

## 高击穿电压聚氨酯漆包线的制备及性能

冯忠泰<sup>1</sup>, 焦晓光<sup>2</sup>, 李成杰<sup>1</sup>, 黄桂明<sup>1</sup>, 王群<sup>1</sup>, 矫庆泽<sup>2,3</sup>, 冯彩虹<sup>2</sup>, 赵芸<sup>2</sup>

(1.珠海睿胜超微线材有限公司, 广东 珠海 519000; 2.北京理工大学 化学与化工学院, 北京 100081;

3.北京理工大学 珠海学院, 广东 珠海 519085)

**摘要:**采用1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇对异佛尔酮二异氰酸酯三聚体的1个异氰酸酯基进行封端,将封端后的三聚体替代部分异佛尔酮二异氰酸酯与全氟聚醚二元醇反应,合成了不同三聚体含量的支链型含氟聚氨酯。然后将支链型含氟聚氨酯配置成漆包线漆,通过高速漆包线机将其制备成漆包线。分别采用红外光谱、热重分析仪、万能试验机和接触角测试仪等对所制备的支链型含氟聚氨酯结构、热稳定性、力学性能以及疏水性进行测试;采用电压试验仪、单向刮漆试验仪、软化击穿试验仪及焊锡试验仪等对漆包线的击穿电压、力学性能、热性能和直焊性进行测试,探究了封端三聚体含量对聚合物结构、性能以及漆包线性能的影响。结果表明,封端三聚体占比30%(摩尔分数)的支链型含氟聚氨酯的拉伸强度可达30.50 MPa、断裂伸长率为952%、初始分解温度提高至216.6 °C、接触角增大至96.1°,相较于普通的聚氨酯均有大幅提高;相应漆包线的击穿电压高达7033.8 V,而封端三聚体占比10%的支链型含氟聚氨酯漆包线的击穿电压最高,达到了7513.4 V,是普通聚氨酯漆包线(4719.8 V)的1.6倍。同时,力学性能、热性能和直焊性均满足聚氨酯漆包线的使用要求。

**关键词:**支链含氟聚氨酯; 击穿电压; 漆包线

**中图分类号:**

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7555(2022)11-000

聚氨酯漆包线因具有的直焊性、易染色、耐水解和耐高频等性能被广泛应用在家电、5G通讯、继电器、电子仪表等方面<sup>[1,2]</sup>。随着智能家居和5G通讯时代的到来,变频器、变频电机、变频空调洗衣机等电器设备的出现不仅推动了变频电机交流调试技术的进步,对其核心原件——漆包线也提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。由于变频电机供电电源的脉冲频率较高,脉冲上升沿陡峭,脉冲极性呈周期性正负交变特性<sup>[4]</sup>。因此,变频电机在运行的过程中需要不断地承受双极性的高频脉冲电压的冲击,从而使得变频电机的漆包绕组匝间会产生局部放电的现象。同时,电机内部漆包线组安装的空间十分狭窄,当激烈的电磁场产生电流时就会使得狭隘的空间里面的温度陡升,高温环境的产生使得漆包线被击穿的概率也在提高<sup>[5]</sup>。针对高压脉冲引起的电老化的影响,有必要开发出一种能抗高压击穿的漆包线,使其能在极端工况下延长使用寿命。

针对漆包线存在击穿电压不足的问题,国内外对其进行了探索和研究。Pfeifer等<sup>[6]</sup>将烷氧基硅烷基胺与均苯四甲酸酐反应,然后通过工业涂层设备将不同的前驱体应用于细铜线的涂层,制备的漆包线具有较高的机械和热性能,击穿电压远超过200 V/ $\mu\text{m}$ 。Morikawa等<sup>[7]</sup>使用溶胶-凝胶工艺,将TEOS水解后在聚酰胺酸漆中缩聚制备了聚酰亚胺-二氧化硅混合绝缘层的耐热漆包线,漆包线在300 °C或400 °C热老化后表现出比无二氧化硅漆包线更高的击穿电压。Kim等<sup>[8]</sup>使用声化学方法二氧化硅纳米粒子进行表面改性,将其溶解在稀释剂中后分散在聚酯清漆中并制备了漆包线,与商用聚酯漆包线相比,漆包线在耐热性和介电击穿强度方面均有所增强。国内专利报道通过赛克改性、添加无机氧化物颗粒等方法可提高漆包线的击穿电压<sup>[9-11]</sup>。虽然已有部分研究对提高漆包线的击穿电压进行探索,但是,针对聚氨酯基漆包线提高击穿电压的方

