

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.11.021

电场对水树老化 XLPE 电缆修复效果的影响^{*}

陈讴,周凯,李天华,陈泽龙,黄科荣

(四川大学电气信息学院,成都 610065)

摘要:为提高水树老化交联聚乙烯(XLPE)电缆注入式修复效果,研究了在施加不同电场时,水树老化 XLPE 电缆的注入式修复效果,以获得较好的修复方式。将水树老化后的电缆样本分别在不施加电压、施加直流正极性电压、直流负极性电压以及施加工频交流电压的情况下进行注入式绝缘修复。注入式修复期间,测量4组电缆样本的泄漏电流并对电缆样品切片后进行扫描电子显微镜观测。结果表明,注入式修复时施加电压明显提高了电缆的修复效果,而施加直流正极性电压时,修复液与水反应后的生成物颗粒团聚小,在水树区域分布均匀,注入修复液后4 h 水树老化 XLPE 电缆的泄露电流下降至 10 μ A,修复效果在4组样本中最优。

关键词:交联聚乙烯电缆;电场;水树老化;修复

中图分类号: TM247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)11-0108-05

Influence of Electric Field on Rejuvenation Effect of Water-Tree Aged XLPE Cables

Chen Ou, Zhou Kai, Li Tianhua, Chen Zelong, Huang Kerong

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract : To improve the rejuvenation effect of water-tree aged XLPE power cables, the injecting rejuvenation effect of the aged cables while rejuvenated with different electric fields were studied for finding a better rejuvenation method. The aged cable samples were rejuvenated by injection method without electric field, with DC voltage while the conductor was positive, with DC voltage while the conductor was negative, and with power frequency voltage, respectively. Then the leakage current of the four samples were tested regularly during the rejuvenation process, and the samples were cut into pieces for scanning electron microscope. Results show that due to the effect of electric field during the injection rejuvenation, the rejuvenation effects of the water-tree aged power cables are obviously improved, and when the aged cables are rejuvenated with DC voltage while the conductor is positive, the product granules of the rejuvenation liquid reaction with water are smaller than others, the granules are evenly distributed in the water tree area, the leakage current decreases to 10 μ A in 4 h after injecting the rejuvenation liquid and the rejuvenation effect is the optimal in the four samples.

Keywords : XLPE cable ; electric field ; water-tree aged ; rejuvenation

地下电缆具有优良的电气性能,在全球各城市电网中得到了广泛应用^[1],1971年,Vahlstrom首次描述了地下住宅配电电缆中的水树^[2],此后国内外学者就电缆水树老化的机理进行了深入广泛的研究。电缆水树区域电场畸变,加速绝缘层老化,而当电缆运行温度过高时,会进一步加速电缆绝缘层老化。部分交联聚乙烯(XLPE)电缆采用温水交联的方式制造^[3],使得电缆绝缘层内具有少量水分,也促进了水树的生长,水树老化是电缆系统运行的安全隐患。因此,有研究者在1984年提出采用修复液注入技术来延长电缆使用寿命^[4]。随后,该技术在北美广泛应用,成功修复了超过1800万m的水树老化电缆^[4]。我国城市电网改造中早期敷设的电缆至今已运行二十余年,这些电缆的运行环境恶劣,电缆

防水性能不佳,电缆水树老化严重。而且,这些水树老化电缆多在城市繁华路段,更换这部分电缆所需人力物力巨大,且破路施工困难。因此,采用注入有机硅修复液的方式修复电缆具有十分重大的意义。

为提高有机硅修复液注入式修复的修复效果,国内外学者对注入修复液的压力以及修复液温度进行了改进^[5-6],取得了较好的修复效果。但是提高注入修复液的压力可能会破坏电缆结构,而适当提高修复液温度的方法在现场实施并不方便,不利于该技术的推广。

^{*} 国家自然科学基金项目(51477106)

联系人:陈讴,研究生,主要研究方向为电缆绝缘诊断、电缆老化修复技术

收稿日期:2017-09-08

笔者在前期研究的基础上,在修复过程中对电缆施加不同类型的电压,对比在不同电场下,电缆的修复效果以及修复液与水反应后生成物的分布情况,以获得修复效果最好的电压类型。

