

# 复合绝缘子雾凇覆冰特性与伞形结构优化研究

潘 杨

(中国电建集团河南省电力勘测设计院有限公司, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 复合绝缘子覆冰特性受伞形结构影响较大。为研究复合绝缘子自然雾凇覆冰特性, 揭示伞形结构差异对覆冰的影响规律, 选取 8 种 220 kV 复合绝缘子在湖南雪峰山自然覆冰试验站进行试验。试验结果显示: 复合绝缘子迎风面两侧边缘冰厚明显大于中部, 增速先快后慢; 迎风侧冰棱长度在覆冰初期一段时间后增长速度有所减缓, 之后再次加快, 后期再次变慢并有饱和趋势; 背风面冰厚小于迎风面, 增速随时间减缓, 在试验后期趋于饱和。通过试验和分析, 针对雾凇覆冰地区复合绝缘子伞形结构优化给出以下建议: 在允许的范围内适当增大伞裙的倾斜角度; 相邻伞裙的间距应大于 40 mm, 同时大伞之间可分布若干中小伞径伞裙, 个数宜在 3 个以上; 大中小伞伞下不宜有棱, 伞径可分别取 250 mm、150 mm 和 90 mm, 排列方式以“大-小-中-小-中-小-大”为宜。

**关键词:** 复合绝缘子; 雾凇; 覆冰特性; 伞形结构; 优化

## The rime icing characteristics of composite insulator and the optimization of shed configuration

PAN Yang

(Power China Henan Electric Power Survey & Design Institute Corporation Limited, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** The sheds structure of composite insulators is the important factor that affect icing process and icing flashover voltage. In order to study the icing characteristics of rime and the influence of shed structure on the icing process, the icing tests of 8 composite insulators with different shed structures were carried out at Xuefengshan natural icing test station. The results are as follows: the ice on windward edge is thicker than the middle part; the length of ice ridges on the windward side grows more slowly soon after the icing starts, then begins to accelerate for a period of time, then slows down again at the later stage and has a tendency to saturation. The ice on the leeward side is obviously thinner than that on the windward side, its growth rate shows a trend of first fast and then slow, and the thickness tends to be saturated. The thickest icing area of composite insulator is the edge of windward surface. The structural optimization design suggestions of composite insulator umbrella skirt in rime icing area are given: appropriately increase the top surface inclination; shed distance should be more than 40mm, and there should be more than three middle or small sheds between the adjacent large sheds; there shouldn't be any edge under large, middle or small sheds, their diameters prefer to be 250/150/90 mm, and the arrangement can be "large-small-middle-small-middle-small-large".

**Key words:** composite insulator; rime; icing characteristics; sheds structure; optimization

## 0 引言

复合绝缘子覆冰后外绝缘水平将大大降低,

已有运行经验和人工模拟结果均表明, 复合绝缘子冰闪特性并不明显优于瓷和玻璃绝缘子, 这与

复合绝缘子伞裙间隙小、伞形结构设计没有考虑覆冰的影响有关<sup>[1-8]</sup>。

目前该领域研究大都基于软件仿真和人工覆冰试验，然而人工气候室受其空间狭窄的限制，在模拟形成条件更严苛的雾凇覆冰时有些力不从心，因此对雨凇覆冰的研究较多。为研究复合绝缘子雾凇覆冰特性，本文选取8种不同220 kV复合绝缘子，在湖南雪峰山自然覆冰试验站进行试验。试验中选取若干特征量，测量并记录其随时间的增长特性。在此基础上进一步分析不同伞形结构对覆冰程度的影响，并提出相关优化建议。研究结果可为复合绝缘子雾凇覆冰机理、预测模型建立和伞形结构设计提供参考。

1 试验平台和试品及方法

1.1 试验平台

雪峰山自然覆冰试验站位于湖南省怀化市，具有典型的微地形、微气象特征，11月至次年3月为覆冰季节，年降水量超过1 800 mm，雷暴日超过80天，最大风速超过35 m/s，阴雨雾霾天气超200天；覆冰频次高，持续时间长；最大雨凇覆冰厚度超过500 mm。

