

# 复合绕包绝缘航空导线的烧结裂纹分析及工艺优化

夏浩杰, 胡滔

(长沙恒飞电缆有限公司, 长沙 410000)

**摘要:**复合绕包绝缘航空导线是航空航天领域重要的动力传输元器件,烧结后绝缘容易出现裂纹,进而导致产品绝缘击穿报废。以导体为铝合金、内绝缘为聚酰亚胺/聚四氟乙烯复合薄膜、外绝缘为聚四氟乙烯生料带的95 mm<sup>2</sup>航空导线为研究对象,研究导线的绝缘绕包工艺和烧结工艺,分析绝缘产生裂纹的主要原因,并对其工艺进行改进。研究表明,合理选择绕包和烧结工艺参数,可以有效消除绝缘烧结裂纹的产生。

**关键词:**航空导线;绕包;烧结裂纹;工艺优化

中图分类号:TM249

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2024)03-0041-04

## Sintering Cracks Analysis and Process Optimization for Aerospace Wire with Wrapped Insulation

XIA Haojie, HU Tao

(Changsha Hengfei Cable Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** As electronic component in aircraft, aerospace wire with wrapped insulation is prone to cracks which could result in scrapping after sintering. Main reasons of sintering cracks in 95 mm<sup>2</sup> wire with wrapped insulation were studied and the process of wrapping and sintering was improved. The results indicated that by selecting parameters reasonably, sintering cracks could be eliminated effectively.

**Key words:** aerospace wire; wrap; crack; process optimization

### 0 引言

复合绕包绝缘航空导线作为航空航天领域重要的电子元器件之一,主要用于航空航天及安全可靠性要求高的场合<sup>[1]</sup>。该导线具有重量轻、外径小、耐环境性能,以及电气性能稳定可靠等特点,其绝缘层代表结构为聚酰亚胺(PI)/聚四氟乙烯(PTFE)复合薄膜和PTFE生料带组合<sup>[2]</sup>。

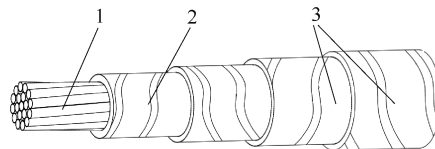
受绝缘结构特点和材料特性的制约,导线表面在烧结过程中易产生裂纹。为了解决该问题,本研究研究了复合绕包绝缘航空导线烧结裂纹的形成原因,并据此优化了绕包和烧结工艺。

### 1 改进前产品结构、工艺和设备

#### 1.1 结构设计

本工作以截面面积为95 mm<sup>2</sup>的复合绕包绝缘航空导线为例,依据GJB 773B—2015《航空航天用

含氟聚合物绝缘电线电缆通用规范》设计。复合绕包绝缘航空导线的导体结构采用铝合金单线正规绞合,绝缘层结构采用PI/PTFE复合薄膜和PTFE生料带复合绕包<sup>[3]</sup>,其结构示意图见图1。



1—导体;2—PI/PTFE复合薄膜;3—PTFE生料带

图1 复合绕包绝缘航空导线结构示意图

由图1可知,复合绕包绝缘航空导线的绝缘层采用多层复合绕包结构,第一层为PI/PTFE复合薄膜,第二层至第四层为PTFE生料带<sup>[4]</sup>,每层绕包遮盖率均不小于50%,相邻层绕包方向相反,且绕包完成后应进行烧结熔封。烧结后绝缘平均厚度不小于0.35 mm,最薄点厚度不小于0.30 mm。

PI/PTFE复合薄膜具有优异的电气绝缘性能及耐高温性能,但耐水解性能相对较差<sup>[5]</sup>,可作为内层绝缘使用。PTFE生料带经烧结后具有优异的电气绝缘性能,以及耐高温、耐水解、耐腐蚀等特点,可

