

低温环境绝缘子热风清洗热应力安全阈值研究

方永忠

中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月7日; 发布日期: 2026年4月21日

摘要

围绕低温条件下采用热风方式清洗接触网绝缘子时的热应力安全限值问题, 选取陶瓷、玻璃以及复合材料绝缘子作为研究对象, 借助有限元数值仿真技术, 深入探讨了热风清洗过程中的热-流-固多物理场耦合作用机制。采用高压水射流冲洗配合热风干燥的联合作业模式, 设置了多组不同的环境温度与热风温度组合工况, 系统性地研究了绝缘子表面应力与位移的分布规律。数值模拟结果表明, 在低温环境中, 陶瓷材质和玻璃材质的绝缘子对温度差异表现出较高的敏感性, 当热风温度与环境温度之差超过某一临界数值时, 绝缘子表面的应力水平将逼近材料的抗弯强度极限, 从而产生损伤破坏的风险。具体而言, 陶瓷绝缘子的安全温差上限应控制在 60°C 以内, 玻璃绝缘子的安全温差上限应控制在 55°C 以内。相比之下, 复合绝缘子展现出优异的耐温变性能, 即便热风温度达到 90°C 以上, 其表面产生的应力仍然明显低于材料的强度阈值, 能够维持安全稳定运行状态。本研究成果为低温环境下绝缘子清洗工艺参数的优化设计提供了重要的理论依据, 对于确保接触网电力系统的安全可靠运行具有重要的指导意义。

关键词

低温清洗, 热应力安全阈值, 绝缘子, 热流固耦合

Study on Thermal Stress Safety Threshold of Low Temperature Environment Insulator Hot Air Cleaning

Yongzhong Fang

China Railway Urumqi Bureau Group Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: March 15, 2026; accepted: April 7, 2026; published: April 21, 2026

Abstract

Focusing on the safety limit of thermal stress when cleaning contact network insulators with hot air under low-temperature conditions, ceramic, glass, and composite insulators were selected as research

subjects. Using finite element numerical simulation technology, the thermal-fluid-solid multiphysics coupling mechanism during the hot air cleaning process was thoroughly investigated. A combined operation mode involving high-pressure water jet flushing and hot air drying was adopted, with multiple sets of different ambient and hot air temperature combinations systematically studied to analyze the distribution patterns of stress and displacement fields on insulator surfaces. Numerical simulation results indicate that in low-temperature environments, ceramic and glass insulators exhibit high sensitivity to temperature differences. When the temperature difference between hot air and ambient conditions exceeds a critical threshold, the stress level on insulator surfaces approaches the bending strength limit of the materials, posing a risk of damage. Specifically, the safe temperature difference limit for ceramic insulators should be kept below 60°C, while that for glass insulators should be below 55°C. In contrast, composite insulators demonstrate excellent thermal resistance, with surface stress levels significantly below the material strength threshold even at hot air temperatures exceeding 90°C, enabling safe and stable operation. These findings provide crucial theoretical support for optimizing cleaning process parameters in low-temperature environments and hold significant guiding implications for ensuring the safe and reliable operation of contact network power systems.

Keywords

Low Temperature Cleaning, Thermal Stress Safety Threshold, Insulator, Thermal Fluid Solid Coupling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

低温环境下绝缘子清洗是保障电力系统安全运行的关键环节。在低温高污染区域，绝缘子表面易积污覆冰，严重影响绝缘性能，可能引发污闪事故，威胁电网稳定[1]。随着我国电力需求的持续增长和极端天气事件的频发，低温环境下绝缘子清洗技术的重要性愈发凸显。

目前，绝缘子清洗技术主要包括带电水冲洗、热水除冰、热力除冰、干冰清洗、激光清洗等多种方法。带电水冲洗技术相对成熟，需遵循 GB/T13395-2008《电力设备带电水冲洗导则》等标准，但在低温下易结冰，需严格控制水温、环境温度和冲洗参数[2][3]。近年来，智能水冲洗装置的发展使得冲洗过程能够实现实时监测和智能调控，提高了清洗效率和安全性[4]。干冰清洗技术利用固态二氧化碳颗粒的冲击力和升华作用去除污垢，具有无水残留、环保无污染、可带电作业等优势，逐渐成为绝缘子清洗的重要方法[5][6]。激光清洗技术则通过高能量密度的激光束照射绝缘子表面，实现无接触、无损伤的高效清洁，为绝缘子清洗提供了新的技术途径[7]。

在低温除冰方面，热力除冰技术因其效果显著而受到广泛关注。热力除冰主要包括热风除冰、热水除冰和电加热器除冰等方法。研究表明，热风除冰法除冰速度适中，带电除冰安全性较高，具有较好的应用前景[8]。近年来，无人机热射流除冰技术的出现为高海拔、重覆冰地区的绝缘子除冰提供了新的解决方案，该技术能够避免人员登塔作业，大幅降低安全风险，提高作业效率[9]。

然而，绝缘子在清洗和除冰过程中面临热应力损伤风险，不同材质绝缘子的热响应特性差异显著。盆式绝缘子电热老化研究表明，热分解机制和活化能参数对绝缘寿命预测至关重要。环氧树脂复合材料在电热应力下会产生微观缺陷，影响绝缘性能[10][11]。复合绝缘子芯棒在湿热环境下易热老化，导致酥

朽断裂[12]。陶瓷和玻璃绝缘子在低温清洗中的热应力特性需特别关注。电网支柱瓷绝缘子温度循环效应会导致内部热应力累积，可能引发破裂。刚性接触网悬挂瓷绝缘子破裂主要由机械应力和热应力共同作用导致，制定清洗方案时需严格控制温度变化速率[1] [13]。玻璃绝缘子因导热性能差，急剧温度变化易产生温度梯度和热应力，需采用渐进式加热或冷却策略[14]。

