

聚合物熔体膜在基体表面的润湿和铺展行为

袁才根, 陈 亚, 胡春圃*

(华东理工大学 材料科学与工程研究所, 上海 200237)

摘要: 聚合物熔体膜在基体表面上的润湿和铺展行为受铺展系数和 Hamaker 常数影响。对于不能在基体表面上铺展的聚合物膜, 当处于其玻璃化温度以上时, 聚合物熔体膜将破裂, 出现非连续区域。随着体系处于聚合物玻璃化温度以上时间的延长, 非连续部分尺寸不断增长, 增长速率与表面张力、聚合物粘度、聚合物液滴在基体表面的平衡接触角等因素有关, 平衡后聚合物以液滴的形式在基体表面稳定存在。将带功能端基聚合物加入不能在基体表面上铺展的聚合物中, 通过修饰聚合物与基体界面或改变聚合物熔体膜的表面张力, 可以使原来不能在基体表面铺展的聚合物保持稳定。本文综述了聚合物熔体膜的铺展和润湿动力学研究进展, 并归纳了使聚合物熔体膜稳定的方法。

关键词: 聚合物熔体膜; 铺展与润湿; 高分子表面物理化学

聚合物熔体膜的润湿和铺展是高分子表面物理化学的内容之一, 是在表面物理化学规律的基础上以聚合物熔体膜为对象的一个研究领域。随着高分子材料科学的发展和应用领域的拓宽, 高分子聚合物膜的应用越来越广泛, 如微电子、润滑、涂层等领域都涉及聚合物膜, 故它们在基体上的铺展和润湿行为亦开始受到人们的重视。90 年代初至今, 有关聚合物熔体膜润湿和铺展动力学理论^[1~8]和实验研究^[9~18]的报道不断出现, 本文综述了这方面的研究进展。

1 理论

1.1 非挥发性液体在固体基体表面上的铺展和润湿行为

对于小分子液体的铺展和润湿行为在表面化学中已有深入研究, 但有关液体铺展和润湿动力学的研究报道却较少, 因为小分子易挥发, 且液体粘度较低, 故铺展润湿平衡的速度较快, 难于进行研究。聚合物的分子量较大, 大分子不易挥发且趋于平衡的速度较慢, 所以适合于铺展和润湿动力学的研究。1991 年 Brochard-Wyart^[19]首次从理论上研究了光滑表面上厚度为 e 的非挥发性液体膜的铺展和润湿行为, 认为可以用式(1)所示的单位表面自由能 $F(e)$ 加以说明:

$$F(e) = \gamma_L + \gamma + P(e) \quad (1)$$

式中 γ_L 和 γ 分别为固液界面和液气界面的界面张力, $P(e)$ 为长程范德华作用势能。当膜的厚度 e 较大时, $P(e)$ 趋向于零; 而当膜较薄时, $P(e)$ 可用下式表示:

$$P(e) = \frac{A}{12e^2} \quad (2)$$

其中 $A = A_{SL} - A_{LL}$ 为固液 Hamaker 常数和液液 Hamaker 常数之差, 在此仍称为 Hamaker 常数。对于不同的固液体系 Hamaker 常数 A 可为正值也可为负值。当 A 为正值时表明 $A_{SL} > A_{LL}$, 此时液

作者简介: 袁才根 (1965—), 男, 博士生。1997 年赴美国康涅狄格大学研修, 主要从事高分子表面物理化学和含氟材料的研究;
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://w

* 通讯联系人

膜在固体表面有铺开的倾向;反之,当 A 为负值时,则液体不能在固体表面铺展。结合表面化学中描述短程相互作用的铺展系数 S , 对于在光滑固体表面上的液体膜, 影响其铺展和润湿行为的主要参数为 A 和 S 。而且 Brochard-Wyart^[19] 认为 A 和 S 是相互独立的, 它们各自可以是正值或负值, 这样就出现四种情况, 相应地液体在固体表面有三种状态: (1) 完全铺展, 液体在固体表面铺展润湿; (2) 半铺展, 液体在固体表面以球冠状存在, 周围有一层铺展的液体分子膜与球冠液体平衡共存; (3) 粘附润湿, 液体在固体表面以液滴的形式存在, 接触角为 θ 。

