

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.021

植物绝缘油浸纸板电气性能的研究

何清¹, 李亚飞², 王伟¹, 鲁莽³, 王瑞珍¹, 于钦学²

(1. 国网湖北省电力公司科学研究院, 武汉 430077; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;
3. 国网孝感供电公司, 湖北 孝感 432099)

摘要:绿色环保型植物绝缘油越来越受到人们的重视,国外已经做到420 kV/300 MVA植物油变压器,而国内植物油变压器制造才刚刚起步,到目前为止还没有商品化植物油变压器。因此研究植物绝缘油浸纸板最基本的电气性能具有非常重要的意义。为掌握水分和温度对植物绝缘油浸纸板电气性能的影响,文中制备了不同含水量的植物绝缘油和矿物绝缘油浸纸板试样,并对比研究了它们在常温下的交流击穿特性,以及体积电阻率、损耗因数和相对介电常数随温度和水分的变化规律。研究表明,油浸纸板的电气性能在含水量超过4%时急剧下降,同等水分下植物绝缘油浸纸板的击穿场强高于矿物绝缘油浸纸板。文中的研究对植物绝缘油的应用具有重要的参考意义。

关键词:水分;温度;植物绝缘油;矿物绝缘油;油浸纸板;电气性能

Study on Electrical Properties of Vegetable Insulating Oil Impregnated Pressboard

HE Qing¹, LI Yafei², WANG Wei¹, LU Mang³, WANG Ruizhen¹, YU Qinxue²

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institution, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Grid Xiaogan Power Supply Company, Hubei Xiaogan 432099, China)

Abstract: Vegetable insulating oil has attracted more and more attention. The 420 kV/300 MVA vegetable oil transformer has been used in foreign countries, and the domestic vegetable oil transformer has just started. And there is no commercial natural ester transformer, so the study of vegetable insulating oil base electrical properties is of great significance. In order to master the influence of moisture and temperature on the electrical properties of vegetable insulating oil impregnated pressboard, the authors have prepared different kinds of vegetable insulating oil and mineral oil impregnated pressboard samples with different moisture and studied their AC breakdown characteristics at room temperature, and the temperature characteristics of loss factor, volume resistivity and relative permittivity with different moisture. The results show that the electrical properties of oil-impregnated pressboard are abruptly decreased when the moisture content is more than 4%. The AC breakdown strength of vegetable oil impregnated pressboard is higher than that of mineral oil. The study of this paper has important reference significance for the application of vegetable insulating oil.

Key words: moisture; temperature; vegetable insulating oil; mineral insulating oil; oil-impregnated pressboard; electrical properties

0 引言

植物绝缘油作为一种新型环保的液体绝缘介质在变压器中应用的越来越广泛^[1]。这得益于其优良的理化电气性能:植物绝缘油的击穿场强高于矿物绝缘油,燃点高,可生物降解、可再生^[2-3]。利用植

物绝缘油替代矿物绝缘油是缓解目前化石能源紧缺、环境污染压力的有效办法。

国外在变压器用植物绝缘油方面的研究和应用已经超过10年^[4-7]。ABB公司于1999年在美国申请了BIOTEMP®型天然酯(植物)绝缘油的专利^[8]。2000年总部位于美国威斯康辛州密尔沃基的Cooper公司开发出Envirotemp FR3®植物绝缘油^[9]。M&I MATERIALS研制出MIDEL® eN。2009年日本

AE帕瓦株式会社通过对棕榈油进行改性,研制出低燃点(170 ℃)低粘度的棕榈油 PFAE^[10]。植物绝缘油配变压器在欧美国家应用超过了 100 万台,最高应用电压等级达到了 420 kV^[11]。国内,西安交通大学、重庆大学、中国电力科学研究院、国网河南电科院等科研院所^[12-16]也分别开展了植物绝缘油的相关研究工作,国内已有自主知识产权的植物绝缘油的商业化生产线。国家电网公司自 2014 年以来连续 3 年将植物绝缘油变压器列为重点推广新技术。国家工业和信息化部、质检总局、发展改革委联合颁布了《配电变压器能效提升计划(2015—2017 年)》,明确指出重点解决高性能、环保型植物绝缘油抗老化和量产问题,促进环保型植物绝缘油推广应用。但是到目前为止国内还没有商品化植物油变压器。

