

# 无溶剂绝缘浸渍漆的研究进展

邓青山, 颜爱国

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 介绍了无溶剂浸渍漆的常规性能, 阐述了环氧树脂绝缘浸渍漆、不饱和聚酯绝缘浸渍漆、二苯醚树脂绝缘浸渍漆、聚酯酰亚胺绝缘浸渍漆、聚酰亚胺绝缘浸渍漆和有机硅绝缘浸渍漆等无溶剂绝缘浸渍漆的研究现状, 并展望了其发展趋势。

**关键词:** 无溶剂浸渍漆; 耐热性能; 电气绝缘性能; 贮存稳定性能

**中图分类号:** TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2011)05-0009-05

## The Development of Solvent-Free Impregnating Varnish

Deng Qingshan, Yan Aiguo

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** The properties of the impregnating varnish are introduced and the status of the epoxy resin insulating varnish, unsaturated polyester insulating varnish, diphenyl ether resin insulating varnish, polyesterimide insulating varnish, polyimide insulating varnish and organic silicon insulating varnish are explained. The developing trend of insulating impregnating varnish is prospected.

**Key words:** solvent-free impregnating varnish; heat resistance; electrical insulation; storage stability

绝缘浸渍漆<sup>[1]</sup>常用于浸渍电机、电器的线圈和零部件, 以填充其间隙和微孔。浸渍漆固化后能在浸渍物表面形成连续平整的漆膜, 并使线圈黏结成一个结实的整体, 可提高绝缘结构的耐潮、导热、介电强度和机械强度等性能。

浸渍漆可分为有溶剂和无溶剂2种。相对有溶剂浸渍漆, 无溶剂浸渍漆具有环境污染小、填充率高、绝缘层无气隙、便于自动化浸渍等优点, 经济环保。因此, 无溶剂浸渍漆已成为浸渍漆领域的主流发展方向。

### 1 常规性能

无溶剂浸渍漆的常规性能主要有黏度、凝胶时

间、固体挥发份、黏结强度、耐热性能、电气绝缘性能和贮存稳定性能等<sup>[2]</sup>。

1) 黏度。黏度是衡量无溶剂浸渍漆流动性能的指标。黏度适当, 无溶剂浸渍漆可充分地渗透到工件各部位, 形成一个无气隙、连续平整的绝缘层。在无溶剂浸渍漆中, 基体树脂的黏度一般较高, 需要加入活性稀释剂以降低其黏度, 同时与其发生交联固化反应。

2) 凝胶时间。凝胶时间是对无溶剂浸渍漆反应活性的表征。一定温度条件下, 凝胶时间越短, 说明无溶剂浸渍漆反应活性越大。凝胶时间短, 固化周期就短, 能耗就相对较小。

3) 固化挥发份。固化挥发份是指在固化过程中

收稿日期: 2011-05-16

作者简介: 邓青山(1986-), 男(瑶族), 湖南郴州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高分子材料合成与改性,

E-mail: dqsh1986@163.com

无溶剂浸渍漆挥发份的百分含量。按照挥发份的含量,无溶剂浸渍漆可分为:高挥发份漆(固化挥发份为20%~30%)、低挥发份漆(固化挥发份为10%~20%)、极低挥发份漆(固化挥发份小于10%)。挥发份高则工件的挂漆量低,挂漆量低则无法保证浸渍工艺要求,同时还污染环境。因此,无溶剂浸渍漆的挥发份应控制在一个较低的范围。

4) 黏结强度。黏结强度是衡量无溶剂浸渍漆与工件之间的黏合强弱。黏结强度较高的无溶剂浸渍漆可以防止线圈位移,降低绝缘电阻,特别在高温条件下,需要其具有较高的黏结强度,以防剥离。

5) 耐热性能。无溶剂浸渍漆的温度指数是衡量材料耐热性能的主要参数。目前,无溶剂浸渍漆的耐热等级分为Y(90℃),A(105℃),E(120℃),B(130℃),F(155℃),H(180℃),N(200℃),R(220℃),S(240℃)和C(>240℃)10个等级。随着电器设备的更新,对无溶剂浸渍漆的耐热性能要求也越高。

6) 电气绝缘性能。电器表面漆膜的主要作用是形成一个绝缘结构层,故具有良好的电气绝缘性能是无溶剂浸渍漆最基本的性能要求,一般采用体积电阻率、电气强度和介质损耗因数等参数来评定其电气绝缘性能。

