

# 军工船舶发电机用特种漆包线的研制

汤晓水, 龙香林, 赖维东, 罗至勇

(江西铜业加工事业部, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 为提升漆包线产品的技术水平与行业市场竞争力, 使产品进入漆包线产品的高端市场, 扩大公司漆包线新品种与技术储备, 提升公司科研创新和新产品的研发能力, 与客户合作开展对军工船舶发电机用特种漆包线的研制。根据特种漆包线的性能要求和关键技术, 对其漆膜绝缘材料的选择、产品结构的设计与优化及研制的生产工艺技术进行探讨, 研制出的特种漆包线通过对其性能考核, 完全满足客户的各项性能指标要求。

**关键词:** 船舶发电机; 特种漆包线; 附着性; 耐浸渍漆; 工艺技术

中图分类号: TM245+.1

文章编号: 1009-3842(2020)05-0019-05

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research and Development of Special Enamelled Wire for Military Ship Generator

TANG Xiao-shui, LONGXiang-lin, LAI Wei-dong, LUO Zhi-yong  
(1. Jiangxi Copper Processing Division, Nanchang 330096, Jiangxi, China  
2. JCC-YATES Copper Foil Inc., Nanchang 330096, Jiangxi, China)

**Abstract:** In order to improve the technical level and market competitiveness of enamelled wire products, to make the products enter the high-end market of enamelled wire products, expand the company's new varieties and technical reserves, and enhance the company's research and innovation and research and development ability of new products, the special enamelled wire for military ship generator is developed by cooperating with customers. According to the performance requirements and key technologies of the special enamelled wire, the selection of the film insulation materials, the design and optimization of the product structure and the production technology of the development are discussed, the developed special enamelled wire can fully meet the requirements of various performance indicators of customers through the performance evaluation.

**Keywords:** ship generator; special enamelled wire; adhesion; resistance to impregnating varnish; process technology

## 1 引言

随着漆包线市场竞争的日趋激烈, 目前常规的漆包线品种由于工艺技术成熟、稳定, 漆包线行业利润已进入微利时代, 而企业为了生存和发展, 必须要加大新产品的研发力度, 尤其是要对新能源汽车、5G、军工、轨道交通等目前国内新兴领域用特种漆包线新产品的研发, 以提升产品的技术水平与行业市场竞争力。我国在加大水电、火电、核电等电站建设的同时, 也引进了西门子、阿尔斯通、三菱重工等国外一些大型发电机组的

制造加工技术。而漆包线产品属于制造发电机组的核心部件, 大多数是采购进口的漆包线, 导致发电机组的制造加工成本大幅增加。因此, 国内的一些大型的发电机制造厂商, 例如东方电机、上海气发、哈尔滨电气等开始进行漆包线国产化的研究, 尤其是国内的一些制造发电机组的军工企业, 为突破国外技术的封锁以及原材料的采购限制, 进一步加快了对制造发电机组用特种漆包线国产化的研究进程。所以也催生了一大批大型发电机用特种漆包线的制造生产厂家。我公司面对国内的生产需求, 与国内一家生产军工船舶发

收稿日期: 2019-12-12

作者简介: 汤晓水(1971-), 男, 江西永新人, 高级工程师, 主要从事漆包线研发、生产技术管理工作。E-mail: bang9977@163.com

电机的知名企业合作, 研制出军工船舶发电机用耐热等级为 200 级、 $\Phi 2.00\text{mm}$  以上大规格、具有零针孔、高柔韧性、高附着性和高耐浸渍漆等性能要求的特种漆包线, 使产品进入军工船舶发电机行业中漆包线产品的高端市场, 从而扩大了公司漆包线新品种与技术储备, 提升公司的技术创新能力和新产品研发能力。

## 2 特种漆包线的性能要求

适用于新型军工船舶发电机用特种漆包线产品必须满足恶劣的工作环境需要, 除了需长期承受高温、高湿、高盐雾、粉尘、烟雾、油雾等侵蚀破坏和设备震动、冲击等机械作用破坏外, 还要耐受特殊情况下发电机受水喷溅或者短暂浸泡, 从而加剧了发电机绝缘材料的老化, 导致发电机绕组用漆包线容易发生龟裂。因此必须对发电机绕组按照湿热电机的要求经过特殊的浸漆处理, 使其良好的防潮、烟雾和防盐雾等性能。该系列军工船舶发电机用特