收稿日期:2023-06-27

作者简介:夏浩杰(1990-),男,工程师。

E-mail:1160057934@qq.com

作为外层绝缘使用。

## 1.2 绝缘生产工艺

绝缘出现裂纹的绕包烧结工艺包括绝缘绕包和绝缘烧结。

绝缘绕包。PI/PTFE 复合薄膜绕包张力为 $(2.5 \pm 0.1) \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , 绕包角为 $68^\circ \pm 2^\circ$ , 绕包搭盖率为 $55\% \pm 2\%$ ; PTFE 生料带绕包张力为 $(1.8 \pm 0.1) \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , 绕包角为 $68^\circ \pm 2^\circ$ , 绕包搭盖率为 $55\% \pm 2\%$ 。

绝缘烧结。绝缘烧结时 8 个加热区的温度分别为 370, 400, 430, 430, 430, 430, 420, 420  $^\circ\text{C}$ , 线速率为 $0.7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , 电缆出烧结炉后的冷却方式为室温空气冷却。

## 1.3 绝缘生产设备

绕包设备。使用卧式主动放带包带机, 型号为 WRBJ-Z3B, 最高转速为 $1\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 采用包带、送带、引取三轴伺服系统, 收线张力通过磁粉张力控制。

烧结设备。使用卧式高温线缆烧结线, 型号为 WRSJ-22A, 单片陶瓷加热片功率为 0.6 kW, 共有 16 片陶瓷加热片, 最高加热温度为 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , 长度为 5 m, 最高线速度为 $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

火检设备。使用工频火花机, 型号为 GP-25-200-III, 功率为 1 kW, 使用频率为 50~60 Hz。

## 2 烧结裂纹分析

对开裂的绝缘层进行剖析, 发现其开裂现象出现在 PTFE 生料带绕包层, PI/PTFE 复合薄膜并未发生开裂现象。因此, 本工作主要针对 PTFE 生料带绝缘层烧结裂纹进行分析。

考虑到生产设备启动和停机时速率和温度的匹配度不稳定等因素的影响, 试样分别取自烧结样线的前段、中断和后段, 尽量避免或减少因速率和温度的匹配度对裂纹走向、裂纹形状等产生的影响, 以确保裂纹分析准确。

### 2.1 绕包工艺影响

PTFE 生料带绕包时, 有时会因包带张力参数选择不当等导致包带绕包质量不稳定, 影响烧结的熔封效果, 生产出质量不达标产品。

对已出现内部烧结裂纹的航空导线样品绝缘层进行投影, 绝缘内部裂纹投影见图 2。

由图 2 可知, 绝缘层内部存在未完全黏结的裂纹, 裂纹表面光滑, 且具有间断性, 出现在 PTFE 生料带层与层之间。由投影形状和特点可知, 绕包过程中包带受到的张力较小, 与前一层包带贴合不够紧密, 导致材料组织在转为非结晶状态后因接触不

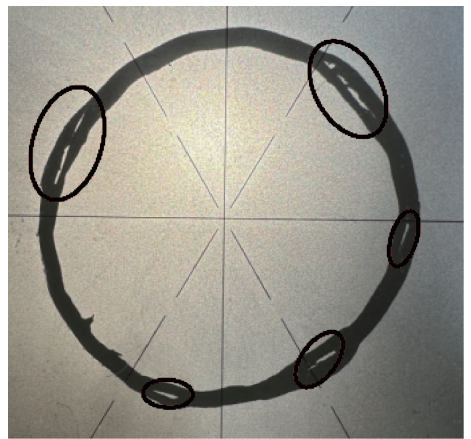


图 2 绝缘内部裂纹投影

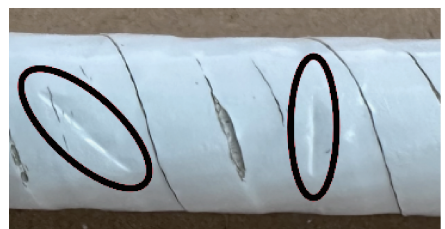
够紧密无法通过熔融扩散黏结成一体, 最终在绝缘层内部形成类似裂纹的缝隙。

### 2.2 烧结工艺影响

绝缘表面缺陷见图 3。



(a) 烧结裂纹



(b) 压痕

图 3 绝缘表面缺陷

由图 3 可知, 绝缘表面烧结裂纹的扩展方向基本为直线, 主要沿着包带纵向开裂, 与包带加工时压延形成的纤维组织方向一致, 如图 3(a) 所示。同时, 在导线冷却状态下按压绝缘表面会出现压痕, 说明 PTFE 生料带绝缘层烧结密实度不够, 如图 3(b) 所示。