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0249

收稿日期:2022-03-17

基金项目:珠海市产业核心和关键技术攻关方向项目(ZH01084702180005HJL)

通讯联系人:冯忠泰,主要从事微细漆包线研发,E-mail: fengzhongtai@ronsen.com.cn;

赵芸,主要从事高分子材料合成及应用研究,E-mail: zhaoyun@bit.edu.cn

法还鲜有报道,通过分子结构设计的思路从基体树脂结构角度提高聚氨酯漆包线击穿电压的方法还未见报道。

研究表明,含氟聚合物具有优异的表面性能、热稳定性和化学稳定性<sup>[12,13]</sup>。本文通过将耐热性高、绝缘性好的含氟基团以共价键合方式引入到异氰酸酯三聚体上,然后替代部分二异氰酸酯与全氟聚醚二元醇合成支链型含氟聚氨酯,随着含氟基团的引入增大分子间的键能,使聚合物的耐热性提高,耐电压强度增大;同时,异氰酸酯三聚体形成部分交联结构,提高了聚合物的耐热性和击穿电压。两者协同作用,延长了漆包线在高击穿电压下的使用寿命。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

全氟聚醚二元醇( $M_n=902$ ):工业级,Solvay S. A.;聚丙二醇(PPG): $M_n=400$ ,分析纯,麦克林试剂有限公司;异佛尔酮二异氰酸酯三聚体:分析纯,拜耳;异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)、1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇、二月桂酸二丁基锡、1,4-丁二醇(BDO)、二丁胺及溴甲酚绿溶液指示剂:分析纯,麦克林试剂有限公司;二甲苯、甲酚、苯酚:分析纯,北京市通广精细化工公司。

### 1.2 树脂合成

将 IPDI 三聚体(6.6017 g, 0.0099 mol)和 1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇(45.9478 g, 0.0099 mol)加入配有机机械搅拌器、温度计、氮气导管和冷凝管的四口烧瓶中,再加入适量二甲苯做溶剂,滴加质量分数 0.2% 二月桂酸二丁基锡,混合物在 80 °C 搅拌下进行反应。反应 3 h 后,加入异佛尔酮二异氰酸酯(19.8051 g, 0.0891 mol),滴加全氟聚醚二元醇(90.2 g, 0.1 mol),继续搅拌反应。反应直至—NCO 含量达到理论值(通过二正丁胺法测定)。最后,冷却至室温得到支链型含氟聚氨酯(B-FPU)溶液,将其记为 B-FPU1(IPDI 三聚体占异氰酸酯总量的 10%(摩尔分数))。通过改变 1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇封端 IPDI 三聚体在异氰酸酯中的比例,制得与 B-FPU1 基团比  $r$  相同,IPDI 三聚体在异氰酸酯中的摩尔分数分别为 20% 和 30% 的 B-FPU2 与 B-FPU3。

将 PPG(40 g, 0.1 mol)和 IPDI(52.4802 g, 0.2360 mol)加入具有机械搅拌器、温度计、氮气导管和冷凝管的四口烧瓶中,再加入适量二甲苯做溶剂,滴加质量分数 0.2% 二月桂酸二丁基锡,将混合物在

80 °C 搅拌进行反应。3 h 后在滴加 BDO(12.4802 g, 0.1384 mol)继续搅拌。反应直至—NCO 含量达到理论值(通过二正丁胺法测定)。最后,将反应液冷却至室温得到直链型不含氟聚氨酯 PU 作为对照样。

### 1.3 聚合物膜的制备

将适量的支链型含氟聚氨酯与二甲苯和甲酚混合,使用超声波清洗器超声 30 min,然后将其平铺于聚四氟乙烯板上,室温下自然干燥 24 h 后放入鼓风干燥箱 60 °C 干燥 6 h,最后放入真空烘箱 60 °C 干燥 6 h,再置于干燥器中备用。聚合物的膜厚为(0.3±0.1) mm。