油浸纸板作为变压器内部重要的结构,起到绝缘和支撑的作用,其电气性能的优劣直接影响着变压器安全运行的可靠性。目前国内外针对水分对植物油浸纸板性能的影响研究集中在这几个方面:水分在植物油和绝缘纸之间的扩散规律^[17-18],不同含水量下植物油浸纸的介电谱^[19],以及水分对植物绝缘油浸纸板老化性能的影响^[20-22]等,而对基础电气性能在水分和温度双重作用下的变化规律报道较少。

文中制备了具有不同含水量的植物绝缘油浸纸板和矿物绝缘油浸纸板试样,并研究了这两种油浸纸板试样在不同含水量下的体积电阻率、损耗因数和相对介电常数的温度特性以及常温下的击穿特性。研究植物绝缘油纸基本的电气性能对设计具有自主知识产权的植物绝缘油变压器、维护其安全稳定的运行具有重要意义。

1 试样的制备

该试验选用国产 25 号矿物绝缘油、进口 FR3 植物绝缘油以及国产变压器用绝缘纸板为研究对象,纸板边长为 100 mm,厚度为 0.5 mm。两种绝缘油和纸板的基本参数见表 1、2。

表 1 两种绝缘油的基本参数

基本参数	25号矿物油	FR3植物油
颜色	无色	亮绿
化学类型	烃类	酯类
25 ℃比重	0.89	0.92
40 ℃运动粘度/cSt	9.7	36.0
倾点/℃	-42	-21
闪点(闭口)/℃	142	319
损耗因数(90 ℃下)	0.000 9	0.030 0
击穿电压/kV	55.0	54.4
酸值/(mg KOH·g ⁻¹)	0.009	0.030

表 2 绝缘纸板的基本参数

Table 2 Basic parameters of the pressboard

基本参数	国产绝缘纸板
厚度/mm	0.50
抗张强度(纵向)/MPa	76.00
抗张强度(横向)/MPa	57.00
延长率(纵向)/%	7.70
延长率(横向)/%	8.80
层间附着力/(N·mm ⁻¹)	370.00
水分含量/%	<7.00
吸油率/%	30.00
密度/(g·cm ⁻³)	0.86

1.1 绝缘油的处理

利用真空储油瓶和磁力搅拌器分别对两种绝缘油进行脱水、脱气处理。保持恒温 60 ℃、真空度低于 70 Pa,磁力搅拌 12 h。经过处理后,油中的氧气含量低于 500×10⁻⁶,植物绝缘油中水分含量低于 30×10⁻⁶,矿物绝缘油水分含量低于 10×10⁻⁶。

1.2 油浸绝缘纸板试样的制备

将绝缘纸板置于烘箱内,105 ℃下干燥 48 h,使纸板中水分低于 0.3%。然后将烘干的绝缘纸板放到湿度 50%、温度 50 ℃的恒温恒湿箱内,通过控制放置时间可获得不同含水量的绝缘纸板试样。然后对其进行 24 h 的真空浸油。经过萃取法测得试样含水量在 0.3%~6%之间。为了叙述方便,下文记矿物绝缘油浸纸板为 MP,植物绝缘油浸纸板为 NP。

2 测量方法与设备

2.1 水分的测量

油浸纸板中含水量参考标准 DL 449—2015《油浸纤维质绝缘材料含水量测定法——萃取法》进行测量得到。试验中用到的微水测量仪为 JF-5 型库仑法微水测定仪。利用甲醇萃取绝缘纸板中的水分,通过计算萃取之后甲醇试样与空白试样之间的水分差值得到绝缘纸板中的含水量。见式(1)

$$W = \frac{4(A-B) \times V}{m} \times 10^{-4}. \quad (1)$$

式(1)中:W 为含水量,%(质量);A 为 250 μL 含样品的萃取液含水量,μg;B 为 250 μL 空白甲醇的含水量,μg;V 为所加入的萃取溶剂的体积,mL;m 为干纸的质量,g。