由图 3(a) 可知, 烧结裂纹的扩展具有方向性, 呈现沿包带组织纤维方向扩展的基本趋势, 具有明显的应力开裂特征。说明, 在该烧结温度下, 由于导线规格较大, 导体吸热量大, PTFE 生料带组织并未完全由结晶状态转为非结晶状态, 包带在收缩过程中因组织状态不均匀产生了较大的内应力; 同时, 包带张力未完全消除, 因 PTFE 生料带纵向抗拉强度远大于横向抗拉强度, 导致包带沿纵向方向形成

裂纹。

综上所述,复合绕包绝缘航空导线绝缘包带的绕包张力、烧结温度和速率的匹配性是导致烧结裂纹出现的主要原因。

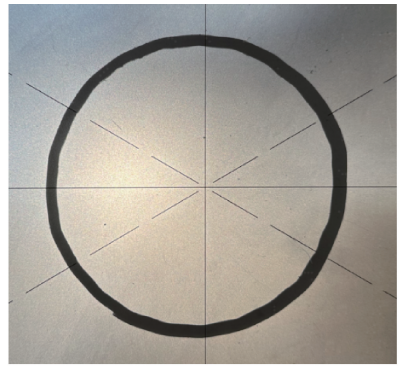
### 3 工艺优化

根据烧结裂纹的形成原因优化绝缘生产工艺,提高其外观质量、电性能和机械物理性能。

1) 优化绕包工艺。在生产过程中,针对绝缘层内部产生缝隙的问题,在原有绕包工艺的基础上,对部分工艺参数进行了调整。优化后 PTFE 生料带绕包张力为  $(2.2 \pm 0.1) \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ,其余参数不变。

2) 优化烧结工艺。为了避免烧结过程中绝缘表面形成裂纹,优化了大截面复合绕包绝缘航空导线的烧结工艺,调整了烧结工艺参数。优化后 8 个加热区的温度分别为 370, 400, 460, 460, 460, 460, 445, 445  $^{\circ}\text{C}$ ,收线速率不变,电缆出烧结炉后的冷却方式为室温空气冷却,工艺优化后绝缘层横切面和外观见图 4。

由图 4(a)可知,绝缘层横切面未见缝隙,且均匀连续,说明原本分离的 PTFE 生料带在高温条件下通过熔融扩散已经黏结成一体,达到了熔封效果。由图 4(b)可知,绝缘外观光滑,无裂纹,且色泽均匀,说明 PTFE 生料带在高温条件下已完全由结晶状态转为非结晶,组织扩散均匀,消除了绕包时产生的内应力,同时材料组织在收缩过程中未产生较大的内应力。