种漆包线产品必须满足  $180^\circ\text{C}$  高温烘烤后反复二次真空压力浸漆的特殊要求, 并且在耐热等级 200 级的绝缘系统中长期稳定运行, 因而当特种漆包线产品绕制成电机绕组后浸漆, 能够满足不同的浸渍漆对漆膜附着性要求<sup>[4]</sup>。由于军工船舶发电机功率较大, 要求相应应用的漆包线规格也较大 ( $\Phi 2.00\text{mm}$  以上), 而生产漆包线规格越大, 伴随其柔韧性和附着性的下降。以上条件决定了军工船舶发电机用特种漆包线产品在工艺技术和产品的功能上必须具有创新性, 耐高温、零针孔、良好的柔韧性、高附着性和高耐浸渍漆等性能是该系列规格产品的特性亮点。

研制军工船舶发电机用特种漆包线系列产品的型号为 Q(ZY/XY)-2/200, 以该系列规格中的  $\Phi 2.24\text{mm}$  为例, 其性能指标应在完全符合 GB/T6109.20-2008 标准外, 还必须满足客户的产品技术标准要求, 从而根据该规格产品的性能指标要求制定产品的内控检验标准<sup>[2-3]</sup>, 其性能指标对比如表 1 所示。

表 1 特种漆包线性能指标对比

项目	GB/T6109.20	客户标准	对比结果
外观	漆膜应光滑、连续、无斑纹、无气泡和杂质	漆膜应光滑、连续、无斑纹、无气泡和杂质	
导体径 /mm	$2.24 \pm 0.22$	$2.24 \pm 0.22$	
导体不圆度	0.022	0.020	高于
漆膜偏心度	/	1.2 以下	GB/T6109.20
最小漆膜厚度 /mm	0.77	0.77	
最大外径 /mm	2.355	2.355	
直流电阻 $20^\circ\text{C} /\Omega$	$\leq 0.004462$	$\leq 0.004462$	
伸长率 /%	$\geq 33$	$\geq 33$	
回弹角 /度	$\leq 5$	$\leq 5$	
柔韧性 / 附着性	拉伸 32% 后, 漆层不开裂 扭转 49 转数后漆层不失附着性	拉伸 35% 后, 漆层不开裂 扭转 65 转数后漆层不失附着性	高于 GB/T6109.20
热冲击	拉伸 25% 后, 漆层不开裂	拉伸 25% 后 1D 卷绕, 漆层不开裂	
软化击穿	$320^\circ\text{C}$ 下 2min 内不击穿	$320^\circ\text{C}$ 下 2min 内不击穿	
耐刮	最小 18.2N, 平均 15.4N	最小 18.2N, 平均 15.4N	
耐溶剂	铅笔硬度 1H 漆层不被刮破	铅笔硬度 2H 漆层不被刮破	
耐油性	/	铅笔硬度 2H 漆层不被刮破	
击穿电压 /kV	室温 $\geq 5.0\text{KV}$	室温 $\geq 9.0\text{KV}$	高于
盐水针孔	/	12V/6m 内针孔数不超过 0 个	GB/T6109.20
静摩擦系数	/	不大于 0.05	
高耐浸渍漆性能	/	$180^\circ\text{C}$ 高温烘烤后反复二次真空压力浸漆, 漆层不脱落	

从表 1 数据分析可知, 军工船舶发电机用特种漆包线系列产品对质量要求很苛刻。其导体不圆度、漆膜偏心度、柔韧性、附着性、热冲击、耐溶剂、耐油性、击穿电压、盐水针孔、静摩擦系数、高耐浸渍漆性能等性能指标均高于 GB/T6109.20-2008 标准。

### 3 特种漆包线关键技术与主要研究内容

#### 3.1 关键技术

**样品品质考核:** 漆包线产品是否符合客户的技术标准要求。即研制的漆包线样品应通过客户进行的各种性能检测, 来验证漆包线的机械性能、化学性能、电性能、热性能等各项性能指标与客户的技术标准的符合性。

**绕线使用性能:** 漆包线是否适用绕组绕制工程。即研制的漆包线静摩擦系数小, 表面润滑性能好, 确保嵌线性能优良, 槽满率低, 绕制成电机绕组后漆包线漆膜完好无破损, 绝缘抗击穿性能良好<sup>[6]</sup>, 漆包线符合客户的使用性能要求。

