



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180210

植物纤维基电气绝缘纸的强度性能

贾盼, 刘瑜, 贾旺强, 郑进智, 刘泽华

(天津市制浆造纸重点实验室, 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 以未漂硫酸盐针叶木浆为原料, 研究了打浆和添加纤维素纳米纤丝(CNF)对绝缘纸强度性能的影响, 在此基础上研究了油浸时间和油浸温度对绝缘纸强度性能的影响. 实验结果表明: 以提高强度为目的进行打浆, 打浆度控制在 50 °SR 时, 纸页抗张指数达到 84.4 N·m/g, 此时添加 CNF, 抗张指数可以进一步提高至 95.5 N·m/g; 综合考虑绝缘纸的强度性能及成本因素, CNF 的适宜添加量为 2% (相对于绝干浆质量). 通过对绝缘纸油浸处理发现: 随着油浸时间的增加及油浸温度的提高, 纸页的强度性能下降明显, 未添加 CNF 纸页在 150 °C 下油浸 5 h 时, 抗张指数下降至 76.9 N·m/g; 而添加 CNF 纸页的抗张指数可保持在 80.9 N·m/g, 强度性能均能保持在较高水平.

关键词: 植物纤维绝缘纸; CNF; 强度性能; 油浸

中图分类号: TS761.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2020)01-0057-05

Strength Properties of Plant Fiber Based Insulation Paper

JIA Pan, LIU Yu, JIA Wangqiang, ZHENG Jinzhi, LIU Zehua

(Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, College of Light Industry Science and Engineering,
Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Unbleached kraft pulp was selected as the raw material in the preparation of plant fiber based insulation paper. The effect of beating and cellulose nano-fibril (CNF) on the strength properties of insulation paper was studied in detail. The influence of oil immersion time and temperature on the strength properties of insulation paper was also investigated. The results showed that the suitable beating degree to increase the strength of paper sheets is 50 °SR, and the tensile index can be increased to 84.4 N·m/g. When CNF was added, the tensile index could be further increased to 95.5 N·m/g. The suitable dosage of CNF was 2% (relative to absolute dry pulp) when the insulation paper's strength properties and cost were taken into consideration. Oil immersion treatment of the insulation paper showed that the strength properties of insulation paper sheets decreases gradually with the increase of oil immersion time and temperature. The tensile index of the paper without CNF, after oil immersion at 150 °C for 5 h, decreased to 76.9 N·m/g, while the tensile index of CNF paper was 80.9 N·m/g, which showed that the CNF paper had much better strength properties than the samples without CNF.

Key words: plant fiber based insulation paper; CNF; strength performance; oil immersion

在经济迅速发展和能源综合利用的背景下, 我国对电网的稳定和电力供应提出了更高的要求, 而电力设备的运行状况直接影响电网的安全运转^[1-2]. 根据国家电网运行分析报道^[3], 近年来由于电气设备故障引发的电网故障不断增加, 是影响电网安全运行的主要因素之一. 而电力变压器作为电力系统的核心设备, 随着电压等级的提高, 对其内部电气绝缘纸的要

求越来越高^[4-5]. 植物纤维绝缘纸作为一种常用的绝缘纸, 在电气设备的使用过程中不仅受到光热的作用, 还会受到各种外力作用的影响 (如高压大容量发电机所用的绝缘纸要能承受高速旋转、运行振动以及突然短路造成的机械应力), 所以要求植物纤维绝缘纸有较高的强度性能^[6]. 大量的实际运行数据表明, 变压器发生事故的原因和绝缘纸的强度性能有很大

收稿日期: 2018-07-03; 修回日期: 2018-09-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0308200)

作者简介: 贾盼 (1994—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生; 通信作者: 刘泽华, 副教授, zehual@tust.edu.cn

的关系,并非电气强度^[7].

目前国内大型电力变压器大多是油浸式变压器,绝缘纸和变压器油组成的油纸复合绝缘是电力变压器内绝缘的主要组成形式^[8-9],该方式的绝缘效果远高于单一绝缘纸或绝缘油的效果.然而,绝缘纸和变压器油长期在一起工作会使变压器油浸入绝缘纸内影响绝缘纸的强度性能,油浸式电力变压器又长期在高温的环境下工作会加速纤维素的降解,降低纸张的强度性能,引发变压器事故^[10-11].因此,对于绝缘纸的研究不应仅关注它的电气性能和热老化性能,提高高温条件下油浸绝缘纸的强度性能同样具有重要的研究意义.

