● 材料保护及表面工程 Material Protection and Surface Engineering ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.029

化学镀 Ni-P 对高压输电线表面润湿性的影响

郭 微[1],王芳芳[2],何 楷[1],陈海军[1],刘 博[1]
(1. 国网宁夏电力有限公司检修公司,宁夏 银川 750011; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048)

摘 要:为了增加高压输电线表面的润湿性,降低电晕放电引起的可听噪声,对喷砂处理后的高压输电线表面先进行碱性预镀,再进行酸性化学镀 Ni-P 处理,得到表面粗糙、厚度为 0.1 mm 的化学镀 Ni-P 涂层。结果表明,化学镀层的硬度为 1 100 HV,表面润湿角为 23.5°。高硬度、高粗糙度的化学镀 Ni-P 涂层提高了高压输电线表面对液体的表面张力,使高压输电线表面的润湿性增大,不容易产生水珠,降低了电晕放电引起的可听噪音。

关键词:高压输电线;化学镀 Ni-P;喷砂处理;表面润湿性

中图分类号:TG174 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)07-0748-04

Influence of Ni-P Electroless Plating on Surface Wettability of High Voltage Transmission Line

GUO Wei[1], WANG Fangfang[2], HE Kai[1], CHEN Haijun[1], LIU Bo[1]
(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to increase the wettability of the surface of the high voltage transmission line and reduce the audible noise caused by corona discharge, the surface of the high voltage transmission line after sand blasting treatment was first alkaline pre-plating, followed by acid electroless Ni-P plating treatment, and the chemical Ni-P coating with rough surface and thickness of 0.1 mm was obtained. The results show that the hardness of electroless plating is 1 100 HV, the wetting contact angle of the coating surface is 23.5°. The electroless Ni-P coating with high hardness and roughness improves the surface tension of liquid on the surface of the high voltage transmission line, increases the wettability of the surface of the high voltage transmission line, does not easily produce water droplets, and reduces the audible noise caused by corona discharge.

Key words: high voltage transmission line; Ni-P electroless plating; sand blasting; surface wettability

随着超高压、特高压输电线路的建设,高等级电压加剧了周围空气中电场的不均匀性,引起电晕现象的发生。电晕现象主要发生在雨天,下雨时,雨水在输电线表面形成水珠,水珠端部较高的电场强度使空气电离,形成尖端放电[1]。电晕放电现象不仅造成电能的损失,还会发出噪音、产生电磁干扰,严重地影响沿线居民的正常生活,对人体健康、通讯和电视信号等造成极大影响[2]。针对上述实际问题,国家电力公司专门列专项攻关,本研究是其中的一部分,主要是增加高压输电线表面的润湿性,降低高压线电晕放电引起的可听噪声。随着输电线表面的亲水性提高,电晕放电引起的可听噪音变得柔软;当输电线表面极度亲水时,电晕放电引起的可听噪音大大降低[3,4]。为此,本文通过在铝高压输电线表面制备化学镀 Ni-P 涂层,提高铝高压输电线的表面自由能,增加高压输电线表面的润湿性,减少或减小雨天时高压输电线表面水珠的形成,从而降低电晕放电引起的可听噪音。

1 试验材料及方法

采用的高压输电线试样为长 200 mm、横截面积为 38 mm^2 的钢芯铝绞线,绞线由 24 根铝包 7 根钢芯组成。采用碱性化学镀工艺[5],首先对输电线试样表面进行如下处理:采用箱式喷砂机对输电线表面进行喷砂处理,金刚砂为 14~18 目,喷砂压力为 0.6 MPa,喷枪距试样的距离为 250 mm;碱洗处理;预镀处理的温度 60~65 ℃,时间为 3~5 min(预镀液配方见表 1),采用 1:1 的氨水溶液将预镀液的 pH

收稿日期:2019-01-15
基金项目:陕西省教育厅重点实验室项目(18JS079 和 16JS066)
作者简介:郭 微(1984-),宁夏银川人,硕士,工程师.主要从事输变电工程环境保护的研究工作.
电话:13639598989,E-mail:286955867@qq.com
通讯作者:王芳芳(1987-),女,河南漯河人,博士生.研究方向:材料的腐蚀与防护、聚氨酯涂层的改性研究.
电话:18729213668,E-mail:wff1170111008@163.com

值调至 9，每升预镀液消耗氨水溶液 52 mL；蒸馏水清洗；化学镀处理的温度 85~90 ℃，时间为 25~35 min（化学镀配方见表 2），化学镀 Ni-P 溶液的 pH 值为 5~6。