尽管国内外学者在绝缘子清洗技术领域开展了广泛研究，但关于低温环境下热风清洗过程中热应力安全阈值的研究仍然相对较少。特别是对于不同材质绝缘子在温度梯度作用下的应力响应特性缺乏系统性的认识，难以制定科学合理的清洗工艺参数。现有研究多集中于单一清洗技术的效果评估，而对清洗过程中绝缘子材料的热-流-固耦合机制研究不够深入，缺乏针对不同材质绝缘子的热应力安全阈值确定方法。此外，现有研究在低温环境下绝缘子清洗的热应力损伤机理、安全温度变化范围确定以及清洗工艺参数优化等方面仍存在明显不足。

本文以陶瓷、玻璃和复合绝缘子为研究对象，采用数值仿真与理论分析相结合的方法，深入探讨低温环境下热风清洗过程中的热-流-固耦合机制，系统分析不同材质绝缘子在温度梯度作用下的应力响应特性，确定不同材质绝缘子的热应力安全阈值，为低温清洗工艺的优化设计提供理论支撑，从而提高绝缘子清洗的安全性和可靠性，延长绝缘子使用寿命，确保电力系统的安全稳定运行。

2. 研究对象与方法

2.1. 研究对象

选取铁路接触网系统中应用最为广泛的三种典型绝缘子作为研究对象，分别为瓷绝缘子、玻璃绝缘子和复合绝缘子。瓷绝缘子采用高铝陶瓷材料制造，具有优异的电气绝缘性能和机械强度，但其抗热冲击性能相对较弱。玻璃绝缘子采用钢化玻璃材料，表面光滑致密，憎水性能良好，但在温度急剧变化时容易产生应力集中。复合绝缘子以硅橡胶材料为伞裙护套，玻璃纤维增强塑料为芯棒，兼具良好的电气性能和机械性能，且具有优异的耐候性和抗老化能力。

2.2. 模型简化

本研究在建立绝缘子热风清洗数值仿真模型时，对实际工程问题进行了必要的简化，主要包括以下几个方面：

(1) 几何简化：将复杂的绝缘子结构简化为典型的棒式模型，忽略了伞裙边缘的细微几何特征和表面粗糙度。这种简化虽然降低了计算复杂度，但可能影响局部流场分布和应力集中的精确预测，特别是在伞裙根部等关键区域。

(2) 忽略残余水分相变：模型中未考虑水冲洗后绝缘子表面残余水分在热风作用下的相变过程(蒸发、结冰等)。实际上，水分的蒸发会吸收热量，影响绝缘子表面的温度分布；而在极低温条件下，残余水分可能发生相变放热，这些因素都会对热应力分布产生影响。

(3) 理想化气流假设：采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型描述热风流动，假设热风为均匀、稳定的层流或湍流，忽略了实际作业中气流的不稳定性、涡流效应以及环境风对热风流场的干扰。这些理想化假设可能导致对流换热系数的计算偏差。

(4) 材料均匀性假设：将绝缘子材料视为各向同性的均匀连续介质，忽略了陶瓷和玻璃材料内部可能存在的微观缺陷、气孔以及复合材料的界面效应。实际材料的不均匀性可能导致局部应力集中，影响热应力分布的准确性。

(5) 边界条件简化：将绝缘子端面设定为固定壁面，忽略了实际安装中可能存在的微小位移和振动；同时，将环境温度设定为恒定值，未考虑温度波动的影响。

这些简化虽然在一定程度上影响了仿真结果的精度，但在工程应用中是必要的权衡。通过保守的设计参数和安全裕度，可以在保证工程安全的前提下，有效降低计算成本，为实际作业提供有价值的指导。

以典型的棒式绝缘子为例，选用材质为陶瓷、玻璃和复合材质，简化后的模型见图 1。

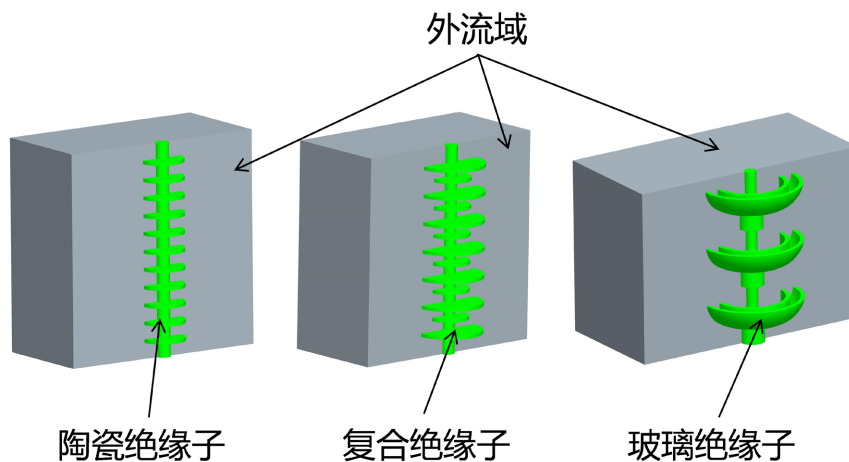


Figure 1. Simplified model of insulator simulation
图 1. 绝缘子仿真简化模型

陶瓷绝缘子的主体材料是陶瓷，其成分主要包括氧化铝和氧化锆；玻璃绝缘子的伞裙材料为钢化玻璃，还包括铁帽及钢脚；复合绝缘子伞裙是硅橡胶材质，芯棒是玻璃纤维增强环氧树脂复合材料，相关材料特性见表 1 [15] [16]。

