

200 Class Corona Resistant Enamelled Magnet Wire

Wen-jin Wang, Hong-yan Li, Ming-bo Yang, Qi-bin Jiang

Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou, China

Email: wangwenjin@teg.cn

Abstract: In this paper, aluminum oxide composite particles were introduced into common insulation varnish, and two kinds of corona resistant insulation varnish were prepared, and four types of corona resistant enamelled magnet wire were trial-produced. Experiment results indicate that the corona resistant wire of the configuration PE-CR/PEI-CR/PAI can satisfy magnet wire all properties according to the criterions of related standard.

Keywords: corona resistant; enamelled wire; inverter-fed motor

200 级耐电晕漆包线漆的研究

王文进, 李鸿岩, 杨名波, 姜其斌

株洲时代新材料科技股份有限公司, 株洲, 中国, 412007

Email: wangwenjin@teg.cn

摘要: 本文将 Al_2O_3 基纳米复合颗粒添加到漆包线漆中, 制备了聚酯耐电晕漆包线漆 PE-CR 和聚酯亚胺耐电晕漆包线漆 PEI-CR, 并涂制了四种不同结构的耐电晕漆包线, 考察了其耐电晕性能。结果表明: 采用 PE-CR/PEI-CR/PAI 结构的线, 完全可以满足 200 级耐电晕漆包线的各项性能要求。

关键词: 耐电晕; 漆包线漆; 变频电机

1 引言

交流变频调速电机具有高效、节能、便于自动控制等优点。因此, 国外变频调速电机每年以 13%~16% 的速度增长, 估计今后将会有 50%~70% 的电机使用变频技术^[1-3]。电机的交流变频技术要求电机绝缘结构具备较高的耐电晕性能和耐温等级, 其中耐电晕漆包线是优化绝缘结构和保障性能的有效途径之一。美国、欧洲等国家都大力开发耐电晕漆包线^[4-5], 这让耐电晕漆包线漆有了良好的发展机遇。目前国内尚无能力生产高技术含量的耐电晕漆包线漆, 所用的耐电晕漆包线漆大部分仍依赖国外进口。因此, 研究国产耐电晕漆包线漆成为发展我国变频技术的一个当务之急。

本文通过将 Al_2O_3 基纳米复合颗粒引入到漆包线漆中, 拟制备聚酯亚胺耐电晕漆包线漆 (PEI-CR) 和聚酯耐电晕漆包线漆 (PE-CR), 并应用到耐电晕漆包线中, 对四种不同结构的耐电晕漆包线的性能分析比较。

2 试验

2.1 主要原料和设备

对苯二甲酸二甲酯, 工业级, 上海昊天化工有限公司; 乙二醇, 工业级, 江都市长丰化工材料厂; 赛克, 工业级, 邯郸市瑞邦精细化工有限公司; 偏苯三酸酐, 工业级, 常州博大化工有限公司; 4,4-二氨基二苯甲烷, 工业级, 湖北洪湖双马树脂厂; 聚酰胺酰亚胺 (PAI), ELANTAS Tongling; Al_2O_3 基纳米复合颗粒, 自制。

JGM-3 高频脉冲绝缘测试仪, 上海申发检测仪器厂; TEM 透射电镜采用 JEOL-1200 透射电子显微镜; SEM 表征采用日本电子 (JEOL) 公司的 JSM-6360LA 型扫描电镜, 测试电压为 16 KV; 立式热风循环漆包机 VM5/1-5/13, 无锡同创。