2.2 体积电阻率、介质损耗因数和相对介电常数的测量

油纸绝缘纸板的体积电阻率的测量参考标准 GB/T 1410—2006《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》,介质损耗因数和相对介电常数的测量参考标准 GB/T 1409—2006《测量电气绝缘

材料在工频、音频、高频(包括米波波长在内)下电容率和介质损耗因数的推荐方法》,利用固体标准三电极系统见图 1(a),结合 Tettex2821 高低压西林电桥、温度控制系统与 ZC36 型高阻计进行相关参数的测量。

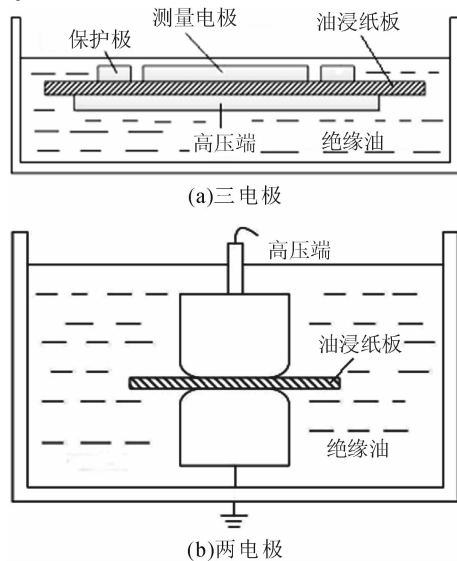


图 1 电极系统

Fig. 1 Electrode systems

2.3 击穿场强的测量

油浸绝缘纸板的击穿实验参考标准 GB/T 1408.1—2006《绝缘材料电气强度试验方法第 1 部分工频下试验》。见图 1(b),击穿试验采用 $\phi 25$ mm 柱/柱电极系统,升压速度为 2 kV/s。试验时绝缘油一定要完全浸过试样。

3 实验结果与讨论

3.1 体积电阻率的变化规律

两种油浸纸板的体积电阻率随含水量的变化曲线见图 2,从图 2 可以看到,随着油浸纸板含水量的增加和温度的升高,两种油浸纸板试样的体积电阻率都不断减小;其中 MP 的体积电阻率要高于 NP 的体积电阻率,这是由矿物绝缘油的体积电阻率高于植物绝缘油所导致的。油浸纸板的电导主要以离子电导为主,电阻率受温度影响明显。当温度升高时,离子容易摆脱周围分子的束缚而产生位移,从而使电阻率下降。由图 2 可见,当水分低于 4% 时,两种油浸纸板的体积电阻率的对数与含水量的关系都可以近似拟合为直线。而当含水量在 3.5% 左右时,电阻率下降的速度出现转折,明显较低水分下加快。水分子的引入会增加油浸绝缘纸板中载流子的含量,使得油浸纸板的电导率增加。而且水的电导比油浸纸板电导大很多,因此水分的增加,会使油浸纸板电阻率明显下降。

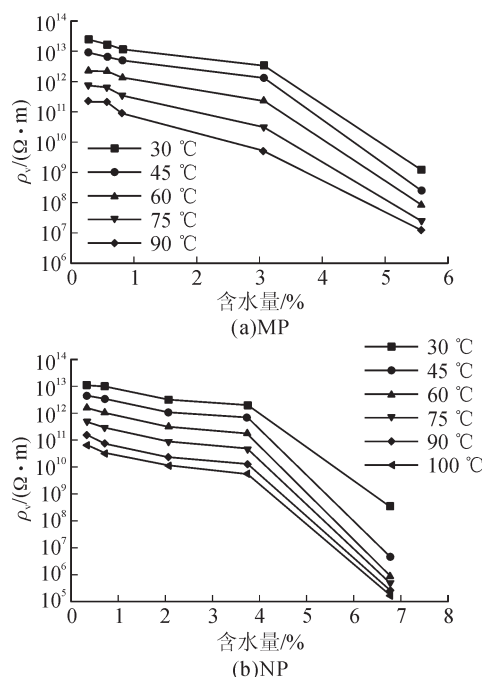


图 2 不同温度下油浸纸板的体积电阻率随含水量的变化曲线

Fig. 2 Variation of volume resistivity with moisture content for oil-impregnated pressboard specimens at different temperatures