Table 1. Characteristics of insulator materials
表 1. 绝缘子材料特性

材质	密度(g/cm ³)	弹性模量(GPa)	抗弯强度(MPa)	抗压强度(MPa)
陶瓷	3.6	300	290	850
复合	1.8	50	310	340
玻璃	2.4	72	70	120

2.3. 数值仿真方法

采用三维设计软件和有限元分析软件 ANSYS 建立绝缘子的三维数值模型，通过热 - 流 - 固耦合计算方法模拟热风清洗过程中的多物理场相互作用[17]。仿真过程包括流体域计算、温度场计算和应力场计算三个主要步骤。

在流体域计算中，采用标准 k-ε 湍流模型描述热风的流动特性，考虑了热风速度、温度、湍流强度等参数对绝缘子表面换热系数的影响[18]。网格划分后示意图见图 2。

边界条件设置如下：入口边界设定为速度入口，热风速度范围为 10 m/s 至 40 m/s，温度范围为 40℃ 至 90℃；出口边界设定为压力出口，相对压力为零；绝缘子表面设定为无滑移壁面边界。

在温度场计算中，考虑了绝缘子内部的热传导过程以及表面的对流换热过程。初始条件设定绝缘子整体温度与环境温度相同，环境温度变化范围为 -20℃ 至 0℃。采用瞬态热分析方法，计算时间步长设定为 1 秒，总计算时间为 300 秒，确保达到热平衡状态。数值仿真边界条件见表 2。

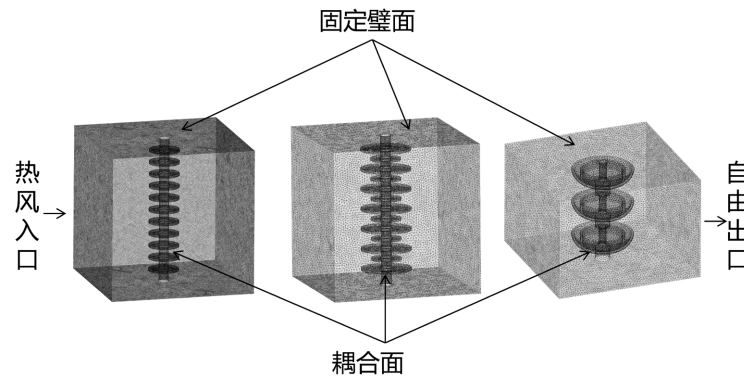


Figure 2. Grid division diagram
图 2. 网格划分示意图

Table 2. Numerical simulation boundary conditions
表 2. 数值仿真边界条件

边界类型	边界条件	参数设置
入口边界	速度入口	热风速度 10~40 m/s, 温度 40°C~90°C
出口边界	压力出口	相对压力为零
绝缘子表面	无滑移壁面	-
初始条件	温度场	绝缘子整体温度与环境温度相同
计算时间	瞬态分析	时间步长 1 秒, 总计算时间 300 秒

在应力场计算中, 将温度场计算得到的温度分布作为热载荷施加到结构分析模型中, 同时考虑了绝缘子承受的风载荷。采用弹性本构关系描述绝缘子材料的力学行为, 假设材料为各向同性线弹性体。通过有限元求解得到绝缘子内部的应力分布和位移, 重点关注伞裙根部、法兰连接处等应力集中区域的应力水平。

2.4. 工况设置

为了系统研究不同工况下绝缘子的热应力响应特性, 设计了多组数值仿真工况。环境温度设定为 -20°C ~ 0°C 三个等级, 覆盖了我国北方地区冬季的典型温度范围。热风温度设定为 40°C ~ 90°C 六个等级, 涵盖了从温和干燥到高温强化的完整温度区间。热风速度设定为 10~40 m/s 三个等级, 代表低速、中速和高速多种清洗工况。

通过组合不同的环境温度、热风温度和热风速度参数, 共形成 72 组仿真工况。数值仿真工况参数见表 3。

Table 3. Numerical simulation operating condition parameters
表 3. 数值仿真工况参数

参数类型	参数等级	具体数值
环境温度	3 个等级	-20°C , -10°C , 0°C
热风温度	6 个等级	40°C , 50°C , 60°C , 70°C , 80°C , 90°C
热风速度	4 个等级	10 m/s, 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s
仿真工况总数	-	72 组

对于每一组工况，分别计算三种材质绝缘子的温度场分布和应力场分布，记录关键位置的最大应力值和最大位移值，为后续的安全阈值分析提供数据支撑。

3. 结果与讨论

3.1. 温度场分布特性

数值仿真结果显示，在热风清洗过程中，绝缘子表面的温度分布呈现出明显的不均匀性。由于热风直接冲击绝缘子迎风面，该区域的温度上升速度最快，温度幅值最高。随着热风沿着绝缘子表面流动，气流速度逐渐降低，换热强度减弱，背风面的温度上升相对滞后。在达到热平衡状态后，绝缘子表面形成了从迎风面到背风面的温度梯度，这种温度分布的不均匀性是产生热应力的根本原因。