本文采用未漂硫酸盐针叶木浆,研究打浆、添加纤维素纳米纤丝(CNF)对绝缘纸的增强效果,同时研究油浸对绝缘纸强度性能的影响.

1 材料与方法

1.1 原料及设备

针叶木未漂硫酸盐浆(加拿大乔治王子牌),玖龙纸业(乐山)有限公司;CNF,天津市木精灵生物科技有限公司;变压器油,河南玉柴润滑油有限公司.

P40110 E000型PFI磨,PTI有限公司;ZDJ-100型打浆度测定仪、066型抗张强度测定仪、009型撕裂度仪,瑞典Lorentzen & Wettre公司;M10097型快速纸页成型器,德国KARL. FRANK. GMBH公司;912型纤维测试分析仪,瑞典RGW公司;JSM-IT300 LV型扫描电子显微镜(SEM),日本电子公司;耐折度测定仪,TESTING MACHINE公司.

1.2 实验方法

1.2.1 打浆

取 (30 ± 0.5) g的绝干浆,在室温下用0.5L水浸泡4h以上,根据GB/T 29287—2012《纸浆实验室打浆PFI磨法》采用PFI磨进行打浆.称取2g绝干浆料,打散后,稀释至1L,根据GB/T 3332—2004《纸浆打浆度的测定》进行打浆度测定.

1.2.2 电气绝缘纸的抄造

采用快速纸页成型器抄造定量为 60 g/m^2 的绝缘纸样,湿纸页在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥5min,放在自封袋密封备用.

1.2.3 纸页强度性能的测定

纸页在国际标准恒温恒湿条件 $((23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(50 \pm 2)\%$)下平衡24h,分别按照GB/T 451.2—2002《纸和纸板定量的测定》、GB/T 451.3—2002

《纸和纸板厚度的测定》、GB/T 12914—2008《纸和纸板抗张强度的测定》、GB/T 528—2009《纸和纸板撕裂度的测定》、GB/T 457—2008《纸和纸板耐折度的测定》进行纸页相关性能的测定.

1.2.4 纸页的微观形貌观察

将纸页剪成 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的正方形,喷金处理后在扫描电子显微镜(SEM)下观察纸页的微观形貌.

2 结果与讨论

2.1 打浆对绝缘纸强度性能的影响

打浆度对绝缘纸抗张指数和伸长率的影响如图1所示.由图1可知:通过打浆,可以明显改变纸页的抗张强度和伸长率.在打浆度为 $50 \text{ }^\circ\text{SR}$ 时,纸页的抗张指数达到了 $84.4 \text{ N}\cdot\text{m/g}$,相比打浆度 $20 \text{ }^\circ\text{SR}$ 时抗张指数有很大程度的提高;但是随着打浆度的不断提高,纸页的抗张指数又逐渐下降.纸页的伸长率也随着打浆度的提高不断增加,打浆度为 $50 \text{ }^\circ\text{SR}$ 时,纸页的伸长率达到了 3.21% ,并趋于平稳.

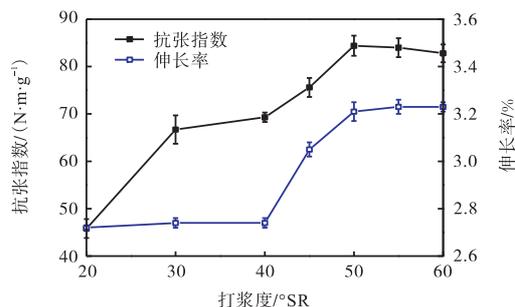


图1 打浆度对抗张指数和伸长率的影响

Fig. 1 Effect of beating degree on the tensile index and elongation

打浆度对耐折度、撕裂指数的影响如图2所示.随着打浆度的提高,纸页的耐折度先提高后趋于平稳,打浆度为 $50 \text{ }^\circ\text{SR}$ 时,达到了881次.纸页的撕裂指数随着打浆度的提高先提高后降低,打浆度在 $50 \text{ }^\circ\text{SR}$ 时,纸页的撕裂指数达到了 $18.9 \text{ mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$.

