

水溶性超支化光敏有机硅聚氨酯丙烯酸酯 光固化膜的性能研究

孙芳 李国甯 刘晓康 杜洪光

(北京化工大学理学院 北京 100029)

摘要 合成了3种水溶性超支化光敏有机硅聚氨酯丙烯酸酯(WHBPSUA),详细研究了体系组成对其光固化膜的吸水率、硬度、体积收缩率、拉伸强度、拉伸率、耐热性能以及附着力的影响。研究发现:体系的吸水率随着低聚物支化度和体系交联度增加而下降,随低聚物含量的增加而增加;体积收缩率随着低聚物的含量以及单体官能度的增大而升高,且所研究体系的体积收缩率均<7%;加入高支化度的低聚物和多官能度的单体有助于提高固化膜的拉伸强度;固化膜的耐热性随着单体官能度的增大而增强;所研究体系在无机玻璃上有优异的附着力。

关键字 光固化,水溶性,超支化,有机硅,阻焊油墨

中图分类号 TQ5724.4, TQ630.1, TQ323

近年来,超支化光固化低聚物由于其低粘度、高反应活性和极易功能化的优点,在液态光致成像型油墨领域得到广泛应用^[1-6]。液态光致成像型油墨(又称阻焊油墨)是印制电路板制作过程中的重要组成部分。为了适应环保需要,在印制电路板制作工艺中,目前阻焊油墨的显影工艺已由有机溶剂显影工艺发展到水显影^[7];无铅焊接技术代替了有铅焊接,这要求阻焊油墨必须能耐受更高的温度;同时,挠性印制电路板(FPC)的广泛需求对阻焊油墨的耐挠曲性提出了更高的要求^[8]。因此,研究开发耐高温挠性水显影型阻焊油墨成为目前研究的方向。

Anila等^[9]合成了一种水溶性的超支化聚酯,其具有低粘度和良好的水溶性,且与丙烯酸酯类单体有很好的相容性,在水性光固化涂料领域拥有广阔的发展前景。Chen等^[10]合成了一种新型水性UV固化聚氨酯丙烯酸酯,研究了双键含量差异对涂膜硬度、耐丙酮性能、拉伸性能和热稳定性的影响,研究发现此种聚氨酯丙烯酸酯水分散体具有优异的耐热和拉伸性能。Fenfen等^[11]研究了用于紫外光固化涂料的超支化聚氨酯丙烯酸酯的合成及性质,当其与环氧树脂和活性单体以适当比例混用时,体系光固化膜具有很高的拉伸强度、断裂伸长率。

有机硅具有突出的耐高温、耐候、电气绝缘性能及柔性分子链^[12-15],将其用于阻焊油墨,能够赋

予阻焊油墨更高的柔韧性、焊接耐热性、电气可靠性。文献[16]、[17]研究了碱溶性直链型和超支化型光敏有机硅聚氨酯丙烯酸酯低聚物及其固化膜的相关性能,以其为主体树脂的光固化体系有良好的碱溶性和光聚合性能,且其固化膜具有较好的柔韧性和耐高温性。但是由于碱水显影体系仍存在着环境污染,所以本课题组在以前的工作基础上进一步改进,将超支化有机硅体系中引入水溶性基团,使其兼备有机硅和超支化低聚物特性的同时,能够实现水显影。本文设计合成了支化度分别为6,12和24的3种水溶性超支化光敏有机硅聚氨酯丙烯酸酯(WHBPSUA),以期用于阻焊油墨。详细研究了3种低聚物体系组成对其光固化膜的吸水率、硬度、体积收缩率、拉伸强度、拉伸率、耐热性能以及附着力的影响。以期为其实际应用提供理论依据和参考。

1 实验材料和方法

1.1 药品与仪器

丙烯酸 β -羟乙酯(HEA),丙烯酸异冰片酯(IBOA),1,6-己二醇二丙烯酸(HDDA),二缩丙二醇双丙烯酸酯(DPGDA),2-羟基-2-甲基-1-苯基丙酮(1173),三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA),长兴公司;光引发剂2-羟基-1-甲基苯基-丙-酮(DC1173),聚氨酯丙烯酸酯(OAK-27),Ciba公