2.2 试样制备

2.2.1 PE 和 PEI 的制备

将对苯二甲酸二甲酯、乙二醇和赛克进行酯交换反应, 再在一定温度和真空减压下进行缩聚, 最后用甲酚稀释就成了 PE 漆包线漆。

将对苯二甲酸二甲酯、乙二醇和赛克进行酯交换反应, 生成聚酯树脂; 再加入偏苯三酸酐和二胺反应,

生成亚胺二元酸；两种组分在高温下发生缩聚反应生成聚酯亚胺树脂，最后用甲酚、助剂和二甲苯稀释成 PEI 漆包线漆。

2.2.2 耐电晕漆包线漆的制备

将 Al_2O_3 基纳米复合颗粒加入到漆包线漆 PEI 和 PE 中，按一定比例混合均匀，即可制备两种耐电晕漆包线漆，分别记为 PEI-CR 和 PE-CR。

2.2.3 耐电晕漆包线的制备

耐电晕漆包线的涂制在立式热风循环漆包机进行，四种不同结构的耐电晕漆包线见表 1。烘焙时从烘炉下层通过下层，烘炉入口温度 $155^{\circ}C$ ，烘炉下层温度 $260^{\circ}C$ ，一次催化前温度 $370^{\circ}C$ ，催化后补充加热温度 $470^{\circ}C$ 。

表 1 四种不同结构的耐电晕漆包线

Table 1 Four different configuration corona resistant wire

序号	用漆		
	底漆	中间漆	面漆
试验 1 (PE/PE-CR/PAI)	PE	PE-CR	PAI
试验 2 (PE/PEI-CR/PAI)	PE	PEI-CR	PAI
试验 3 (PE-CR/PE-CR/PAI)	PE-CR	PE-CR	PAI
试验 4 (PE-CR/PEI-CR/PAI)	PE-CR	PEI-CR	PAI

先将 $\Phi 1.25mm$ 的裸铜线表面涂覆 4 道底漆，按照 1.30、1.31、1.32、1.33 规格的涂漆模具依次涂覆，逐道烘烤固化后形成底层绝缘层；再涂覆 7 道中间漆，按照 1.33、1.34、1.35、1.36、1.37、1.37、1.38 规格的涂漆模具依次涂覆，逐道烘烤固化后形成中间绝缘层；最后涂覆 2 道聚酰胺酰亚胺面漆，按照 1.39、1.39 规格的涂漆模具依次涂覆，逐道烘烤固化后绝缘层，最终形成 $\Phi 1.25mm$ 的耐电晕漆包线。



图 1 耐电晕漆包线

Figure 1 Corona resistant wire

3 分析与讨论

3.1 纳米粒子的形态

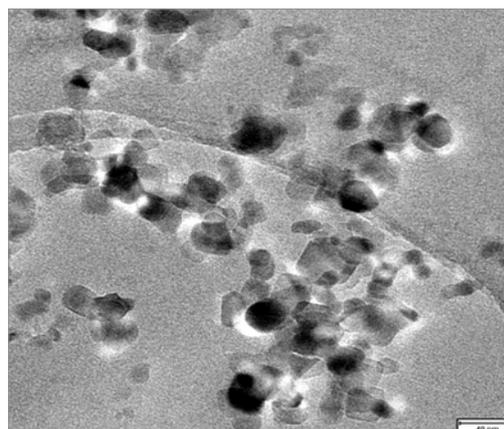


图 2 PE-CR 中 Al_2O_3 纳米粒子的 TEM 照片

Figure 2 TEM image of Al_2O_3 nanometer particles in PE-CR

图 2 所示为 PE-CR 中的 Al_2O_3 纳米粒子的透射电镜照片，从图中可以看出， Al_2O_3 纳米粒子在耐电晕漆包线漆中分布较均匀，无明显的团聚现象，其平均粒径为 $10-30nm$ 。

3.2 线的常规性能

采用立式热风循环漆包机，涂制了四种不同结构的耐电晕漆包线，检测结果见表 2。

PE/PE-CR/PAI 和 PE-CR/PE-CR/PAI 的热冲不合

格，表明仅依靠二道面漆并不能达到 200 级。为解决 漆。PE/PEI-CR/PAI 和 PE-CR/PEI-CR/PAI 的各项常规热冲问题，中间漆必须采用耐热性能更好的聚酯亚胺 性能都合格。

