

基于有限元仿真的国产聚丙烯薄膜卷绕性能研究

肖煜¹, 周春红², 刘东静¹, 贡明辉¹, 冯春林², 卢建新²

(1. 桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

摘要:干式直流支撑电容器是柔性直流输电系统的核心器件,其元件卷绕质量直接决定产品的电气性能与长期运行可靠性。针对国产与进口树脂金属化聚丙烯薄膜机械强度差异导致的卷绕工艺适配性问题,基于ANSYS平台构建电容器圆柱元件卷绕过程的二维轴对称有限元模型,采用区域分层法实现计算效率与仿真精度的平衡,系统对比分析两种薄膜在8 N、10 N、13 N 3种典型恒定卷绕张力下的应力响应、变形特性及卷层间压力分布规律。本研究将国产粒料(中原石化FC03R)制备的薄膜编号为树脂A,进口粒料(北欧化工HC300BF)制备的薄膜编号为树脂B。研究结果表明:树脂A纵向弹性模量偏低19.3%,导致其基础层最大等效应力较树脂B低1.72%,最大径向变形低1.18%;卷层间压力呈显著分层特性,外层压力分布差异明显;树脂A强度储备更小,断膜风险更高,卷绕工艺窗口窄于树脂B。进一步通过不同卷绕张力下的加速老化实验验证了仿真结论,发现适中的卷绕张力可使国产薄膜元件获得最优的电容量稳定性。研究结果为国产树脂膜的卷绕工艺参数优化提供了定量理论支撑。

关键词:树脂;双向拉伸聚丙烯薄膜;直流支撑电容器;卷绕工艺;有限元仿真;力学响应

Research on the Winding Performance of Domestic Polypropylene Films Based on Finite Element Simulation

XIAO Yu¹, ZHOU Chunhong², LIU Dongjing¹, YUN Minghui¹, FENG Chunlin², LU Jianxin²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology,

Guangxi Guilin 541004, China; 2. Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: Dry-type DC-link capacitors are core components in VSC-HVDC transmission systems. The winding quality of capacitor elements directly determines the electrical performance and long-term operational reliability of the products. In view of the winding process adaptability issues arising from the mechanical strength discrepancies between metallized polypropylene films made from domestic and imported resins, a two-dimensional axisymmetric finite element model of the cylindrical capacitor element winding process is established using the ANSYS platform. The regional layering technique is adopted to optimize the trade-off between computational efficiency and simulation fidelity. The stress behavior, deformation patterns, and interlaminar pressure distributions of the two film types are systematically compared under three constant winding tension levels—8 N, 10 N, and 13 N. In this study, the film prepared from domestic granule (Sinopec Zhongyuan Petrochemical FC03R) is denoted as Resin A, and the film prepared from imported granule (Borealis HC300BF) is denoted as Resin B. The study results show that the longitudinal elastic modulus of Resin A is 19.3% lower than that of Resin B. As a consequence, the maximum equivalent stress in the base layer of Resin A is 1.72% lower, and the maximum radial deformation is 1.18% lower than those of Resin B. In addition, the inter-layer pressure exhibits significant layered characteristics, with notable differences observed in the pressure distribution of the outer layers.

收稿日期:2026-06-07; 修回日期:2026-08-03

基金项目:广西重点研发计划(桂科AB25069315);广西重点研发计划(桂科FN2600640576)。

Project Supported by the Guangxi Key R & D Program(Guik AB25069315);Guangxi Key R & D Program(Guik FN2600640576)。

Resin A has a smaller strength reserve, leading to a higher risk of film rupture and a narrower winding process window compared to resin B. The simulation findings are further validated through accelerated aging tests under different winding tensions, revealing that a moderate winding tension enables domestically produced film elements to achieve optimal capacitance stability. The research results provide quantitative theoretical support for the optimization of winding process parameters for domestic resin films.

Keywords: resin; biaxially oriented polypropylene film; DC-link capacitor; winding process; finite element simulation; mechanical response

0 引言

柔性直流输电与新能源并网技术的快速发展,对电力电子装备的容量与可靠性提出严苛要求^[1-5]。干式直流支撑电容器作为换流阀核心器件,其性能直接决定换流阀运行稳定性^[6-10]。双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene, BOPP)薄膜是电容器核心绝缘介质,其机械性能与卷绕工艺的适配性直接影响元件层间接触状态、气隙含量及最终电气性能^[11];卷绕过程中,薄膜弹性模量、拉伸强度等参数决定其应力变形响应与层间压力分布。

高端电力电容器用 BOPP 薄膜树脂长期被德、日企业垄断。国产树脂在灰分含量、熔体流动速率控制及加工稳定性方面与国际领先企业存在明显差距^[12],国产薄膜在机械强度、厚度均匀性等方面仍落后于进口产品^[13-14],性能差异会显著降低电容器长期运行寿命^[15]。盲目套用进口树脂薄膜卷绕工艺易引发断膜、层间压力不均等问题,严重制约生产良率与产品可靠性。

国内外学者已在 BOPP 薄膜卷绕力学建模、有限元仿真、张力控制及性能测试等方面开展大量工作。孙合垚^[16]建立了卷绕非线性力学模型并推导了张力-层间压力传递方程,通过 ABAQUS 仿真验证了有限元法处理卷绕非线性问题的可靠性;陈建魁等^[17]综述了卷到卷收卷内应力 4 种主流建模方法,指出有限元法是多工况对比的最优选择,明确卷绕张力是核心控制参数;宋家乐等^[18]明确了国产与进口薄膜关键力学指标的定量差异;李化等团队研究了元件层间压强对其自愈能力及寿命的影响^[19-24];文献[25-31]研究了卷制张力对径向压强分布及元件性能的影响和卷绕张力控制系统。但现有研究多聚焦于单一材料的工艺优化或单一性能对比,尚未系统揭示国产与进口树脂膜机械性能差异对卷绕过程应力、变形及层间压力分布的影响规律,缺乏多张力工况下的定量对比分析,导致国产树脂膜工艺参数只能通过试错法调整,效率低且质量不稳定。