### 1.4 漆包线漆及漆包线的制备

将 B-FPU1, B-FPU2 及 B-FPU3 在二甲苯与甲酚的混合溶液中混合,通过机械搅拌高速搅拌 30 min 得到固含量为 15% 的漆液。采用高速智能拉包联合漆包线全自动生产线,试生产聚氨酯漆包线,导体为 0.30 mm 铜线。漆包线的制造流程为拉丝→包漆,其中包漆工艺流程为放线→退火→涂漆→烘培→涂漆→烘培→收线→检验→成品收线。铜线在漆包机中经历 2 次涂漆与烘焙,分别对应底漆和面漆的涂覆与烘焙。其中,底漆采用工业普通聚氨酯底漆,面漆即为实验室自制支链型含氟聚氨酯漆液。通过螺旋测微仪测得漆膜总厚度稳定为 0.03 mm。

### 1.5 测试与表征

**1.5.1 反应的游离状态下的—NCO 测定:**通过二丁胺-丙酮滴定法测定<sup>[14]</sup>。

**1.5.2 聚合物结构表征及性能测试:**采用傅里叶变换红外光谱仪((FT-IR), Spectrum one 型,美国 PerkinElmer 公司)分析树脂的结构,波数范围为 450~4000  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为 32 次;采用热重分析仪((TGA), TGA7 型,美国 PerkinElmer 公司)进行聚合物热稳定性分析,在氮气气氛下,升温速率为 10 °C/min,测试温度范围为室温至 800 °C;采用接触角测试仪(CAST3 型,上海梭伦信息科技有限公司)测量样品与去离子水之间的接触角;采用台式电子精密万能试验机(AGS-J 型,日本岛津公司)测量样品的拉伸强度及断裂伸长率:将干燥后的聚合物膜裁剪成长 40 mm、宽 10 mm 的形状,然后在样品的中心位置分别取 3 个点测其厚度后取平均值,本实验设定的拉伸速度为室温下 100 mm/min,试验机拉伸力为 500 N,每个样品测试 5 次,除去最大值及最小值后取平均值。

**1.5.3 漆包线的击穿电压测试:**根据 GB/T 4074.5-2008,

采用电压试验仪(QDS-15KV型,湘鸿仪器机械有限公司)进行漆包线的击穿电压测试。每组漆包线测试5个样品,取平均值。

**1.5.4 漆包线的力学性能测试:**采用漆包线卷绕试验仪(JR-100型,湘鸿仪器机械有限公司)对漆包线进行卷绕。然后根据GB/T 4074.5-2008,采用盐水针孔测试仪(YZK-I型,湘鸿仪器机械有限公司)对漆包线的盐水针孔个数进行测试,每种漆包线测试5个样品。根据GB/T 4074.3-2008,采用单向刮漆试验仪(WDG-400型,湘鸿仪器机械有限公司)对漆包线的单向刮破力进行测试。

**1.5.5 漆包线的热性能分析:**根据GB/T 4074.6-2008,采用软化击穿试验仪(WRH-1型,湘鸿仪器机械有限公司)进行漆包线的软化击穿测试,测试条件为250℃,4.5 N和2 min;采用加热鼓风干燥箱(101-1AB型,天津市泰斯特仪器有限公司)进行漆包线的热冲击测试,烘箱温度200℃、热冲击时间30 min,然后使用放大镜观察漆膜表面开裂情况,每组漆包线测试5个样品。

**1.5.6 漆包线的直焊性分析:**根据GB/T 4074.4-2008,采用焊锡试验仪(ZHX-500型,湘鸿仪器机械有限公司)对直焊性进行测试,焊锡槽温度360℃,浸入时间为6 s;用6~10倍放大镜检查镀锡线表面,每组漆包线测试3个样品,记录漆包线表面状况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 支链型含氟聚氨酯的结构及相对分子质量

以二甲苯为溶剂,1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇封端IPDI三聚体,然后替代部分IPDI,与全氟聚醚二元醇合成了系列支链型含氟聚氨酯,并对其结构与相对分子质量进行表征。红外分析结果如图1所示,相对分子质量结果列于Tab.1中。