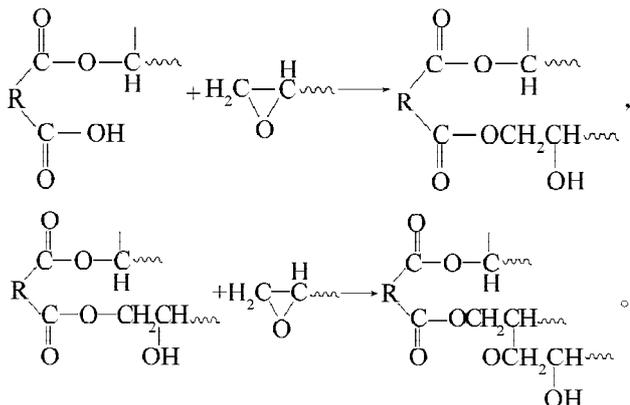
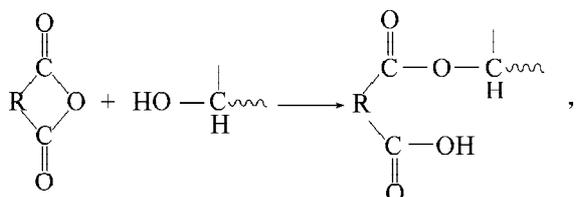
7) 贮存稳定性能。贮存稳定性能是评价无溶剂浸渍漆适用性的重要指标,以浸渍漆在60℃条件下贮存96h后的黏度增长倍数来评定。增长倍数越小,浸渍漆的贮存稳定性能越好,可使用的时间越长。

## 2 研究现状

无溶剂绝缘浸渍漆一般由基体树脂、改性剂、活性稀释剂、引发剂、固化剂和促进剂等组成。根据基体树脂的不同,无溶剂绝缘浸渍漆一般可分为环氧树脂绝缘浸渍漆、不饱和聚酯绝缘浸渍漆、二苯醚树脂绝缘浸渍漆、聚酯酰亚胺绝缘浸渍漆、聚酰亚胺绝缘浸渍漆和有机硅绝缘浸渍漆等<sup>[3]</sup>。

### 2.1 环氧树脂无溶剂绝缘浸渍漆

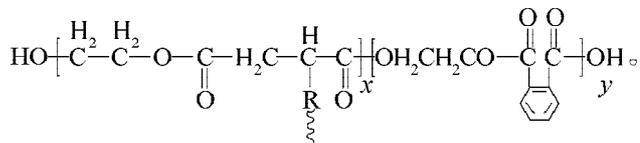
环氧树脂与酸酐固化机理为:环氧树脂的羟基使酸酐开环,然后对环氧基加成,生成二酯和羟基,酯化生成的羟基与环氧基发生醚化。具体反应式为:



环氧树脂具有优良的机械强度和电气绝缘性能,其耐化学腐蚀性能好,耐潮性能好,固化收缩率小,黏结强度高,相容性好,具有优异的分子结构可设计性,故应用广泛。但环氧树脂漆价格较高,黏度较大,贮存稳定性能较差,故多用于双组分浸渍漆。文清云等将环氧树脂、不饱和树脂、改性剂和催化剂按设定工艺进行化学反应,反应完成后加入阻聚剂、稳定剂和促进剂等制备成浸渍漆,所制备的浸渍漆具有F,H级电气绝缘性能,耐热性能较好,起始分解温度达434℃,挥发份小于5%,适用于常规浸渍和真空压力浸渍工艺<sup>[4]</sup>。李孟德等用自制的低黏度环氧树脂与亚胺二元酸制得一种环氧-亚胺树脂,所制得的树脂耐热性能较好,最高耐热温度为223℃;介质损耗较低,常态仅为0.05%;贮存稳定性能较好,在50℃条件下贮存15d,黏度增加了0.58倍<sup>[5]</sup>。

### 2.2 不饱和聚酯无溶剂绝缘浸渍漆

不饱和聚酯由多无醇与饱和酸酐、不饱和酸酐合成。固化时,加入引发剂,产生自由基,与活性稀释剂R交联固化。如乙二醇与苯酐、顺酐合成的不饱和聚酯与交联剂R的结构式如下:

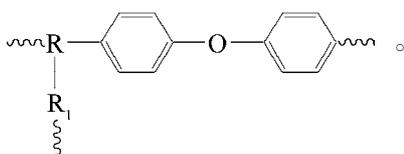


不饱和聚酯无溶剂浸渍漆具有优良的耐化学性能、耐潮性能、电气绝缘性能,黏度较低,贮存稳定性能较好,且易于浸渍,是国内外无溶剂绝缘浸渍漆发展的主要方向。但因其具有固化收缩率较大、黏结强度较低、空气氧阻聚导致表面干燥性能较差等缺点,故需将其改性,才能得到综合性能优异的浸渍漆<sup>[6]</sup>。张建华等在不饱和聚酯合成后期加入含双键和乙氧基的有机硅预聚体,缩合得到有机硅改性不饱和聚酯,加入活性稀释剂和引发剂,配制成浸渍漆。该无溶剂绝缘浸渍漆氧指数达25.4,可作为H级阻燃无溶剂浸渍漆使用;耐热性能较好,初始分

解温度提高到 312 ℃;同时,具有优良的电气绝缘性能和贮存稳定性能<sup>[7]</sup>。卢军彩等在传统不饱和聚酯树脂配方中引入耐热基团亚胺结构的同时,用部分三元酸(或醇)代替二元酸(或醇),引入三官能团单体,以提高不饱和聚酯漆的交联密度和机械强度。所制备的浸渍漆最高耐热温度为 182.7 ℃,可作为 H 级绝缘浸渍漆使用;同时,其黏结强度高,贮存稳定性能好,低温固化快<sup>[8]</sup>。

### 2.3 二苯醚树脂无溶剂绝缘浸渍漆

普通二苯醚聚合物一般由二苯醚及其衍生物、低聚物与芳香族化合物在付氏催化剂的作用下缩聚而得,其结构式如下:

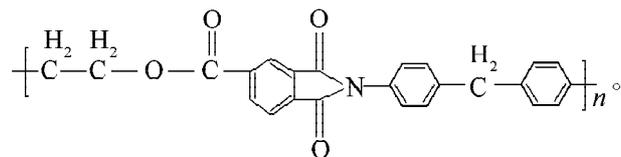


在此结构式中,  $R_1$  为固化剂,固化剂产生小分子化合物。目前,一般在二苯醚中引入不饱和双键,合成不饱和的二苯醚树脂,再加入引发剂、活性稀释剂、改性剂等,固化时二苯醚树脂与活性稀释剂交联聚合,此时  $R_1$  为活性稀释剂。

二苯醚树脂耐热性能好,弯曲强度和黏结强度较高,耐化学腐蚀,耐潮,耐辐射,价格比有机硅低,是一种优良的 H 级绝缘材料。但由于二苯醚树脂缩聚固化时产生的小分子产物多、漆膜脆性大、固化温度高等缺点,限制了其发展。近年来,通过引入不饱和双键,浸渍漆由固化促进体系变为引发阻聚体系,其性能得以改善。饶保林等采用马来酰亚胺、酚类化合物与甲氧基次甲基二苯醚反应,将不饱和键引入树脂中,制得亚胺改性二苯醚无溶剂绝缘浸渍漆,其介电性能和贮存稳定性能较好,耐热等级为 C 级<sup>[9]</sup>。张建等利用聚苯并噁嗪和不饱和聚酯改性二苯醚树脂,合成一种含双键的二苯醚树脂,其后,加入引发剂和活性稀释剂,制得无溶剂绝缘浸渍漆。该浸渍漆贮存稳定性能好,在 60 ℃ 密闭环境下,储存 72 h 后,黏度仅增加 20%,最高耐热温度为 187.7 ℃,可作为 H 级绝缘浸渍漆使用,高低温条件下均有较好的黏结强度和电气绝缘性能<sup>[10]</sup>。

### 2.4 聚酯酰亚胺无溶剂绝缘浸渍漆

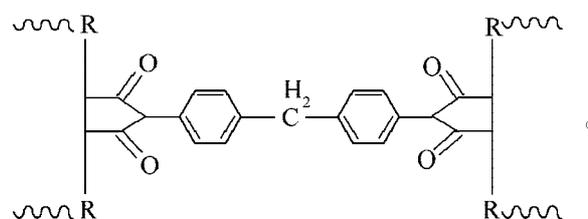
传统的聚酯酰亚胺浸渍漆由羟基醚化反应交联固化而成。近年来,在聚酯酰亚胺中引入不饱和双键,通过引发剂自由基交联聚合,由乙二醇、偏苯三酸酐、4,4'-二氨基二苯基甲烷合成的聚酯酰亚胺树脂的结构式如下:



聚酯酰亚胺具有黏度低,贮存稳定性能、电气绝缘性能良好,耐化学性能、耐潮性能、耐热性能优良,工艺简单等优点,但价格较高,限制了其发展。李强军等在不饱和聚酯树脂的基础上,采用亚胺基团封端技术,制得一种亚胺改性不饱和耐热聚酯 H 级无溶剂浸渍漆,其贮存稳定性能较好,耐高温,介质损耗因数低,分子量分布窄,能满足高压电机对真空压力浸渍无溶剂浸渍漆的要求<sup>[11]</sup>。

### 2.5 聚酰亚胺无溶剂绝缘浸渍漆

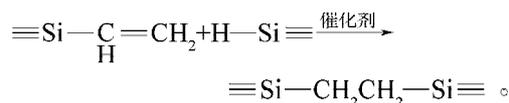
聚酰亚胺树脂由酸酐与二氨基反应合成,二甲甲烷二氨与马来酸酐反应,制得树脂与交联剂 R 的固化产物,其结构式如下:



聚酰亚胺浸渍漆具有良好的力学性能、化学稳定性能、耐老化性能、电绝缘性能、耐高低温性能、尺寸稳定性能,广泛用于航空航天、印制版、机车电器等领域。由于马来酰亚胺与普通稀释剂的相容性差,共聚活性低,黏度高,漆膜易开裂,因此常采用环氧树脂、不饱和聚酯等对其进行共混改性。王祖德等利用芳香亚胺结构和交联互穿网络结构,制得一种综合性能较好的耐高温无溶剂浸渍漆,其机械性能、贮存稳定性能、电气绝缘性能均较好,能满足各种浸渍工艺要求<sup>[13]</sup>。

### 2.6 有机硅无溶剂绝缘浸渍漆

有机硅浸渍漆<sup>[14-17]</sup>由树脂中不饱和双键和硅氧键加成固化而成,其反应式如下:



由于硅氧键键能高,有机硅浸渍漆在高温和低温条件下均能使用,同时具较好的漆膜韧性、耐辐射性、电气绝缘性能、抗老化性、稳定性等优点,广泛应用于 H 级电机电器领域。但有机硅浸渍漆在高温下机械性能较差,固化温度高,且合成工艺复杂,成本较高,这些限制了其应用。用醇酸、环氧、聚

酯、聚氨酯等对有机硅树脂进行改性,可改善其机械性能,但会降低漆膜的耐热性能。南车集团从 Isola 公司引进一种全新的 C 级有机硅绝缘浸渍漆<sup>[13-15]</sup>,耐热等级达 C 级。该浸渍漆由乙烯基聚甲基-苯基硅氧烷和端基带硅氢键的聚甲基-苯基硅氧烷在铂类催化剂作用下加聚而成,其固化时基本无小分子析出,常态下接近零挥发,同时具有黏度小、贮存稳定性较好等优点,适合真空压力浸渍工艺,能实现无气隙绝缘结构,能达到变频牵引电机的绝缘要求。

### 3 发展趋势

目前,无溶剂绝缘浸渍漆的品种较多,但仍然满足不了日益提高的电机绝缘要求。电机电器设备正朝着高电压、大容量、小型化、高效性、高耐压耐热性和智能化方向发展,这对浸渍漆的质量及可靠性提出了越来越高的要求。同时,国家对环境污染和能源短缺等问题也越来越重视。为了适应环保及电机绝缘要求,无溶剂绝缘浸渍漆可朝以下方向发展<sup>[16-21]</sup>:

1) 耐高温、高压型。电机电器和输电设施均朝着大容量、高电压方向发展,国内外大电机单机容量已超过 1 000 MkW,这就需要耐高压的绝缘漆。电机功率增大,设备发热量也增大,这对浸渍漆的耐热性能提出了更高的要求。

2) 环保型。随着人们环保意识的增强,材料的无毒或低毒成为产品研发时需重点考虑的问题。应开发低挥发无溶剂漆等环保型浸渍漆,以减少苯乙炔等挥发造成的环境污染<sup>[22]</sup>。