1.2 非挥发性液体在液体基体表面上的铺展和润湿行为

Brochard-Wyart 等^[20] 还从理论上研究了相互不铺展的液-液界面上的润湿动力学 (FBW 理论)。对于液体 A 在液体 B 表面上形成的液体双层膜, 当 B 较粘稠, 且 A 和 B 的粘度 η_A 、 η_B 以及 A 在 B 表面上的平衡接触角 θ 符合 $\eta_A > \eta_B / \theta$ 的关系时, 液体 B 具有类固体性质。此时在向润湿平衡转化过程中 AB 界面将保持平直, 不发生内陷, 其润湿动力学和液体在固体表面上的情况类似。如果 A 有一定的粘度且 θ 较小, 则在趋向润湿平衡过程中, 膜 A 上非连续部分尺寸增长速率有如下形式:

$$v = \frac{1}{12 \ln 2} \frac{\gamma_A \theta}{\eta_A} \quad (3)$$

式中 γ_A 为上层液体的表面张力, $\ln$ 项为对边界扩散引起的偏差的校正项。反之, 若下层液体膜不太粘稠, 且存在 $\eta_A < \eta_B / \theta$ 的关系时, 液体 B 在趋向润湿平衡时表现出液体性质, A 在 B 表面发生活塞式流动, AB 界面发生变形。当 B 膜较厚时, 在趋向润湿平衡过程中 A 膜上非连续部分尺寸增长速率为

$$v = \frac{\gamma}{\eta_B \theta} \quad (4)$$

式中 $\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\gamma_A} + \frac{1}{\gamma_B}$

而当下层膜 B 非常薄时, 则

$$v \propto \left(\frac{\gamma_A L^2 \theta}{\eta_B} \right)^{\frac{1}{3}} t^{-\frac{1}{3}} \quad (5)$$

式中 L 为下层液膜的厚度, t 为时间。式 (5) 说明液膜 A 上的非连续部分尺寸的增长速率随时间减小。

2 聚合物熔体膜的铺展和润湿动力学

有关聚合物熔体膜的流体动力学研究是从 90 年代初开始的。利用特殊的技术如旋转涂膜法, 聚合物可以在其不铺展的表面上形成均匀膜。然而, 这种聚合物膜是不稳定的, 当被加热到其玻璃化温度以上时, 聚合物膜将破裂, 达平衡后表现为粘附润湿或不润湿。

1991 年 Redon 等^[21] 研究了在化学接枝低表面能硅片上, 厚度为 $20 \mu\text{m} \sim 50 \mu\text{m}$ 的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 薄膜的运动规律。他们在旋转涂膜法形成的均匀薄膜上用毛细管或气流使硅片中心处的 PDMS 膜上形成一个小孔, 然后观察小孔尺寸 (R) 的变化情况。实验结果发现, 非连续部分尺寸增长速率 $v = dR/dt$ 与 R 和膜厚无关, 而与 PDMS 的粘度成反比, 且受 PDMS 与基体间的平衡接触角 θ 影响很大。当 θ 很小时, $v \propto \theta$ 。

聚苯乙烯 (PS) 在硅片表面上的铺展系数 S 为负值, 所以 PS 膜在硅片表面是不稳定的。1992 年 Reiter^[22] 研究报道了 PS 超薄膜 ($< 100 \text{ nm}$) 在硅片表面的润湿与铺展行为, 发现硅片上均匀的