Fig.1为B-FPU的红外谱图。由图可知,B-FPU的IR图在3347 cm<sup>-1</sup>,1697 cm<sup>-1</sup>,1536 cm<sup>-1</sup>,1204 cm<sup>-1</sup>,1138 cm<sup>-1</sup>和1090 cm<sup>-1</sup>处出现了吸收峰,其中,3347 cm<sup>-1</sup>和1697 cm<sup>-1</sup>是氨基甲酸酯结构中的一NH和一C=O伸缩振动吸收峰,表明产物中含有氨基甲酸酯基团。1536 cm<sup>-1</sup>处为氨基甲酸酯基团中—NH的弯曲振动吸收峰;1204 cm<sup>-1</sup>处为—C—O—键的振动吸收峰;1090 cm<sup>-1</sup>处为醚键C—O—C的伸缩振动吸收峰;1138 cm<sup>-1</sup>处出现了较为明显的C—F键的伸缩振动吸收峰,说明C—F键被引入到聚氨酯分子链上;谱图上没有出现2260~2280 cm<sup>-1</sup>处的一NCO特征吸收峰,表明—NCO已完全反应。这一

系列特征峰表明成功合成了B-FPU。

Tab.1为不同支链型含氟聚氨酯样品的相对分子质量。由于在合成树脂的过程中,未添加小分子扩链剂进行扩链,因此相对分子质量偏低,B-FPU1,B-FPU2及B-FPU3的相对分子质量分别仅为2000,1600及1500。理论上,此相对分子质量的聚氨酯无法成膜,但是B-FPU系列在聚四氟乙烯板上均表现出了良好的成膜性,其中应形成了微交联结构。结合红外图可以看出,所有异氰酸酯基团均反应完全,微交联结构是由于1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇未能按照预期1:1的比例封端异氰酸酯三聚体,部分三聚体与2个或3个1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇反应,剩余了部分未封端的IPDI三聚体在体系中充当交联剂的作用参与到反应中。

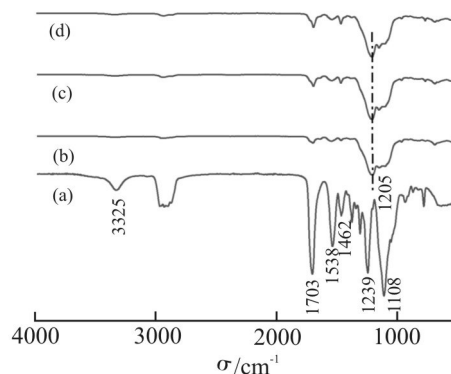


Fig.1 IR spectra of (a)PU, (b)B-FPU1, (c)B-FPU2 and (d)B-FPU3

Tab.1 Molecular weight of PU and B-FPU

	$x / \text{mol}\%$	$M_n \times 10^{-3}$
PU	0	41
B-FPU1	10	2
B-FPU2	20	1.6
B-FPU3	30	1.5

$x$ : molar fraction of capped trimers;  $M_n$ : number average molecular weight

### 2.2 支链型含氟聚氨酯的热稳定性

Fig.2为B-FPU的热失重曲线,其初始分解温度列于Tab.2。相较于PU的200.7℃,B-FPU的初始分解温度均有所提高,这是由于引入含氟基团后,C—F键的键能较大,断裂所需要的能量更高,因此B-FPU的初始分解温度均大于PU。随着三聚体含量的增加,初始分解温度呈现降低的趋势。这是由于在支链型含氟聚氨酯的热分解过程中,侧链上的氨基甲酸酯基团率先分解,随着支链型含氟聚氨酯的侧链上氨基甲酸酯基团含量逐渐增多,率先分解的

氨基甲酸酯基团就越多,所以B-FPU的初始分解温度随着封端IPDI三聚体含量的增加依次降低。

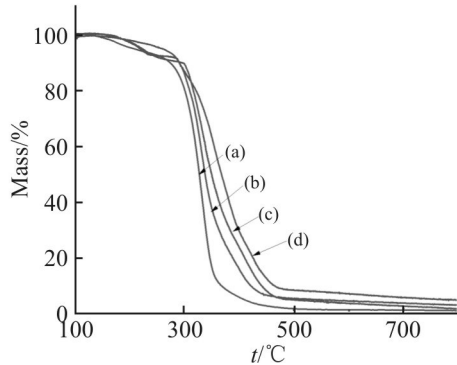


Fig.2 TGA curves of (a)PU, (b)B-FPU1, (c)B-FPU2 and (d)B-FPU3

Tab.2 Initial decomposition temperature of PU/B-FPU

	$x / \text{mol}\%$	$T_g / ^\circ\text{C}$
PU	0	200.7
B-FPU1	10	256.9
B-FPU2	20	220.7
B-FPU3	30	216.6