对于陶瓷绝缘子而言，由于其导热系数相对较低，内部热传导过程较为缓慢，表面温度与内部温度之间存在较大的差异。其典型工况风速和温度分布云图见图 3。

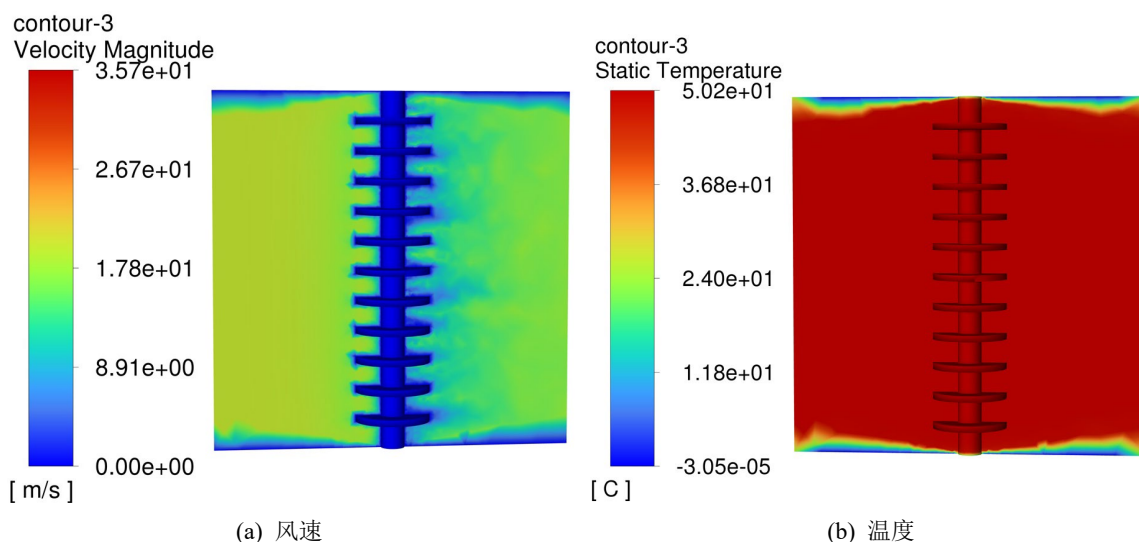


Figure 3. Cloud map of wind speed and temperature distribution of ceramic insulators
图 3. 陶瓷绝缘子风速和温度分布云图

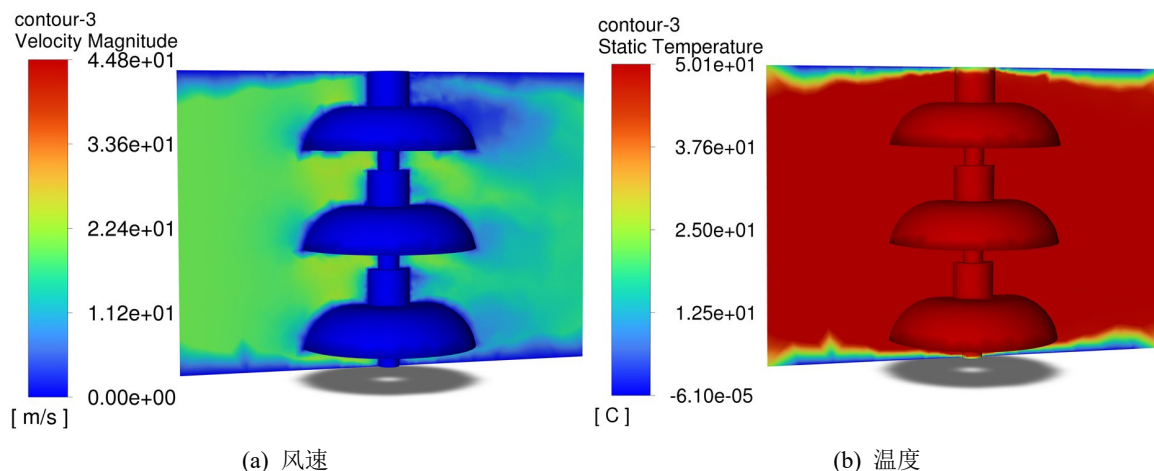


Figure 4. Cloud map of wind speed and temperature distribution for glass insulators
图 4. 玻璃绝缘子风速和温度分布云图

在热风温度为 50℃、环境温度为 0℃ 的工况下，绝缘子表面最高温度达到 44℃，而内部最低温度仅为 4℃，内外温差高达 40℃。这种显著的温度梯度会在绝缘子内部产生较大的热应力，特别是对于伞裙等薄壁结构，热应力的影响更为突出。

玻璃绝缘子的导热系数略高于陶瓷绝缘子，但其热膨胀系数较大，对温度变化的敏感性更强，其典型工况风速和温度分布云图见图 4。

在相同的工况下，玻璃绝缘子表面最高温度达到 46℃，内部最低温度为 7℃，内外温差为 39℃。虽然温差数值与瓷绝缘子相近，但由于热膨胀系数的差异，玻璃绝缘子产生的热应力水平会明显高于瓷绝缘子。

复合绝缘子的导热系数最高，但由于硅橡胶材料具有较低的热膨胀系数和良好的弹性模量，其热应力响应特性与瓷绝缘子和玻璃绝缘子存在显著差异，其典型工况风速和温度分布云图见图 5。