在自然覆冰试验站中架设两个9 m×9 m×9 m的试验塔，用于布置各种型式的瓷、玻璃和复合绝缘子及不同直径和分裂方式的导线，两个试验塔之间试验线段为120 m，其覆冰效果如图1所示。



图1 雪峰山自然覆冰试验站  
Fig. 1 Xuefeng mountain natural icing test station

1.2 试品

试品为8种不同伞形结构的220 kV复合绝缘

子，绝缘子由同一厂家生产，仅外形结构不同。其结构示意图如图2所示，基本技术参数见表1。

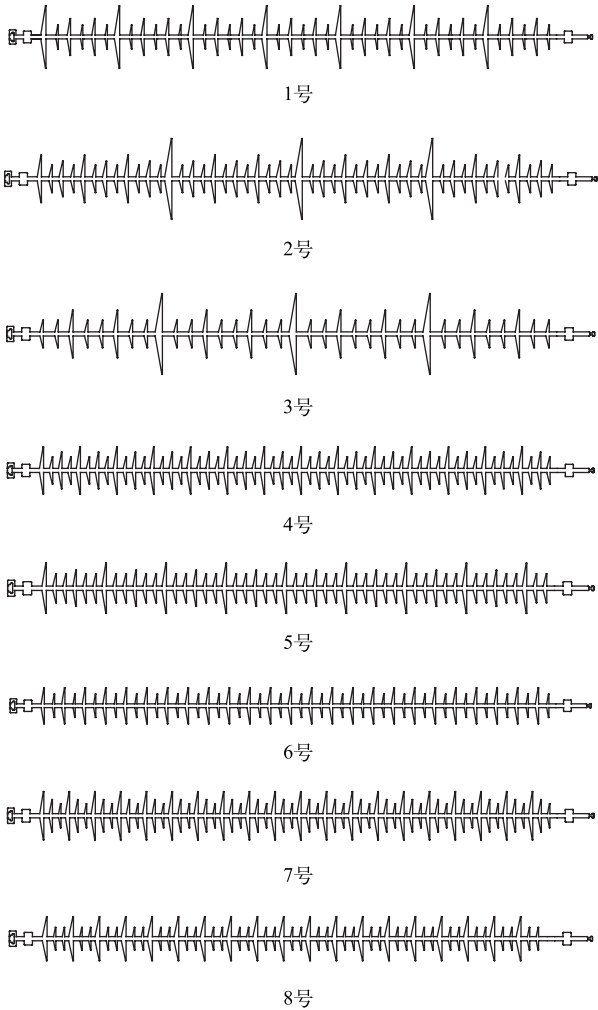


图2 试品结构示意图  
Fig. 2 Structure diagram of tested insulator

表1 试品的基本技术参数  
Tab. 1 Parameters of the test specimens

| 编号 | 伞裙直径/mm         | 结构高度<br>H/mm | 芯棒直径<br>D/mm | 伞间距<br>S/mm | 爬电距离<br>L/mm | 伞裙上倾角<br>$\alpha$ (°) |
|----|-----------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-----------------------|
| 1  | 250/150/100     | 2 140        | 32           | 47          | 7 500        | 20                    |
| 2  | 300/180/130/100 | 2 240        | 25           | 40          | 8 200        | 20                    |
| 3  | 300/180/100     | 2 240        | 25           | 53          | 6 300        | 20                    |
| 4  | 180/140/100     | 2 240        | 22           | 35          | 8 800        | 10                    |
| 5  | 180/130/100     | 2 140        | 32           | 35          | 7 500        | 20                    |
| 6  | 150/100         | 2 240        | 32           | 40          | 7 800        | 20                    |
| 7  | 180/120/90      | 2 240        | 26           | 32          | 9 400        | 10                    |
| 8  | 160/85          | 2 240        | 26           | 32          | 7 800        | 10                    |