表 2 耐电晕漆包线的性能检测结果
Table 2 Test results of the corona resistant wire

名称	单位	技术要求	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4
外观	-	光洁均匀,无影响性能缺陷	合格	合格	合格	合格
导体尺寸	mm	$\phi 1.250 \pm 0.013$	1.240	1.242	1.243	1.239
漆膜厚度	mm	≥ 0.067	0.093	0.095	0.097	0.102
最大外径	mm	≤ 1.349	1.333	1.337	1.340	1.341
伸长率	%	≥ 31	35	35	37	35
回弹角	°	≤ 37	33	34	31	36
剥离扭转	转	≥ 88	合格 (115)	合格 (110)	合格 (98)	合格 (95)
热冲击	-	220°C, 3d 不开裂	不合格	合格	不合格	合格
软化击穿	-	320°C, 2min	合格	合格	合格	合格
刮漆	N	平均刮破力 12.9/ 最小刮破力 11.0	18.24/ 13.03	20.34/ 19.37	20.84/ 20.84	21.48/ 21.28
击穿电压	KV	$\geq 5.0KV$	14.0;14.1;12.2; 12.5; 10.7	14.1;14.3;12.7; 12.6;11.9	9.8;12.1;11.6; 13.1;12.0	14.5;14.1;14.0; 14.0;11.4
漆膜连续性	个	小于 5 个/30m	0	0	0	0
卷绕	-	1D 卷绕不开裂	合格	合格	合格	合格

注：常规性能检测参照 GB 6109.11-1990《漆包圆绕组线 第 11 部分：200 级聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合漆包铜圆线》执行

3.3 耐电晕性能

Al₂O₃ 基纳米复合颗粒的引入可以大大提高成品线的耐变频寿命，采用两层耐电晕漆包线漆结构的线的耐变频寿命要优于采用单层耐电晕漆包线漆结构的。采用 PE-CR/PEI-CR/PAI 结构的线，常规性能完全能满足 200 级漆包线的各项性能国家标准，耐电晕寿命也能达到 GB/T 21707-2008《变频调速专用三相异步电动机绝缘规范》的要求（耐变频寿命检测条件：

100ns, 20kHz, 3kV, 155°C, $\geq 12h$)

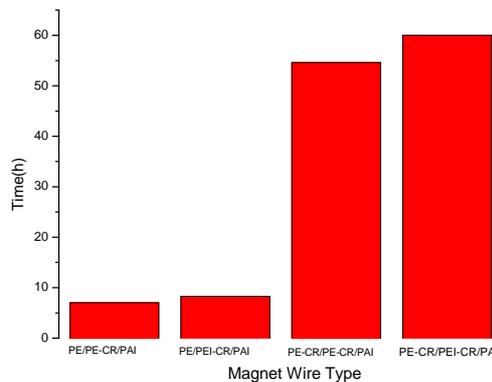


图 3 耐电晕寿命检测结果
Figure 3 Results of pulse endurance test

随着电晕放电时间的延续，耐电晕线的扭绞线间放电区域表面上逐渐析出白色粉末，并在扭绞线交界处有堆积现象。对耐电晕性能检测前后样线的表面分别进行了 SEM 分析，检测后的表面出现了大量缺陷。