国家自然科学基金(50873011)资助

第一作者:孙芳,女,1969年12月出生,2001年于北京化工大学获博士学位,主要从事光固化功能材料研究,副教授

E-mail: sunfang60@yeah.net

收稿日期:初稿 2012-09-27,修回 2012-11-27

司; 上述原料均为化学纯。3 种水溶性超支化光敏有机硅树脂 (WHBPSUA), 自制, 其结构见图 1。

TG209C 热失重分析仪, 德国 Netzsch 公司; 铅笔硬度计, 天津第二材料试验机厂; HY-909 厚

度计, 天津科泰科技有限公司; Model 1185 万能材料试验机, 美国 Instron 公司; 高压汞灯, 1000 W, $I=10 \text{ mW/cm}^2$ 。

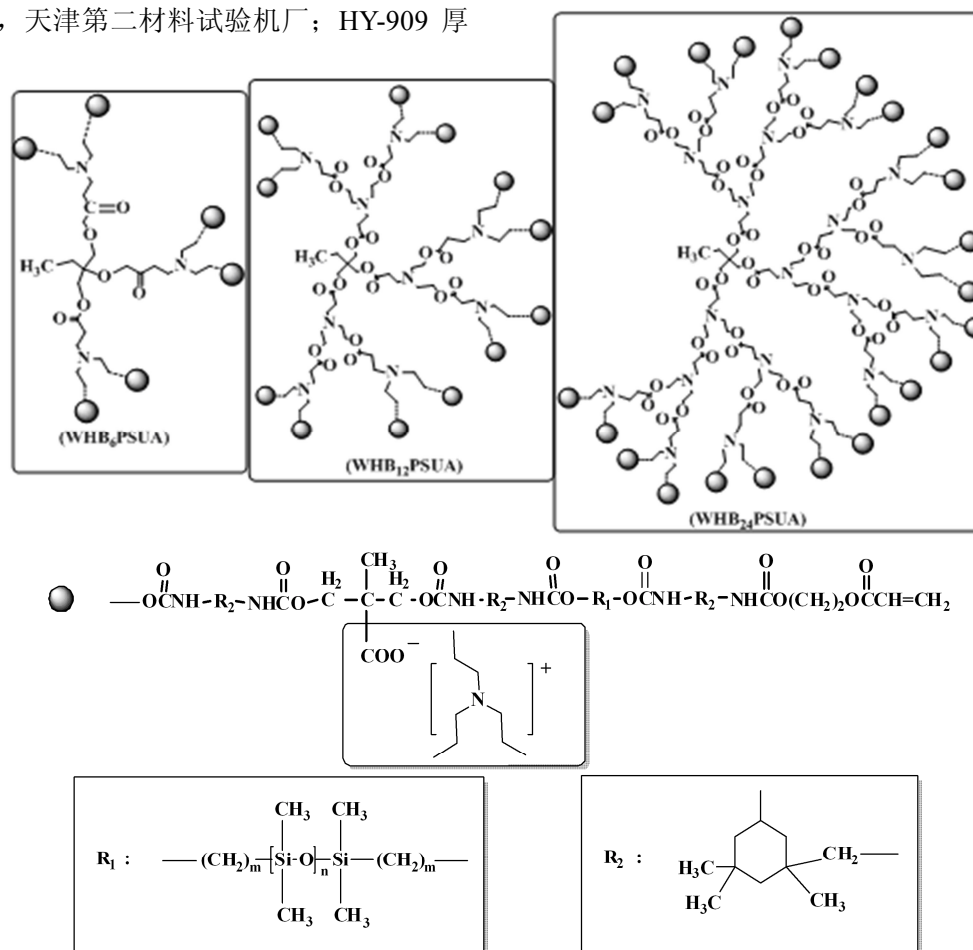


Fig.1 Structure of WHBPSUA

1.2 实验方法

1.2.1 固化膜的制备 将低聚物 WHBPSUA 与不同活性单体及光引发剂 1173 以一定的质量比进行混合, 搅拌均匀后涂布于涤纶片基上, 厚度为 $100 \mu\text{m}$, 在 1000 W 的高压汞灯下曝光 30 s , 受光面积为 $1.5 \text{ cm} \times 7.0 \text{ cm}$, 光强为 10 mW/cm^2 , 使其完全固化成膜, 用于性能测试。