本文基于 ANSYS 构建电容器圆元件卷绕二维轴对称有限元模型,采用区域分层法平衡计算效率与仿真精度,对比分析 8 N、10 N、13 N 3 种典型恒定张力下国产与进口树脂膜的力学响应差异。研究结果可为国产树脂膜的卷绕工艺优化提供理论支撑,为后续实验研究与工艺调整指明方向,对推动高端电力电容器用薄膜国产化替代具有重要工程意义。

1 模型构建

1.1 几何模型建立

采用 ANSYS DesignModeler 建立直流支撑电容器圆元件的二维轴对称模型。该模型基于元件径向力学的严格轴对称特性,可大幅降低计算量,同时保证求解精度。

模型几何参数取自工程实际:芯棒外径为 9 mm (半径 4.5 mm),元件目标外径为 80 mm。为避免全尺寸模型(数万层薄膜)导致的计算量爆炸,本文提出基于力学特性聚类的区域分层等效建模方法。由于 BOPP 薄膜单层厚度仅为 6 μm ,若逐层建模,单元数量将达百万级,单工况计算耗时数十小时,无法满足多工况对比需求。区域分层法将力学特性(应力梯度、层间压力传递规律)相似的相邻层合并为等效层,在保证近心层及关键界面力学响应精度的前提下,将模型规模压缩至可接受范围。

具体地,将卷层划分为 4 个区域:1)基础层(内层,10 mm),承载芯棒-薄膜界面压力传递核心;2)中间过渡层(3 mm),表征层间压力梯度变化;3)外层(3 mm),反映卷绕张力直接作用区域;4)最外层(3 mm),捕捉自由端边界效应。芯棒半径 4.5 mm,卷层总厚度为 10+3+3+3=19 mm,因此模型外径为 4.5+19=23.5 mm(直径 47 mm)。该模型尺寸虽小于实际元件外径,但涵盖了应力水平最高、层间压力梯度变化最剧烈的近心层及表层区域,通过等效应力与变形相似性原理,可有效反映整体力学行为。详细尺寸参数如表 1 所示。

表1 模块结构尺寸
Table 1 Dimensions of the module structure

序号	名称	材料	长度/mm	总厚度/mm
1	芯棒	聚碳酸酯(PC)	152	9(直径)
2	基础层(内层)	BOPP 薄膜	150	10
3	中间过渡层	BOPP 薄膜	150	3
4	外层	BOPP 薄膜	150	3
5	最外层	BOPP 薄膜	150	3

1.2 材料属性定义

为兼顾商业保密性与学术表述的严谨性,以中原石化 FC03R(粗化膜料 PPH-FC03R)为原料制备的薄膜记为树脂 A,以北欧化工 HC300BF(Borclean™ HC300BF)为原料制备的薄膜记为树脂 B。两者均为电容器级 BOPP 薄膜,实测力学参数如表 2 所示。芯棒采用聚碳酸酯(PC),参数如表 3 所示。

表2 BOPP薄膜正交各向异性材料参数
Table 2 Orthotropic material parameters of BOPP film

参数名称	树脂 A(中原石化 FC03R)	树脂 B(北欧化工 HC300BF)
杨氏模量 X(MD)/Pa	2.501×10 ⁹	3.099×10 ⁹
杨氏模量 Y(TD)/Pa	4.069×10 ⁹	5.124×10 ⁹
杨氏模量 Z(厚度)/Pa	1.8×10 ⁹	1.8×10 ⁹
泊松比 XY	0.35	0.35
泊松比 YZ	0.35	0.35
泊松比 XZ	0.35	0.35
剪切模量 XY/Pa	9.5×10 ⁸	9.5×10 ⁸
剪切模量 YZ/Pa	6.5×10 ⁸	6.5×10 ⁸
剪切模量 XZ/Pa	6.5×10 ⁸	6.5×10 ⁸
密度/(kg/m ³)	900	900
MD 拉伸强度/Pa	1.98×10 ⁸	2.00×10 ⁸
TD 拉伸强度/Pa	3.05×10 ⁸	3.27×10 ⁸
断裂伸长率 MD/%	141	158
断裂伸长率 TD/%	60	62

表3 芯棒材料(PC工程塑料)参数
Table 3 Material parameters of mandrel (PC engineering plastic)

参数名称	数值
弹性模量/Pa	2.4×10 ⁹
泊松比	0.38
密度/(kg/m ³)	1 200
热膨胀系数/(1/°C)	6.5×10 ⁻⁵

BOPP 薄膜为典型正交各向异性材料,纵向(MD,卷绕方向)、横向(TD)与厚度方向力学性能差异显著。模型全局坐标系与材料主方向对应为:X

轴对应 MD 方向,Y 轴对应 TD 方向,Z 轴对应厚度方向。元件整体结构如图 1 所示。

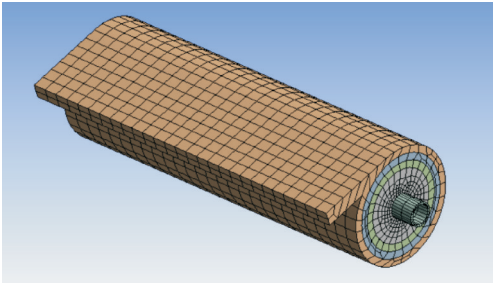


图1 电容器元件示意图
Fig. 1 Schematic diagram of capacitor element

1.3 接触设置

卷绕过程中薄膜层间接触行为是控制层间压力传递的核心非线性因素。本文采用手动接触对构建方法,依据“硬面为目标面、软面为接触面”及“细网格面为接触面、粗网格面为目标面”准则,建立了芯棒-基础层绑定接触(Bonded)和薄膜层间摩擦接触(Frictional,静摩擦系数取 0.2^[32])两组关键接触对,完整覆盖所有力学作用界面。