对纸浆纤维形态进行分析,结果见表1.纤维长度随着打浆度的提高逐渐减小,但变化不明显,这是由于PFI高浓打浆主要以分丝帚化为主,长度损失较小.在打浆初期,纤维宽度有一定程度提高,是因为纤维在机械作用下被压扁造成的.随着打浆度的提高,纤维宽度变化不大.纤维长宽比呈下降趋势,但不明显.对比纸页强度性能的变化可以看出,纤维长宽比并不是衡量浆料优劣的绝对标准.影响纸页强度的因素,除了纤维长度,纤维之间的结合状态十分

重要。

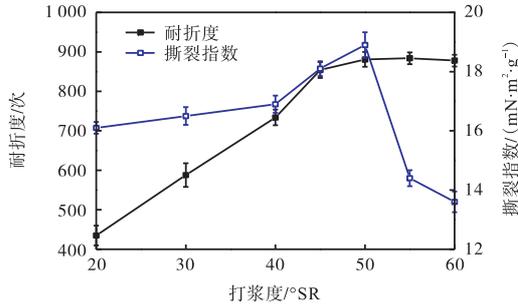


图2 打浆度对耐折度和撕裂指数的影响

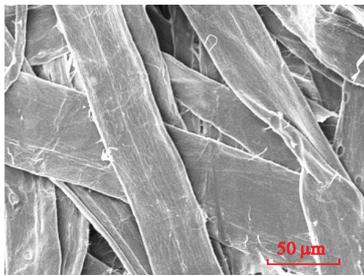
Fig. 2 Effect of beating degree on the folding strength and tear index

表1 打浆前后纸浆的纤维形态变化

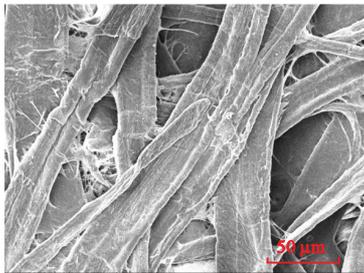
Tab. 1 Morphological changes of pulp fiber before and after beating

打浆度/°SR	纤维长度/mm	纤维宽度/ μm	长宽比
10(原浆)	2.446	30.0	81.7
20	2.379	32.0	74.3
30	2.379	32.1	74.1
40	2.367	32.1	73.7
45	2.352	32.1	73.3
50	2.325	31.8	73.1
55	2.294	31.4	73.1
60	2.189	31.2	70.2

纸页表面的扫描电子显微镜图片如图3所示。



(a) 未打浆



(b) 打浆度为 50°SR

图3 打浆前后的纸页微观形貌

Fig. 3 Micromorphology of paper sheets before and after beating

打浆前,纤维表面相对比较光滑,纤维之间的结合面积较小;而打浆后纤维分丝帚化明显,显著提高了纤维之间的结合面积,从而使纸页的强度性能提高.从表2还可以看出,随着打浆度的提高,纸页的紧度也随之提高,在打浆度为50°SR时,紧度提高到了0.60 g/cm³.

综上,在以提高强度为目的打浆时,打浆度控制在50°SR为宜。

表2 打浆度对绝缘纸紧度的影响

Tab. 2 Effect of beating degree on the tightness of insulation paper

打浆度/°SR	紧度/(g·cm ⁻³)	打浆度/°SR	紧度/(g·cm ⁻³)
20	0.42	50	0.60
30	0.45	55	0.63
40	0.48	60	0.64
45	0.56		

2.2 CNF对绝缘纸强度性能的影响

根据QB/T 4250—2011《500 kV 变压器匝间绝缘纸》的性能指标要求,耐折度和撕裂度基本达到要求,但标准中抗张强度要求不低于88.4 N·m/g,因此需要考虑添加增强剂来提高纸页的抗张强度。