$x$ : molar fraction of capped trimers;  $T_g$ : glass transition temperature

### 2.3 支链型含氟聚氨酯的力学性能

Tab.3 列出了PU和B-FPU的拉伸强度及断裂伸长率。其中,PU的拉伸强度为8.32 MPa, B-FPU1, B-FPU2和B-FPU3的拉伸强度分别为3.75 MPa, 9.61 MPa和30.50 MPa。B-FPU1相比于PU略有下降。这是由于B-FPU中未添加小分子扩链剂进行扩链,所以相对分子质量偏低,而且B-FPU1中IPDI三聚体的含量低,交联点少,因此力学性能有所降低。随着IPDI三聚体含量的增加,聚合物中的交联点增加,力学性能逐渐增大到B-FPU3的30.50 MPa。同时,B-FPU的断裂伸长率也随着IPDI三聚体的含量增加而逐渐增大。B-FPU不仅

表现出了极大的拉伸强度,同时还表现出了极高的断裂伸长率。这是由于随着IPDI三聚体含量的增加,未封端的三聚体含量增加,所得聚氨酯的交联和支化度都有所提高,赋予了材料极大的拉伸强度和断裂伸长率。

Tab. 3 Mechanical properties of PU and B-FPU

	$x / \text{mol}\%$	$\sigma / \text{MPa}$	$\delta / \%$
PU	0	8.32±0.68	325±28
B-FPU1	10	3.75±0.32	392±36
B-FPU2	20	9.61±0.54	875±58
B-FPU3	30	30.50±2.38	952±54

$\sigma$ : tensile strength;  $\delta$ : elongation at break

### 2.4 支链型含氟聚氨酯膜的表面性能

Fig.3为PU和B-FPU与水的接触角测试图。PU膜与去离子水之间的接触角为74.4°,表明普通的聚氨酯涂层疏水性较差。引入含氟基团后,B-FPU1的接触角为90.1°,薄膜表面表现出了疏水性能。这是由于氟元素的引入,含氟链段向表面的迁移以及聚合物表面内聚能的降低,使接触角变大。因此,B-FPU膜表现出良好的疏水性能。随着封端三聚体含量的继续增大,B-FPU3的接触角逐渐增大到96.1°。所有B-FPU的接触角均大于90°,赋予了聚氨酯表面良好的疏水特性。

### 2.5 支链型含氟聚氨酯漆包线的击穿电压

如Tab.4所示,普通聚氨酯PU漆包线的击穿电压为4719.8 V, B-FPU1, B-FPU2和B-FPU3漆包线的击穿电分别为7513.4 V, 7146.6 V和7033.8 V,支链型含氟聚氨酯漆包线的击穿电压远大于普通聚氨酯。这是由于支链型含氟聚氨酯的侧链C—F键含量增大,C—F键的键能大于C—C键,氟原子结合电子能力强且电负性是所有元素中最高的,会赋予