PS 膜在 165°C 恒温条件下被破坏, 首先出现小孔; 随着 PS 膜处于玻璃化温度以上时间的延长, 小孔增大并形成非连续区域, 后者的尺寸不断地增大; 当非连续部分相遇时, PS 聚集形成小液滴, 到达平衡状态后, PS 液滴有规则地呈多边形分布; 液滴和多边形的大小与膜厚成正比, 而其数目则与膜厚成反比。

Reiter 等^[23]曾报道了聚合物在其自身表面上的铺展与润湿行为, 在硅片表面上接枝一层 PS, 再在其上面形成另一层 PS 膜, 发现上层 PS 不能在下层 PS 上铺展。润湿过程中非连续部分尺寸及平衡接触角均随 PS 接枝密度的增加而增大。他们认为紧密接枝于硅片表面上的 PS 分子呈梳状分布, 由于熵的作用对未接枝的 PS 分子产生排斥作用, 使后者不能在接枝 PS 分子表面上铺展。

Qu 等^[24]对 PS 和聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 形成的双层高分子膜界面上的润湿和铺展动力学进行了研究, 将双层膜加热至 165°C , 此时 PS 和 PMMA 都处于粘流态, 然后分别考察了不同分子量的 PS 和 PMMA 体系的润湿动力学, 得到了与 FBW 液液双层理论一致的结果。

Zhao 等^[25]研究了分子量为 93K、290K 和 374K 的聚乙烯-丙烯共聚物 (PEP) 在硅表面的润湿和铺展行为, 发现即使对于可在硅片表面铺展的 PEP 聚合物体系, 当膜厚小于该聚合物的旋转半径时, 所形成的聚合物膜亦是不稳定的。Qi 等^[26]则研究了硅片表面的聚碳酸酯和苯乙烯-丙烯腈共聚物, 并对非连续部分尺寸随膜厚等因素的变化进行了考察。

3 聚合物膜在基体表面上的稳定

在基体上涂覆有聚合物膜的复合材料的实际应用场合, 聚合物膜的稳定性是极其重要的。对于 $S < 0$ 的体系, 聚合物膜不能在基体表面铺展, 即使采用特殊的工艺得到均匀的聚合物膜, 它们仍处于亚稳状态。为了解决这一问题, 最常用的方法是对基体表面进行改性, 如采用等离子体处理基体表面, 使基体表面的表面能提高, 从而使 $S > 0$, 聚合物就可以在基体表面上铺展。

Henn 等^[27]用一端或两端带磺酸钡基团的 PS 在硅片上成膜, 研究了在 $160^{\circ}\text{C} \sim 175^{\circ}\text{C}$ 下初始膜厚、聚合物分子量和链端官能度对润湿行为的影响。实验结果表明, 低分子量单官能度 PS 与普通 PS 一样不能在硅片表面铺展, 其润湿动力学行为和普通 PS 类似, 然而, 到达平衡状态后, X 射线反射率 (X-ray reflectivity) 分析发现聚合物膜上非连续部分对应的硅片表面处仍覆盖有一层单官能度 PS, 如图 1 所示。这是由于单官能度 PS 分子上的离子端基能与基体结合, 然后紧密排列形成“聚合物分子刷”, 这种特殊链结构使别的 PS 分子不能穿插到“刷”中去, 因而未被吸住的聚合物将不能在刷表面上铺展。当单官能度 PS 的分子量增加时, 形成“聚合物分子刷”的高分子和游离高分子间将发生缠绕, 从而使整个聚合物膜能均匀地稳定存在于基体上。对于双官能度 PS, 无论其分子量大小如何, 都能在硅片表面上铺展形成稳定的膜。此时一端的离子端基吸附于硅片表面, 而没有吸附于硅片表面上的端基则相互聚集, 从而产生类似于缠绕的结果, 使膜保持稳定。

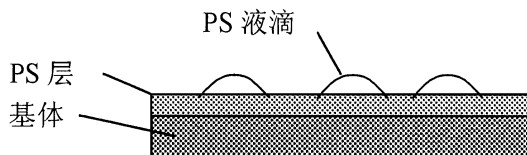


图 1 在硅片表面上的单官能度 PS 在 $160^{\circ}\text{C} \sim 175^{\circ}\text{C}$ 下达平衡状态后的截面示意图