1 实验部分

1.1 电缆样本

XLPE 电缆: YJLV22-3×95, 8.7/10 kV, 四川新蓉电缆有限责任公司。

1.2 主要仪器及设备

高频信号发生器: UTG9002C 型, 优利德科技(中国)有限公司;

功率放大器: DA2400B 型, 杭州川万电子有限公司;

试验变压器: YD-10/100 型, 泸州市聚源电力设备有限公司;

示波器: DS6104 型, 北京普源精电科技有限公司;

空气压缩机: EBS10 型, 浙江永源机电有限公司;

工频调压器: TSGC-6 型, 上海广伐电器有限公司;

直流高压发生器: HY1310 型, 上海好仪电气有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): JSM-7500F 型, 日本电子 (JEOL) 公司。

1.3 老化电缆样本制备

为了获得水树老化电缆样本, 采用水针电极老化法加速样本老化, 实验设置如图 1 所示。

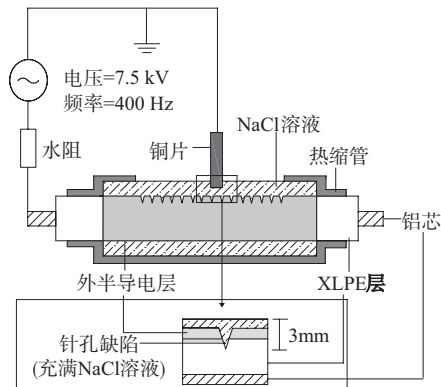


图1 电缆样本加速老化实验示意图

每根电缆长 320 mm, 两端剥去绝缘层, 露出约 20 mm 的缆芯, 再将两端的外半导体层剥去 80 mm。用钢针 [针尖曲率半径为 $(2.5 \pm 0.5) \mu\text{m}$] 在电缆样本的外半导体层上, 每隔 5 mm 扎入深约

3 mm 的针孔缺陷。电缆外套上热缩管, 两端加热收缩。热缩管内注入浓度为 20% 的 NaCl 溶液。对电缆施加 7.5 kV, 400 Hz 的高频高压信号, 进行为期 60 d 的加速电缆老化。400 Hz 高频信号由信号发生器产生, 经功率放大器放大信号功率, 再经由试验变压器升压至 7.5 kV, 该高频信号经示波器检测后, 施加于电缆上。

1.4 带电修复实验

经加速老化 60 d 后, 利用如图 2 所示修复液注入装置, 将老化样本分作四组进行带电修复实验, 注入修复液时由空气压缩机产生 0.2 MPa 的气压以保持修复过程中的压力一致。修复实验共分四组: A 组样本修复过程中不对电缆施加电压; B 组样本修复过程中, 利用工频调压器、试验变压器和自制的整流电路对电缆施加直流正极性电压; C 组样本修复过程中采用上述调压整流设备对电缆施加负极性直流电压; D 组样本修复过程中仅采用工频调压器和试验变压器对电缆施加工频电压, B, C, D 组电缆所施电压的有效值为 7.5 kV, 修复时间共 31 h。

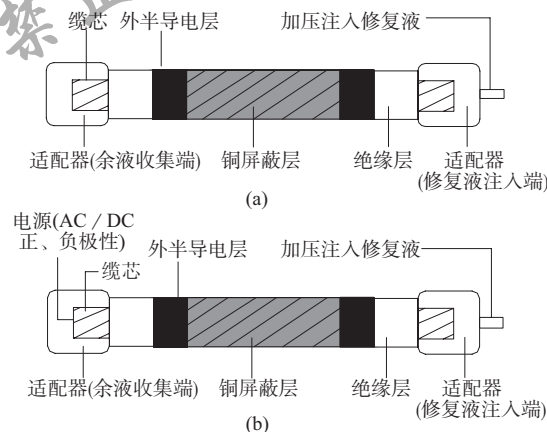


图2 注入式修复示意图

1.5 测试与表征

泄露电流测试: 注入修复液后, 每隔 4 h 采用直流高压发生器测量 4 组电缆的泄漏电流, 测量电压为 20 kV。

SEM 表征: 将电缆样本在针孔处沿垂直于缆芯方向淬断后, 在水树区域相同位置进行 SEM 观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 修复前后泄漏电流测量