3.2 损耗因数的变化规律

两种油浸纸板的损耗因数随含水量的变化曲线见图 3,从图 3 可以看到,随着含水量的增加和温度的升高,两种油浸纸板试样的介质损耗因数都不断增加。水分的增加使得油浸纸板中载流子浓度增加,从而导致油纸绝缘的电导率增加,随之由电导引起的损耗也会不断增加。油纸绝缘的损耗来源还有一部分是松弛损耗。纤维素分子中的极性基团主要是 $-OH$, 水分子的引入使得纤维素分子上的 $-OH$ 数量大大增加,因此产生了较大的松弛损耗。温度增高也会导致油浸纸板电导率的升高,因此电导产生的损耗也随温度的升高而逐渐增高。对比 MP 和 NP 试样,可以看到水分低于 4% 时,MP 和 NP 都保持着较低的介质损耗因数,且 MP 试样的介质损耗因数随着水分的变化近似呈指数增加。而 NP 试样的损耗在含水量 4% 以下时,随水分的增加相对增加缓慢,当超过 4% 时,损耗因数快速增大。

3.3 相对介电常数的变化规律

两种油浸纸板相对介电常数随含水量的变化曲线见图 4,从图 4 可以看到,不同温度下,植物绝缘油和矿物绝缘油油浸纸板的介电常数都随着水分的增加而增加。其中水分含量在 4% 以下时,相对介电常数随水分变化不明显,而当含水率超过 4% 时,相对介电常数急剧增加。这是由于纤维素的主要成分是由葡萄糖分子组成的大分子多糖,水分的

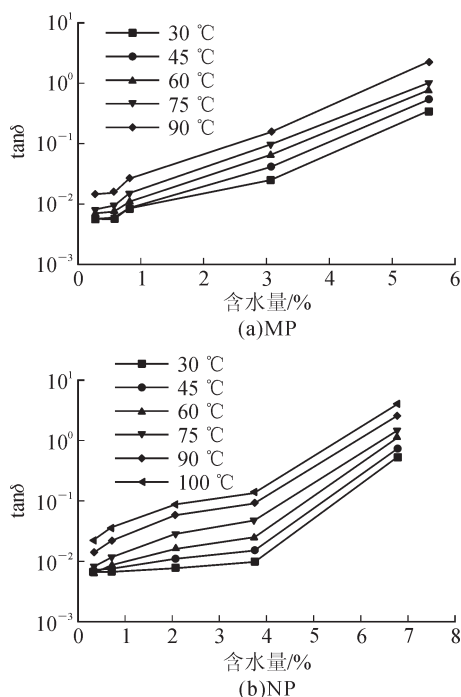


图 3 不同温度下油浸纸板的介质损耗因数随含水量的变化曲线

Fig. 3 Variation of dissipation factor with moisture content for oil-impregnated pressboard specimens at different temperatures

引入首先会与纤维素分子中的羟基形成氢键,形成束缚水,所以在水分含量不大的情况下,对油纸绝缘的相对介电常数影响不大。而随着水分含量增加,越来越多的水分子游离其中,水是强极性介质,必然会引起油浸纸板介电常数急剧增加。还可以看到不同含水率下,相对介电常数随着温度的增加而增加。随温度升高极性分子更容易脱离分子束缚,松弛极化更容易建立,所以相对介电常数随温度增加而增加。