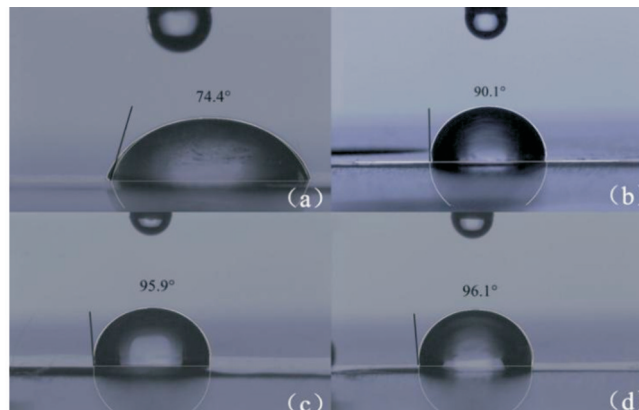


Fig. 3 Water contact angles of (a)PU, (b)B-FPU1, (c) B-FPU2 and (d)B-FPU3

含氟聚合物优异的电性能;而且三聚体的引入产生了微交联结构,交联结构和氢键极大地增加了分子间作用力。两者协同作用使得 B-FPU 的击穿电压大幅增强,远高于普通聚氨酯漆包线。在 B-FPU 中,随着封端 IPDI 三聚体含量的增加,击穿电压降低。由于在相同的固化条件下,B-FPU 中交联点最少的 B-FPU1 漆膜固化较好,所以击穿电压最大;随着交联点增多,B-FPU3 的漆膜固化相对较差,击穿电压略有下降。但是,支链含氟聚氨酯漆包线的击穿电压相比直链型含氟聚氨酯漆包线显示了优异的抗击穿性能。根据国家标准 GB/T 6109.1-2008,支链型含氟聚氨酯漆包线的电气性能均满足 155 级直焊锡聚氨酯漆包线的要求。

**Tab. 4 Breakdown voltages of PU and B-FPU**

	$x/\text{mol}\%$	Breakdown voltage / V
PU	0	4719.8
B-FPU1	10	7513.4
B-FPU2	20	7146.6
B-FPU3	30	7033.8

**Tab. 5 Mechanical properties of PU and B-FPU**

	$F_s/\text{N}$	Pinhole	Surface of the paint film after winding	Pinhole after coiling
PU	3.52	0	+	0
B-FPU1	4.66	0	+	0
B-FPU2	4.85	0	+	0
B-FPU3	4.88	0	+	0

$F_s$ : one-way scratching force of enameled wire; + means the coating does not crack

## 2.6 支链型含氟聚氨酯漆包线的力学性能

如 Tab.5 所示, PU, B-FPU1, B-FPU2 和 B-FPU3 漆包线的单刮力分别为 3.52 N, 4.66 N, 4.85 N 和 4.88 N。制得的所有漆包线的单向刮擦力均大于 2.9 N, 这表明所有漆包线的涂层与铜线之间均具有良好的附着力。根据国家标准 GB / T 6109.10-2008, 满足 155 级直焊锡聚氨酯漆包线的要求, 说明

虽然支链型含氟聚氨酯的相对分子质量较低, 薄膜较软, 但并不影响其与铜线之间的黏合。在盐水针孔试验和卷绕后盐水针孔试验中, 所有漆包线的针孔数均为 0。这也表明漆膜在铜线表面涂覆均匀且具有良好的附着力, 漆膜表面完整没有针孔, 不会产生短路等现象。此外, 漆膜的柔韧性也很好, 即使在外力缠绕后绝缘涂层也不会出现破裂、产生针孔从而导致短路等现象。

## 2.7 支链型含氟聚氨酯漆包线的热性能

由 Tab.6 可知, 不含氟的 PU 漆包线在 220 °C, 4.5 N 条件下, 2 min 内被击穿; 所制得的 B-FPU 漆包线在 220 °C, 4.5 N 条件下, 2 min 内未出现被击穿现象。将不含氟的 PU 漆包线在 200 °C 下, 进行 30 min 的热冲击, 通过放大镜观察, 漆膜表面产生了开裂现象; 将所制得的 B-FPU 漆包线在 200 °C 下, 进行 60 min 的热冲击, 通过放大镜观察, 漆膜表面不会产生开裂现象。根据国家标准 GB / T 6109.1—2008 及 GB / T 6109.10—2008, 所得漆包线均满足 155 级直焊锡聚氨酯漆包线的要求。从上述结果可知, 普通聚氨酯漆包线的耐热性较差。结合 PU 的热失重曲线, PU 的初始分解温度为 200.7 °C, 因此在相应的测试条件下漆膜开始分解, 所以涂层开裂。而 B-FPU1 的初始分解温度较高, 而且不同于普通聚氨酯的是, B-FPU 率先分解的是支链的含氟侧链, 主链尚未开始分解, 交联结构和含氟基团形成的氢键保证了漆包线的耐热性。