不同修复时间下 4 组电缆的泄漏电流如图 3 所示。根据 DL/T 1253-2013 电力电缆线路运行规程,

8.7/10 kV 电缆的泄漏电流不超过 $20\ \mu\text{A}$ 为合格,新电缆的泄漏电流一般为 $0\sim 1\ \mu\text{A}$ 。4 组电缆修复前泄漏电流均大于 $20\ \mu\text{A}$,电缆老化严重。现场修复在运水树老化电缆时,电缆停运时间一般不超过 8 h,因此,电缆修复工作需要 4 h 内完成。根据 4 组电缆的泄漏电流测量结果,注入修复液 4 h 后 B 组电缆的泄漏电流下降至 $10\ \mu\text{A}$,已符合电缆投运要求。C、D 两组电缆泄漏电流下降至 $19\ \mu\text{A}$,虽然在电缆投运合格范围内,但接近上限值 $20\ \mu\text{A}$ 。各组电缆样本注入修复液后 4 h 的泄露电流下降比例计算结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,在 4 h 内,修复过程中缆芯施加直流正极性电压的 B 组电缆泄露电流下降比例最大,为现场修复的最快方式。

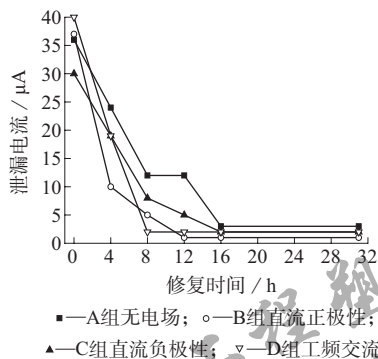


图 3 泄漏电流随修复时间的变化

表 1 注入修复液 4 h 后各组电缆样本泄漏电流下降比例 %

编号	电压类型 (缆芯电压)	泄漏电流下降比例
A 组	无电场	33.3
B 组	直流正极性	73.0
C 组	直流负极性	36.7
D 组	工频交流	52.5

而在注入修复液 31 h 后,修复过程中不施加电压的 A 组电缆的泄漏电流降至 $3\ \mu\text{A}$, B 组电缆的泄漏电流降至 $0\sim 1\ \mu\text{A}$, C、D 组电缆的泄漏电流下降至 $2\ \mu\text{A}$ 。计算注入修复液 31 h 后,各组电缆样本的泄露电流下降比例,结果如表 2 所示。表 2 结果表明,长时间修复结束后,4 组电缆的绝缘水平都有大幅提升。

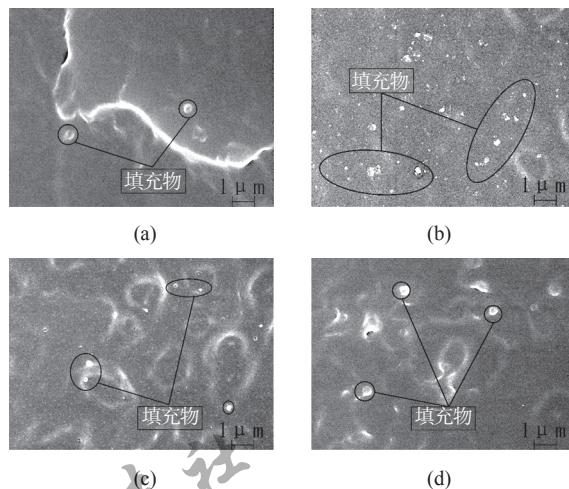
表 2 注入修复液 31 h 后各组电缆样本泄漏电流下降比例 %

编号	电压类型 (缆芯电压)	泄漏电流下降比例
A 组	无电场	91.7
B 组	直流正极性	97.3
C 组	直流负极性	93.3
D 组	工频交流	95.0

2.2 SEM 表征

修复液注入电缆后,在压力和浓度差的作用下,渗透到绝缘层,与水树区域的水反应,生成介电常数与 XLPE 接近的胶体物质^[7]。为分析在不同类

型电场下修复后,水树区域的修复液与水反应后的生成物的分布状况以及填充物的形态,对各组电缆样本的水树区域进行 SEM 观察,放大 10 000 倍后的观测结果如图 4 所示。