3) 节能型。目前正处于全球能源紧张时期,为了减少能量消耗,提高生产效率,有必要开发烘焙时间短、固化温度低的浸渍漆,这样不仅可降低生产成本,还能节省能源。目前,国内外都在大力研发中低温干燥型和快固化型浸渍漆。

4) 特性功能型。新电机电器设备的开发,对无溶剂浸渍漆提出了更高的要求:不仅要具有良好的耐热性能和电气绝缘性能,还要具有较好的耐化学腐蚀、阻燃、耐辐照等特殊功能。因此,有必要开发特性功能专用浸渍漆。

5) 多工艺适应型。大部分浸渍漆只能适用一种浸渍方式,限制了其广泛应用。因此,有必要开发能满足各种工艺要求的浸渍漆。

#### 参考文献:

[1] 焦明霞,李积继.变频电机的绝缘结构[J].防爆电机,

2002(4): 14-16.

Jiao Mingxia, Li Jiji. The Insulation Structure of the Variable-Frequency Motor[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2002(4): 14-16.

[2] 王伟. H 级绝缘浸渍漆的优选及应用[J]. 绝缘材料, 2008, 41(2): 34-37.

Wang Wei. Optimization and Application of Class-H Insulating Impregnating Varnish[J]. Insulating Materials, 2008, 41(2): 34-37.

[3] 左瑞霖,梁国正,常鹏善,等.耐高温无溶剂绝缘浸渍漆的研究进展[J]. 绝缘材料, 2002, 35(2): 26-32.

Zuo Ruilin, Liang Guozheng, Chang Pengshan, et al. The Development of Heat-Resistant Solventless Insulation Impregnating Varnishes[J]. Insulating Materials, 2002, 35(2): 26-32.

[4] 文清云,吕天峰,伍尚华. H 级环保型无溶剂浸渍树脂的研制[C]//第十届全国绝缘材料与绝缘技术学术交流会论文集.昆明:中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会, 2008: 172-175.

Wen Qingyun, Lü Tianfeng, Wu Shanghua. The Development of a Type of Environment-Friendly H-Class Solventless Impregnating Resin[C]//Review of the Proceeding 10th Conference on Electrical Insulation. Kunming: China Electrotechnical Society of Professional Committee of Insulating Material and Technology, 2008: 172-175.

[5] 李孟德,汝国兴,汤超宇,等. C 级环氧-亚胺无溶剂浸渍树脂的研究[C]//2007 年全国绝缘材料与绝缘技术专题研讨会论文集.昆明:中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会, 2007: 123-129.

Li Mengde, Ru Guoxing, Tang Chaoyu, et al. Research of Class C Epoxy-Imide Solventless Impregnating Resin[C]//2007 National Insulation Materials and Insulation Technology Symposium Proceedings. Kunming: China Electrotechnical Society of Professional Committee of Insulating Material and Technology, 2007: 123-129.

[6] 俞翔霄,牛平宏.环氧改性耐热聚酯无溶剂漆的研制及应用[J]. 绝缘材料, 2003, 36(6): 3-6, 10.

Yu Xiangxiao, Niu Pinghong. Research and Application of Epoxy Modified Heat Resistant Polyester Impregnating Varnish[J]. Insulating Materials, 2003, 36(6): 3-6, 10.

[7] 张建华,姜其斌,林金火,等.有机硅/不饱和聚酯无溶剂浸渍漆性能的研究[C]//2006 年全国绝缘材料与绝缘技术专题研讨会论文集.昆明:中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会, 2006: 127-131.

Zhang Jianhua, Jiang Qibin, Lin Jinhua, et al. Study on Properties of Solventless Mpregnating Varnish of Organic Silicon/UPR Condensation[C]//2006 National Insulation Materials and Insulation Technology Symposium Proceedings. Kunming: China Electrotechnical Society of Professional Committee of Insulating Material and Technology, 2006: 127-131.