1.2.2 吸水率的测定 将干燥的固化膜称重, 放于 25°C 的去离子水中浸泡 24 h , 取出后擦干表面的水分, 称重。吸水率用下式计算:

$$\text{吸水率} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100\%$$

式中, W_1 为浸泡后的样品质量 (g); W_0 为浸泡前的样品质量 (g)

1.2.3 凝胶率的测定 称取一定质量 (m) 固化膜, 精确至 0.0001 g 。将其放入自制的小袋, 称量袋子

的质量 (M_1)。将袋子放于索氏提取器中用乙醇连续提取 24 h 后, 取出袋子, 烘干至恒重, 记录袋子的质量 (M_2)。

$$\text{交联率} = \left(1 - \frac{M_1 - M_2}{m}\right) \times 100\%$$

式中, M_1 为固化膜萃取前样品与袋子的总质量 (g); M_2 为固化膜萃取后, 干燥至恒重后样品与袋子的总质量 (g); m 为装入袋子的固化膜的质量 (g)。

1.2.4 体积收缩率 采用密度法, 具体操作见参考文献[18]

1.2.5 附着力 依据 GB1720-79《漆膜附着力测定法》对紫外光固化膜在无机玻璃上的附着力进行测定。

2 结果和讨论

2.1 固化膜的吸水率

光固化材料在使用过程中与空气接触, 若吸收空气中的水分, 将影响材料的光学性能和机械性能。

本文考察了低聚物化学结构、单体种类及用量对水溶性光敏超支化有机硅聚氨酯丙烯酸酯低聚物 (WHBPSUA) 光聚合体系固化膜的吸水率的影响, 见表 1。

Table 1 Water absorption of cured films in different systems

No.	Composition of system (mass fraction)	Crosslinking yield / %	Water absorption / %
1	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=20:80	99.2	0.9
2	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=30:70	98.2	5.0
3	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=50:50	98.1	12.5
4	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=70:30	97.7	27.6
5	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=80:20	97.2	27.1
6	WHB ₁₂ PSUA:HEA=50:50	94.7	23.2
7	WHB ₁₂ PSUA:IBOA=50:50	91.2	11.4
8	WHB ₁₂ PSUA:HDDA=50:50	98.5	4.2
9	WHB ₁₂ PSUA:TMPTA=50:50	99.1	4.5
10	WHB ₆ PSUA:HDDA=50:50	97.9	4.5
11	WHB ₂₄ PSUA:HDDA=50:50	98.7	5.1

Note: 1173 was used as photo-initiator and its weight concentration was 0.1%.

从表 1 中发现, 体系 1—5 随着低聚物用量的增加, 吸水率均增大。这是因为随着 WHBPSUA 低聚物的增加, 体系中的亲水基团羧酸铵盐量随之增加的缘故。另外, 随着体系中活性稀释剂的官能度的提高, 体系的交联度增大, 体系的固化膜的吸水率随之变小 (如体系 6—9)。低聚物 WHBPSUA 与单体 HEA 所组成的光聚合体系, 吸水率>20%, 这因为其固化体系交联密度较低, 且 HEA 分子自身含有亲水基团羟基的缘故。体系 8、10 和 11 数据显示低聚物 WHBPSUA 支化度对固化膜吸水性影响不大。

2.2 固化膜的体积收缩率

光固化材料在实际应用过程中, 体积收缩是一个需要关注的问题, 材料固化后发生形变, 直接影响其使用性能, 故固化体系体积收缩越小越好, 通常要求在 8% 以下。

表 2 为不同体系的体积收缩率。由表 2 可知, 随着低聚物在光聚合体系中含量的增加, 光聚合体系固化膜的体积收缩率逐渐增大 (见体系 1—5)。这是由于 WHBPSUA 末端支链比较长, 在此前提下, 分子内自由体积随着低聚物加入量的增大而不断积累, 使得紫外光固化膜的体积收缩率增大。由表 2 中的体系 6—9 可见, 随着活性稀释剂的官能度不断增大, 体系固化膜的体积收缩率也逐渐变大,