**耐浸渍漆工艺性能:** 漆包线是否适合军工船舶发电机的高耐浸渍漆要求。即研制的漆包线经绕制成发电机绕组后浸漆, 能够满足不同的浸渍漆以及 180℃ 高温烘烤后反复二次真空压力浸漆对漆包线漆膜附着性的特殊要求。

**船舶发电机整机可靠性:** 漆包线是否能满足军工船舶发电机使用要求。即组装后的船舶发电机必须通过中华人民共和国国家军用标准《军用装备实验室环境实验方法》(GJB150A) 的“三防试验”(防湿热、防盐雾、防霉菌)及振动、冲击、倾斜、水喷溅试验<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 主要研究内容

##### 3.2.1 特种漆包线漆膜绝缘材料的选择

通过对军工船舶发电机用特种漆包线使用不同的绝缘材料涂层进行附着性、耐浸渍漆试验、热冲击、耐溶剂、耐油性、表面滑性等性能进行对比分析以及绕制成绕组时的张力控制进行研究, 确定适合该性能特性的特种漆包线使用的绝缘材料, 使漆包线漆膜的柔韧性大于漆膜与裸铜线之间的附着力, 满足漆包线高附着性和高耐浸渍漆等性能要求。不同的绝缘材料涂层的性能对比如表 2 所示。

表 2 不同的绝缘材料涂层的性能对比

性能	聚酯亚胺 + 聚酰胺酰亚胺	赛克改性高温聚酯 + 聚酰胺酰亚胺	赛克改性高温聚酯 + 聚酰胺酰亚胺	赛克改性高温聚酯 + 聚酰胺酰亚胺 + 自润滑漆
扭转 65 转数后漆层应不失附着性	差(脱落)	良	优	优
拉伸 25% 后 1D 卷绕, 漆层不开裂	良	优	优	优
拉伸 25% 后 1D 卷绕经 220℃ 2H, 差(开裂)漆层不开裂		良	优	优
耐溶剂	优	优	优	优
耐油性	优	优	优	优
耐浸渍漆	差(开裂)	良	优	优
表面滑性(摩擦系数)	良	良	良	优
张力控制	良	良	良	优

从表 2 分析可知, 船舶发电机用特种漆包线使用的绝缘材料确定为赛克改性高温聚酯 + 聚酰胺酰亚胺 + 自润滑漆 (PE+AI+AI 自润滑) 这三种绝缘油漆的组合。即底涂采用耐热指数 200 级赛克改性高温聚酯, 中涂采用耐热指数 220 级聚酰胺酰亚胺, 面涂采用耐热指数 220 级聚酰胺酰亚胺自润滑漆, 其产品的柔韧性、附着性和耐浸渍漆性能以及绕制性能是最优的。

##### 3.2.2 特种漆包线产品结构的设计与优化

目前我公司生产  $\Phi 1.00\text{mm}$  以下规格的耐冷媒漆包线采用聚酯亚胺复合聚酰胺酰亚胺产品结构完全满足客户的需求。但众所周知, 生产漆包线规格越大, 柔韧性和附着性则越差。因而需要对  $\Phi 2.24\text{mm}$  大规格漆包线产品结构重新设计优化, 由于聚酯亚胺漆膜弹性较差, 将耐冷媒漆包线的绝缘结构由聚酯亚胺 + 聚酰胺酰亚胺改为赛克改性高温聚酯 + 聚酰胺酰亚胺 + 自润滑漆, 利用赛克改性高温聚酯漆膜的高附着性、聚酰胺酰亚胺漆膜的高柔韧性和漆膜的零针孔性, 以满足客户的特殊性能要求<sup>[5]</sup>。

根据以上确定特种漆包线使用的绝缘材料, 对不同绝缘涂层比例涂覆后的特种漆包线进行附着性、耐浸渍漆试验、热冲击、耐溶剂等性能测试对比, 如表 3 所示。根据测试对比结果并结合生产成本控制情况, 确定最终的涂层比例为底涂层: 中涂

层：面涂层 =60% : 30% : 10%，这样不仅能满足漆包线高附着性和高耐浸渍漆等加工要求，而且具有良好的机械、化学、绝缘性能。

表 3 不同绝缘涂层比例的性能测试对比

性能	70%:20%:10%	65%:35%:10%	60%:30%:10%
扭转 65 转 数后漆层不 失附着性	良	优	优
拉伸 25% 后 1D 卷绕， 漆层不开裂	良	优	优
拉伸 25% 后 1D 卷绕经 220℃ 2H， 漆层不开裂	良	良	优
耐溶剂	良	优	优
耐油性	优	优	优
耐浸渍漆	良	良	优