- [8] 卢军彩, 祝斌, 王德祥. 新型H级不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍漆的研制[J]. 船电技术, 2008(5): 312-314.  
Lu Juncai, Zhu Bin, Wang Dexiang. A New Polyester-Imide Solventless Impregnating Varnish[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2008(5): 312-314.
- [9] 饶保林, 赵斌, 史博. 马来酰亚胺改性无溶剂浸渍漆的研究[J]. 绝缘材料, 2004, 37(4): 4-6.  
Rao Baolin, Zhao Bin, Shi Bo. Diphenylether Imide Solventless Impregnating Varnish[J]. Insulating Materials, 2004, 37(4): 4-6.
- [10] 张建, 王晓梅, 焦丕玉, 等. 改性二苯醚/聚苯并噁嗪H级无溶剂浸渍漆的研制[C]//2005年全国绝缘材料与绝缘技术专题研讨会论文集. 昆明: 中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会, 2006: 208-210.  
Zhang Jian, Wang Xiaomei, Jiao Piyu, et al. Modified Diphenyl Ester Resin/Polybenzoxazine Class H Solventless Impregnating Varnish Research[C]//2005 National Insulation Materials and Insulation Technology Symposium Proceedings. Kunming: China Electrotechnical Society of Professional Committee of Insulating Material and Technology, 2006: 208-210.
- [11] 李强军, 姜其斌. H级不饱和聚酯亚胺无溶剂浸渍漆的研究[J]. 绝缘材料, 2005, 38(3): 11-13.  
Li Qiangjun, Jiang Qibin. Research of Class H Unsaturated Polyester Imide Solventless Impregnating Varnish[J]. Insulating Materials, 2005, 38(3): 11-13.
- [12] 刘业强. 改性聚酰亚胺浸渍漆的研究[J]. 绝缘材料, 2001, 34(5): 13-15.  
Liu Ye qiang. Research on the Modified Polyimide Impregnating Varnish[J]. Insulating Materials, 2001, 34(5): 13-15.
- [13] 王祖德, 金品梅. 220、240级亚胺型无溶剂浸渍树脂的研究[J]. 绝缘材料, 2008, 41(2): 1-3.  
Wang Zude, Jin Pinmei. Class 220 and 240 of HT1170 Imine-Type Solventless Impregnating Resin[J]. Insulating Materials, 2008, 41(2): 1-3.
- [14] 衷敬和, 姜其斌, 黎勇, 等. 有机硅绝缘浸渍漆的现状与发展趋势[J]. 绝缘材料, 2008, 41(6): 21-24.  
Zhong Jinghe, Jiang Qibin, Li Yong, et al. Status and Development Trend of Silicone Impregnating Varnish[J]. Insulating Materials, 2008, 41(6): 21-24.
- [15] 陈红生, 衷敬和, 姜其斌, 等. C级3551有机硅无溶剂浸渍树脂及其在牵引电机上的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2006(5): 38-40.  
Chen Hongsheng, Zhong Jinghe, Jiang Qibin, et al. Class C Impregnating Varnish 3551 Solventless Silicone Resin and Its Application on Traction Motors[J]. Electrical Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2006(5): 38-40.
- [16] 衷敬和, 姜其斌, 黎勇, 等. C级无溶剂有机硅浸渍漆的应用工艺研究[J]. 绝缘材料, 2008, 41(4): 11-13.  
Zhong Jinghe, Jiang Qibin, Li Yong, et al. Application Technique of Grade C Solvent-Free Silicone Impregnating Varnish[J]. Insulating Materials, 2008, 41(4): 11-13.
- [17] Pravat Kumar Maiti. Development of a Silicone Modified Unsaturated Polyester Varnish for Rated Electrical Insulation Application[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 455-468.
- [18] Li Qiangjun. Study on a C-Class Solvent-Free Silicone Impregnating Varnish[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 785-790.
- [19] 张犇. 绝缘浸渍树脂现状和发展方向[J]. 电机技术, 2006(1): 3-7.  
Zhang Ben. Current Status & Development Direction of Insulation Impregnating Resin[J]. Electrical Machinery Technology, 2006(1): 3-7.
- [20] 朱兴俭, 胡兆楠, 李锦樑. 浅谈浸渍漆的发展动向[J]. 中小型电机, 2005, 32(5): 49-51.  
Zhu Xingjian, Hu Zhaonan, Li Jinliang. Elementary Introduction Developing Trend of Impregnating Varnish[J]. S & M Electric Machines, 2005, 32(5): 49-51.
- [21] 李钦, 彭巍, 陈子荣, 等. TF1159高固含量环保型绝缘漆的研究[J]. 绝缘材料, 2004, 37(2): 20-24, 27.  
Li Qin, Peng Wei, Chen Zirong, et al. Research on High-Solid-Content Environmental Protection-Type Impregnating Varnish[J]. Insulating Materials, 2004, 37(2): 20-24, 27.

(责任编辑: 徐海燕)