表1 预镀配方
Tab.1 Preplating formula

药品名称	用量 /g·L^{-1}
硫酸镍($NiSO_4$)	13
次亚磷酸钠(NaH_2PO_2)	32
柠檬酸	10

表 2 化学镀 Ni-P 配方
Tab.2 Formula of Ni-P electroless plating

药品名称	用量 /g·L^{-1}
硫酸镍($NiSO_4$)	28
次亚磷酸钠(NaH_2PO_2)	26
乙酸钠(CH_3COONa)	15
乳酸	20 mL/L

2　试验结果与讨论

图 1 为表面未处理和表面化学镀 Ni-P 处理的高压输电线的表面润湿角测试结果。可以看出，经过化学镀 Ni-P 处理后高输电线的表面润湿角明显变小，说明化学镀 Ni-P 处理可以提高高压输电线表面的润湿性。高压输电线表面水珠变得扁平，不容易产生过多的尖端，减少了电晕放电的放电源，从而达到降低电晕放电可听噪音的目的。

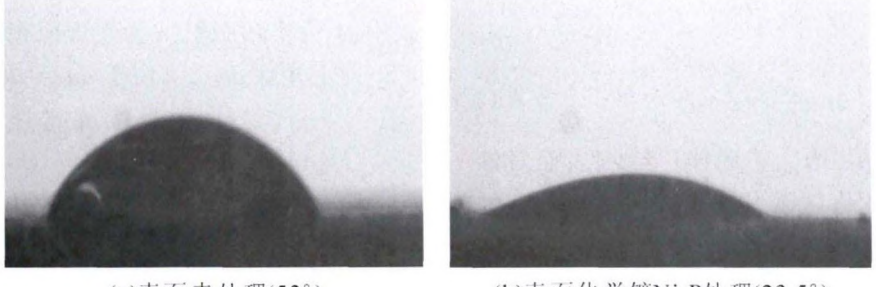
模拟雨天的状况对高压输电线进行喷淋试验，表面未处理和表面化学镀 Ni-P 处理的高压输电线表面的水珠状态见图 2。可以看出，喷淋实验后，经过化学镀 Ni-P 处理的高压输电线表面基本没有水珠残留，而未处理的高压输电线表面水珠直径比较大，最小为直径 5 mm。上述现象说明化学镀 Ni-P 处理增加了高压输电线表面的润湿性。化学镀 Ni-P 处理后高压输电线表面水珠减小的原因主要是化学镀 Ni-P 涂层的表面能较高。一般来讲，材料的表面硬度越大，表面能越高。硬度测试表明，铝的硬度为 550 HV，而化学镀 Ni-P 涂层的硬度为 1 100 HV，化学镀 Ni-P 涂层的表面能较高，表面能高的固体表面更易被表面能低的液体所浸润[6]。

由于高压输电线的外层是由多股较细的铝导线绞制成形，在对输电线表面进行化学镀时，镀液可以通过两股之间的缝隙浸入导线内侧，使整个导线表面完全被化学镀，镀层厚度约为 0.1 mm。当输电线表面被镀上 0.1 mm 的化学镀 Ni-P 涂层后，两股导线之间的夹缝就变得更小，相当于锥形毛细管（见图3）。如图 3 所示，当输电线表面化学镀 Ni-P 涂层的表面被水浸润后，由于毛细管的作用，水更容易进入到毛细管的内层，即输电线的两股绞线之间的缝隙。

图 4 为锥形毛细管的润湿原理示意图。锥形毛细管润湿的条件[7]如式（1）：

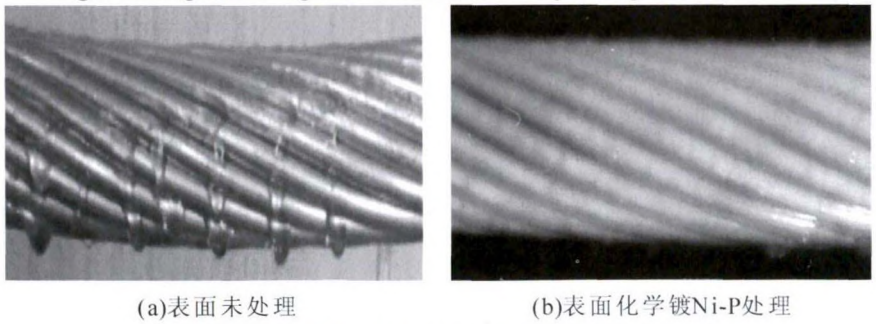
$$\Delta p=-\frac{2\gamma_{LV}}{R}\sin(\theta_a-\phi_2) \tag{1}$$