## 4 特种漆包线研制的生产工艺技术

根据军工船舶发电机用特种漆包线的特殊性能要求，结合加工事业部漆包线厂现有的工艺装备和多年来的技术储备以及生产工艺路线，在此基础上确定其生产设备、主要原材料、最佳涂漆、退火和烘烤工艺控制，从而制定最佳的工艺方案，确保产品研制成功。

### 4.1 生产工艺流程图

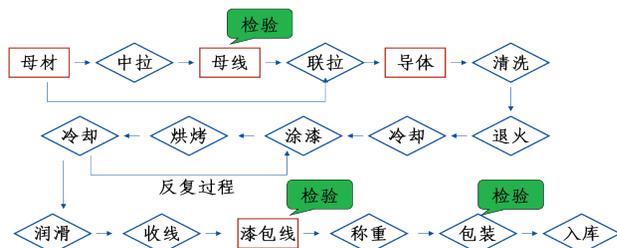


图 1 生产工艺流程图

### 4.2 特种漆包线 Q (ZY/XY) -2/200 Φ2.24mm 研制的生产工艺

#### 4.2.1 主工艺设备的选择

生产设备可以使用奥地利 MAG 公司生产的 MOZART V6/4-4/20D 立式连拉连包高速漆包机。裸铜线进线规格 Φ1.0-Φ3.5mm；生产规格为 Φ0.50-2.00 mm（经改造目前最大可生产

Φ2.50mm）；收线机械速度最高 352m/min；模具涂漆道次 24 道；最大烘烤温度 700℃，最大退火温度 700℃，最大风机转速 4500rpm 等。

#### 4.2.2 主要原材料选择

(1) 立式漆包机裸铜线进线采用由 SCR 工艺生产的型号规格为 TR Φ2.60 mm 的低氧铜杆；

(2) 绝缘涂料选用艾伦塔斯公司生产的涂料组合：赛克改性高温聚酯 PE (966/40HVS) + 聚酰胺酰亚胺 PAI(595/36MB)+ 自润滑漆 PAI(595/36MBA)；

(3) 特种漆包线产品表面润滑油采用 1.0% 浓度的合成石蜡 (848/330) 溶液。以改善漆包线表面滑性，降低静摩擦系数。

#### 4.2.3 研制的生产工艺

(1) 拉丝、涂漆工艺。根据客户对漆包线的导体径、漆膜厚度等性能要求及上述所确定的各涂层比例，确定拉丝、涂漆工艺如下。

拉丝模具排列：2.261 (±0.001) -2.512mm。

涂漆模具排 (11+5+1)：

2.295-2.300-2.305-2.310-2.315-2.320-2.325-2.330-2.335-2.340-2.345mm (PE) +2.350-2.355-2.360-2.360-2.365mm (PAI) +2.365mm (自润滑 PAI)。

(2) 退火和烘烤工艺。

通过漆膜介质损耗 ( $\text{tg } \delta$ ) 来验证漆包线漆膜的交联固化反应程度以及柔软度，从而确定漆包机的退火温度、烘炉固化温度、线速度，循环、排废风机转速等工艺技术参数如下：退火温度：590℃ (一区) +580℃ (二区)；烘烤温度：烘炉固化温度 580℃；线速度：35.0m/min；风机转速：循环风机转速：4200rpm，排废风机转速：2200rpm。

#### 4.2.4 过程质量控制要求

漆包线是连续作业的生产模式，为研制出性能稳定、均一性高以及加工性能优良的漆包线，必须对其制造过程严加控制，要严格按漆包线生产过程质量控制流程图作业。漆包线生产线上安装在线粒子针孔检测仪 (HVC)，对其产品质量进行持续监控，杜绝漆包线表面粒子及针孔，保证漆膜的连续性；通过对漆膜剖面的光学分析及偏心比度的测试，对产品漆膜涂覆的均一性进行控制，保证漆膜的一致性；加强工艺卫生、工艺纪律的执行以及关键质量控制点的检查。

## 5 性能考核

### 5.1 特种漆包线漆膜介质损耗测试曲线

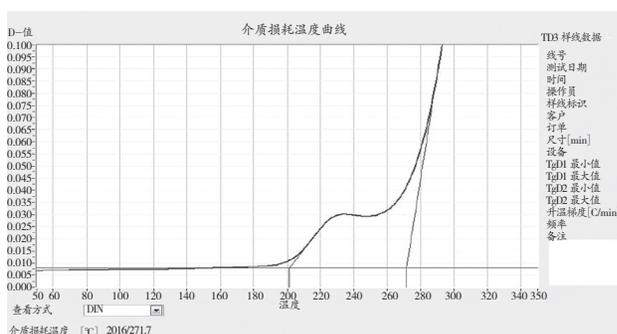


图2 特种漆包线漆膜介质损耗测试曲线

### 5.2 特种漆包线常规性能及耐浸渍漆性能考核

性能考核产品为型号规格 Q (ZYIXY) - 21200Φ2.24mm, 研制样品方法为 GB/74074-2008, 检验日期 2018 年 9 月 2 日。