a—A 组电缆; b—B 组电缆; c—C 组电缆; d—D 组电缆

图 4 SEM 观测下修复后各组电缆绝缘层中无机颗粒分布

根据图 4 可以看出,修复过程中施加电压的电缆内的生成物数量较修复过程中不施加电压的电缆样本多。而在修复过程中,缆芯施加直流正极性电压时,绝缘层内生成物颗粒明显多于施加另外两种类型电压的电缆样本,且分布均匀。利用光学显微镜测量了图 4 中修复液与水反应后生成物的直径。图 4a 中,生成物的直径在 $0.40\ \mu\text{m}$ 左右;图 4b 中,生成物的直径多在 $0.10\ \mu\text{m}$ 左右,而仅有少数生成物的直径达到 $0.20\ \mu\text{m}$ 。而图 4c、图 4d 中,生成物的直径为 $0.12\sim 0.30\ \mu\text{m}$,且生成物数量明显较图 4b 中少。由此可知,修复过程中缆芯施加直流正极性电压时,修复液与水树区域水反应后生成物的填充效果及分布最优。

2.3 修复效果提升机制

修复液分子具有弱极性^[8],在电场作用下,修复液分子会向电场强的方向移动。水树老化后的电缆,水树区域电场严重畸变,此时修复液会在电场的作用下向水树区域定向移动,因此,与修复时不施加电场相比,更多的修复液定向地移动至水树区域,与水树区域的水反应,消耗水分并填充水树空洞,实现快速修复水树老化电缆的目的。

本修复实验中采用的修复液有效成分为硅氧烷,修复液渗透到绝缘层的水树区域后,在催化剂的作用下,与水分子发生水解缩合反应,生成凝胶状的有机聚合物,其反应如式 (1) 所示^[9]。式中 Me 为甲

基, Ph 为苯基, X 为参与水解缩合反应的分子数。



在不同电场以及不施加电场的情况下,修复液与水反应后生成物的尺寸明显变化。从图 4 可明显看出,修复过程中施加电压时,填充物的含量明显多于不施加电场修复。这是由于在 XLPE 内部,修复液的各成分渗透速度不一致^[10],导致部分水解缩合反应不完全,生成物含量较少且生成物尺寸较大。当修复过程中施加电场时,水树通道打开^[11],修复液分子的直径远小于水树通道,此时,修复液各成分在水树通道内的渗透速度是一致的,使修复液与水的反应更完全,生成物含量更多,填充效果更好。

施加不同类型电场时,填充物尺寸有明显区别。根据胶体系统扩散双电层理论,胶体质点表面因吸附带电离子而使胶粒带电,而整个体系是电中性的,因此,在胶体溶液中,胶粒表面附近有与胶粒表面电荷数量相等、符号相反的电荷存在^[12]。这些符号相反的离子即反离子。越靠近胶粒表面的反离子浓度越高,越远离胶粒表面的反离子浓度越低,到某一距离,反离子的浓度与胶粒表面离子浓度相等,该位置紧靠胶粒表面的一层为紧密层,紧密层外为扩散层^[13]。

加速老化后的电缆水树区域充满了氯化钠溶液。缆芯施加直流正极性电压时,带正电荷的钠离子在电场的作用下聚集在针孔附近,带负电荷的氯离子聚集在水树尖端;缆芯施加直流负极性电压时,带负电荷的氯离子聚集在针孔附近,带正电荷的钠离子聚集在水树尖端,如图 5 所示。