原因是活性稀释剂的官能度不断增大, 导致其固化中自由体积不断的增大, 进而使体积收缩率增大。WHBPSUA 低聚物光聚合体系固化膜的体积收缩率均<7%, 符合使用要求。

Table 2 Volume shrinkage of WHBPSUA systems

No.	Composition of system (mass fraction)	Volume shrinkage / %
1	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=20:80	3.0
2	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=30:70	3.5
3	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=50:50	4.3
4	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=70:30	4.7
5	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=80:20	6.5
6	WHB ₁₂ PSUA:HEA=50:50	4.2
7	WHB ₁₂ PSUA:IBOA=50:50	3.9
8	WHB ₁₂ PSUA:HDDA=50:50	4.2
9	WHB ₁₂ PSUA:TMPTA=50:50	5.2
10	WHB ₆ PSUA:HDDA=50:50	4.4
11	WHB ₂₄ PSUA:HDDA=50:50	4.1

Note: 1173 was used as photo-initiator and its weight concentration was 0.1%.

2.3 固化膜的硬度

表 3 为测得不同体系的铅笔硬度。从表 3 可以发现,体系 1—5 中随着低聚物含量的增加,硬度变化不大,但当低聚物在体系中含量>70% 时,硬度迅速下降。这是因为当低聚物>70% 时,体系的相容性较差,双键反应不完全,交联度有所下降,固化膜的硬度偏低。此外,低聚物中有机硅链段有上

浮趋势,表面过多的有机硅柔性链段也可能导致固化膜硬度下降。体系 6—9 研究了不同官能度活性稀释剂对体系固化膜硬度的影响,多官能度的活性稀释剂体系由于其交联度较大使其固化膜的硬度均较大,最高可达 6H 以上。从体系 8、10 和 11 的数据可以发现不同支化度的低聚物体系光固化膜的硬度均达到 6H。

Table 3 Hardness of cured films in WHBPSUA systems

No.	Composition of system (mass fraction)	Crosslinking yield / %	Hardness
1	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=20:80	99.2	>6H
2	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=30:70	98.2	5H
3	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=50:50	98.1	5H
4	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=70:30	97.7	3H
5	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=80:20	97.2	3B
6	WHB ₁₂ PSUA:HEA=50:50	94.7	4B
7	WHB ₁₂ PSUA:IBOA=50:50	91.2	<6B
8	WHB ₁₂ PSUA:HDDA=50:50	98.5	6H
9	WHB ₁₂ PSUA:TMPTA=50:50	99.1	>6H
10	WHB ₆ PSUA:HDDA=50:50	97.9	6H
11	WHB ₂₄ PSUA:HDDA=50:50	98.7	6H

Note: 1173 was used as photo-initiator and its weight concentration was 0.1%.

2.4 固化膜的附着力

光固化材料与基材之间互相黏结的能力被称为附着力。光固化材料通常通过机械结合力、物理吸附、氢键及化学键和相互扩散等作用与基材黏附在一起。

不同体系的光固化膜在无机玻璃上的附着力数据如表 4 所示。从表 4 中可以发现,所有体系均具有较好的附着力。这是由于在只有物理吸附作用体系中,润湿作用决定了附着力的差异,良好的润湿性带来优异的附着力性能,而 WHBPSUA 低聚物的黏度较小,使得体系的润湿作用良好。另一方面由于低聚物本身含有 Si-O 键,与玻璃基材形成很强的分子间作用力,两方面共同作用增强了其附着力。HEA 体系的附着力相对稍差,是因为 HEA 体系交联密度低,相对分子量稍偏小,与基材分子的分子间作用力也会偏小,使得附着力降低。

Table 4 Adhesion power of WHBPSUA systems

No.	Composition of system (mass fraction)	Adhesive power
1	WHB ₁₂ PSUA:HEA:1173=50:50:0.1	Grade 1
2	WHB ₁₂ PSUA:IBOA:1173=50:50:0.1	Grade 0
3	WHB ₁₂ PSUA:HDDA:1173=50:50:0.1	Grade 0
4	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA:1173=50:50:0.1	Grade 0
5	WHB ₁₂ PSUA:TMPTA:1173=50:50:0.1	Grade 0
6	WHB ₆ PSUA:DPGDA:1173=50:50:0.1	Grade 0
7	WHB ₂₄ PSUA:DPGDA:1173=50:50:0.1	Grade 0