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

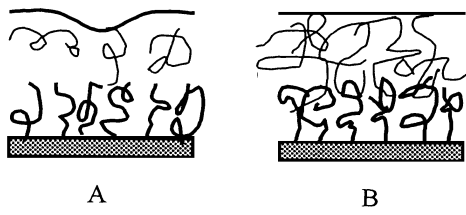
Yerushalmi-Rozen 等^[28]通过向 PS 齐聚物 ($M_w = 580$) 中加入高分子量 PS 和带有功能端基的高分子量 PS, 然后在硅片表面成膜, 并研究了膜的稳定性。对于分子量为 580 的 PS 在硅片表面

形成的均匀膜,一般几分钟内就会破裂变得不均匀,而加入高分子量 PS 和带有功能端基的高分子量 PS 后,形成的聚合物膜的稳定性与加入的单官能度 PS 和高分子量 PS 的浓度和分子量有关,如表 1 所示。从表 1 可知,向 PS580 中分别加入 12% PS30.3K、8%PS330K 和 5% PS1930K 时,PS 膜仍不能稳定。如果单独加入单官能度 $[(CH_2)_3N^+(CH_3)_2(CH_2)_3SO_3^-]$ 的 PS(dPSX380K),则加入浓度达 4.6%时,PS 膜数月后仍能保持均匀稳定。如果先形成一层 dPSX380K 聚合物膜,再在其上制备 PS580 膜,则 PS580 膜也不能稳定存在,与 Reiter 等^[23]报道的上层 PS 不能在下层 PS 上铺展的结果类似;若在 PS580 中加入高分子量 PS,再在单层 dPSX380K 上成膜,则聚合物膜能稳定存在,其中高分子量 PS 的加入量随其分子量增加而下降,增加 dPSX380 的浓度可以相应降低高分子量 PS 的用量。如果在 PS580 中同时加入 1%dPSX380K 和高分子量 PS,则聚合物膜能稳定存在,同样高分子量 PS 的加入量随其分子量增加而下降,增加 dPSX380 的浓度可以相应降低高分子量 PS 的用量。聚合物膜的稳定机理如图 2 示意。

表 1 分别加入不同浓度 dPSX380K 和不同浓度高分子量 PS 后形成的 PS580 齐聚物膜的铺展与润湿实验结果

编号	dPSX-380K 含量	均聚物含量	熔体膜行为
1	无	无	不稳定、开裂
2	无	3%~12%PS30.3K	No.2 中所有分子量和浓度组合的 PS 熔体膜均不稳定、开裂
		5%~8%PS330K	
		5%~7%PS550K	
		2%~8%PS710K	
		2%~5%PS1000K	
		5%PS1930K	
3	单层 ^a	无	不稳定
4	1%~4%	无	不稳定
5	>4.6%	无	稳定
6	单层 or 1%	≤5%PS330K	不稳定
7	单层 or 1%	7%PS330K	稳定
8	单层 or 1%	≤5%PS330K	不稳定
9	单层 or 1%	7%PS330K	稳定
10	单层 or 1%	<5%PS710K	不稳定
11	单层 or 1%	≥5%PS710K	稳定
12	单层 or 1%	2.5%PS1000K	稳定
13	1%~5%	1%~5%PS710K	稳定
14	单层 or 1%	1.6%PS1930K	不稳定
15	单层 or 1%	2.5%PS1930K	稳定
16	单层 or 1%	2%PS7100K	稳定

a 表示先在基体表面形成一层 dPSX380K 单分子膜,再在其上制备 PS 膜。



(图 2)加入 dPSX380K 和高分子量普通 PS 的 PS580 齐聚物膜中高分子链分布排列示意图

dPSX380K 离子端吸附于基体表面上形成分子“刷”,高分子量普通 PS (A) 浓度较小,不能形成缠绕,聚合物膜不稳定;
(B) 浓度较大,高分子量普通 PS 间及高分子量普通 PS 与 dPSX380K 间发生缠绕,聚合物膜能稳定存在。

