

聚四氟乙烯/聚酰亚胺复合绝缘航空线载流量仿真

韩永进, 朱敏, 张振, 刘旌平*

(上海电缆研究所有限公司 特种电缆技术国家重点实验室, 上海 200093)

摘要:聚四氟乙烯/聚酰亚胺复合绝缘航空线是飞机中用量较大的一类线缆,其载流量对飞机的电气线路互连系统(EWIS)设计具有极其重要的作用。基于电磁热多物理场耦合模型,采用COMSOL软件对6 AWG、10 AWG、16 AWG这3种规格的聚四氟乙烯/聚酰亚胺复合绝缘航空线进行载流量建模仿真,并与实测数据和SAE AS50881H:2023中的数据进行对比,验证仿真结果的正确性。该研究可为航空线缆EWIS设计提供一种简单有效的方法。

关键词:航空线;载流量;COMSOL软件;仿真

中图分类号:V221

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2024)05-0036-05

Current Carrying Capacity Simulation of PTFE/PI Combined Insulated Aerospace Wires

HAN Yongjin, ZHU Min, ZHANG Zhen, LIU Jingping*

(State Key Laboratory of Special Cable Technology, Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: PTFE/PI combined insulated aerospace wires are extensively used in aerospace vehicles, and current carrying capacity is an important factor for the design of electrical wiring interconnection system(EWIS). Based on multi-physics coupled model, three specifications of wires, 6 AWG, 10 AWG and 16 AWG, were chosen to simulate current carrying capacity by COMSOL. Besides, simulation results were compared with measured data and the data from SAE AS50881H:2023, to verify the correctness of simulation. The study could provide a reference for the design of aviation EWIS without numbers of experiments.

Key words: aerospace wires; current carrying capacity; COMSOL; simulation

0 引言

载流量是指在特定的工况条件下,电缆能够连续承载而不使其稳定温度超过规定值的最大电流。电线电缆的载流量除受到本身材料的制约外,还受敷设方式、环境、海拔等众多因素的影响。近年来,关于中高压电缆的载流量仿真研究较多,而关于航空线缆的载流量仿真研究鲜有报道^[1-9]。

随着C919飞机的国产化,以及适航认证的要求,适航中心要求设计者提供相应的验证数据。由于飞行器结构复杂、运行环境苛刻,需要进行大量的试验验证。因此,设计者希望能够对电线电缆的相关参数进行模拟仿真,以减少长期繁重的试验。目前,航空线缆的允许载流量一般参照HB 5795—

2023《航空电线载流量》和SAE AS50881H:2023《航空航天器布线》^[10-11],标准中给出了单线载流量,以及高度修正系数、成束修正系数、线束负荷率等参数,由此可计算出线束在不同海拔的载流量。由于实际工况和设计方式复杂多变,标准中的数据无法满足实际应用需求,这就需要重新进行试验验证。

因此,本工作选取M22759/87-6-9、M22759/87-10-9、M22759/87-16-9这3种规格的聚四氟乙烯/聚酰亚胺(PTFE/PI)复合绝缘航空线,采用COMSOL软件建立电磁热多物理场耦合的载流量仿真模型,期望为航空线缆的设计选用提供方法和依据。

1 试验

1.1 试验样品

试验样品为M22759/87-6-9、M22759/87-10-9、M22759/87-16-9这3种规格的线缆,样品符合美国

收稿日期:2024-03-19

作者简介:韩永进(1982—),男,高级工程师。

*通信作者:liujingping@secr.com

航空线缆标准 SAE AS22759/87E:2022^[12], 线缆采用 PTFE/PI/PTFE 复合带和 PTFE 带复合绝缘结构, 导体材料为镀镍铜, 绝缘材料为 PI、PTFE, 结构示意图见图 1, 结构尺寸见表 1。

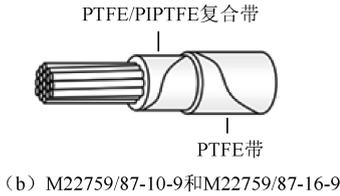
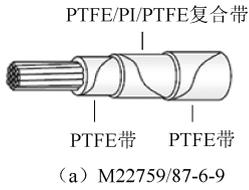


图 1 线缆结构示意图

表 1 线缆样品结构参数

型号	导体外径/mm	绝缘厚度/mm	线缆外径/mm
M22759/87-6-9	5.10	0.23	5.56
M22759/87-10-9	2.74	0.20	3.13
M22759/87-16-9	1.31	0.20	1.72