2.5 固化膜的拉伸性能

拉伸强度和拉伸率是考察一种高分子材料应用性的重要指标。本文研究了不同低聚物 and 不同单体对固化膜拉伸性能的影响,结果见表 5。

Table 5 Tensile strength and elongation values of cured films in different monomers systems

No.	Composition of system (mass fraction)	Tensile strength / MPa	Elongation / %	Crosslinking yield / %
1	WHB ₁₂ PSUA:IBOA=70:30	12.805	90.147	94.7
2	WHB ₁₂ PSUA:HDDA=70:30	40.080	7.054	98.5
3	WHB ₁₂ PSUA:DPGDA=70:30	41.615	15.294	98.1
4	WHB ₁₂ PSUA:TMPTA=70:30	81.859	2.952	99.1
5	WHB ₆ PSUA:DPGDA=70:30	45.494	13.883	97.1
6	WHB ₂₄ PSUA:DPGDA=70:30	44.150	17.644	97.8
7	OAK-27:IBOA=70:30	16.330	10.100	-
8	OAK-27:DPGDA=70:30	17.940	21.690	-

Note: 1173 was used as photo-initiator and its weight concentration was 0.1%.

表 5 显示, 体系 1—4 随着单体官能度的增加, 其固化膜的拉伸强度随之增高, 而断裂伸长率随之急剧降低。低聚物 WHBPSUA 的支化度越高, 其断裂伸长率越大, 而其拉伸强度却有下降的趋势, 如体系 3、5 和 6 所示。这是因为支化度越高, 分子中有机硅链比例越大, 有机硅链具有很好的柔韧性, 使得伸长率变大。所研究的体系 1—6 与商业化挠性树脂 OAK-27 体系相比, 与 IBOA 组成体系相比, 超支化有机硅体系具有更高的拉伸率, 而两者的拉伸强度相差不大; 在 DPGDA 体系, 超支化有机硅体系拉伸强度明显高于 OAK-27 树脂, 而拉伸率略低于 OAK-27 树脂。综合来看, 超支化有机硅体系的拉伸强度和断裂伸长率优于 OAK-27 体系。

2.6 固化膜的热重分析

热重分析 (TGA) 是一种考察材料热稳定性的重要方法。图 2 是低聚物 WHBPSUA 与不同单体 (HEA、IBOA、HDDA、DPGDA 和 TMPTA) 所组成的光聚合体系热重分析曲线图。

从图 2 中可发现, 在 300℃ 下, 随着活性单体官能度的变大, 体系固化膜的热失重率变小, 表明体系的热稳定性逐渐增大, 主要原因是随着官能度的变大, 固化膜的交联密度也变大, 较高的交联密度增加了固化膜的热稳定性。其中 IBOA 体系在 300℃ 时就开始失重 50%, 然后出现一个平台, 在 400℃ 开始第二次失重。300℃ 时的第一阶段失重, 可能是六元环分解为更稳定的直链结构所致。温度继续升高, TG 的曲线下降平缓, 直至 400℃ 时分子链继续分解, 出现第二次失重。

图 3 为不同结构低聚物所组成的体系热重分析曲线图, 表 6 是不同结构低聚物体系固化膜在 300℃ 下失重百分率。

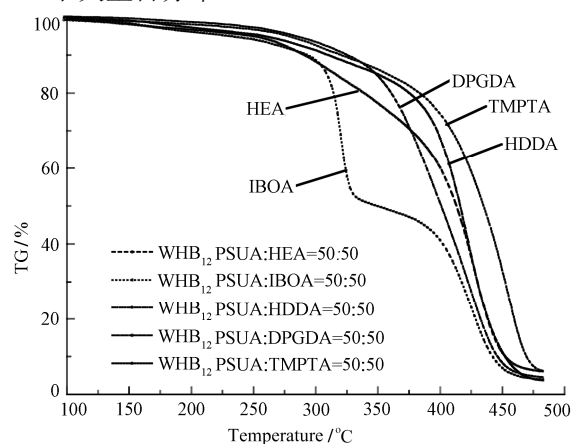


Fig.2 TGA curves of WHB₁₂PSUA systems in nitrogen environment (heating rate, 10°C/min)