1.4 边界条件与载荷施加

在约束条件设置中,依据实际工况的模块安装方式,在芯棒中心施加全固定约束,限制其所有自由度,模拟实际卷绕过程中芯棒的固定状态。

在最外层薄膜的自由端施加线载荷,模拟稳定卷绕阶段的张力。二维轴对称模型中,总张力 F 与线载荷 q 的转换关系为

$$q = \frac{F}{2\pi \times t}$$

式中, t 为薄膜厚度,3 种工况对应的线载荷值如表 4 所示。

表4 不同卷绕张力对应的线载荷值
Table 4 Linear load corresponding to different winding tensions

总卷绕张力(F/N)	线载荷 q /(N/mm)
8	212.2
10	265.3
13	344.9

加速区附加张力载荷:通过 Tabular Data 定义时变的旋转加速度,模拟卷绕加速过程。最大加速度 $a_0=600 \text{ rad/s}^2$,施加在芯棒轴线,使其逆时针旋转,模拟时间为 60 s。本仿真为静态结构分析,设置的 60 s 为载荷步时间,仅用于控制载荷的平稳施加过程,避免因载荷突变导致的数值收敛问题,并非实际物理卷绕时间。

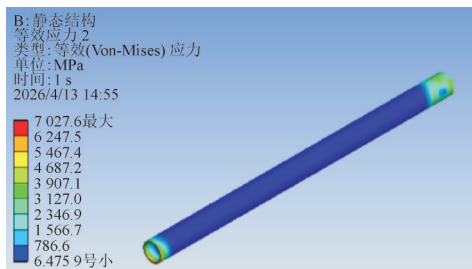
1.5 网格划分与求解设置

在网格划分上,采用分区差异化策略:芯棒及基础层生成 0.5 mm 结构化网格,外层单元尺寸 0.05~0.1 mm(厚度方向至少 3 层),加速区结合部局部加密至 0.03 mm 以捕捉应力梯度。最终模型含单元约 8 855 个、节点约 4 万个。实现国产/进口树脂膜及 8N/10N/13N 3 种张力工况自动切换,一次建模完成全部计算,显著降低重复工作量。详细的接触对参数设置、网格无关性验证及收敛性分析过程,请参见本文附录 A。

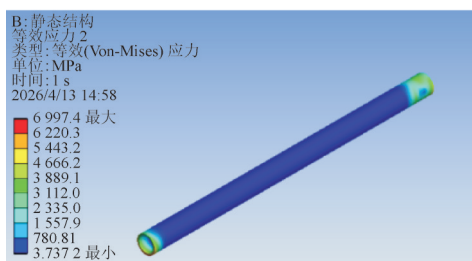
2 仿真结果与分析

2.1 芯棒应力分布

图 2 为 10 N 恒定卷绕张力下树脂 A 与树脂 B 卷绕元件的芯棒 Von Mises 等效应力云图。两种元件芯棒应力分布规律一致:最大等效应力集中于芯棒两端边缘,源于卷绕张力的端部应力集中效应;芯棒中部应力均匀且数值极低,整体呈“两端高、中间低”分布,与受均布径向压力的空心圆筒力学行为一致。



(a) 树脂 A 芯棒应力云图



(b) 树脂 B 芯棒应力云图

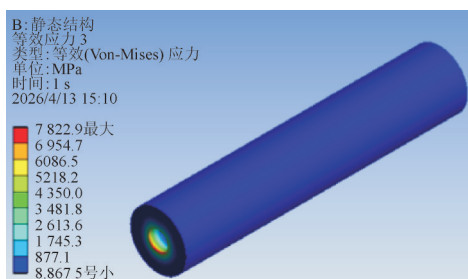
图2 10 N恒定卷绕张力下芯棒应力分布对比图
Fig. 2 Comparison of core stress distribution under constant winding tension of 10 N

定量对比显示:树脂 A 与树脂 B 元件芯棒最大等效应力分别为 7 027.6 MPa 和 6 997.4 MPa,差值仅 30.2 MPa,相对偏差 0.43%,处于有限元数值计算固有误差范围内。

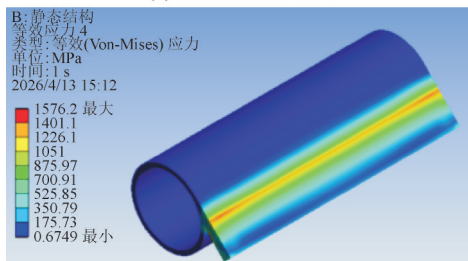
结果表明,BOPP 薄膜机械性能差异对芯棒应力分布影响较小,芯棒应力水平主要由卷绕张力和几何尺寸决定,卷绕过程中芯棒无结构失效风险。

2.2 薄膜等效应力分布

图 3~4 为 10 N 恒定卷绕张力下两种树脂膜基础层及最外层 Von Mises 等效应力云图。两种薄膜基础层应力分布一致:最大等效应力集中于芯棒接触内表面中心,呈环形对称分布,沿径向向外梯度衰减。定量分析显示,树脂 A 与树脂 B 基础层最大等效应力分别为 7 822.9 MPa 和 7 959.7 MPa,相对偏差仅 1.72%,表明基础层应力主要由卷绕张力与外层载荷决定,材料性能差异影响较小。