**Tab. 6 Thermal performance of PU and B-FPU**

	Softening breakdown	Thermal shock
PU	-	-
B-FPU1	+	+
B-FPU2	+	+
B-FPU3	+	+

+ means the coating does not crack; - indicates cracked coating

## 1.8 支链型含氟聚氨酯漆包线的直焊性

由于将含氟基团引入聚氨酯分子链后, C—F 键

**Tab. 7 Solderability of PU and B-FPU**

	$x/\text{mol}\%$	Solder surface
PU	0	Smooth surface, no pinholes and paint film residues
B-FPU1	10	Smooth surface, no pinholes and paint film residues
B-FPU2	20	Smooth surface, no pinholes and paint film residues
B-FPU3	30	Smooth surface, no pinholes and paint film residues

的高键能使分子链的键能增大,使含氟聚氨酯的初始分解温度大幅增加,漆包线的耐热性也提高。树脂的耐热性提高一方面可以使漆包线的耐热性提高;但另一方面,过高的耐热性可能对漆包线的直焊性带来不利影响,使得漆包线在焊锡过程中,漆膜不易分解从而产生残渣或针孔。为了探究含氟基团的增加以及交联点的存在对漆包线直焊性是否产生影响,对支链型含氟聚氨酯漆包线进行了焊锡性测试,结果如 Tab.7 所示。

由 Tab.7 可知,所有漆包线表面经过焊锡测试后,漆包线表面光滑,无针孔和漆膜残渣,说明虽然支链型含氟聚氨酯中的含氟基团含量增大,且其中存在部分交联点,但是在提高其漆包线产品耐热性的同时,不会对其直焊性造成不良影响。这是由于,影响直焊性的基体树脂分子结构主要包括聚氨酯分子结构中氨基甲酸酯基的含量、耐热基团的类型和数目及分子结构的空位阻效应,氨基甲酸酯基越多,直焊温度越低,残渣也越少,直焊性越好。B-FPU 中由于引入了 IPDI 三聚体,因此支链增多,氨基甲酸酯基含量增大,提高了 B-FPU 漆包线的直焊性。根据国家标准 GB/T 6109.10-2008,符合 155 级直焊锡聚氨酯漆包线的要求。

### 3 结论

本文以 1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇封端 IPDI 三聚体替代部分异佛尔酮二异氰酸酯,与全氟聚醚二元醇合成了系列支链型含氟聚氨酯。然后将支链型含氟聚氨酯配置成漆包线漆,通过高速漆包线机将其制备成漆包线。结果表明,随着 1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇封端 IPDI 三聚体在异氰酸酯中的含量的增加,初始分解温度依次降低至 216.6 °C,但均大于不含氟的普通聚氨酯。随着 1,1,2,2-四氢全氟-1-癸醇封端 IPDI 三聚体在异氰酸酯中的含量的增加,聚合物的拉伸强度逐渐增大至 30.50 MPa,断裂伸长率也逐渐增大至 952%,接触角增大至 96.1°,相较于普通的聚氨酯均有大幅提高。支链型含氟聚氨酯漆包线击穿电压相比于不含氟的聚氨酯漆包线大幅提高,最高达到了 7513.4 V,是普通聚氨酯漆包线(4719.8 V)的 1.6 倍。同时,力学性能及热性能也均有大幅提升,满足 155 级直焊锡聚氨酯漆包线的要求,拓展了聚氨酯漆包线的应用领域。

#### 参考文献:

[1] Jiao X G, Feng Z T, Jiao Q Z, *et al.* Fluorinated polyurethane-

based enameled wires with a low friction coefficient[J]. ACS Omega, 2021, 6: 4719-4725.