1.2 载流量试验

试验设备: 高温热电偶、正弦脉宽调制 (SPWM) 直流稳定电源、温湿度计。

试验方法: 控制环境温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, 将处理好的样品置于玻璃罩中心位置, 玻璃罩为圆筒状有机玻璃, 内径为 50 mm; 电缆两端接在电源接线柱上, 参照 SAE AS50881H:2023 中的载流量试验方法, 逐渐提高电缆两端电压, 最终使导体温度稳定在 260°C , 记录导体温度和电流随时间的变化情况。试验装置见图 2。



图 2 载流量试验装置

1.3 仿真模型

采用 COMSOL 的电磁热多物理场耦合模型对航空线缆的载流量进行仿真, 其物理原理是, 当电缆通入交流电流后, 电缆周围会产生稳定的电

磁场, 用麦克斯韦方程组的微分形式表示^[13]。公式 (1) 为法拉第电磁感应定律, 公式 (2) 为安培环路定律, 公式 (3) 为高斯定理, 公式 (4) 为磁通连续性定理。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

式中: ∇ 为向量微分算符; \mathbf{E} 为电场强度, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$; \mathbf{H} 为磁场强度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$; \mathbf{D} 为电通量密度, $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$; \mathbf{B} 为磁感应强度, 也被称为磁通密度, T ; \mathbf{J} 为电流密度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$; t 为时间, s ; ρ_q 为电荷体密度, $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

根据电磁学理论, 在各向同性的介质中, 还存在公式 (5)~公式 (7) 这 3 个本构方程可作为辅助方程。

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

式中: ε 为介质的介电常数, $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$; μ 为介质的磁导率, $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$; σ 为材料的电导率, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

在本模型中, 电缆通过 400 Hz 的交流电流, 所产生的电场和磁场随时间呈正弦变化, 称为时变电磁场。时变电磁场的电磁损耗转化为热量。本模型中的磁损耗可以忽略, 主要为电损耗, 计算公式为

$$Q_{\text{th}} = \frac{1}{2} \text{Re}[(\mathbf{J} + j\omega \mathbf{D}) \cdot \mathbf{E}^*] \quad (8)$$

式中: Q_{th} 为电损耗, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$; Re 为取复数实部的符号; j 为虚数, $j^2 = -1$; ω 为角频率, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; \mathbf{E}^* 为电场强度的共轭复数。

根据傅里叶定律和通量守恒定律, 可以得到电损耗作为热源的传热微分方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_{\text{th}} \quad (9)$$

式中: ρ 为材料密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_p 为材料的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为热力学温度, K ; k 为材料的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

电缆中由电磁损耗产生的热量向外扩散, 形成温度场, 温度又反过来影响材料的本体参数, 引起电导率的变化, 电磁损耗也随之变化。电磁场与热场形成了一个双向耦合的系统。