CNF 是对植物纤维进行多次高压均质后得到的直径为15~20 nm的纤维素纤维材料,作为一种具有高比表面积、高强度、高吸附性能的纳米材料,CNF成为近年来研究的重点^[12-15].为了尽量减少CNF中杂质对绝缘纸电学性能的不利影响,选用的CNF为纯机械法制得,没有经过任何化学处理,纤维之间形成的网络结构可以增加纤维之间的结合力^[16-17],所以在一定程度上可以增强绝缘纸的强度性能。

固定打浆度在50°SR,CNF的添加量对绝缘纸抗张指数和伸长率的影响如图4所示。

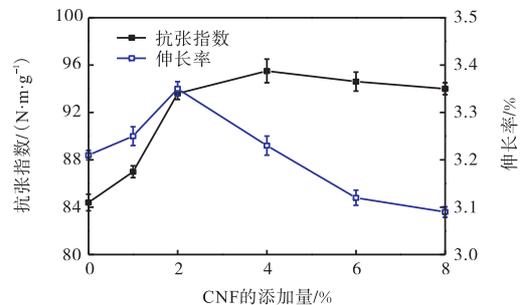


图4 CNF的添加量对绝缘纸抗张指数和伸长率的影响

Fig. 4 Effect of CNF dosage on the tensile index and elongation of insulation paper

在一定添加范围内,随着CNF添加量的增加,纸页的抗张指数增加,在添加量为2%时,抗张指数为

93.6 N·m/g, 添加量为在 4% 时, 抗张指数达到了 95.5 N·m/g; 随着 CNF 添加量的持续增加, 纸页的抗张指数逐渐减小, 但变化不明显. 纸页的伸长率随着 CNF 添加量的增加先增加后大幅度下降, 添加量为 2% 时, 伸长率达到最大, 为 3.35%.

CNF 的添加量对绝缘纸耐折度和撕裂指数的影响如图 5 所示. 随着 CNF 添加量的增加, 纸页的耐折度先增加后迅速降低, 当 CNF 的添加量为 2% 时, 纸页的耐折度达到了最大, 为 967 次. 随着 CNF 添加量的增加, 纸页的撕裂指数也随之增加, 当 CNF 的添加量为 2% 时, 纸页的撕裂指数达到了 20.6 mN·m²/g, 并逐渐趋于平稳.

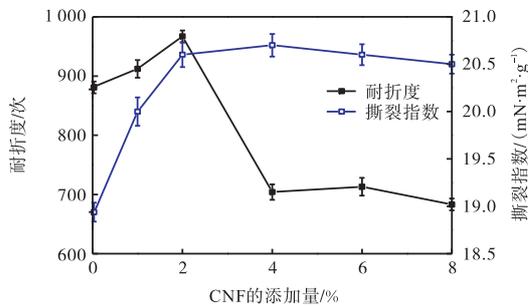


图 5 CNF 的添加量对绝缘纸耐折度和撕裂指数的影响
Fig. 5 Effect of CNF dosage on the folding strength and tear index of insulation paper

对添加 2% CNF 的纸页进行 SEM 形貌分析, 结果如图 6 所示. 相比图 3(b) 未添加 CNF 的纸页, 添加 CNF 后, 纤维与纤维之间的空隙变小, 纤维之间的结合更加紧密, 这是因为 CNF 的添加增强了纤维与纤维之间的结合力, 在一定程度上能够提高绝缘纸的强度性能^[16]. 但是, CNF 的加入会降低纤维的平均长度, 过多加入将影响纸页的伸长率和耐折度^[18].

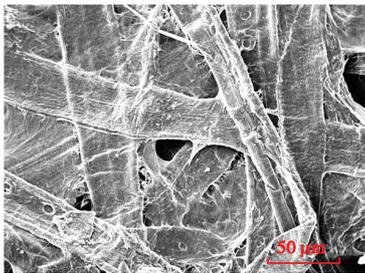


图 6 添加 2% CNF 的纸页微观形貌
Fig. 6 Micromorphology of paper sheet with 2% CNF

可见, 少量添加 CNF 可以优化纸页的结构, 提高纸页的强度性能, 综合考虑绝缘纸的强度性能及成本问题, 选择 CNF 的添加量以 2% 为宜.