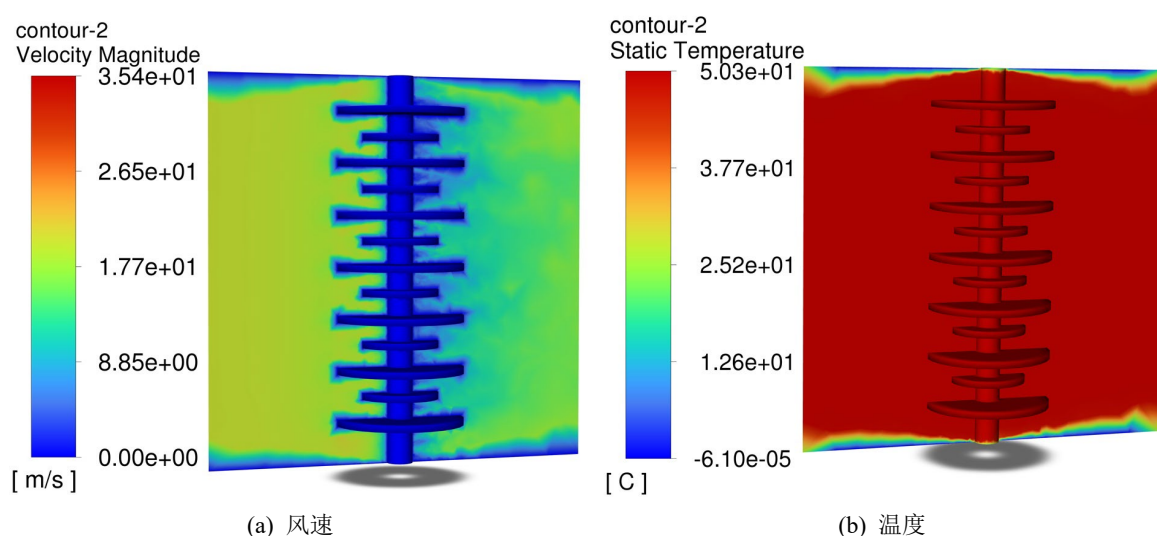


Figure 5. Cloud map of wind speed and temperature distribution of composite insulators

图 5. 复合绝缘子风速和温度分布云图

在相同工况下，复合绝缘子表面最高温度达到 48℃，内部最低温度为 9℃，内外温差为 39℃。尽管表面温度较高，但由于材料的热膨胀系数较小，且硅橡胶具有一定的变形能力，能够通过弹性变形释放部分热应力，因此其内部应力水平相对较低。

3.2. 应力场分布特性

通过对绝缘子应力场的分析发现，热应力主要集中在伞裙根部、法兰连接处以及材料界面等几何不连续区域。这些区域由于几何形状的突变，容易产生应力集中现象，在温度载荷的作用下应力水平显著高于其他部位。不同风速对绝缘子的风载影响较小，对应力影响也较小。

3.2.1. 陶瓷绝缘子

对于陶瓷绝缘子，最大应力通常出现在伞裙根部与芯棒连接处，其变形和应力分布云图见图 6。

在热风温度为 50℃、环境温度为 0℃ 的工况下，最大应力为 216 MPa。随着热风温度的进一步升高，应力水平持续增大，不同工况下陶瓷绝缘子表面的最大应力和形变如图 7 所示。

当温差达到 60℃ 时，最大应力达到 245 MPa，接近了陶瓷材料的强度极限(290 MPa)，如温差继续加大则存在开裂风险。

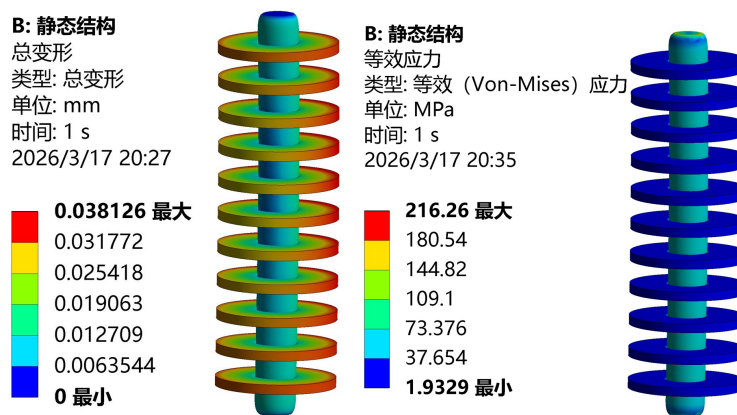


Figure 6. Cloud map of deformation and stress distribution of ceramic insulators
图 6. 陶瓷绝缘子形变和应力分布云图

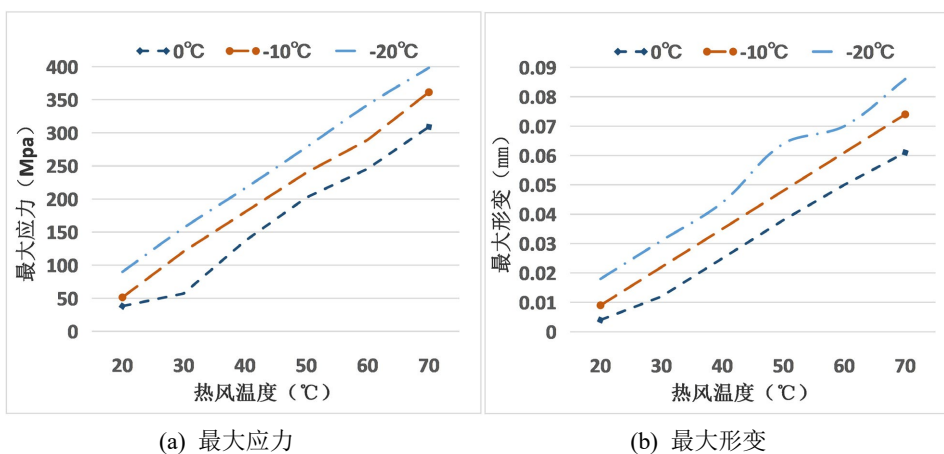


Figure 7. Stress and deformation curves under different operating conditions (ceramic insulator)
图 7. 不同工况下应力和形变曲线(陶瓷绝缘子)