- [2] Fang Z H, Shang J J, Wang J, *et al.* Preparation and characterization of the heat-resistant UV curable waterborne polyurethane coating modified by bisphenol A1[J]. Express Polymer Letters, 2010, 4: 704-711.
- [3] Jalilian M, Yeganeh H, Haghghi N. Preparation and characterization of polyurethane electrical insulating coatings derived from novel soybean oil-based polyol[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2010, 21: 118-127.
- [4] Juan T, Joaquín G, Guillermo R. Efficient metrics for the detection of partial discharges under steep-fronted voltage pulses [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108159.
- [5] Veronika G, Andrey L, Andrey B, *et al.* A method for endurance testing of enameled round and rectangular wires for motors controlled by SiC-based inverters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28: 2091-2098.
- [6] Pfeifer S, Brendler E, Veith M, *et al.* Hybrid-coatings derived from pyromellitic acid bridged alkoxy-silylalkyl precursors[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2014, 70: 191-202.
- [7] Morikawa A, Suzuki K, Asano K. Enameled wire having polyimide-silica hybrid insulation layer prepared by sol-gel process[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2015, 28: 151-155.
- [8] Kim Y, Park S Y, Su Y K, *et al.* Enhanced thermal resistance of nanocomposite enameled wire prepared from surface modified silica nanoparticle[J]. Thermochimica Acta, 2012, 542: 62-68.
- [9] 付金栋,涂张应.一种高击穿电压聚酯亚胺漆包线漆及其制备方法:中国,110713788A[P],2020-01-21.
- [10] 伍文慧.一种变压器用耐热防电晕漆包线漆及其制备方法:中国,107129743A[P],2017-09-05.
- [11] 徐勇.一种抗高压击穿漆包线:中国,206058960U[P],2017-03-29.
- [12] 单昌礼,张英强,娄静洁,等. UV 固化的水性含氟聚氨酯的制备与表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(3): 45-51.
- [13] Shan C L, Zhang Y Q, Lou J J, *et al.* Design and properties of UV-Curable waterborne polyurethane reinforced by a short-segment fluorinated chain extender[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(3): 45-51.
- [13] 左严严,胡平安,和玲.硅表面接枝含氟聚合物刷的动力学与表面性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(2): 16-21.

Zuo Y Y, Hu P A, He L. Reaction kinetics and surface properties of fluorinated copolymer brushes on the silicon wafer [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(2): 16-21.

[14] 熊军, 孙芳, 杜洪光. 丙酮二正丁胺滴定法测定聚氨酯中的异氰酸酯基[J]. *分析实验室*, 2007, 26(8): 73-76.

Xiong J, Sun F, Du H G. Determination of isocyanate group in polyurethane by "di-n-butylamine-acetone" method[J], 2007, 26 (8): 73-76.

## Preparation of Fluorinated Polyurethane Based Enameled Wire Coatings with High Breakdown Voltage and Their Properties

Zhongtai Feng<sup>1</sup>, Xiaoguang Jiao<sup>2</sup>, Chengjie Li<sup>1</sup>, Guiming Huang<sup>1</sup>, Qun Wang<sup>1</sup>,  
Qingze Jiao<sup>2,3</sup>, Caihong Feng<sup>2</sup>, Yun Zhao<sup>2</sup>

(1. Zhuhai Ronsen super Micro-Wire Co., Ltd, Zhuhai 519040, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. School of Chemical Engineering and Materials Science, Beijing Institute of Technology, Zhuhai 519085, China)

**ABSTRACT:** One isocyanate group of isophorone diisocyanate trimer was capped with 1,1,2,2-tetrahydro perfluoro-1-decanol. Fluorinated polyurethane containing branched chains (B-FPU) was synthesized by the reaction of different contents of capped trimer, isophorone diisocyanate and perfluoropolyether diol. A solution of B-FPU in xylene and cresol was then prepared and coated on copper wires using high-speed enameled machine to obtain enameled wires. The structures, thermal stability, mechanical properties, and hydrophobic properties of B-FPU were characterized by infrared spectroscopy, thermogravimetric analyzer, universal testing machine and contact angle tester. The breakdown voltage, mechanical properties, thermal properties, and direct solderability of enameled wires were measured by voltage tester, unidirectional scratch tester, softening breakdown tester and solder tester. The effects of capped trimer content on the structure and properties of B-FPU and the corresponding enameled wires were investigated. The results show that the tensile strength and elongation at break of B-FPU with 30% of capped trimer are 30.50 MPa and 952%, respectively. Its initial decomposition temperature and contact angle are increased to 216.6 °C and 96.1°, respectively, which are much higher than those of ordinary polyurethane. The breakdown voltage of the corresponding enameled wire is as high as 7033.8 V. The enameled wire prepared using B-FPU with 10% of capped trimer shows the largest breakdown voltage of 7513.4 V, which is 1.6 times of 4719.8 V for ordinary polyurethane enameled wire. At the same time, the mechanical properties, thermal properties, and direct solderability meet the requirements of polyurethane enameled wire.

**Keywords:** fluorinated polyurethane containing branched chains; breakdown voltage; enameled wires