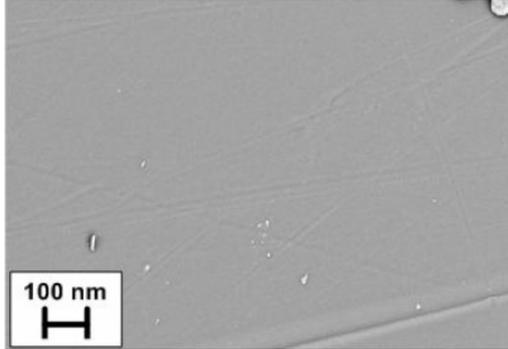


图 4 耐电晕性能检测前漆包线表面

Figure 4 SEM image of magnet wire surface before pulse endurance testing

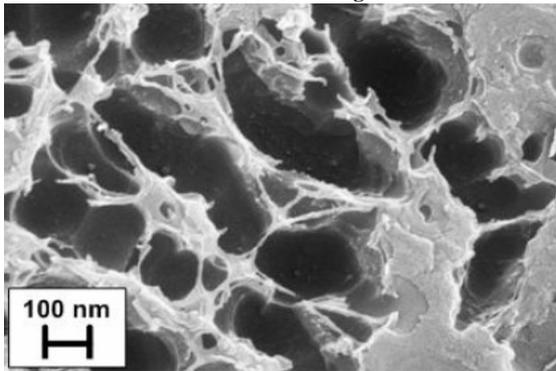


图 5 耐电晕性能检测后漆包线表面

Figure 5 SEM image of magnet wire surface after pulse endurance testing

一般学者认为^[6-8]，纳米粒子在提高耐电晕性能方面的作用不是单一的，而是电场均匀化、电子及紫外光屏蔽、热稳定等多种效应共同作用的结果。纳米 Al_2O_3 填充改性漆包线漆涂制的漆包线经过电晕放电破坏后，析出的纳米 Al_2O_3 微粉层能改善间隙中的电场分布特性，并通过电动力的作用自适应迁移使间隙的电场分布趋于均匀化。纳米 Al_2O_3 层在绝缘表面形

成电子屏蔽层，可捕获来自放电的电荷，并通过高电导率的纳米 Al_2O_3 微粉层使积聚的电荷沿表面扩散。这一纳米 Al_2O_3 微粉层还能吸收来自电晕放电且对绝缘有光化学降解作用的紫外线，将光能转化为热能后通过良好的导热性扩散掉，从而起到紫外线屏蔽效应。变频电机的电晕放电发热对绝缘的电化学和光化学降解有一定促进作用，纳米 Al_2O_3 在绕组绝缘中也起到了热稳定化效应。由于纳米级氧化物层的存在及其对内绝缘层的这些保护作用，使得耐电晕漆包线有了更长的耐电晕寿命。

4 结论

4.1 耐电晕漆包线漆 PE-CR 和 PEI-CR，采用 PE-CR/PEI-CR/PAI 结构的漆包线的耐电晕性能最好，完全可以满足 200 级耐电晕漆包线的要求。

4.2 PE-CR/PEI-CR/PAI 结构的耐电晕漆包线可以应用于变频电机

References (参考文献)

- [1] Jeff Anderson, Scott Lebruska. Stress related failures and testing of inverter driven motors [C]. Proceedings of the Electrical/Electronics Insulation Conference, Sep 22~25. 1997. 151-154.
- [2] Yin Weijun. Dielectric properties of an improved magnet wire for inverter-fed motors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(4): 17-23.
- [3] Yin W. Failure Mechanism of Winding Insulations in Inverter - fed Motors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, (6): 18-23.
- [4] Barta Yin W, et al. Improved magnet wires for inverter fed motors[C]. EASA Phoenix 1996.
- [5] Bonnett A H. Available insulation systems for PWM inverter fed motors[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1998, (1 / 2): 15-24.
- [6] Yin W, Bultemeier K, Barta D, et al. Critical factors for early failure of magnet wires in inverter-fed motors[C]. Conference on electrical insulation and dielectric phenomena(CEIDP), Annual Report, 1995: 258-261.
- [7] He Enguang, Liu Xuezhong. Influence of nano TiO_2 filler on the corona-resistant magnetic wire insulation performance of inverter-fed motor[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2003 (18) : 72-77.
(何恩广, 刘学忠. 纳米 TiO_2 填料对变频电机耐电晕电磁线绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2003 (18) : 72-77.)
- [8] Okamoto T, et al. Partial discharge resistant mechanism of newly developed enameled wire[C]. Conference on electrical insulation and dielectric phenomena(CEIDP), Minneapolis, 1997: 512-515.