从铺展系数公式可知,表面张力 γ_A 、 γ_B 和 γ_{AB} 决定了铺展系数 S 为正值还是为负值,所以从理论上讲对于铺展系数 S 为负的体系,设法改变三个表面张力都有可能使 S 由负值变为正值。如对基体表面进行等离子体等处理可使基体表面张力 γ_B 增大,就有可能使铺展系数 S 由负值变为正值,则原来不铺展的聚合物熔体可在基体表面上铺展。改变聚合物熔体和基体间的界面张力 γ_{AB} 也能使聚合物膜稳定,如 Henn^[27] 和 Yerushalmi-Rozen^[28] 等研究的离子端基聚合物体系,可以认为离子端基在界面的吸附使 AB 间的界面张力 γ_{AB} 减小,至铺展系数大于零时,聚合物膜就能在基体表面铺展。显然,除了通过改变基体表面张力或界面张力,还可以通过改变聚合物表面张力 γ_A 的方法使铺展系数大于零,从而使聚合物膜能在基体表面上铺展。大量的研究工作^[29~37] 表明,聚合物膜表面符合表面化学规律,即其表面能趋向于最小化。对于含不同端基的聚合物形成的膜, Koberstein 等^[30] 的研究显示体系中的低能端基将向膜表面富集,在表面层表现为正吸附;而高能端基则倾向于离开表面,在表面层表现为负吸附。在此基础上, Yuan 等^[38] 通过向 PS 中添加含氟端基 $[\text{Si}(\text{CH}_3)_2(\text{CH}_2)_2(\text{CF}_2)_7\text{CF}_3]$ 聚苯乙烯 (PS-F) 来改变 PS 膜的表面张力,然后在甲基丙烯酸甲酯 (MMA) 的表面成膜,对 PS 熔体膜的铺展和润湿行为进行了研究。光电子能谱 (XPS) 研究发现, PS-F 的加入使 PS 膜表面有氟端基富集。加入 PS-F 的浓度越高或相同浓度但分子量越小,表面氟端基富集越明显,相应地 PS 膜的表面张力的下降越明显。对 PS 膜润湿动力学研究发现, PS-F 的加入使 PS 膜上非连续部分尺寸的增大速率下降,后者与 PS-F 的分子量及其加入浓度有关,如图 3 所示。

图 3 表明,在相同的加入浓度下 PS-F 的分子量越小, PS 膜上非连续部分尺寸的增大速率的下降越多;而对于相同分子量的 PS-F,则随着加入浓度增加 PS 膜上非连续部分尺寸的增大速率的下降幅度增大,这种速率的变化与公式 (3) 一致。进一步的研究表明,由纯 PS-F 35.5K 形成的膜在 165℃ 的条件下保持三天以上仍能稳定;在 PS 34.5K 中加入 70% 的 PS-F 17.3K 就能使 PS 膜稳定;而在 PS-F 4.5K 与 PS 34.5K 的体系中, PS-F 4.5K 的稳定浓度只需 50%。这些研究结果显示,只要降低聚合物膜的表面张力 γ ,就能使原来不能在基体表面铺展的聚合物膜得以稳定存在。

高分子薄膜的润湿与铺展行为是高分子表面物理化学的一个重要研究方向,通过近 10 年的研究,已经对高分子薄膜的润湿和铺展行为有了一些了解,亦为高分子膜的实际应用提供了一定的理论基础。随着实验研究的深入和分子模拟研究方法的引入,对聚合物熔体膜的润湿和铺展行为将进一步提高到分子水平进行考察,从而能更全面地理解高聚物表面的物理化学规律。

参考文献:

- [1] Kacker N, Kumar S, Allara D L. Langmuir, 1997, 13:6366.
- [2] Dan D. Langmuir, 1996, 12:1101.
- [3] Shall K R. Macromolecules, 1996, 29:8487.
- [4] Walton D G, Soo P P, Mayes A M, et al. Macromolecules, 1997, 30:6947.