2.3 油浸对绝缘纸强度性能的影响

2.3.1 油浸时间对绝缘纸强度性能的影响

实验选用打浆度为 50°SR 的浆料, 不添加 CNF 和添加 2% CNF (相对于绝干浆) 分别进行抄片, 在 30 °C 下油浸处理, 研究油浸时间对绝缘纸强度性能的影响, 结果见表 3.

表 3 油浸时间对绝缘纸强度性能的影响

Tab. 3 Effect of oil immersion time on the strength properties of insulation paper

油浸时间/h	抗张指数/(N·m·g ⁻¹)		伸长率/%	
	未添加 CNF	2% CNF	未添加 CNF	2% CNF
0	84.4	93.6	3.21	3.35
5	82.3	87.9	2.99	3.12
12	82.0	86.7	2.80	2.90
24	76.0	83.2	2.75	2.85
48	75.8	82.8	2.76	2.89
92	75.5	82.7	2.27	2.79

油浸时间/h	耐折度/次		撕裂指数/(mN·m ² ·g ⁻¹)	
	未添加 CNF	2% CNF	未添加 CNF	2% CNF
0	881	967	18.9	20.6
5	800	880	15.3	17.2
12	650	705	13.1	16.0
24	666	688	13.5	16.1
48	608	662	13.2	15.7
92	589	690	12.8	15.5

随着油浸时间的增加, 绝缘纸的抗张指数逐渐降低, 油浸 24 h 后, 绝缘纸的抗张指数下降趋于平缓. 油浸处理对纸页伸长率的影响较大, 不添加 CNF 的纸页在油浸处理 92 h 时, 下降 30% 左右, 添加 2% CNF 的纸页下降 16% 左右. 随着油浸时间的增加, 绝缘纸的耐折度和撕裂指数也随之下降低, 在油浸 24 h 后下降趋于平缓. 总体来说, 添加 2% CNF 的纸页在油浸处理后强度性能大于未添加 CNF 的纸页.

2.3.2 油浸温度对绝缘纸强度性能的影响

为了进一步研究油浸温度对绝缘纸强度性能的影响, 本实验选用打浆度为 50°SR 的浆料, 不添加 CNF 和添加 2% CNF 分别抄片, 然后分别在不同温度下对纸页进行油浸处理 5 h, 研究油浸温度对纸页的强度性能的影响, 结果见表 4. 由表 4 可知: 随着油浸温度的升高, 绝缘纸的抗张指数下降, 当温度大于 60 °C 时, 纸页的抗张指数下降较为明显. 未添加 CNF 纸页在 150 °C 下油浸 5 h 时, 抗张指数下降至 76.9 N·m/g, 添加 CNF 纸页的抗张指数下降至 80.9 N·m/g, 总体上添加 2% CNF 的纸页的抗张指数大于未添加的纸页. 随着油浸温度的升高, 纸页的伸长率下降, 但并不明显, 添加 2% CNF 的纸页的伸长率较大. 纸页的耐折度也随着油浸温度的升高迅速下

降,添加 2% CNF 的纸页的耐折度优于未添加的纸页. 纤维之间的结合情况会对耐折度产生明显的影响,添加 NFC 能显著改善纤维之间的结合,从而提高纸页的耐折度. 由于油的渗透作用,浸油后纤维之间的结合受到一定程度的破坏,而且温度越高,破坏程度越大. 此外随着油浸温度的升高,纸页的撕裂指数下降,当温度大于 120 °C 时,未添加 CNF 的纸页的撕裂指数迅速下降,而添加 CNF 的撕裂指数仍保持在相对较高水平.

表 4 油浸温度对绝缘纸强度性能的影响

Tab. 4 Effect of oil immersion temperature on the strength properties of insulation paper

油浸 温度/°C	抗张指数/(N·m·g ⁻¹)		伸长率/%	
	未添加 CNF	2% CNF	未添加 CNF	2% CNF
30	82.3	87.9	2.99	3.12
60	82.1	87.4	2.78	2.89
90	81.6	82.8	2.75	3.00
120	77.1	80.4	2.64	2.72
150	76.9	80.9	2.57	2.63
油浸 温度/°C	耐折度/次		撕裂指数/(mN·m ² ·g ⁻¹)	
	未添加 CNF	2% CNF	未添加 CNF	2% CNF
30	800	880	15.3	17.2
60	786	796	15.3	17.1
90	630	667	14.5	15.6
120	531	589	14.4	14.7
150	498	535	10.7	13.9

综上所述,添加 CNF 对于提高绝缘纸的强度性能具有较明显的作用.