当 $\theta_a<\phi_2$ 时，Δp 为正值，水很容易进入两股导线的夹缝中。由于两股导线是相切关系，因此 ϕ_2 为



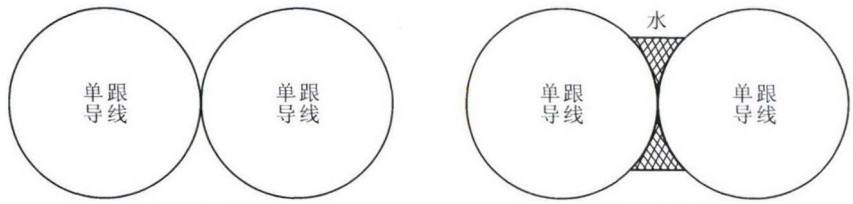
(a)表面未处理(52°)　　(b)表面化学镀Ni-P处理(23.5°)

图 1 高压输电线表面的润湿角
Fig.1 Wetting contact angle on the surface of the high voltage transmission line



(a)表面未处理　　(b)表面化学镀Ni-P处理

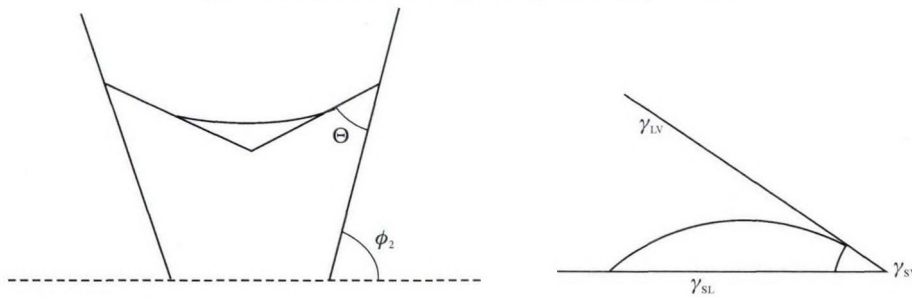
图 2 喷水淋试验时高压输电线表面的水珠状态
Fig.2 Appearance of water drop on the surface of the high voltage transmission line under the condition of rain water spraying test



(a)表面未处理　　(b)表面化学镀Ni-P处理

图 3 两股导线之间的夹缝

Fig.3 Crack between two high voltage transmission lines



(a)锥形毛细管　　(b)液-固表面的接触角

图 4 毛细管润湿原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of capillary wetting principle

45°；实测的化学镀 Ni-P 涂层的表面润湿角为 37°，因此 $\theta_a<\phi_2$。这一结果加速了涂层表面的水珠进入两股导线的夹缝中。

由于毛细管的曲面压差公式，

$$\Delta p=2\gamma_{LV}\frac{\cos\theta}{R} \tag{2}$$

式中，R 为毛细管的半径，相当于两股导线夹缝的缝隙宽度。

又因为杨氏方程[8,9]，

$$\cos\theta=\frac{\gamma_{SV}-\gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \tag{3}$$

因此，可得到：

$$\Delta p=\frac{2}{R}(\gamma_{SV}-\gamma_{SL}) \tag{4}$$

由于 Δp 的存在，增大了固体（导线）表面对液体的表面张力，因此化学镀 Ni-P 涂层的表面润湿性增大，使化学镀 Ni-P 涂层的表面不容易产生水珠，从而降低了电晕放电引起的可听噪音。

在化学镀之前对高压输电线表面进行喷砂处理的目的有两个：一是除去高压输电线表面的油污和氧化皮，有利于化学镀层的形成；二是构造粗糙的表面，喷砂处理后高压输电线化学镀表面的宏观照片见图 5。可以看出，喷砂处理后化学镀 Ni-P 涂层的表面凹凸不平。

对于理想表面张力[10]的定义，

$$\gamma=\left(\frac{\partial G}{\partial A}\right)_{T,P} \tag{5}$$

$$dG=\left(\frac{\partial G}{\partial A_{SV}}\right)\left(\frac{\partial A_{SV}}{\partial a_{SV}}\right)da_{SV}+\left(\frac{\partial G}{\partial A_{SL}}\right)\left(\frac{\partial A}{\partial a_{SL}}\right)da_{SL}$$

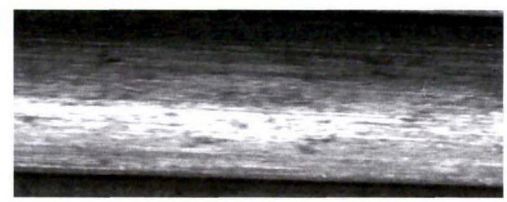


图 5 高压输电线表面化学镀 Ni-P 涂层的宏观图像（放大 10 倍）

Fig.5 Image of Ni-P electroless plating on the surface of the high voltage transmission line

$$+\left(\frac{\partial G}{\partial A_{LV}}\right)\left(-\frac{\partial A_{LV}}{\partial a_{LV}}\right)da_{LV}=0 \tag{6}$$

