved.

Keywords: polytetrafluoroethylene; turning film; crystallization; homogeneity; heat treatment