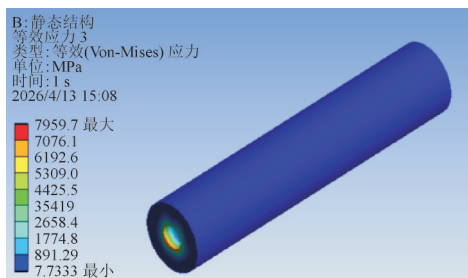


(a) 基础层应力云图

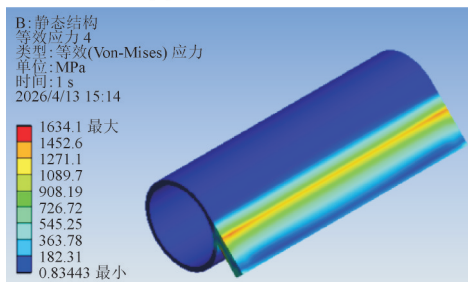


(b) 最外层应力云图

图3 树脂 A 等效应力云图
Fig. 3 Equivalent stress contour of resin A



(a) 基础层应力云图



(b) 最外层应力云图

图4 树脂 B 等效应力云图
Fig. 4 Equivalent stress contour of resin B

最外层应力分布与基础层显著不同:最大等效应力集中于卷绕张力施加的自由端纵向边缘,呈带状分布,沿轴向向元件末端衰减。树脂 A 与树脂 B 最外层最大等效应力分别为 1 576.2 MPa 和 1 634.1 MPa,相对偏差 3.54%,高于基础层,说明材料性能差异对直接承受张力的最外层应力影响更显著。

2.3 不同卷绕张力下薄膜等效应力分布对比

图 5-6 为两种树脂膜在 8 N、10 N、13 N 恒定卷绕张力下的整体 Von Mises 等效应力云图。两种薄膜各张力工况下应力分布规律一致:最大等效应力集中于基础层与芯棒接触的内表面中心,呈环形对称分布,由外层载荷与卷绕张力共同作用所致;应力沿径向向外梯度衰减,最外层自由端纵向边缘呈带状应力集中,为张力边界效应引起。整体呈内高外低、中心高两端低的稳定分布,且不随卷绕张力变化,表明两种薄膜卷绕力学行为本质一致。

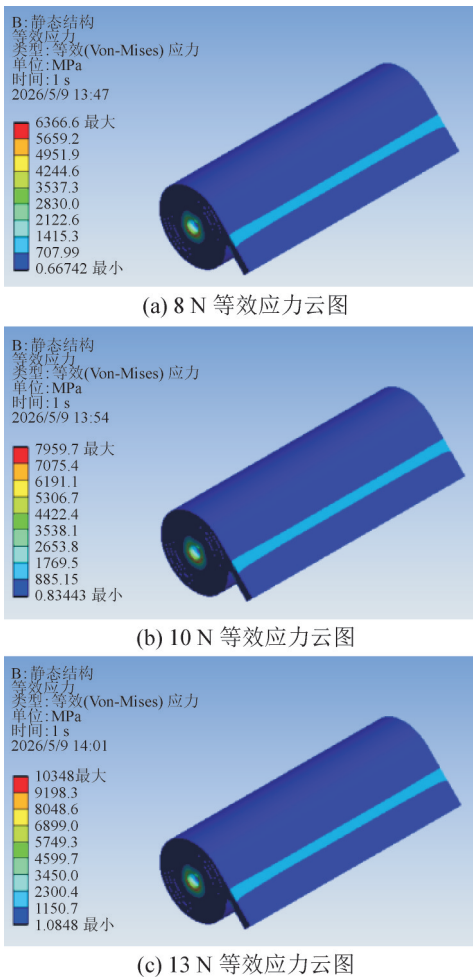


图5 树脂B整体等效应力云图
Fig. 5 Overall equivalent stress contour of resin B

定量分析表明,两种薄膜基础层最大等效应力随卷绕张力增大呈严格线性增长,符合线弹性材料力学特性,对比结果见表 5。

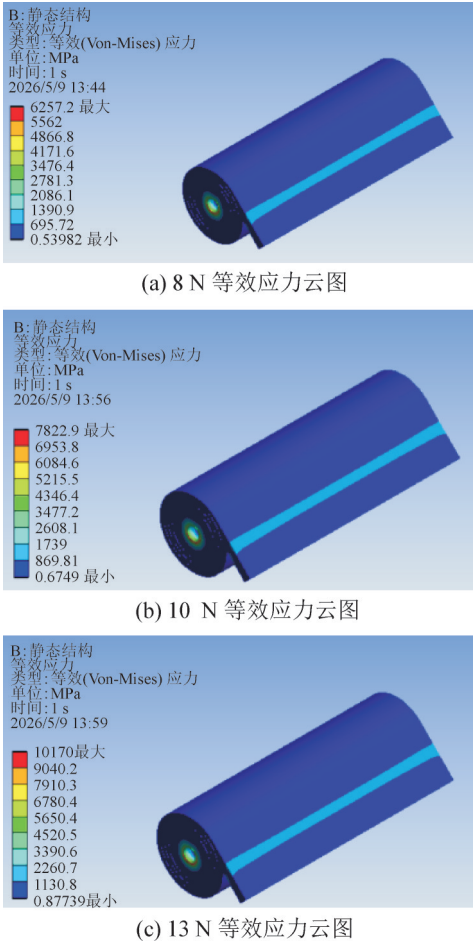


图6 树脂A整体等效应力云图
Fig. 6 Overall equivalent stress contour of resin A

表5 不同卷绕张力下薄膜基础层最大等效应力对比
Table 5 Comparison of maximum equivalent stress of film base layer under different winding tensions

卷绕 张力/N	树脂A最大 等效应力/ MPa	树脂B最大 等效应力/ MPa	差值/ MPa	变化率/ %
8	6 257.2	6 366.6	-109.4	-1.72
10	7 822.9	7 959.7	-136.8	-1.72
13	10 170.0	10 348.0	-178.0	-1.72