### 1.3 试验方法

将试品事先悬挂在试验塔上等待覆冰天气，布置方式如图3所示，从左到右依次为1~8号复合绝缘子，其中1号绝缘子大伞下有棱。



图3 试品布置图

Fig. 3 Arrangement of the test specimens

复合绝缘子雾凇覆冰外貌与雨凇有较大区别，主要向迎风方向发展，无垂直的冰棱。试验中记录了迎风面两侧边缘冰厚、迎风面冰棱长度和背风面冰厚，其中覆冰厚度用游标卡尺测量，随机选取不同大伞进行测量后取平均，再减去伞裙厚度；冰棱长度用卷尺测量大伞背风面到迎风面伸出尖端的距离减去相应伞径。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 覆冰环境条件

PortLog便携式自动气象站如图4所示，它监测到2015年1月27日19:00时温度降低至0℃以下，以此时间点作为覆冰的起始时刻。覆冰期间各气象参数的变化曲线如图5所示。其中外部温度和露点温度一开始逐步降低，第三天之后随昼夜变化有所起伏，最低温度达到-7.5℃；相对湿度一直维持在100%；初期风速较大，最大可达7.8 m/s，中后期风速白天较小，夜间有所上升；风向整体上以北风为主。



图4 PortLog 便携式自动气象站

Fig. 4 PortLog portable automatic meteorological station

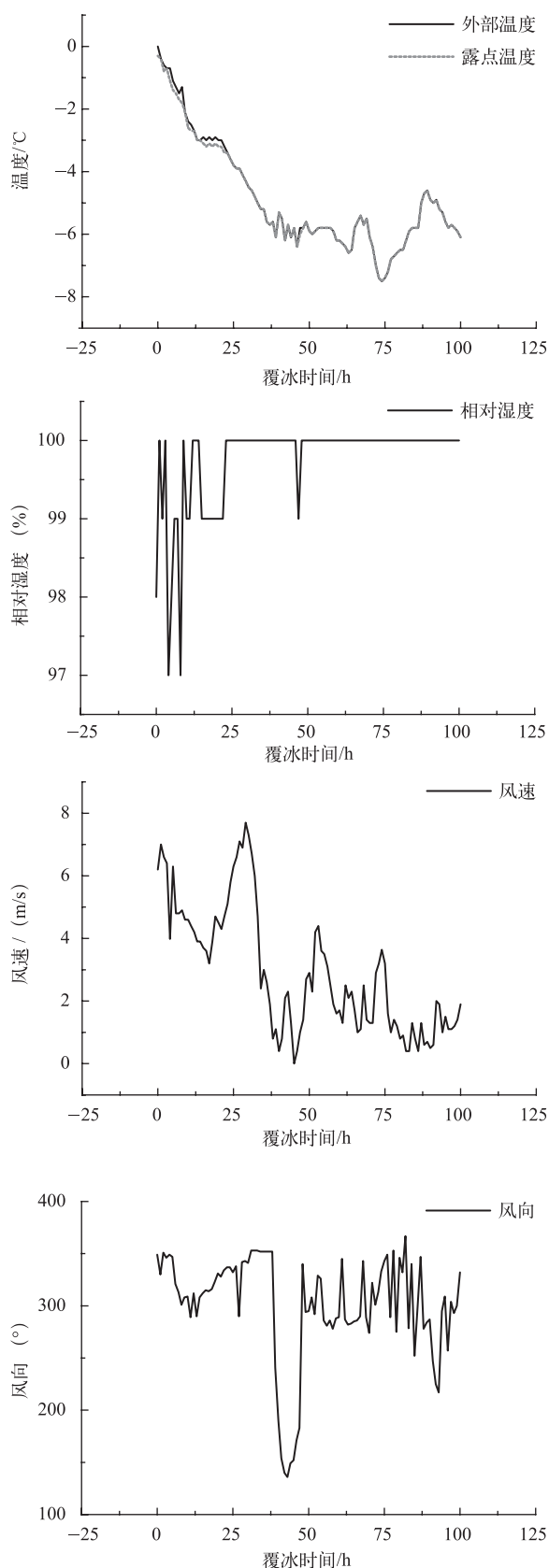


图5 覆冰环境条件

Fig. 5 The environmental conditions of the icing process

由于中后期风速较小,且覆冰趋于饱和,本次试验取前90 h的覆冰情况进行分析。

## 2.2 复合绝缘子雾凇覆冰特征

不同复合绝缘子覆冰66 h的照片如图6所示。从图6中可以看出,复合绝缘子雾凇覆冰主要是沿着伞裙边沿朝迎风侧向外伸长并不断增厚,同时伞裙上表面会出现朝迎风方向生长的冰棱,这些冰棱不断增多并伸长,导致中后期迎风面两侧边缘的覆冰厚度将明显大于迎风侧中部。当相邻两伞伞径差距不大或者伞间距较小时,就很容易被覆冰桥接,导致电气性能显著降低。与迎风侧相比,复合绝缘子背风侧覆冰则主要体现在厚度上,其覆冰较均匀且明显小于迎风侧,也不存在冰棱和桥接现象。