(a) 烧结后绝缘层横切面投影



(b) 烧结后绝缘外观

图 4 工艺优化后绝缘

### 4 产品性能验证及对比

根据 GJB 17A—2020《航空电线电缆试验方法》中的方法对优化前和优化后的导线进行电性能和耐环境性能试验,产品的主要性能和试验结果对比见表 1。

表 1 产品主要性能和试验结果对比

试验项目	技术要求	试验结果	
		优化前	优化后
绝缘平均厚度/mm	$\geq 0.35$	0.42	0.41
绝缘最薄处厚度/mm	$\geq 0.30$	0.40	0.38
电线外径/mm	$\leq 15.0$	13.7	13.6
浸水电压试验	浸水 5 h 后,电压为 AC 2.5 kV,通电时间为 1 min,不击穿	不合格	合格
绝缘电阻/ $(\text{M}\Omega \cdot \text{km})$	浸水 4 h 后,电压为 DC 1.0 kV,通电时间为 1 min,绝缘电阻不小于 $1.5 \times 10^3 \text{M}\Omega \cdot \text{km}$	$1.9 \times 10^3$	$8.6 \times 10^3$
绝缘表面电阻/ $(\text{M}\Omega \cdot \text{mm})$	电压为 AC 2.5 kV,通电时间为 1 min,试验期间无电弧、冒烟或燃烧	不合格	合格
	电压为 DC 1.0 kV,通电时间为 1 min,绝缘表面电阻不小于 $1.3 \times 10^4 \text{M}\Omega \cdot \text{mm}$	$6.8 \times 10^4$	$2.7 \times 10^6$
绝缘可剥性	绝缘应易剥离且不损伤导体	合格	合格
老化试验	试验温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ ,试验时间为 500 h,绝缘应无开裂及其他损伤	合格	合格
	老化试验后,电压为 AC 2.5 kV,通电时间为 5 min,不击穿	不合格	合格
粘连试验	试验温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ ,试验时间为 24 h,电线相邻圈和相邻层应易分开且不出现在粘连现象	合格	合格
低温弯曲	试验温度为 $(-65 \pm 3) ^{\circ}\text{C}$ ,试验时间为 4 h,绝缘应无开裂及其他损伤现象	合格	合格
	低温弯曲后,电压为 AC 2.5 kV,通电时间为 5 min,不击穿	不合格	合格

表 1(续)

试验项目	技术要求	试验结果	
		优化前	优化后
盐雾试验	绝缘表面无皱纹、气孔、裂纹等缺陷	合格	合格
	耐盐雾后,电压为 AC 2.5 kV,通电时间为 5 min,不击穿	不合格	合格
	耐盐雾后浸水 4 h,施加电压为 DC 1.0 kV,通电时间为 1 min,绝缘电阻不小于 $1.5 \times 10^3 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$	合格	合格
浸液试验(4109号润滑油)	试验温度为 48~50 °C,试验时间为 24 h,外径变化率应不大于 5%,电线绝缘不开裂	合格	合格
	室温卷绕绝缘应无开裂	合格	合格
	浸液后,试验电压为 AC 2.5 kV,通电时间为 5 min,不击穿	不合格	合格
浸液试验(异丙醇)	试验温度为 20~25 °C,试验时间为 24 h,外径变化率应不大于 5%,电线绝缘不开裂	合格	合格
	室温卷绕绝缘应无开裂	合格	合格
	浸液后,试验电压为 AC 2.5 kV,通电时间为 5 min,不击穿	不合格	合格
外观	圆整光滑,无杂质、刮痕、裂纹、凹陷等	不合格	合格

由表 1 可知,工艺优化后,电缆外观圆整光滑,无杂质、刮痕、裂纹、凹陷等缺陷,外径由优化前的 13.7 mm 降低至 13.6 mm,且绝缘层仍易剥离不损伤导体。同时,通过工艺优化解决了电缆浸水电压试验击穿的问题,绝缘电阻和绝缘表面电阻由优化前的  $1.9 \times 10^3 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$  和  $6.8 \times 10^4 \text{ M}\Omega \cdot \text{mm}$  分别提高至  $8.6 \times 10^3 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$  和  $2.7 \times 10^6 \text{ M}\Omega \cdot \text{mm}$ ,浸液试验后的外径变化率由优化前的 0.12% 降低至 0.09%。

## 5 结束语

通过提高复合绕包绝缘航空导线生产工艺中 PTFE 生料带的绕包张力和烧结温度,使 PTFE 生料

带绕包层在烧结过程中充分熔融扩散,提高熔封效果,为复合绕包绝缘航空导线的普及提供参考。

## 参考文献:

- [1] 姜茂盛,刘美法,龚家俊. 聚酰亚胺复合绝缘导线的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2015(1):17-20.
- [2] 杨得亮,胡一东,闵俊,等. 新型航空用复合绝缘绕包线的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2007(5):8-10.
- [3] 中国人民解放军总装备部. 航空航天用含氟聚合物绝缘电线电缆通用规范:GJB 773B—2015[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2015.
- [4] 马红杰. 聚酰亚胺复合绝缘绕包型航空导线的改进[J]. 电线电缆,2018(6):23-26.
- [5] 蒋仁章,范涛. 聚酰亚胺航空导线发展历程及技术突破[J]. 电线电缆,2019(1):16-19.