表 4 特种漆包线常规性能及耐浸渍漆性能检测数据

检验项目	客户标准	实测结果
外观	漆膜应光滑、连续、无斑纹、无气泡和杂质	合格
导体径/mm	2.24 ± 0.022	2.237-2.241
导体不圆度	0.020	0.004
漆膜偏心度	1.2 以下	1.08
最小漆膜厚度/mm	0.77	0.99
最大外径/mm	2.355	2.338
直流电阻 20℃/Ω	≤ 0.004462	0.004437
伸长率/%	≥ 33	42/41/43/45/46
回弹角/度	≤ 5	4.07
柔韧性/附着性	拉伸 35% 后, 漆层不开裂	合格
	扭转 65 转数后漆层不失附着性	72/73/70/75/76
热冲击	拉伸 25% 后 1D 卷绕, 漆层不开裂	合格
软化击穿	320℃ 下 2min 内不击穿	合格
耐刮	最小 18.2N, 平均 15.4N	20.4/16.2、21.1/17.3
耐溶剂	铅笔硬度 2H 漆层不被刮破	合格
耐油性	铅笔硬度 2H 漆层不被刮破	合格
击穿电压/kV	室温 ≥ 9.0kV	15.6/15.3/14.9 /15.4/15.9
盐水针孔	12V/6m 内针孔数不超过 0 个	0/0/0/0
静摩擦系数	不大于 0.05	0.045/0.047/0.041 /0.045/0.042
高耐浸渍漆性能	180℃ 高温烘烤后反复二次真空压力浸漆, 漆层不脱落	5 组样品都合格
结果判定		合格

### 5.3 特种漆包线绕制成船舶发电机整机可靠性考核

表 5 军工船舶发电机整机可靠性实验结果

检验项目	执行标准	实测结果
湿热实验	GJB150.9A-2009	合格
盐雾实验	GJB150.11A-2009	合格
霉菌实验	GJB150.10A-2009	合格
振动实验	GJB150.16A-2009	合格
冲击实验	GJB150.18A-2009	合格
倾斜实验	GJB150.23A-2009	合格
水喷溅实验	GJB150.8A-2009	合格
结果判定		合格

通过对研制的特种漆包线的漆膜介质损耗测试曲线可知, 比对分析漆膜固化程度, 其漆膜交联固化程度处于最佳状态; 通过对研制的特种漆包线常规性能及耐浸渍漆性能检测数据分析可知, 特种漆包线的品质考核、绕线使用性能、耐浸渍漆工艺性能等各项指标完全满足客户的技术标准; 通过对研制的特种漆包线绕制成船舶发电机整机可靠性实验结果分析可知, 组装后船舶发电机的“三防试验”及振动、冲击、倾斜、水喷溅试验全部通过国家军用标准 GJB150A 的检验。

## 6 结语

江西铜业加工事业部漆包线厂与知名军工企业合作成功开发研制出军工船舶发电机用特种漆包线产品, 产品满足客户的各项技术要求, 其中附着性、高耐浸渍漆性能和整机可靠性等指标明显优于国内外其他漆包线生产厂家, 2019 年 3 月份开始进入批量生产并供货。该产品成为公司漆包线产品中的高端产品, 为挖掘和抢占中漆包线高端产品市场奠定基础, 从而扩大了公司漆包线新品种与技术储备, 提升了科研创新和新产品的研发能力。

### 参考文献:

- [1] GJB150A-2009 军用装备实验室环境实验方法[S].
- [2] GB/T4074-2008 绕组线试验方法[S].
- [3] GB/T6109.20-2008 漆包圆绕组线第 20 部分[S].
- [4] 刘洁. 船舶电力推进系统电机高耐浸渍漆包线的研发[J]. 科技风, 2014(6): 36-37.
- [5] 蒋英. 大规格高附着性漆包线开发[J]. 铜业工程, 2015(3): 24-27.
- [6] 严华, 杨文中. 提高船舶发电机绝缘的方法[J]. 船电技术, 2017(8): 26-27.