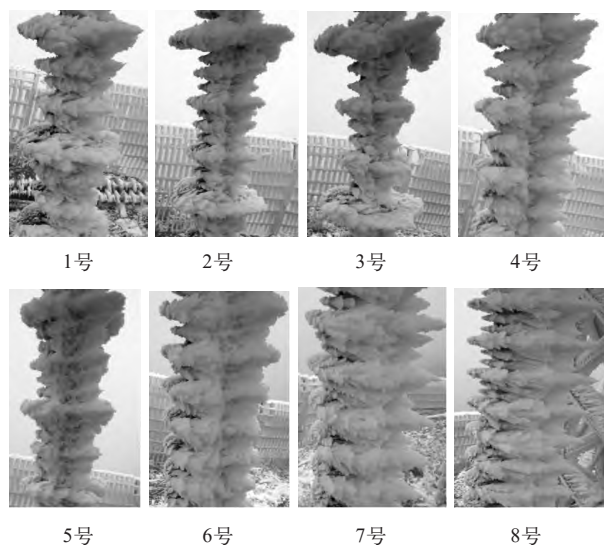


图6 不同复合绝缘子覆冰66 h照片

Fig. 6 Icing of composite insulators after 66 hours

另外,覆冰紧密粘附在复合绝缘子表面,若机械除冰与表面疏水膜一起清除,则耐污性将大大降低。相反,若等覆冰自然融化,则表面疏水膜未遭破坏,憎水性及耐污性能不受影响。

## 2.3 复合绝缘子雾凇覆冰增长规律

### (1) 迎风面两侧边缘覆冰厚度

迎风面两侧边缘覆冰厚增长情况如图7所示。从图7可以看出,迎风面两侧边缘的覆冰厚度在初期略大于中部,且在中后期明显大于

中部,呈非线性增长,增长速率由快变慢。如1号绝缘子7.5 h、12.5 h、16.5 h、22 h、42 h、66 h和90 h的迎风面两侧边缘覆冰厚度分别为8.51 mm、13.55 mm、19.55 mm、37.05 mm、53.35 mm、59.01 mm和64.43 mm,6号绝缘子相应时刻的迎风面两侧边缘覆冰厚度分别为6.16 mm、12.55 mm、15.05 mm、23.05 mm、32.38 mm、38.07 mm和45.51 mm。分析其原因为:开始覆冰后,伞裙迎风面表面出现朝迎风方向生长的冰棱,迎风面两侧边缘的厚度随冰棱生长不断增加,很快超过中部伞裙边沿伸出的冰棱,形成两边厚中间薄的现象;同时,由于伞裙迎风侧上表面能容纳的冰棱数量有限,覆冰在被冰棱布满前快速增长。后期覆冰减缓与外界风速的减小也有一定关系。

由图7还可知:结冰中后期,伞下有棱且伞径较大的1号迎风面两侧边缘覆冰最严重,其次为2号、3号绝缘子;而对比伞径差不多大小的4~8号绝缘子,发现伞裙上倾角较小的4号、7号、8号的迎风面两侧边缘覆冰厚度大于5号和6号。分析其原因为:伞下有棱时,冰棱会沿伞下棱朝迎风侧发展,造成覆冰厚度增加;伞径越大,其上表面能容纳的冰棱数量增长越快,因此迎风面两侧边缘覆冰相对较厚;伞裙上倾角越小,虽然容纳的冰棱数量有所减少,但冰棱更容易朝上下两侧斜着生长,最终导致覆冰厚度反而更大。