式中，A 为实际面积，a 为表观面积（即几何面积）

对上式除 da_{SV}，又由于 $da_{SV}=-da_{SL}$，得到，

$$\frac{da_{LV}}{da_{SL}}=\cos\theta' \tag{7}$$

令 $\beta=\frac{A}{a}=\frac{dA}{da}$，称之为粗糙因子，微分式可简化为：

$$\beta(\gamma_{SV}-\gamma_{SL})=\gamma_{LV}\cos\theta' \tag{8}$$

因为理想表面，

$$\cos\theta=\frac{\gamma_{SV}-\gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \tag{9}$$

由式(8)和式(9)可得到：

$$\beta=\frac{\cos\theta'}{\cos\theta} \tag{10}$$

由于粗糙表面 $\beta>1$，则 $\cos\theta'>\cos\theta$，$\theta'<\theta$，这说明粗糙的表面比光滑的表面更容易润湿。由于喷砂处理使得高压输电线实际的表面积比宏观测试的大，这种变化会引起表面自由能的变化[11]，因此喷砂处理可以提高高压输电线表面润湿性。

3 结论

将喷砂处理后的铝高压输电线表面先经过碱性预镀，再经过酸性化学镀 Ni-P 处理，能够得到表面不平整、厚度为 0.1 mm 的化学镀 Ni-P 涂层。该化学镀层的硬度为 1 100 HV、表面润湿角为 23.5°。喷淋试验表明，经化学镀 Ni-P 处理后高压输电线表面没有形成大的水珠，水容易吸附在多股铝线的绞缝中形成水膜。经分析可知，高硬度、高粗糙度的化学镀 Ni-P 涂层提高了高压输电线表面对液体的表面张力，使其表面润湿性增大，表面不容易产生水珠，降低了高压输电线电晕放电引起的可听噪音。

参考文献：

[1] 冯治国，张爽，杨嘉祥，等. 雨雾天气对导线电晕放电的影响分析[J]. 黑龙江电力, 2010, 32(2): 145-148.

[2] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[3] Miyajima K, Tanabe K. Relationship between wetting property of transmission line and audible noise [R]. Japan : IEICE, 2000.

[4] Miyajima K, Tanabe K. Reduction of audible noise by super-water-repellent treatment of transmission line surfaces [R]. Japan: Trans IEE Japan, 2001.

[5] 冯拉俊，雷阿利. 铸铁表面化学镀工艺参数[J]. 铸造技术，2004, 25(7): 498-499.

[6] 顾惕人，朱瑶，李外郎，等. 表面化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[7] 甄开吉. 表面化学[M]. 吉林: 吉林大学出版社, 1995.

[8] 李小兵，刘莹. 固体表面润湿性机理及其模型 [J]. 功能材料, 2007, 38: 3919-3924.

[9] Adamson A W, Gast A P. Physical Chemistry of Surfaces(6thed) [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.

[10] Levine Ira N. Physical Chemistry (5thed) [M]. New York: Mc Graw-Hill Inc., 2001.

[11] Wright M R. An Introduction to Chemical Kinetics [M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2004.

（上接第 743 页）

Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2001, 32(7): 1755-1767.

[8] Zheng S G, Claire Davis, Martin Strangwood. Elemental segregation and subsequent precipitation during solidification of continuous cast Nb-V-Ti high-strength low-alloy steels[J]. Materials Characterization, 2014, 95(3): 94-104.

[9] Wan X L, Wei R, Wu K M. Effect of acicular ferrite formation on grain refinement in the coarse-grained region of heat-affected zone [J]. Materials Characterization, 2010, 61(7): 726-731.

[10] 杨杰，李春福，申文竹. 针状铁素体形成的研究现状及应用前景 [J]. 金属热处理, 2013, 38(2): 21-24.

新书邮购

《消失模铸造工艺学》

《消失模铸造工艺学》由化学工业出版社2019年5月20日出版发行。（书号：ISBN978-7-122-34175-4）

《消失模铸造工艺学》作者刘立中，历经三十多年现场实践经验的总结和理论的升华。全书总结136个案例，选用1718帧彩色照片，撰写583千字创造性的提出了消失模铸造“三场理论”，详细解读在“流场、热场、负压场”理论指导下的“消失模铸造浇注系统设计原则”，提出了“借用型腔做浇道，极致简化浇注系统”新的理念，在国内外均属首创。奠定了消失模铸造的理论基础，提出了消失模铸造研究与发展的方向。

定价：498元

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　微信：13991824906