表 5 显示,相同卷绕张力下树脂 A 基础层最大等效应力均略低于树脂 B,差值随张力线性增大,相对变化率稳定为 -1.72%。

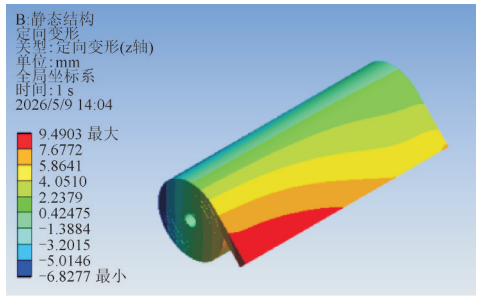
结合材料性能分析,树脂 A 的 MD 向拉伸强度为 198 MPa,低于树脂 B 的 200 MPa,强度储备更小。相同卷绕载荷下树脂 A 更易接近强度极限,张力提升时将先于树脂 B 达到拉伸强度阈值,断膜失效风险显著更高。

2.4 径向变形分析

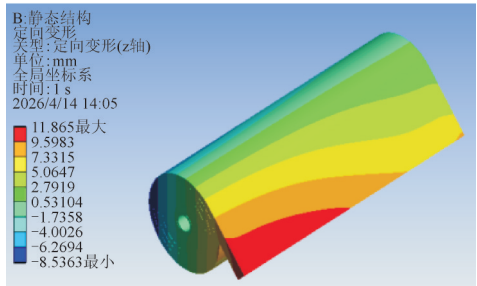
图 7-8 为两种树脂膜在 8 N、10 N、13 N 恒定卷绕张力下的径向变形云图。两种树脂膜各张力工况下变形分布规律高度一致:最大径向变形集中于最外层自由端边缘(无外部约束,受张力拉伸),最

小变形位于基础层内表面(受芯棒刚性约束)。整体变形沿径向向内梯度递减,呈“外大内小、自由端

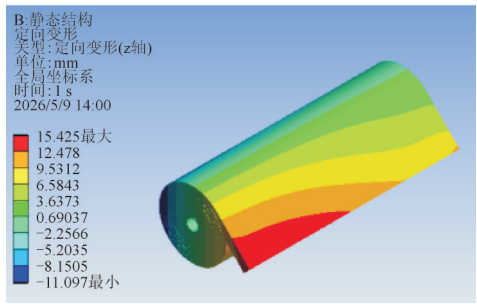
大约束端小”的典型分布,且不随卷绕张力变化,表明两种树脂膜卷绕变形力学行为本质一致。



(a) 8 N 等效应力云图



(b) 10 N 等效应力云图



(c) 13 N 等效应力云图

图7 树脂A径向变形云图
Fig. 7 Radial deformation contour of resin A

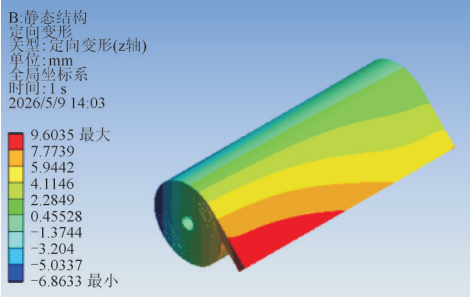
定量分析表明,两种树脂膜最大径向变形量均随卷绕张力增大呈严格线性增长,符合线弹性材料变形响应规律,对比数据见表6。

表6 不同卷绕张力下薄膜最大径向变形量对比
Table 6 Comparison of maximum radial deformation of film under different winding tensions

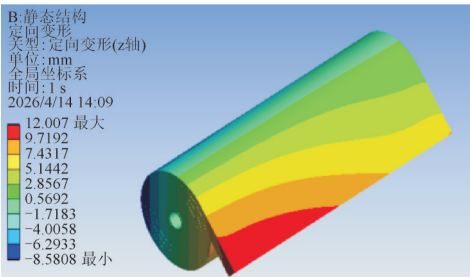
卷绕 张力/N	树脂A最大 变形量/mm	树脂B最大 变形量/mm	差值/mm	变化率/%
8	9.490 3	9.603 5	-0.113 2	-1.18
10	11.865	12.007	-0.142	-1.18
13	15.425	15.609	-0.184	-1.18

表6数据表明,相同卷绕张力下树脂A最大径向变形量均略低于树脂B,差值随张力线性增大,相对变化率稳定为-1.18%,与前文应力分析结论一致。

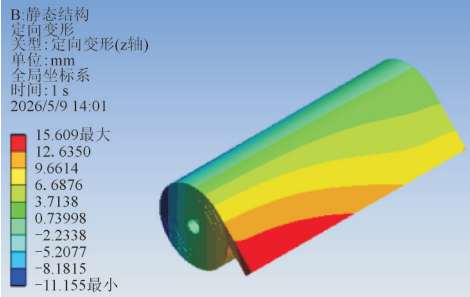
结合材料性能分析,尽管树脂A径向变形偏小,但其弹性模量和拉伸强度均较低,相同变形下应力更高,更易达到强度极限。此外,过大径向变



(a) 8 N 等效应力云图



(b) 10 N 等效应力云图



(c) 13 N 等效应力云图

图8 树脂B径向变形云图
Fig. 8 Radial deformation contour of resin B

形易导致膜层不紧密、气隙及松卷缺陷,影响元件长期寿命。

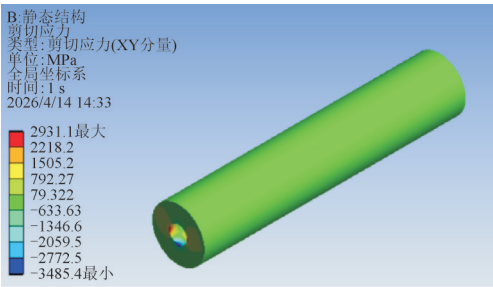
2.5 卷层间压力分布

卷层间接触压力是决定干式直流支撑电容器卷绕质量与绝缘可靠性的关键指标。本文以剪切应力(XY分量)表征层间法向接触压力,图9-10为10 N张力下两种薄膜层间压力云图,其余张力工况规律一致,仅数值随张力线性变化。