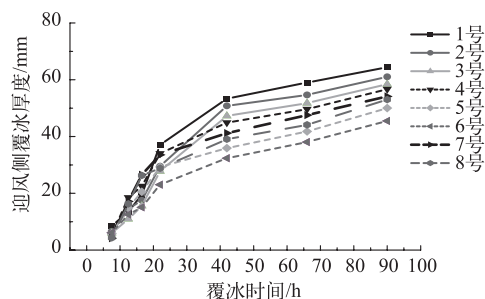


图7 迎风面两侧边缘冰厚增长情况

Fig. 7 Ice thickness growth on both sides of windward side

### (2) 迎风侧冰棱长度

迎风侧冰棱长度随时间的变化规律如图8所

示。其增长呈非线性，覆冰初期一段时间后明显减慢，这是由于伞裙边沿处刚伸出的冰棱较薄，不能支撑其进一步伸长，积累一定厚度后会再次加快，至后期逐渐变慢趋于饱和；同时，伞径和伞裙上倾角越小的复合绝缘子，冰棱朝迎风侧伸出的长度越长。根据文献[5]的仿真分析可知：复合绝缘子水滴碰撞系数随伞裙上倾角的增大而减小，且随伞裙直径的增大呈下降趋势，伞径越大，伞裙对流场的扰动程度增强，流线的弯曲程度加大，使得气流对水滴的曳力作用增强，绝缘子水滴碰撞系数减小。这与本文初期的试验现象相吻合，随着覆冰的持续进行，绝缘子外形有了较大的改变，绝缘子等效伞径变大，水滴碰撞系数减小，因此伸长的速度变缓，且有饱和的趋势，这与后期外界风速的减小也有一定的关系。

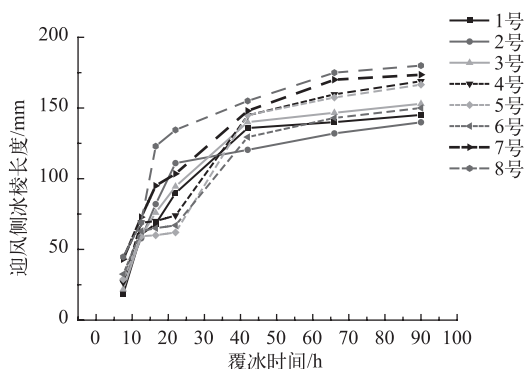


图8 迎风侧冰棱长度随时间变化关系

Fig. 8 The length of the ice ridges on the windward side vs. time

### (3) 背风侧覆冰厚度

试品背风侧冰厚增长情况如图9所示。由图9可知：背风侧覆冰厚度明显少于迎风侧，且随时间呈非线性增长，速度先快后慢，有饱和趋势；覆冰中后期，伞径、大伞间距越大，背风侧覆冰厚度越大。

原因解释如下：背风侧覆冰主要由绕过绝缘子杆径的过冷水滴碰撞伞裙表面所形成，当风携水滴绕过绝缘子杆径时，速度会下降很多，碰撞率也会下降，导致背风侧覆冰明显少于迎风侧，后期背风侧覆冰速度变慢和出现饱和现象与外界风速下降有一定的关系，伞径、大伞间距越大，水滴越容易绕过杆径，从而造成背风侧覆冰