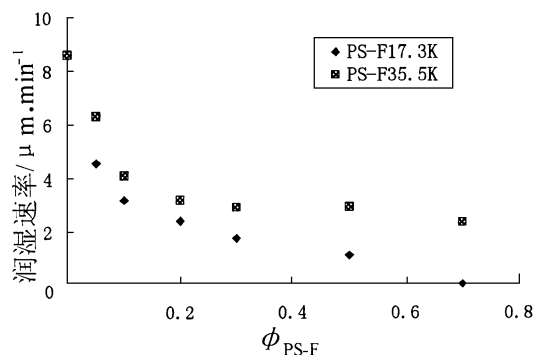


图 3 聚合物熔体膜上非连续部分尺寸增大速率随 PS-F 17.3K 与 PS-F 35.5K 加入浓度的变化图

- [5] Dan Nily, Yerushalmi-Rozen R. Trends in Polymer Science, 1997, 5(2) : 46.
- [6] Genzer J, Composto R J. J Chem Phys, 1997, 106(3) : 1257.
- [7] Gay C. Macromolecules, 1997, 30 : 5939.
- [8] Krusch G. J Phys Condens Matter, 1997, 9 : 7741.
- [9] Liu Y, Rafailovich M H, Sokolov J, et al. Phys Rev Lett, 1994, 73(3) : 440.
- [10] Kerle T, Yerushalmi-Rozen R, Klein J. Macromolecules, 1998, 31 : 422.
- [11] Faldi A, Composto R J, Winey K I. Langmuir, 1995, 11 : 4855.
- [12] Feng Y, Karim A, Weiss R A, et al. Macromolecules, 1998, 31 : 484.
- [13] Geoghegan M, Jones R A L, Sivia D S, et al. Physical Review E, 1996, 53(1) : 825.
- [14] Brochard-Wyart F, Debregeas G, Fondecave R, et al. Macromolecules, 1997, 30 : 1211.
- [15] Straub W, Brader F, Brenn R, et al. Europhys Lett, 1995, 29(5) : 353.
- [16] Shull K R, Karis T E. Langmuir, 1994, 10 : 334.
- [17] Reiter G. Macromolecules, 1994, 27(11) : 3046.
- [18] Kerle T, Yerushalmi-Rozen, Klein J. J Europhys Lett, 1997, 38(3) : 207.
- [19] Brochard-Wyart F, DiMaggio J M, Quere D, et al. Langmuir, 1991, 7 : 335.
- [20] Brochard-Wyart F, Martin P, Redon C. Langmuir, 1993, 9 : 3682.
- [21] Redon C, Brochard-Wyart F, Rondelez F. Phys Rev Lett, 1991, 66(6) : 715.
- [22] Reiter G. Phys Rev Lett, 1992, 68(1) : 75.
- [23] Reiter G, Auroy P, Auvray L. Macromolecules, 1996, 29 : 2150.
- [24] Qu S, Clarke C J, Liu Y, et al. Macromolecules, 1997, 30 : 3640.
- [25] Zhao C, Rafailovich M H, Sokolov J. Phys Rev Lett, 1993, 70(10) : 1453.
- [26] Qi P, Karen I W, Howard H H. Langmuir, 1997, 13 : 1758.
- [27] Henn G, Bucknall D G, Stamm M, et al. Macromolecules, 1996, 29 : 4305.
- [28] Yerushalmi-Rozen R, Klein J. Langmuir, 1995, 11 : 2806.
- [29] 马克勤, 胡春圃, 王世容, 等. 高等学校化学学报, 1990, 11(4) : 402.
- [30] Jalbert C, Koberstein J T, Yilgor I, et al. Macromolecules, 1993, 26 : 3069.
- [31] Lenk T J, Lee D H T, Koberstein J T. Langmuir, 1994, 10 : 1857.
- [32] Hu W, Koberstein J T, Lingelser J P. Macromolecules, 1995, 28 : 5209.
- [33] Fleischer C A, Morales A R, Koberstein J T. Macromolecules, 1994, 27 : 379.
- [34] Schaub T F, Kellogg G J, Mayes A M. Macromolecules, 1996, 29 : 3982.
- [35] Zhao W, Rafailovich M H, Sokolov J. Phys Rev Lett, 1993, 70(10) : 1453.
- [36] Martin J I, Wang Z-G. Langmuir, 1996, 12 : 4950.
- [37] Pan Q, Winey K I, Hu H H, et al. Langmuir, 1997, 13 : 1758.
- [38] Yuan C, Ouyang M, Koberstein J T. Macromolecules, 1999, 32(7) : 2329.