3.2.2. 玻璃绝缘子

玻璃绝缘子的应力集中现象更为明显，最大应力出现在伞裙边缘和法兰连接处，其形变和应力分布云图见图 8。

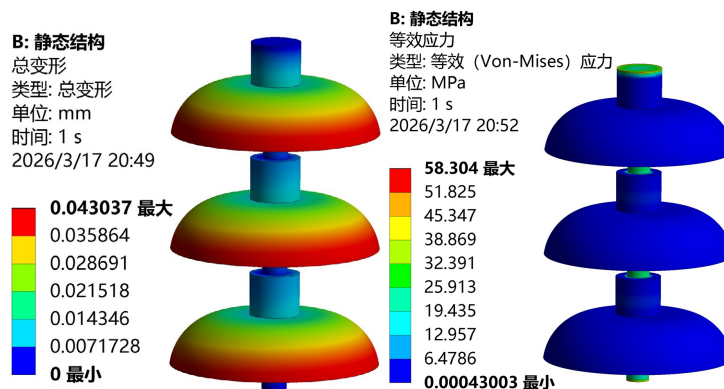


Figure 8. Cloud map of deformation and stress distribution of glass insulators
图 8. 玻璃绝缘子形变和应力分布云图

在热风温度为 55℃、环境温度为 0℃ 的工况下，最大应力为 58 MPa。随着温差的进一步升高，应力水平持续增大，不同工况下玻璃绝缘子表面的最大应力和形变见图 9。

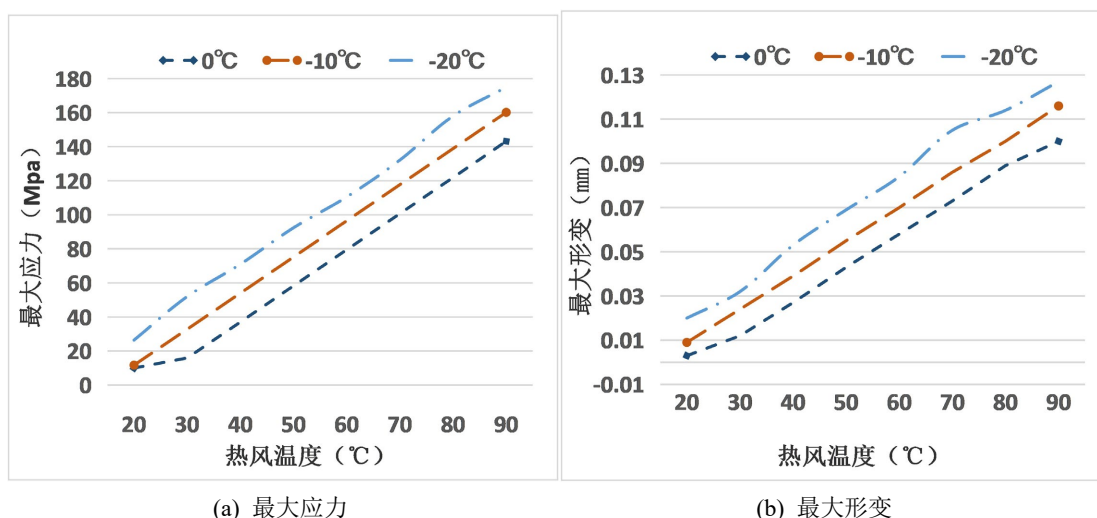


Figure 9. Stress and deformation curves under different operating conditions (glass insulator)
图 9. 不同工况下应力和形变曲线(玻璃绝缘子)

当温差达到 60℃ 时，最大应力达到 69 MPa，接近了玻璃材料的强度极限(70 MPa)，如温差继续加大则可能引发脆性断裂。

3.2.3. 复合绝缘子

相比之下，复合绝缘子的应力分布相对均匀，应力集中程度较低，其形变和应力分布云图见图 10。

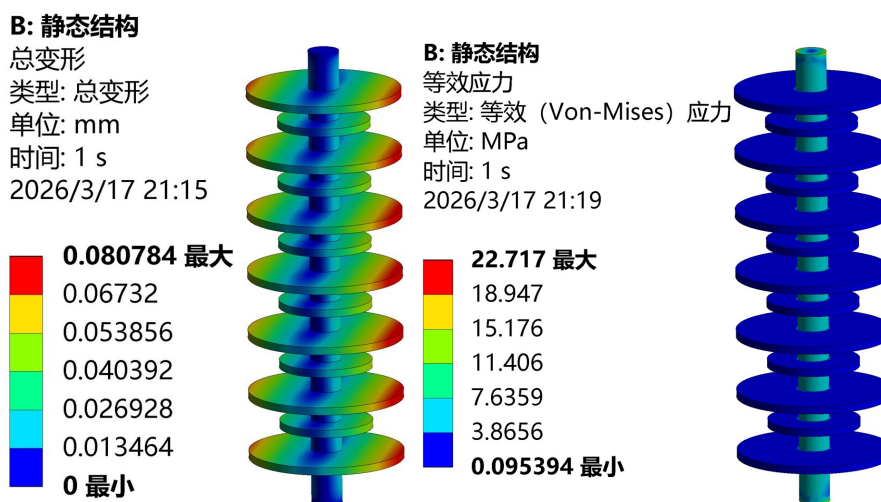


Figure 10. Cloud map of deformation and stress distribution of composite insulators
图 10. 复合绝缘子形变和应力分布云图