越厚。

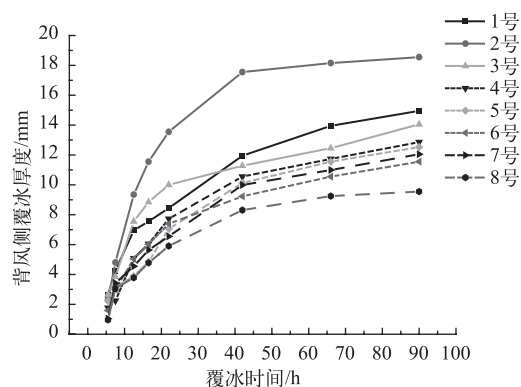


图9 背风侧覆冰厚度随时间变化关系

Fig. 9 Ice thickness on the leeward side vs. time

## 3 伞形结构优化研究

复合绝缘子绝缘水平、抗雷击能力和抗污秽能力主要由爬电距离、结构高度、表面憎水性及憎水迁移性决定，而其抗覆冰能力受伞形结构影响较大。

经过上述分析，复合绝缘子雾凇覆冰最严重区域为迎风面两侧边缘，以下分析受不同伞形结构的影响。

### 3.1 伞裙上倾角

根据文献[5]的仿真分析可知，复合绝缘子水滴碰撞系数随伞裙上倾角的增大而减小，但由于电气原因，伞裙上倾角不宜过大，并给出了覆冰地区复合绝缘子的最佳伞裙上倾角为 $15^{\circ}$ 的结论。但是该文献的仿真并未考虑到覆冰对绝缘子空气动力特性的影响，也没考虑到冰棱的生长特性，因此只适用于覆冰初期的情况，而覆冰真正对电气性能造成影响的往往是在后期，因此该文结论可能有一定的局限性。

本次试验发现伞裙上表面倾斜角较小的4号、7号和8号绝缘子迎风面两侧边缘覆冰较严重。因此从改善覆冰特性的角度出发可适当增大上倾角。值得注意的是，过度增大上表面倾斜角，会增大复合材料用量，成本上升，同时导致空气间隙和爬距变小，雷过电压和污秽性能降低。

### 3.2 伞间距

适当增大相邻伞间距，可减小其被覆冰桥接的可能。3号、5号、6号绝缘子伞间距为53 mm、35 mm和40 mm，由图6可看出，在覆冰66 h之后，5号和6号绝缘子伞间已经完全被覆冰所桥接，而3号绝缘子伞间仍有空隙。

大伞之间的距离也不可过小，4号、6号、7号和8号等大伞间距过小的绝缘子在覆冰66 h后，相邻大伞也几乎被覆冰所桥接，造成泄漏距离远比其他绝缘子小。因此，相邻伞裙的间距应大于40 mm，同时大伞之间可分布若干中小伞径伞裙，个数宜在3个以上。

### 3.3 伞径与伞裙排列方式

从前面的分析可以看出，伞下有棱，虽然可增大爬距，但有利于积冰；在保证一定相邻伞裙直径比的前提下，适当减小大伞直径可提高抗冰能力。同时，由于复合材料的刚性限制，大伞的直径不应太大，本次试验中发现大伞伞径为300 mm的2号和3号绝缘子大伞出现一定程度形变。

中伞伞径的增大有利于增大中小伞伞裙直径比，但也不宜过大，因为大中伞伞径差的减小将增大电弧沿大中伞冰棱间空气间隙发展的概率。

综上可知，大中小伞伞下不宜有棱，伞径可分别取250 mm、150 mm和90 mm，排列方式以“大-小-中-小-中-小-大”为宜。

## 4 结束语

1) 自然雾凇覆冰下，冰棱主要出现在迎风面两侧边缘。在中后期，迎风面两侧边缘的冰厚明显大于中部，呈两侧厚而中间薄。桥架常发生在迎风面边缘冰最厚的部位；背风面覆冰小于迎风面且更均匀。

2) 迎风面两侧边缘的冰厚增速先快后慢，减小伞径、增大上倾角利于提高抗冰能力；迎风侧冰棱长度随时间呈非线性增长，覆冰初期一段时间后增长速度明显减慢，之后再次加快，后期变慢并有饱和趋势，且伞径和伞裙上倾角越小的复合绝缘子，冰棱朝迎风侧伸出的长度越长；背

风侧覆冰厚度明显少于迎风侧，随时间呈非线性增长，速度先快后慢，有饱和趋势。

3) 复合绝缘子雾凇覆冰最严重区域为迎风面两侧边缘，因该处被冰桥接而极大降低了电气性能。结构优化设计建议为：适当增大伞裙上倾角；相邻伞裙的间距应大于40 mm，同时大伞之间可分布若干中小伞径伞裙，个数宜在3个以上；大中小伞伞下不宜有棱，伞径可分别取250 mm、150 mm和90 mm，排列方式以“大-小-中-小-中-小-大”为宜。