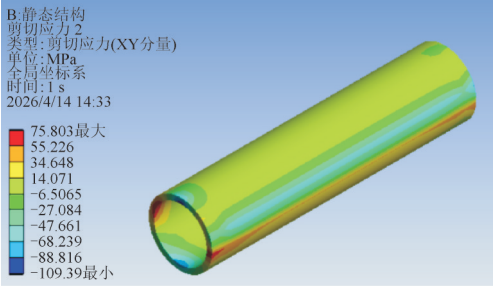
内层压力分布高度均匀,呈环形对称,最大压力集中于芯棒接触内表面。定量结果显示:树脂A与树脂B内层最大压力分别为2 931.1 MPa和2 908 MPa,相对偏差0.79%,处于数值误差范围内。说明内层压力主要由卷绕张力与外层载荷决定,材料性能差异影响可忽略。

外层压力分布显著不均,最大压力集中于自由端边缘与元件端部,呈带状分布并向中部衰减。定量对比表明:树脂A与树脂B外层最大压力分别

为 75.803 MPa 和 81.248 MPa, 相对偏差 7.18%, 显著高于内层。该差异由外层直接承受张力及材料弹性模量不同导致的压力传递特性差异引起。

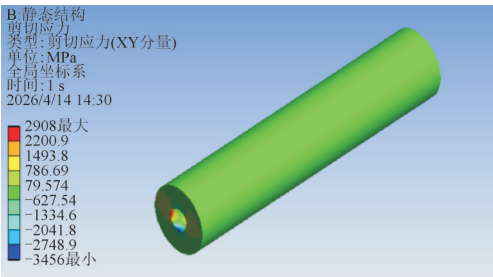


(a) 内层薄膜卷层间压力云图

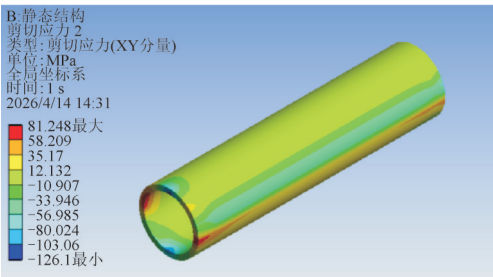


(b) 外层薄膜卷层间压力云图

图9 10 N恒定卷绕张力下树脂A层间压力云图
Fig. 9 Interlaminar pressure contour of resin A under a constant winding tension of 10 N



(a) 内层薄膜卷层间压力云图



(b) 外层薄膜卷层间压力云图

图10 10 N恒定卷绕张力下树脂B层间压力云图
Fig. 10 Interlaminar pressure contour of resin B under a constant winding tension of 10 N

3 实验验证

为进一步验证卷绕张力对国产薄膜元件性能的影响规律, 本研究针对国产粒料(中原石化FC03R)制备的薄膜元件开展了不同卷绕张力下的加速老化试验。实验用卷绕元件如图 11 所示。



图11 实验用电容器元件实物图
Fig. 11 Physical photograph of the capacitor element for experiments

试验选取 3 种卷绕张力水平(按大小排序为: 张力 A > 张力 B > 张力 C), 每种张力下各制备 6 只电容器元件。老化试验分两个阶段进行: 第 1 阶段为 80℃、1.4 倍额定电压(1.4 U_{NDC})下持续 24 h; 第 2 阶段为 80℃、1.6 倍额定电压(1.6 U_{NDC})下持续 240 h。试验前后分别测量元件的电容量(C)和介质损耗角正切($\tan\delta$), 计算电容变化率与 $\tan\delta$ 增量, 并统计自愈失效样本数。结果如表 7 所示。

由表 7 可知: 在 3 种张力水平下, 元件 $\tan\delta$ 均无增量, 自愈失效样本数均为 0, 表明所选张力范围内元件未发生绝缘击穿, 具备基本的绝缘可靠性。

在电容变化方面, 3 种张力下的元件在第 1 阶段均呈现约 +0.05% 的微小正变化, 属正常老化初期的介电响应。进入第 2 阶段后, 3 种张力下的电容均出现负向漂移, 但幅度差异显著: 张力 B 的电容变化率仅为 -0.31%, 明显优于张力 A (-1.27%) 和张力 C (-1.05%)。电容负向漂移通常与薄膜层间贴

表 7 不同卷绕张力下国产薄膜元件老化试验结果

Table 7 Aging test results of domestic film elements under different winding tensions

张力水平	试验阶段	电容平均变化率/%	$\tan\delta$ 平均增量/ $\times 10^{-4}$	样本数	自愈失效样本数
张力 A	80℃、1.4 U_N 、DC、24 h	+0.05	0	6	0
张力 A	80℃、1.6 U_N 、DC、240 h	-1.27	0	6	0
张力 B	80℃、1.4 U_N 、DC、24 h	+0.04	0	6	0
张力 B	80℃、1.6 U_N 、DC、240 h	-0.31	0	6	0
张力 C	80℃、1.4 U_N 、DC、24 h	+0.06	0	6	0
张力 C	80℃、1.6 U_N 、DC、240 h	-1.05	0	6	0

合状态有关一层间压力不足会导致气隙增多,加速局部放电,进而加快电容量衰减。张力 B 对应的中间张力水平使层间接触状态最优,外层压力分布更均匀,因此电容稳定性最佳。

该实验结果表明:对于国产粒料(中原石化 FC03R)制备的薄膜,采用适中的卷绕张力(张力 B)可获得最优的电性能稳定性,而过高的张力 A 导致膜层过度拉伸、弹性变形累积,过低的张力 C 则导致层间贴合不足,二者均加速了电容衰减。这一规律与本文第 3 节仿真分析中“树脂 A(国产)工艺窗口较窄、张力需精确控制”的结论高度一致。

4 结语

本文基于 ANSYS 构建直流支撑电容器圆元件卷绕二维轴对称有限元模型,对比分析了以中原石化 FC03R 为原料的树脂 A 与以北欧化工 HC300BF 为原料的树脂 B 在 8 N、10 N、13 N 3 种典型张力下的力学行为,明确其应力、变形及层间压力分布差异,验证国产树脂膜的工程应用可行性与局限性。主要结论如下:

1)两种薄膜卷绕力学行为本质一致,应力、变形及层间压力分布规律高度吻合。芯棒应力主要由卷绕张力与几何尺寸决定,材料性能差异影响可忽略,两者最大应力相对偏差仅 0.43%,无结构失效风险。

2)树脂 A 弹性模量偏低 19.3%,力学响应存在系统性偏差:基础层最大等效应力低 1.72%,最大径向变形低 1.18%,偏差随张力线性扩大。

3)卷层间压力呈显著分层特性:内层压力分布均匀,两者最大压力相对偏差仅 0.79%;外层压力分布不均,树脂 B 外层最大压力较树脂 A 高 7.18%。

4)树脂 A 纵向拉伸强度略低,强度储备不足,断膜风险更高,工艺窗口更窄。

5)元件卷绕建议:结合仿真分析与实验验证,国产粒料(中原石化 FC03R)制备的薄膜采用适中的卷绕张力(约 8~10 N)可获得最优的电容稳定性,过高或过低的张力均会加速电容衰减。建议在生产中严格控制张力波动,将卷绕张力控制在 8~10 N 范围内,以抑制弹性变形累积、弥补外层层间压力不足。

参考文献

[1] 罗志斌,孙潇,蔡春荣,等.绿色氢基能源技术研究进展与产业化现状[J].南方能源建设,2025,12(3):20-32.
LUO Zhibin, SUN Xiao, CAI Chunrong, et al. Research progress and current status of industrialization for green hy-

drogen-based energy technologies[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(3):20-32.

[2] 吴永利,国江,冯春林,等.电力电容器在工频与谐波条件下的热稳定性性能研究[J].高压电器,2025,61(1):136-144.

WU Yongli, GUO Jiang, FENG Chunlin, et al. Research on Thermal Stability Performance of Power Capacitor Under Power Frequency and Harmonic Condition[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1):136-144.

[3] 李彦斐,施训鹏,SHIGERU KIMURA.氢能的经济与社会影响:东亚峰会地区案例[J].南方能源建设,2025,12(3):1-19.

LI Yanfei, SHI Xunpeng, SHIGERU KIMURA. Economic and social impacts of hydrogen energy: east Asia summit region case study[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(3):1-19.

[4] 雷晓燕,曹刚,肖梁乐,等.直流支撑电容器电容介损测量方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2026,47(1):50-56.

LEI Xiaoyan, CAO Gang, XIAO Liangle, et al. Influence of ambient temperature and applied voltage on the temperature rise and temperature distribution of self-healing power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1):50-56.

[5] 张国豪,李化,林福昌,等.金属化聚丙烯膜电容器自愈产气特性与保护技术[J].高压电器,2024,60(6):197-202.

ZHANG Guohao, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on self-healing gas generation characteristics and protection technology of metallized polypropylene film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6):197-202.

[6] 钟少斌,黄腾昊,张文凤.电力电子技术在新能源电力系统中的应用与挑战[J].电子元器件与信息技术,2025,9(6):89-91.

ZHONG Shaobin, HUANG Tenghao, ZHANG Wenfeng. Application and challenges of power electronics technology in new energy power systems[J]. Electronic Components and Information Technology, 2025, 9(6):89-91.

[7] 党智敏.干式直流电容器全链条国产化关键技术探讨[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(1):1-14.

DANG Zhimin. Discussion on key technology for localization of full-chain of dry DC capacitor, [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1):1-14.

[8] 左强林,吴锦鹏.直流支撑电容器中的电动力危害分析及验证[J].电力电容器与无功补偿,2026,47(1):42-49.

ZUO Qianglin, WU Jinpeng. Analysis and verification of electrodynamic hazards in DC-link capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1):42-49.