Note: 1173 was used as photo-initiator and its weight concentration was 0.1%

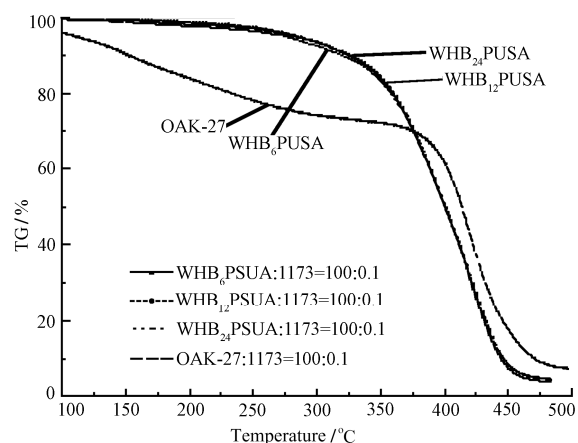


Fig.3 Effect of different structure oligomers on TGA curves in nitrogen environment (Heating Rate, 10°C/min)

Table 6 Percentage of thermal weight loss of WHBPSUA system at 300℃

Composition of system (mass fraction)	Mass loss, 300℃/%
WHB ₆ PSUA : DPGDA:1173=50:50:0.1	6.77
WHB ₁₂ PSUA : DPGDA:1173=50:50:0.1	6.65
WHB ₂₄ PSUA : DPGDA:1173=50:50:0.1	6.56
OAK-27 : DPGDA:1173=50:50:0.1	25.76

Note: 1173 was used as photo-initiator and its weight concentration was 0.1%.

从图 3 和表 6 中可以发现, WHB₆PSUA、WHB₁₂PSUA、WHB₂₄PSUA 体系都比 OAK-27 体系耐热性好, 在 300℃ 下低聚物 WHBPSUA 最大的失重百分率为 6.77%, 而 OAK-27 树脂为 25.76%, 这也是超支化有机硅材料耐热性能的重要体现。

3 结论

WHBPSUA 体系随低聚物含量增加以及单体官能度降低, 体系吸水率增大; 各体系的体积收缩率均<7%, 满足使用要求; 低聚物的支化度增大、单体的含量及官能度增加, 光固化膜的硬度和拉伸强度都随之增大, 而断裂伸长率随之降低, 光固化膜硬度最高可达 6 H; 随着活性单体的官能度的变大, 耐热性增强, 体系固化膜在 300℃ 下失重率变小, 均小于国外商品化的挠性树脂 OAK-27。