3 结 论

(1) 打浆能够明显改变纸页的强度性能. 在以增强为目的打浆时,打浆度控制在 50 °SR 为宜.

(2) CNF 在一定的添加范围内能够提高纸页的强度性能. 综合考虑绝缘纸的强度性能及成本问题,选择 CNF 的添加量为 2% 为宜.

(3) 随着油浸时间的增加和油浸温度的升高,绝缘纸的强度性能逐渐下降,未添加 CNF 纸页在 150 °C 下油浸 5 h 时,抗张指数下降至 76.9 N·m/g,添加 2% CNF 纸页的抗张指数下降至 80.9 N·m/g,强度性能能够保持在较高水平.

参考文献:

[1] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等. 电力变压器油纸绝缘热

老化研究综述[J]. 电工技术学报,2012,27(5):1-12.

[2] 杨飞豹. 变压器油纸水分含量和绝缘老化程度定量评估研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

[3] 孙建锋,葛睿,郑力,等. 2010 年国家电网安全运行情况分析[J]. 中国电力,2011,44(5):1-4.

[4] 廖瑞金,吕程,吴伟强,等. 纳米 TiO₂ 改性绝缘纸的绝缘性能[J]. 高电压技术,2014,40(7):1932-1939.

[5] 廖瑞金,吕程,吴伟强,等. 纳米 Al₂O₃ 改性变压器绝缘纸性能的研究[J]. 电力科学与技术学报,2014,29(1):3-7.

[6] 闫斌. 高耐久性绝缘纸的工艺及机理研究[D]. 济南:齐鲁工业大学,2015.

[7] 朱婷婷. 聚噁二唑涤纶纤维绝缘纸强度的研究[D]. 大连:大连工业大学,2009.

[8] Liao R J, Lü C, Yang L J, et al. Space charge behavior in oil-impregnated insulation paper reinforced with Nano-TiO₂[J]. BioResources, 2013, 8(4):5655-5665.

[9] 吕程. 菜籽油浸渍后绝缘纸的介电和击穿性能[J]. 中国油脂,2015,40(12):109-111.

[10] 马军,周月梅,朱正国,等. 高耐热等级绝缘纸的制备及短时热老化性能快速评价研究[J]. 绝缘材料,2017,50(3):43-48.

[11] 姚洁,魏晓魏,殷勤俭,等. 绝缘纸耐高温老化助剂的制备及应用[J]. 化学研究与应用,2002,14(5):608-610.

[12] Svagan A J, Azizi Samir M A S, Berglund L A. Biomimetic polysaccharide nanocomposites of high cellulose content and high toughness[J]. Biomacromolecules, 2007, 8(8):2556-2563.

[13] 周静,沈葵忠,房桂干,等. 漂白竹浆疏水改性纳米纤维化纤维素的制备和表征[J]. 林业工程学报,2017,2(2):101-106.

[14] Vuoti S, Talja R, Johansson L S, et al. Solvent impact on esterification and film formation ability of nanofibrillated cellulose[J]. Cellulose, 2013, 20(5):2359-2370.

[15] 王钰,刘志明. 纳米纤维化纤维素制备及硅烷化改性[J]. 生物质化学工程,2015,49(2):17-20.

[16] Wegner T H, Jones P E. Advancing cellulose-based nanotechnology[J]. Cellulose, 2006, 13(2):115-118.

[17] 党婉斌,陆赵情,王腊梅,等. 纳米纤维素增强芳纶云母纸性能的研究[J]. 中国造纸,2017,36(5):21-24.

[18] 苗成. 玉米茎秆纳米纤维纤维可改善废纸浆成纸的性能指标[J]. 中华纸业,2017,38(4):53-60.

责任编辑:周建军