- [9] 张茅山,左强林,倪琰,等.直流支撑电容器的热时间常数计算与验证[J].电力电容器与无功补偿,2026,47(1):66-71.
ZHANG Maoshan, ZUO Qianglin, NI Yan, et al. Calculation and verification of thermal time constants of DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1):66-71.
- [10] 曾向君,王婷婷,张福增,等.新型脂环族环氧树脂和硅橡胶材料性能对比研究[J].电瓷避雷器,2022(2):146-152.
ZENG Xiangjun, WANG Tingting, ZHANG Fuzeng, et al. Comparison of properties of new alicyclic epoxy resin and silicone rubber[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2):146-152.
- [11] 许然然.柔性直流换流阀直流支撑电容器用聚丙烯薄膜绝缘失效及其抑制方法研究[D]天津:天津大学,2020.
- [12] 徐辉,张丕生,陈豹,等.电工膜用高纯聚丙烯树脂的现状[J].河南化工,2021,38(5):18-21.
XU Hui, ZHANG Pisheng, CHEN Bao, et al. Present situation of high purity polypropylene resin for electrical film[J]. Henan Chemical Industry, 2021, 38(5):18-21.
- [13] 储松潮,黄云锴,潘毓娴,等.电工级聚丙烯粒子国产化及其薄膜和电容器研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(5):64-69.
CHU Songchao, HUANG Yunkai, PAN Yuxian, et al. Study on localization of electrical grade polypropylene granule and its film and capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5):64-69.
- [14] 张丕生,孙福国,徐辉,等.电容器薄膜用聚丙烯的生产现状[J].合成树脂及塑料,2021,38(3):59-63.
ZHANG Pisheng, SUN Fuguo, XU Hui, et al. Production status of PP for capacitor films, [J]. China Synthetic Resin And Plastics, 2021, 38(3):59-63
- [15] 曹轩赫.多场协同下金属化薄膜电容器的老化特性及寿命评估研究[D]北京:中国地质大学(北京),2024.
- [16] 孙合垚.空间管材卷绕成型装置设计与试验研究[D]廊坊:北华航天工业院,2024.
- [17] 陈建魁,金一威,尹周平.柔性电子卷到卷制造收卷内应力研究综述[J].科学通报,2019,64(Z1):555-565.
CHEN Jiankui, JIN Yiwei, YIN Zhouping. A review of winding internal stress in roll-to-roll manufacturing for flexible electronics[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(Z1):555-565.
- [18] 宋家乐,张添胤,朱光宇,等.热-应力老化作用对电容器用BOPP薄膜绝缘性能的影响[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(1):83-87.
SONG Jiale, ZHANG Tianyin, ZHU Guangyu, et al. Influence of thermal-stress aging on insulation performance of BOPP film for capacitor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 45(1):83-87.
- [19] 王文娟,李化,李智威,等.通过电容器层间压强的增强提高电容器寿命[J].强激光与粒子束,2014,26(4):130-134.
WANG Wenjuan, LI Hua, LI Zhiwei, et al. Lifetime improvement of metallized film capacitors by inner pressure strengthening[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4):124-128.
- [20] 李化,章妙,林福昌,等.金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J].电工技术学报,2012,27(9):218-223.
LI Hua, ZHANG Miao, LIN Fuchang, et al. Study on theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9):218-223.
- [21] 章妙.金属化膜电容器自愈特性研究[D]武汉:华中科技大学,2012.
- [22] 彭波.金属化膜电容器自愈关键参数研究[D]武汉:华中科技大学,2010.
- [23] 李化,林福昌.一种金属化膜电容器层间压强测量方法和装置:CN103487177 B[Z]2015-07-26.
- [24] 孔中华,林福昌,戴玲,等.金属化膜电容器层间压强计算[J].高压电器,2007,43(5):348-350.
KONG Zhonghua, LIN Fuchang, DAI Ling, et al. Calculation of the pressure intensity between layers of a metallized film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5):348-350.
- [25] 董晓亮.直流支撑电容器元件质量与卷绕张力调控的关联性探讨[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(4):40-48.
DONG Xiaoliang, Correlation analysis between quality of DC-link capacitor element and winding tension control[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(4):40-48
- [26] 席光华.自动卷绕机张力控制的探讨[J].电力电容器,2006(5):21-23.
XI Guanghua, Research on the winding tension control of the winding machine[J]. Power Capacitor, 2006, (5):21-23
- [27] 左强林,葛昌晶,雷乔舒.卷绕工艺对直流支撑电容器圆元件膜层间压强的影响研究[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(1):66-71.
ZUO Qianglin, GE Changjing, LEI Qiaoshu. Study on influence of winding process on inter-layer pressure of cylindrical element film in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):66-71
- [28] 赵子轩,左强林,雷乔舒,等.直流支撑电容器圆元件膜层间压强在线测试与改进计算模型[J].电力电容器与无功补偿,2025,51(5):2268-2273.
ZHAO Zixuan, ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, et al. Online testing and improved calculation model for inter-layer pres-

sure of circular elements in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 51 (5) ; 2268-2273.

[29]任剑,张爱玲. 薄膜电容卷绕工艺及关键技术[J]. 电子工艺技术,2008,29(2):102-104.

REN Jian, ZHANG Ailing. Winding technics and key technologies of film capacitors[J]. Electronics Process Technology, 2008, 29(2):102-104.

[30]李实永,王钦若. 模糊控制在薄膜张力控制系统中的研究与应用[J]. 电气传动自动化,2001,23(5):33-35.

LI Shiyong, WANG Qinruo. Research and application of fuzzy control in film tension control system[J]. Electrical Drive Automation, 2001, 23(5):33-35.

[31]王钦若,谢莉萍. 电容器薄膜张力推理控制系统[J]. 电气设备,1999(1):34-35.

WANG Qinruo, XIE Liping. Capacitor film tension inferential control system[J]. Electric Drive, 1999(1):34-35.

[32]塑料薄膜和薄片摩擦系数的测定:GB/T 10006—2021[S]. 2021.

Determination of coefficient of friction for plastic films and sheets:GB/T 10006—2021[S]. 2021.

作者简介:

肖煜(2001-),男,硕士,主要研究方向为电力电子产品制造及可靠性设计。

周春红(1977-),女,正高级工程师,主要从事电力电容器、自愈式电容器设计制造工作。

刘东静(1986—),女,副教授,通信作者,主要研究方向

为功率器件可靠性研究。E-mail:ldj168168@126.com。

贡明辉(1992—),男,讲师,主要从事电力电子产品制造及可靠性设计。

冯春林(1982—),男,高级工程师,主要从事电力电容器技术研究工作。

卢建新(1998—),男,助理工程师,主要从事电力电容器制造工作。

附录 A:模型参数

A.1 接触对参数

本文共建立 4 组接触对:芯棒-基础层采用 Bonded 接触,薄膜层间(3 组)采用 Frictional 接触,静摩擦系数取 0.2^[24]。接触算法采用增强型拉格朗日法,法向刚度因子取 0.5(摩擦接触)与 1.0(绑定接触),穿透容差设为 0.005 mm,满足精度要求。

A.2 网格无关性验证

采用 4 种网格密度对 10 N 张力下树脂 B 的基础层最大等效应力进行对比,结果如表 A.1 所示。

A.3 求解收敛性

采用完全牛顿-拉夫逊迭代法求解,子步数设为 10~100,力和位移收敛容差分别取 0.5%和 1.0%。所有 6 个工况均在第 3~5 子步内达到收敛,最终不平衡力范数<0.3%,位移增量范数<0.6%,求解稳定性良好。

表 A.1 网格无关性验证结果
Table A.1 Grid independence verification results

网格方案	全局尺寸/mm	单元总数	基础层最大应力/MPa	与精细方案偏差/%
粗	0.30	2 341	7 681.2	-3.50
中	0.15	4 912	7 912.5	-0.59
精细(本文采用)	0.05~0.1(分区)	8 855	7 959.7	基准
超精细	0.03~0.05	24 607	7 971.8	+0.15