根据线缆的材料和结构尺寸参数, 应用 COMSOL 软件对 3 种规格的航空线缆进行建模, 结构模型见图 3。

采用 COMSOL 的电磁热多物理场耦合接口、

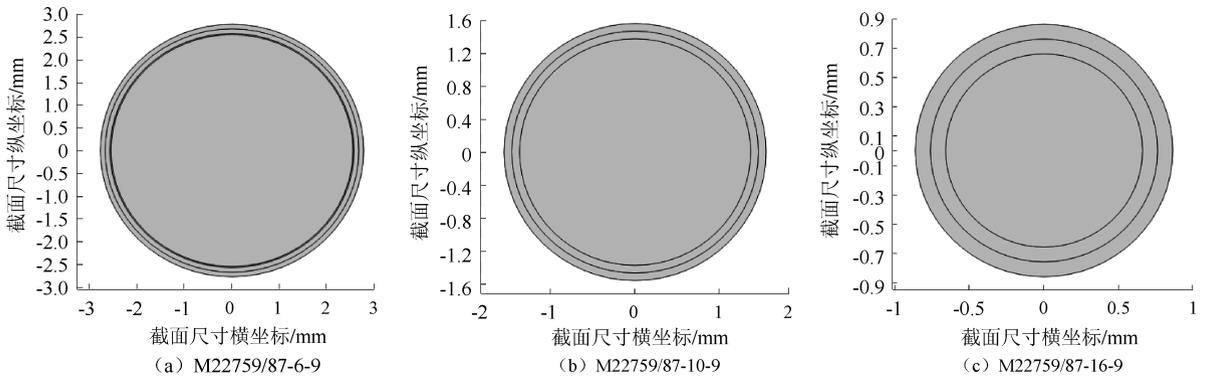


图3 线缆仿真结构模型

频域-瞬态研究模型进行载流量仿真,激励电流采用 中的载流量,频率为 400 Hz,具体仿真条件参数设置见表 2。

表 2 仿真条件参数设置

型号	激励电流/A		湿度/%	初始温度/℃	模式	仿真时长/min
	截流量试验电流	标准中电流				
M22759/87-6-9	210.4	214	80	23.5	自然对流	30
M22759/87-10-9	108.1	105	67	25.2	自然对流	30
M22759/87-16-9	46.7	43	71	25.8	自然对流	30

2 结果与讨论

2.1 载流量试验结果

载流量试验结果见表 3。由表 3 可知,当试验时间达到 25 min 时,线缆导体与环境达到热平衡,

温度区域稳定,取 25 min 时的数据作为试验结果。其中,M22759/87-6-9 在导体温度达到 260 ℃时的电流为 210.4 A;M22759/87-10-9 在导体温度达到 260 ℃时的电流为 108.1 A;M22759/87-16-9 在导体温度达到 259 ℃时的电流为 46.7 A。

表 3 载流量试验结果

时间/min	M22759/87-6-9		M22759/87-10-9		M22759/87-16-9	
	导体温度/℃	电流/A	导体温度/℃	电流/A	导体温度/℃	电流/A
0	25	0	25	0	25	0
5	132	174.0	187	109.0	183	45.0
10	240	213.0	236	110.0	206	45.1
15	247	211.0	253	108.5	235	45.1
20	260	210.5	260	108.0	258	46.7
25	260	210.4	260	108.1	259	46.7

2.2 仿真结果

将 2.1 节中载流量试验的稳态电流作为激励电流进行仿真。3 种规格航空线的温升曲线和达到稳态时的温度场分布图见图 4~图 6,仿真结果见表 4。由表 4 可知,达到稳态后,M22759/87-6-9 的导体温度为 247.2 ℃;M22759/87-10-9 的导体温度为 274.6 ℃;M22759/87-16-9 的导体温度为 304.0 ℃。

仿真以载流量试验得到的电流为激励电流,进而计算出稳态时的导体温度;SAE AS50881H:2023 中的数据假定温度或电流为已知条件,由标准中给出的温升-电流曲线查得对应的电流或导体温度。

由表 5 可知,M22759/87-6-9、M22759/87-10-9、M22759/87-16-9 这 3 种规格的航空线在电流为 210.4,108.1,46.7 A 时,仿真得到的导体温度分别为 247.2,274.6,304.0 ℃,而从 SAE AS50881H:2023 中查得的导体温度分别为 246,271,305 ℃。由此可见,仿真数据与载流量试验数据(260,260,

2.3 结果分析

将试验结果、仿真结果,以及 SAE AS50881H:2023 中的载流量数据进行对比,结果见表 5。其中,

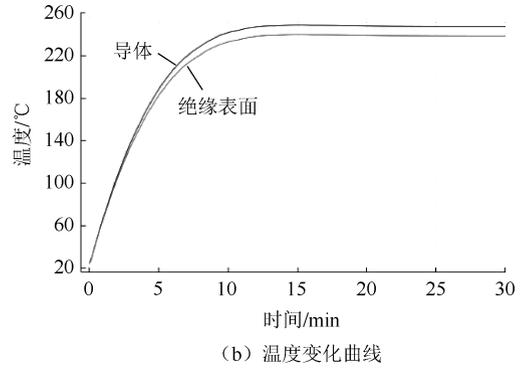
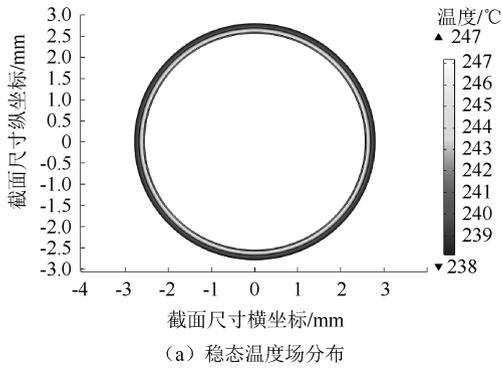