3.4 击穿场强的变化规律

常温下不同水分下油浸纸板的交流击穿场强见图 5,从图 5 可以看到,当含水量低于 4% 时,水分对油纸试样击穿场强的影响不显著,而水分超过 4% 时,击穿场强急剧降低。这是由于在高水分下,油纸绝缘的损耗和电导率急剧增大,使得施加电场时由损耗引起的发热量增加,介质温度不断上升,以致引起油浸纸板的劣化,从而在较低场强下发生击穿。还可以看到,NP 试样的击穿场强要高于 MP 试样,水分低于 4% 时,NP 的击穿场强是 55 kV/mm 左右,而 MP 的击穿场强为 50 kV/mm 左右,这是由两方面因素导致的。一方面是由于植物绝缘油具有亲水的极性基团,饱和含水量比矿物油高,对水分具有束缚作用,所以水分的引入对植物绝缘油纸试样击穿场强的影响就小于对矿物绝缘油纸的影响;另

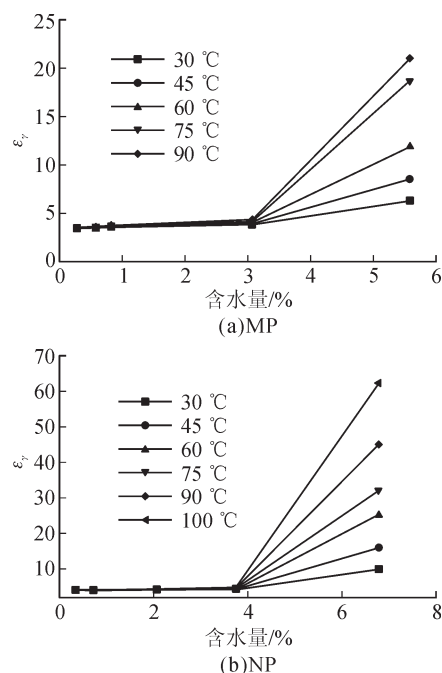


图 4 不同温度下油浸纸板的介电常数随水分含量的变化曲线

Fig. 4 Variation of relative permittivity with moisture content for oil-impregnated pressboard specimens at different temperatures

一方面是由于植物绝缘油的相对介电常数高于矿物绝缘油,与干燥绝缘纸纤维素的相对介电常数更接近,根据复合电介质击穿理论,植物绝缘油纸结构中各介质所受的电场更加均匀,而且植物绝缘油的击穿场强也略高于矿物绝缘油的击穿场强,因此 NP 的击穿场强高于 MP。

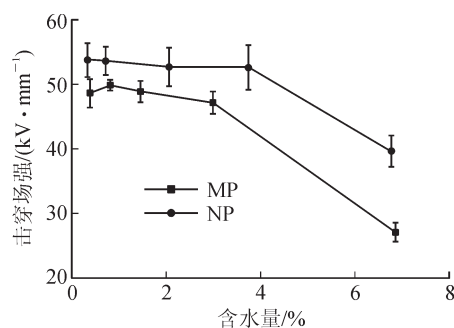


图 5 不同水分下油浸纸板的交流击穿场强

Fig. 5 Variation of AC breakdown strength of oil-impregnated pressboard at different moisture condition

4 结论

1)油浸绝缘纸板的水分含量的具有阈值效应,即当水分含量超过 4% 时,油纸绝缘的各电气参数都会发生急剧变化。

2)同等水分下植物绝缘油浸纸板的击穿场强高于矿物绝缘油浸纸板,且受水分影响较小,结合国内外关于植物绝缘油延缓绝缘纸老化的研究,植物

绝缘油用在变压器中能够有效提高变压器运行的可靠性。

参考文献:

- [1] OOMMEN T V. Vegetable oils for liquid-filled transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(1): 6-11.
- [2] LASHBROOK M, KUHN M. The use of ester transformer fluids for increased fire safety and reduced costs[C]//CIGRE. [S.l.]: CIGRE, 2012: A2-210.
- [3] RAPP K J, LUKSISH J. Review of kraft paper/natural ester fluid insulation system aging[C]//IEEE International Conference on Dielectric Liquids[S.l.]: IEEE, 2011: 1-4.
- [4] ABDELMALIK A A, FOTHERGILL J C, DODD S J. Aging of kraft paper insulation in natural ester dielectric fluid[C]//IEEE International Conference on Solid Dielectrics.[S.l.]: IEEE, 2013: 541-544.
- [5] MCSHANE C P, RAPP K J, CORKRAN J L, et al. Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. [S.l.]: IEEE, 2001: 675-679.
- [6] RAPP K J, MCSHANE C P, LUKSICH J. Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and kraft paper[C]//2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Coimbra: IEEE, 2005: 393-396.
- [7] HOFSTETTER K, HINTERSTOISSER B, SALMÉN L. Moisture uptake in native cellulose—the roles of different Hydrogen bonds: A dynamic FT-IR study using Deuterium exchange[J]. Cellulose, 2006, 13(2): 131-145.
- [8] MARTINS M G. Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers—experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(6): 7-13.
- [9] CARCEDO J, FERNANDEZ I, ORTIZ A, et al. Quantitative study on the aging of kraft paper in vegetable oils[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2016, 32(6): 29-35.
- [10] DAI J, WANG Z D, DYER P, et al. Investigation of the impregnation of cellulosic insulations by ester fluids[J]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007, 30(7): 588-591.
- [11] Siemens. Vegetable oil transformer for ultra-high voltages [EB/OL]. <https://www.Siemens.com/press/en/feature/2014/energy/2014-02-transformator.php>, 2015-02-01.
- [12] 刘光祺, 钟力生, 于钦学, 等. 植物绝缘油研究现状[J]. 绝缘材料, 2012, 45(3): 34-39.
LIU Guangqi, ZHONG Lisheng, YU Qinxue, et al. Research situation of vegetable insulating oil[J]. Insulating Materials, 2012, 45(3): 34-39.
- [13] 邹平, 李剑, 孙才新, 等. 植物绝缘油中含水量对其绝缘性能的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1627-1633.
ZOU Ping, LI Jian, SUN Caixin, et al. Influences of moisture content on insulation properties of vegetable insulating oil[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1627-1633.
- [14] LIAO R J, ZHIQIN M A, JIAN H, et al. Influence of water content on frequency domain spectroscopy characteristics of transformer oil and insulation paper[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2869-2875.
- [15] LIAO Ruijin, GUO Chao, WANG Ke, et al. Investigation on thermal aging characteristics of vegetable oil-paper insulation with flowing dry air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1649-1658.
- [16] LI Jian, ZHANG Zhaotao, GRZYBOWSKI S, et al. A new mathematical model of moisture equilibrium in mineral and vegetable oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1615-1622.
- [17] GASSER H P, KRAUSE C H, PREVOST T. Water absorption of cellulosic insulating materials used in power transformers[C]//2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics Solid Dielectrics. [S.l.]: IEEE, 2007: 289-293.
- [18] MURAD N, MUHAMAD N, SULEIMAN A, et al. A study on palm oil-based oil moisture absorption level and voltage breakdown[C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). [S.l.]: IEEE, 2013: 925-928.
- [19] DU Y, ZAHN M, ALTAMIRANO N, et al. Moisture and temperature effects on the dielectric spectrum of transformer pressboard[J]. 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002, 77(3): 878-881.
- [20] LIAO Ruijin, LIN Yuandi, GUO Pei, et al. Thermal aging effects on the moisture equilibrium curves of mineral and mixed oil-paper insulation systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 842-850.
- [21] LIAO Ruijin, LIN Yuandi, ZHANG Yiyi, et al. Independent effects of aged oil and aged paper on moisture evaluation of power transformers[J]. Electric Power Components and Systems, 2016, 44(5): 556-564.
- [22] GARCIA B, URQUIZA D, BURGOS J C. Investigating the influence of moisture on the 2FAL generation rate of transformers: a new model to estimate the DP of cellulosic insulation[J]. Electric Power Systems Research, 2016(140): 87-94.

何清(1978—),女,高级工程师,主要从事绝缘油检测及充油类设备故障诊断与分析工作。