The Wetting and Dewetting Properties of Polymer Thin Films on Substrates

YUAN Cai-gen, CHEN Ya, HU Chun-pu

(*Institute of Material Science and Engineering, East China University
of Science and Technology, Shanghai 200237, China*)

Abstract: The key parameters which control the wetting and dewetting properties of polymer thin films on substrates are Hamaker constant(A) and spreading coefficient(S). If the polymer

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

(下转第 47 页)

- [29] 苏正涛, 潘大海, 郑俊萍, 等. 合成橡胶工业, 1998, 21(2) : 96.
- [30] 苏正涛. 橡胶工业, 1999, 46(1) : 32.
- [31] Hartmann W, Mangold H, Kerner D·DE 4 235 996, 1994.
- [32] Nielsen J M· J Polym Sci:Symposium, 1973(40) :189.
- [33] 美国 AD 报告, AD74447769.
- [34] 周重光, 贝小来, 周长忍. 高分子学报, 1991(1) :26.
- [35] 周重光, 贝小来, 周长忍, 等. 合成橡胶工业, 1990, 13(1) :17.
- [36] 冯圣玉, 于淑歧, 陈剑华. 合成橡胶工业, 1987, 10(1) :32.
- [37] 冯圣玉, 于淑歧, 李吉海, 等. 合成橡胶工业, 1990, 13(6) :426.

Progress in the Research of the Thermal Stability of Polysiloxanes

FU Shan-ju, HAN Zhe-wen, WU Ping-ping

(*Department of Polymer Science & Engineering, East China University
of Science & Technology, Shanghai 200237, China*)

Abstract:The mechanisms of thermal aging, the facts that decrease the thermal stability and how to enhance the thermal stability of polysiloxanes are reviewed. Thermal depolymerization and thermo-oxidative degradation are the main reactions during the thermal aging of polysiloxanes. Accordingly, the thermal stability of polysiloxanes may be influenced by oxide, water, alcohol, acid, base, residual catalyst, silicone oil, mechanical stress, filler or the end groups of itself. Changing the structure of polysiloxane and adding antioxidants or stabilizers can improve the thermal stability of polysiloxanes.

Key words:Polysiloxanes; Thermal aging; Thermal stability

(上接第 39 页)

films are formed on non-wettable substrates, they should exist in a metastable state. In this case, when the films are annealed at temperature above their glass transition temperature, dewetting will take place. The dewetting velocity is mainly determined by the surface tension, viscosity of polymer melt and the equilibrium contact angle of polymer droplet on the substrate. For the systems of polymer films on non-wettable substrates, the dewetting dynamics of polymer films will be obviously changed and the films can become stable under special conditions like adding end functional polymer to the system. In this paper, the wetting and dewetting properties of polymer thin films on substrates are reviewed.

Key words:Polymer thin film; Wetting and dewetting; Physical chemistry of polymer surface