### 参考文献

- [1] 蒋兴良，易辉．输电线路覆冰及防护[M]．北京：中国电力出版社，2002．
- [2] 蒋兴良，舒立春，孙才新．电力系统污秽与覆冰绝缘[M]．北京：中国电力出版社，2009．
- [3] 王波．伞裙结构对复合绝缘子直流冰闪特性影响的研究[D]．重庆：重庆大学，2007．
- [4] 邵进．基于电场分布的覆冰合成绝缘子结构特征研究[D]．重庆：重庆大学，2006．
- [5] 温作铭．基于流体力学的覆冰地区用复合绝缘子伞裙结构研究[D]．重庆：重庆大学，2007．
- [6] 蒋兴良，温作铭．过冷水滴撞击复合绝缘子表面的数值模拟[J]．高电压技术，2008（5）：888-892．
- [7] 蒋兴良，刘毓，张志劲，等．覆冰地区交流输电线路复合绝缘子伞裙结构的电场分布优化[J]．高电压技术，2013（1）：210-217．
- [8] 蒋兴良，潘杨，汪泉霖，等．基于等效直径的复合绝缘子覆冰特性与结构参数分析[J]．电工技术学报，2017，32(7)：7．

### 作者简介

潘杨（1990—），男，工程师，研究方向为高电压与绝缘技术。

（收稿日期：2022-03-07）

复合绝缘子雾凇覆冰特性与伞形结构优化研究 P1

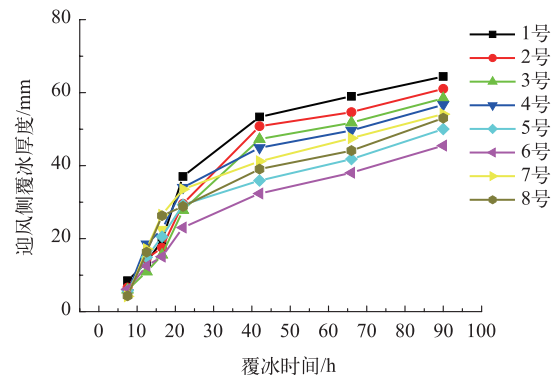


图 7 迎风面两侧边缘冰厚增长情况

Fig. 7 Ice thickness growth on both sides of windward side

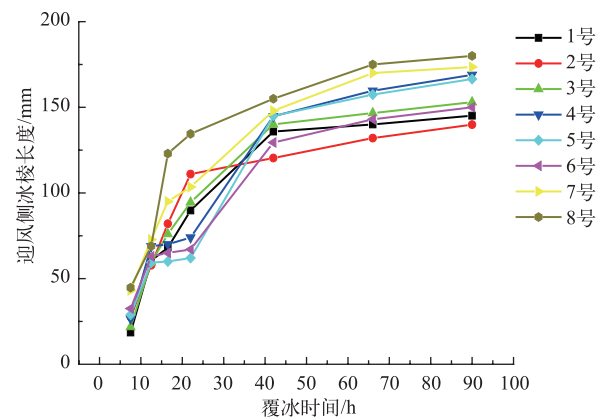


图 8 迎风侧冰棱长度随时间变化关系

Fig. 8 The length of the ice ridges on the windward side vs. time

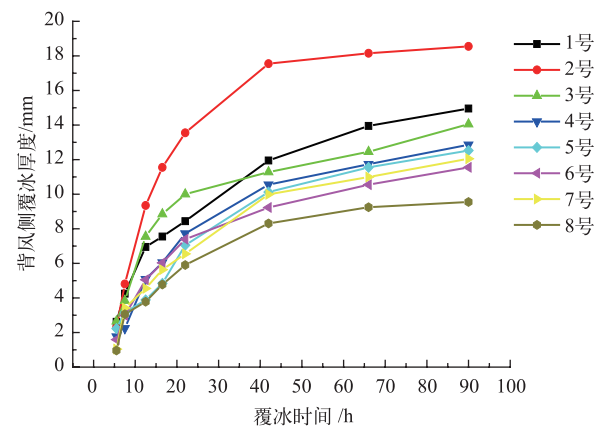


图 9 背风侧覆冰厚度随时间变化关系

Fig. 9 Ice thickness on the leeward side vs. time