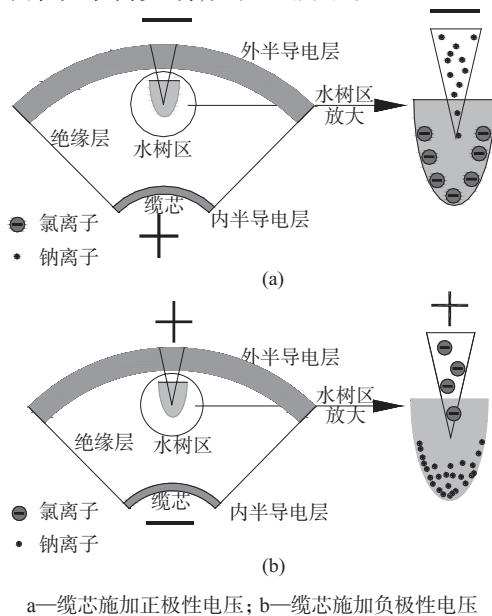
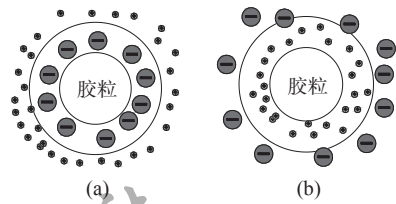


图 5 正/负极性下水树区域电荷分布

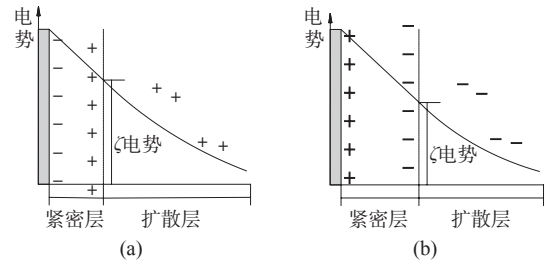
由于水树尖端的电荷种类不同,进入水树区域的修复液与水反应后,生成的胶粒将吸附不同电荷种类的离子。当缆芯施加正极性电压时,胶粒吸附带负电荷的氯离子,缆芯施加负极性电压时,胶粒吸附带正电荷的钠离子,缆芯施加交流电压和不施加电压时,胶粒吸附的离子种类为两种电荷。胶粒吸附不同电荷时双电层结构模型如图 6 所示。缆芯施加正极性电压时,胶粒吸附带负电荷的氯离子,胶粒表面带负电荷;缆芯施加负极性电压时,胶粒吸附带正电荷的钠离子,胶粒表面带正电荷。



a—胶粒吸附负离子; b—胶粒吸附正离子

图 6 双电层结构模型

扩散层与液体内部的电位差定义为 ζ 电势^[14],如图 7 所示。 ζ 电势的大小将影响胶体的稳定性, ζ 电势对溶液的离子浓度非常敏感^[12]。当溶液中离子浓度增加时, ζ 电势下降,胶体中细小胶粒更易团聚为较大颗粒^[15]。



a—胶粒吸附负离子; b—胶粒吸附正离子

图 7 双电层结构模型 ζ 电势

由于钠离子半径(0.095 nm)小于氯离子半径(0.181 nm),扩散到水树尖端的钠离子的通量大于氯离子的通量,聚集在水树尖端的钠离子的浓度更大^[16]。因此,缆芯施加负极性电压时,修复液与水反应后的生成物更容易聚沉为较大的颗粒。由于大部分生成物团聚为较大颗粒,因此,生成物的分布较不均匀。而修复过程中,缆芯施加正极性电压时,溶液中离子浓度较缆芯施加负极性时小,生成物不易聚沉为大颗粒,生成物尺寸较小,在水树区域均匀分布。当缆芯施加工频电压时,胶粒吸附两种离子,吸附不同离子的胶粒相互吸引,容易聚沉为大颗粒。这与 SEM 观测结果,即缆芯施加正极性时水树区域的填充物尺寸更小是相符的。