参考文献

- Mansfield M L. Molecular weight distributions of imperfect dendrimers [J]. *Macromolecules*. 1993, **26**(15): 3811-3814
- Ema Zagar, Majda Zigon. Characterization of a commercial hyperbranched aliphatic polyester based on 2, 2-bis (methylol)propionic acid [J]. *Macromolecules*. 2002, **35**(27): 9913-9925
- Ema Zagar, Majda Zigon. Aliphatic hyperbranched polyesters based on 2, 2-bis (methylol) propionic acid-Determination of structure, solution and bulk properties [J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, **36**(1): 53-88
- Tanis I, Karatasos K. Local dynamics and hydrogen bonding in hyperbranched aliphatic polyesters [J]. *Macromolecules*. 2009, **42**(24): 9581-9591
- HAN Wensong, LIN Baoping, ZHOU Yidan, *et al.* Synthesis and properties of UV-curable hyperbranched polyurethane acrylate oligomers containing photoinitiator [J]. *Polymer Bulletin*, 2012, **68**(3): 729-743
- Enis S Dzunuzovic, Srba V Tasic, Branislav R Bozic, *et al.* Mechanical and thermal properties of UV cured mixtures of linear and hyperbranched urethane acrylates [J]. *Progress in organic coatings*, 2012, **74**(1): 158-164
- 白湘云, 刘磊, 金养智. 紫外线固化水性聚氨酯丙烯酸树脂的研究[J]. *影像技术*, 2000, **3**(3): 33-36
- BAI Xiangyun, LIU Lei, JIN Yangzhi. A study on UV-curable water-soluble polyurethane acrylic resins [J]. *Imaging technology*, 2000, **3**(3): 33-36
- SUN Fang, JIANG Shengling. Study on properties of a novel photosensitive polysiloxane urethane acrylate for solder mask [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, **116**(5): 3035- 3039
- Anila Asif, SHI Wenfang. Synthesis and properties of UV curable waterborne hyperbranched aliphatic polyester [J]. *European Polymer Journal*, 2003. **39**(5): 933-938
- CHEN Yanbai, ZHANG Xingyuan, DAI Jiabing, *et al.* A new UV curable waterborne polyurethane: Effect of C=C content on the film properties [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2006, **55**(3): 291-295
- BAO Fenfen, SHI Wenfang. Synthesis and properties of hyperbranched polyurethane acrylate used for UV curing coatings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2010, **68**(4): 334-339
- SUN F, JIANG S L. Synthesis and characterization of photosensitive polysiloxane [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2007, **254**(1): 125-130
- SUN F, JIANG S L, LIU J. Study on cationic photopolymerization reaction of epoxy polysiloxane [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2007, **264**(2): 318-322
- Frank Baucer, Hans-Jurgen Glasel, Ulrich Decker, *et al.* Trialkoxysilane grafting onto nanoparticles for the preparation of clear coat polyacrylate systems with excellent scratch performance [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2003, **47**(2): 147-153
- SUNG Pohou, YANG Chien. Polysiloxane modified epoxy polymer network-II: Dynamic mechanical behavior of multicomponent graft-IPNs (epoxy/polysiloxane/polypropylene glycol) [J]. *European Polymer Journal*, 1997, **33**(3): 231-233
- 孙芳, 张南, 江盛玲, 等. 碱溶性光敏有机硅聚氨酯丙烯酸酯光固化膜的性能研究 [J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2011, **29**(3): 149-153
- SUN Fang, ZHANG Nan, JIANG Shengling, *et al.* Study

- on properties of UV-curable films based on alkali-soluble photosensitive polysiloxane urethane acrylate oligomer [J]. *J Radiat Res Radiat Process*, 2011, **29**(3): 149-153
- 17 SUN Fang, LIU Xiaokang, ZHANG Lu, *et al.* Synthesis and characterization of alkali-Soluble hyperbranched photosensitive polysiloxane urethane acrylate [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2012, **51**(1): 240-247
- 18 孙芳, 黄跃东, 熊军. 粘接塑料和玻璃用的新型紫外光固化胶粘剂的性能[J]. *北京化工大学学报*, 2006, **33**(5): 83-85
- SUN Fang, HUANG Yuedong, XIONG Jun. Property of UV-curing adhesive for plastic-glass [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2006, **33**(5): 83-85

Study on properties of UV-curable films based on water-soluble hyperbranched photosensitive polysiloxane urethane acrylate oligomer

SUN Fang LI Guonai LIU Xiaokang DU Hongguang

(College of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

ABSTRACT The effect of system composition of the water-soluble hyperbranched photosensitive polysiloxane urethane acrylate (WHBPSUA) with three degrees of branching on physical and mechanical properties of WHBPSUA curable films including water resistance, volume shrinkage, hardness, adhesion, tensile strength, elongation and heat resistance, was investigated in this paper. The results showed that the water absorption of the WHBPSUA decreased with increasing the degree of branching of the oligomer, the content of monomer and crosslinking yield. The volume shrinkage of the WHBPSUA systems increased with increment of WHBPSUA concentration and monomer functionality, while the volume shrinkage of investigated WHBPSUA was lower than 7%. The oligomer with a high degree of branching and multi-functional monomer could improve hardness and tensile strength of the WHBPSUA. When functionality of reactive monomer increased, the heat resistance of the WHBPSUA could be enhanced. The WHBPSUA possesses excellent adhesion on the inorganic glass.

KEYWORDS Photocurable, Water-soluble, Polysiloxane, Hyperbranched, Solder-resist ink

CLC TQ5724.4, TQ630.1, TQ323