图4 M22759/87-6-9 仿真结果

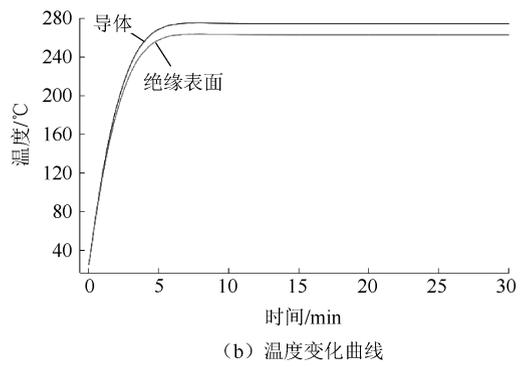
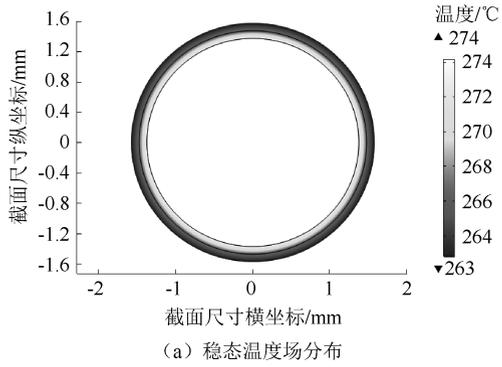


图5 M22759/87-10-9 仿真结果

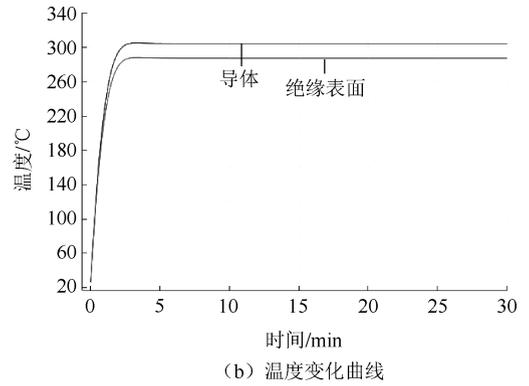
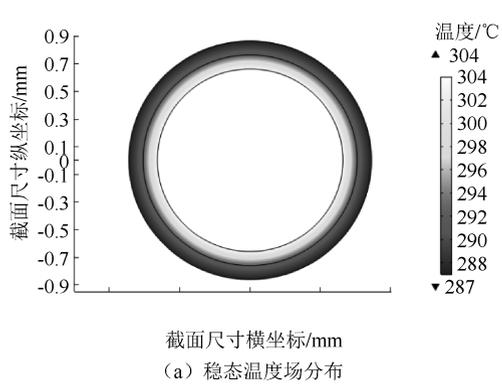


图6 M22759/87-16-9 仿真结果

表4 仿真结果

时间/min	M22759/87-6-9		M22759/87-10-9		M22759/87-16-9	
	激励电流/A	导体温度/°C	激励电流/A	导体温度/°C	激励电流/A	导体温度/°C/°C
0	210.4	67.8	108.1	120.9	46.7	228.0
5		188.2		269.1		304.2
10		241.4		275.0		304.0
15		248.6		274.6		304.0
20		247.7		274.6		304.0
25		247.3		274.6		304.0
30		247.2		274.6		304.0

259 °C) 差别较大, 但与 SAE AS50881H:2023 中的数据具有较好的一致性。同时, 在导体温度为 260

°C 时, SAE AS50881H:2023 中给出的 M22759/87-6-9、M22759/87-10-9、M22759/87-16-9 这 3 种规格航

空线的载流量分别为 214, 105, 43 °C,这也与载流量试验数据存在差异。这可能是由于载流量试验中的环境温度、热电偶探头的设置,以及环境空气对流影响而造成的试验误差^[14]。不同规格导线的发热量

不同,受热电偶探头和试验环境空气对流的影响也不同。特别是截面面积较小的 M22759/87-16-9 导线,受到试验条件的影响更加明显,导致导体温度达到稳态时与标准数据差异较大。