3 结论

(1) 由于修复液分子具有弱极性,在 XLPE 电缆修复过程中施加电压,修复液向水树区域移动更快,水树老化电缆的绝缘性能恢复速度更快。

(2) 电场作用下,水树通道打开,修复液各成分渗透速率相对不施加电场时更接近,因此,施加电场时,修复液与水反应后的生成物填充效果更优。

(3) 现场实施 XLPE 电缆修复时,采用缆芯施加正极性电压的方式,修复液与水反应后的生成物的尺寸小,填充效果好,且电缆绝缘性能在短时间内快速恢复。

参考文献

- [1] 柳先友,雷华.多组分协效低烟无卤阻燃电缆料及电缆加工研究[J].工程塑料应用,2008,36(2):46-50.
Liu Xianyou, Lei Hua. Research on low smoke, multiple synergistic components, free of halogen cable material and processing[J]. Engineering Plastics Application, 2008, 36(2):46-50.
- [2] Thue W A. Electrical power cable engineering[M]. 3rd ed. New York: CRC Press, 2012:275-276.
- [3] 杨非,原晓丽,赵瑞,等.阻燃硅烷交联聚乙烯在电缆上的应用[J].工程塑料应用,2003,31(5):31-33.
Yang Fei, Yuan Xiaoli, Zhao Rui, et al. Application of flame-resistant organosilane cross-linked PE in cable[J]. Engineering Plastics Application, 2003, 31(5):31-33.
- [4] Stagi W R. Cable injection technology[C]//Transmission & distribution conference and exposition: Caracas, Venezuela: IEEE, 2006:1-4.
- [5] Bertini G J, Keitges N E. Silicone injection: Better with pressure[C]//Fall 2009 PES-ICC meeting. Scottsdale, USA: IEEE Insulated Conductor Committee (ICC), 2009:1-7.
- [6] 杨明亮,周凯,邵海彬,等.温度对电力电缆有机硅水树修复的影响[J].绝缘材料,2016(4):35-39.
Yang Mingliang, Zhou Kai, Shao Haibin, et al. Influence of temperature on water tree rejuvenation of power cables[J]. Insulating Materials, 2016(4):35-39.
- [7] 汪朝军,田鹏,刘勇,等.有机硅注入技术对电缆水树缺陷的绝缘修复研究[J].绝缘材料,2011(6):16-20.
Wang Chaojun, Tian Peng, Liu Yong, et al. The effect of siloxane liquid injection technique on water tree rejuvenation of XLPE cables[J]. Insulating Materials, 2011(6):16-20.
- [8] Pelissou S, Lessard G. Underground medium-voltage cable rejuvenation—Part I: Laboratory tests on cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4):2324-2332.
- [9] 周凯,赵威,陶文彪,等. XLPE 电缆绝缘水树老化的无机修复机理及试验分析[J].高电压技术,2014,40(1):67-73.
Zhou Kai, Zhao Wei, Tao Wenbiao, et al. Method and mechanism of the inorganic rejuvenation for water tree aged XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1):67-73.
- [10] Bertini G, Vincent G. Cable rejuvenation mechanisms[C]//Spring 2006 PES-ICC meeting. Reno, USA: IEEE Insulated Conductor Committee (ICC), 2006:1-8.
- [11] Hvidsten S, Ildstad E, Sletbak J. Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5):754-760.
- [12] 沈钟,赵振国,康万利.胶体与表面化学[M].北京:化学工业出版社,2012:55-79.
Shen Zhong, Zhao Zhenguo, Kang Wangli. Colloid and surface chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012:55-79.
- [13] Hou T, Xu R, Tiwari D, et al. Interaction between electrical double layers of soil colloids and Fe/Al oxides in suspensions[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2007, 310(2):670-674.
- [14] 科斯格雷夫.胶体科学原理、方法与应用[M].李牛,李姝,译.北京:化学工业出版社,2009:38-42.
Cosgrove T. Colloid science principle, method and application[M]. Li Niu, Li Shu, Translating. Beijing: Chemical Industry Press, 2009:38-42.
- [15] 芦贻春,李再耕. pH 值对硅溶胶凝胶化过程的影响[J].耐火材料,1995(6):326-328,335.
Lu Yichun, Li Zaigeng. Effect of pH value on sol-gel process of silica sol[J]. Refractory material, 1995(6):326-328, 335.
- [16] 周凯,杨明亮,陶文彪,等.单一极性直流电压下交联聚乙烯电力电缆水树生长特性[J].高电压技术,2015,41(4):1075-1083.
Zhou Kai, Yang Mingliang, Tao Wenbiao, et al. Propagation characteristics of water trees in XLPE power cables under single polarity DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4):1075-1083.

欢迎订阅 2018 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2018 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志,订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊,大 16 开本,每月 10 日出版,2018 年定价 15 元/期,全年 180 元。《化学分析计量》为双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版,2018 年定价 15 元/期,全年 90 元。

电话:(0531)85878223 85878057 传真:(0531)85947355