由于复合绝缘子材料具有良好的弹性和较低的弹性模量，能够通过变形适应温度变化产生的体积膨胀，因此内部应力水平显著低于瓷绝缘子和玻璃绝缘子。随着温差的进一步升高，应力水平持续增大，不同工况下复合绝缘子表面的最大应力和形变见图 11。

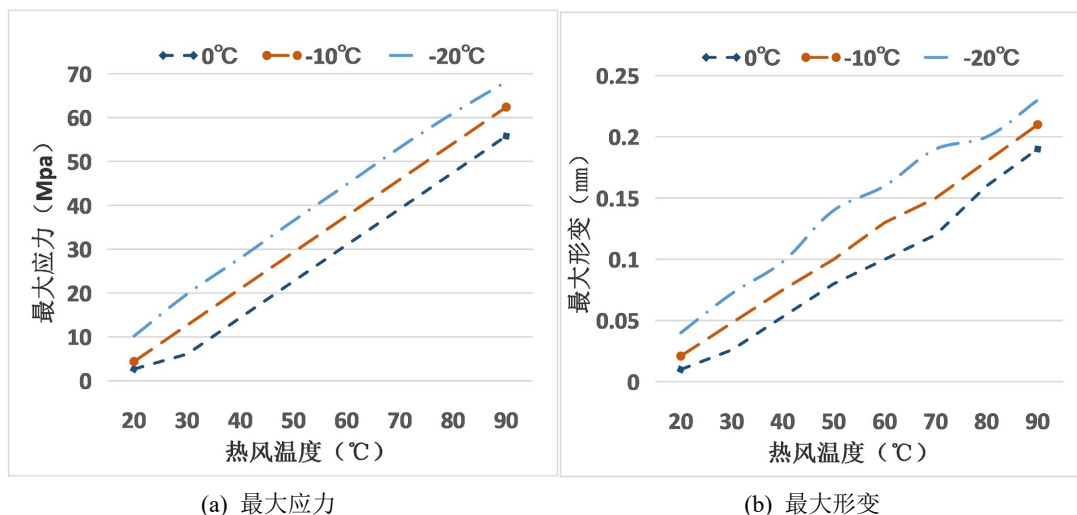


Figure 11. Stress and deformation curves under different operating conditions (composite insulator)
图 11. 不同工况下应力和形变曲线(复合绝缘子)

即使在热风温度达到 90°C、环境温度为-20°C的极端工况下，复合绝缘子的最大应力仅为 68 MPa，远低于复合绝缘子的材料强度极限(310 MPa)，能够保持安全稳定运行。

3.3. 热应力安全阈值分析

3.3.1. 绝缘子失效模式

绝缘子低温清洗可能面临多种失效：

- (1) 热冲击失效：温度变化快导致陶瓷材料内部产生裂纹或破碎。
- (2) 脆性断裂：玻璃绝缘子在应力集中且有缺陷时发生。
- (3) 界面失效：复合绝缘子硅橡胶伞裙与玻璃纤维芯棒因热膨胀系数不匹配而剥离或脱粘。
- (4) 电气性能退化：温度变化影响介电常数等。
- (5) 疲劳失效：反复温度循环致材料疲劳产生裂纹。

本研究考虑了多种失效模式，通过安全阈值分析，为低温清洗提供安全评估框架，但实际应用要结合工况和监测数据综合判断。

3.3.2. 安全阈值

基于上述数值仿真结果，确定不同材质绝缘子在低温环境下的热应力安全阈值。绝缘子材料在实际应用中需要考虑安全系数，通常取 1.25~1.5 [15] [16]。本研究采用 80%的抗弯强度作为安全阈值，对应安全系数为 1.25，符合工程设计的一般要求。

对于陶瓷绝缘子，当环境温度为-20°C、-10°C和 0°C时，安全热风温度分别为 40°C、50°C、60°C，对应的安全温差均为 60°C。由此可见，陶瓷绝缘子的安全温差基本保持在 60°C左右，与环境温度的关系不大。

对于玻璃绝缘子，当环境温度为-20°C、-10°C和 0°C时，安全热风温度为 35°C、45°C、55°C，对应的安全温差为 55°C，玻璃绝缘子的安全温差略低于瓷绝缘子，约为 55°C。

对于复合绝缘子，由于其优异的耐温变性能，在本文研究的温度范围内(-20°C至 0°C)，即使热风温度达到 90°C，对应的最大温差为 110°C，绝缘子内部产生的热应力仍然远低于材料的强度极限。因此，复合绝缘子在低温环境下采用热风清洗具有很高的安全裕度，无需严格限制热风温度。

通过以上分析, 得到不同材质绝缘子的热应力安全阈值见表 4

Table 4. Thermal stress safety threshold of insulators made of different materials
表 4. 不同材质绝缘子的热应力安全阈值

绝缘子类型	环境温度	安全热风温度	安全温差
陶瓷绝缘子	-20°C	40°C	60°C
	-10°C	50°C	60°C
	0°C	60°C	60°C
玻璃绝缘子	-20°C	35°C	55°C
	-10°C	45°C	55°C
	0°C	55°C	55°C
复合绝缘子	-20°C至0°C	90°C以上	110°C