表 5 试验结果、仿真结果和标准数据的对比

型号	载流量试验数据		仿真数据		SAE AS50881H:2023 数据			
	导体温度/°C	电流/A	激励电流/A	导体温度/°C	假定电流/A	导体温度/°C	假定导体温度/°C	电流/A
M22759/87-6-9	260	210.4	210.4	247.2	210.4	246	260	214
M22759/87-10-9	260	108.1	108.1	274.6	108.1	271	260	105
M22759/87-16-9	259	46.7	46.7	304.0	46.7	305	260	43

为进一步验证仿真模型的可靠性,以 SAE AS50881H:2023 中的数据为依据:当导体温度达到额定温度 260 °C 时,M22759/87-6-9、M22759/87-10-9、M22759/87-16-9 对应的电流分别为 214, 105, 43 A。以此为激励电流,重新进行仿真计算,由此得到的导体温度分别为 256, 260, 259 °C,见表 6。这与 SAE AS50881:2023 中给出的温升-电流数据基本一致,表明基于电磁热多物理场耦合模型的载流量仿真模型具有较高的可靠性。

表 6 仿真结果与标准数据对比

型号	激励电流/A	导体温度/°C	
		SAE AS50881H:2023	仿真
M22759/87-6-9	214	260	256
M22759/87-10-9	105	260	260
M22759/87-16-9	43	260	259

3 结论

本文采用 COMSOL 软件对 M22759/87-16-9、M22759/87-10-9、M22759/87-6-9 这 3 种规格航空线进行载流量建模仿真,并与实测数据和标准数据进行对比。

1)载流量实测结果表明,在环境温度为 (25 ± 2)°C 条件下,当导体温度分别为 260, 260, 259 °C 时,M22759/87-6-9、M22759/87-10-9、M22759/87-16-9 对应的载流量分别为 210.4, 108.1, 46.7 A。

2)COMSOL 仿真结果表明,基于电磁热多物理场耦合模型的载流量仿真模型得到的电缆温升数据与 SAE AS50881H: 2023 中的数据一致性较好,仿真结果具有较高的可靠性。

3)基于电磁热多物理场耦合模型的 PTFE/PI

复合绝缘航空线载流量仿真,为航空电气线路互联系统(EWIS)设计提供了简便的方法和数据支撑。

参考文献:

[1] 王兰,李仁鹏. 浅析航空电线电缆载流量计算[J]. 广东科技, 2016, 25(10): 50-51.

[2] 石大城,李乾,余志强,等. 基于电磁-热-流体耦合的隧道敷设电缆载流量分析[J]. 绝缘材料, 2022, 55(12): 111-118.

[3] 韩啸,刘雄军,狄洪杰,等. 基于多物理场耦合技术的电缆载流量修正[J]. 计算机仿真, 2023, 40(6): 381-387.

[4] 戚家伟. 基于有限元法的电缆温度场与载流量分析[J]. 华电技术, 2018, 40(12): 36-39.

[5] 罗楚军,杨帆,李健,等. 长距离隧道敷设电缆载流量仿真计算方法研究[J]. 电工技术, 2021(23): 41-45.

[6] 李红发,王荣鹏,罗应文,等. 电缆线路载流量计算的热场仿真法研究[J]. 新型工业化, 2020, 10(1): 49-54.

[7] 曲名新,邓少平,翟学,等. 基于电-热-流多场耦合仿真的海底电缆载流量分析[J]. 电力勘测设计, 2022(7): 17-24.

[8] 赵莹莹,纪航,王逊峰,等. 电力电缆载流量计算方法综述[J]. 电力与能源, 2022,43(4): 299-303.

[9] 吴冰洁,丁苒苒,陈晨,等. 220 kV 交联海缆的低频载流能力及温度场分布仿真研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(12): 34-42.

[10] 工业和信息化部. 航空电线载流量: HB 5795—2023[S]. 北京:工业和信息化部, 2023.

[11] SAE International. Wiring aerospace vehicle: SAE AS50881H: 2023[S]. Warrendale: SAE International, 2023.

[12] SAE International. Wire, electrical, polytetrafluoroethylene/polyimide insulated, normal weight, nickel coated, copper conductor, 260 °C, 600 volts: SAE AS22759/87E:2022[S]. Warrendale: SAE International, 2022.

[13] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2009.

[14] 韩啸,宋鹏,刘雄军,等. 载流量试验误差分析及数据可靠性研究[J]. 电线电缆, 2021(1): 31-34.