3.3.3. 热应力差异分析

热应力与材料的弹性模量、热膨胀系数和温度变化量成正比, 热应力计算公式为:

$$\sigma \approx E\alpha\Delta T$$

其中 σ 为热应力, E 为弹性模量, α 为膨胀系数, ΔT 为温度变化量。

(1) 陶瓷绝缘子的弹性模量高达 300 GPa, 热膨胀系数相对较大, 因此在相同的温度梯度下会产生较大的热应力。同时, 陶瓷材料的导热系数较低, 导致温度梯度在材料内部难以快速均匀化, 进一步加剧了热应力的集中。当环境温度为 -20°C 至 0°C 时, 陶瓷绝缘子的安全温差仅为 60°C, 这与其较高的弹性模量和较低的热传导性能密切相关。

(2) 玻璃绝缘子的弹性模量为 72 GPa, 虽然低于陶瓷, 但其热膨胀系数相对较小, 且抗弯强度仅为 70 MPa, 远低于陶瓷的 290 MPa。玻璃的脆性特征使其在应力集中区域容易发生脆性断裂, 特别是在存在表面缺陷的情况下。其安全温差为 55°C, 略低于陶瓷, 这主要归因于其较低的强度极限和较高的脆性。

(3) 复合绝缘子的弹性模量仅为 50 GPa, 热膨胀系数相对较小, 且具有优异的导热性能。更重要的是, 复合绝缘子由硅橡胶伞裙和玻璃纤维芯棒组成, 这种复合结构具有良好的柔韧性和抗冲击性能。硅橡胶材料具有较低的热膨胀系数和良好的弹性, 能够有效缓解热应力。在 -20°C 至 0°C 的环境温度范围内, 即使热风温度达到 90°C (温差 110°C), 复合绝缘子内部产生的热应力仍然远低于其抗弯强度 310 MPa, 这充分体现了其优异的耐温变性能。

三种材料的热应力响应差异主要由其弹性模量、热膨胀系数、导热系数以及材料结构的综合效应决定。陶瓷和玻璃材料由于较高的弹性模量和较低的韧性, 在热冲击下容易产生较大的热应力; 而复合绝缘子凭借其复合材料的结构优势和各组分材料的协同效应, 展现出卓越的抗热冲击能力。

4. 结论

(1) 在热风清洗过程中, 热应力主要集中在伞裙根部、法兰连接处等几何不连续区域, 这些区域容易产生应力集中现象。陶瓷绝缘子和玻璃绝缘子由于材料脆性较大, 对应力集中较为敏感, 容易产生开裂破坏。

(2) 陶瓷绝缘子的安全温差阈值约为 60°C, 玻璃绝缘子的安全温差阈值约为 55°C。在制定清洗工艺参数时, 应严格控制热风温度, 确保热风温度与环境温度之差不超过安全阈值。

(3) 复合绝缘子展现出优异的耐温变性能, 即使在温差达到 110°C 的极端工况下, 其内部热应力仍然

远低于材料强度极限，能够保持安全稳定运行。因此，复合绝缘子特别适合在低温环境下采用热风清洗技术。

(4) 本研究成果为低温环境下绝缘子清洗工艺参数的优化设计提供了理论依据，对于确保接触网电力系统的安全可靠运行具有重要的指导意义。在实际工程应用中，应根据绝缘子材质类型合理选择清洗参数，既要保证清洗效果，又要避免热应力损伤。

参考文献

- [1] 赵洲峰, 郭锋, 赵峥, 等. 电网支柱瓷绝缘子的温度循环效应和断裂失效影响分析[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 392-398.
- [2] 涂磊. 变电设备热力除冰技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [3] 罗毅. 低温、高污染地区接触网绝缘子清洗装置研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [4] 张霆, 吴文海, 蓝天, 等. 接触网绝缘子带电水冲洗的关键参数研究[J]. 机械设计与制造, 2022(5): 181-184.
- [5] 刘溟, 王家礼, 马心良, 等. 干冰清洗变电站绝缘子试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1735-1740.
- [6] 蔡忠良, 樊绍胜, 朱航. 变电站支柱绝缘子干冰清洗机器人的视觉伺服控制方法[J]. 电力学报, 2022, 37(3): 219-231.
- [7] 王帅, 李忠涛, 张辉, 等. 变电设备激光除冰技术的应用分析[J]. 云南电力技术, 2023, 51(5): 82-87.
- [8] 张志劲, 杨晟欢, 蒋兴良, 等. 电力设备热水除冰过程水射流特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 1012-1019.
- [9] 蒋浩. 合成热射流防/除冰技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 国防科技大学, 2017.
- [10] 任鹏. GIS 盆式绝缘子电热老化的热动力学特性与绝缘寿命预测方法[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [11] 施毅舟, 张欣, 李西育, 等. 基于应力应变分析的盆式绝缘子破裂趋势判断方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2015, 4(2): 19-22.
- [12] 卢明, 高超, 吴焱松, 等. 复合绝缘子脆性断裂与酥朽断裂差异性研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2317-2325.
- [13] 毕伟伟, 李漪, 李子睿. 高压支柱瓷绝缘子冷热试验时炸坏原因的探讨[J]. 陶瓷研究与职业教育, 2004, 2(4): 42-44.
- [14] 冯世凯, 陈千. 复杂环境下玻璃绝缘子自爆的实时检测方法[J]. 电瓷避雷器, 2024(5): 85-92.
- [15] GB/T 8411.3-2009. 陶瓷和玻璃绝缘材料. 第3部分: 材料性能[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [16] DL/T 376-2010. 复合绝缘子用硅橡胶绝缘材料. 通用技术条件[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [17] 方永忠. 基于热流固耦合的接触网绝缘子低温清洗技术研究[J]. 应用物理, 2024, 14(10): 680-691.
- [18] 张东东, 万武艺, 黄宵宁, 等. 基于热-电-流耦合的芯棒碳化复合绝缘子发热特性研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 3010-3017.