

YUSHUI ZHENKONG FENLI
YUANLI JI YINGYONG



油水真空分离 原理及应用

陈彬 刘阁 张贤明 | 著



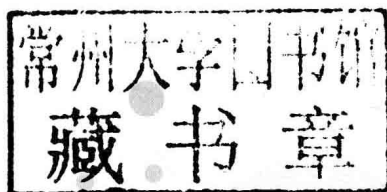
化学工业出版社

YUSHUI ZHENKONG FENLI
YUANLI JI YINGYONG



油水真空分离 原理及应用

陈彬 刘阁 张贤明 | 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面系统地阐述了油水真空分离过程中水分对润滑油理化性能变化的影响规律和影响机理,构建了科学合理的真空作用下的高效油水真空分离和优化决策系统的理论框架;介绍了油水真空分离的实验测试、理论分析、建模研究、机理分析、运动特征提取、知识发现及优化决策等方面的成果。

本书可作为高等学校开设有关油液污染控制、两相分离等专业的本科生、研究生教材,也可作为相关领域科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油水真空分离原理及应用/陈彬,刘阁,张贤明著. —北京:化学工业出版社,2016.11
ISBN 978-7-122-25467-2

I. ①油… II. ①陈…②刘…③张… III. ①油水分离-研究 IV. ①TE624.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第245708号

责任编辑:邹宁
责任校对:吴静

文字编辑:向东
装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:北京科印技术咨询服务公司海淀数码印刷分部
710mm×1000mm 1/16 印张12¼ 字数250千字 2016年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:59.00元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

水分作为油液主要的污染物之一会产生酸类物质、沉淀物和胶质等有害污染物,使油液的理化性能劣化,降低油液的润滑性能等;油液性能的变化意味着在其使用过程中对机械设备本身和设备的运行状态会产生不同程度的影响,与此同时也影响到油液的使用寿命,进而加剧废旧油液的产生量,由此造成巨大的资源浪费。据统计我国润滑油实际消费量的 20% 左右的废润滑油是由于水分污染引起的,给国民经济中石化资源的高效合理利用带来了很大的压力,不利于当前我国资源环境的可持续发展,因而油水分离方法的研究越来越受到重视。

本书从实验测试、理论分析、建模研究、机理分析等方面首先研究了水分对润滑油的性能变化的影响规律和影响机理,通过对油水混合液的电气性能、流动性能和氧化安定性能 3 类 10 项性能指标分析确定油液的均匀稳定性,结合油水实验样品中水分及添加剂物质在特征波数处的中红外吸光度值变化数据与理化性能数据建立了相关的数学模型;并采用模糊数学的方法进行了模糊聚类分析,建立了水分含量与油水理化性能影响的 ANFIS 模型,获取了水分含量对油液理化性能的影响规律,为减少实验次数和人为误差,有效地获取油液的关键理化性能变化规律提供了理论支撑。

书中还综合应用多相流体动力学、知识发现以及数据处理等多学科交叉知识,通过理论和实验相结合的方法,建立油水真空分离过程中油、水、气三相动力学模型,从理论分析的角度探讨在一定真空条件下,水分含量与水分蒸发效能之间的关系及其动态特征;重点研究油水分离过程中油水气三相流运动特征提取、知识发现及优化决策等问题,构建科学合理的真空作用下的高效气体辅助油水真空分离和优化决策系统的理论框架。为有效利用能源、节能降耗、提升油液使用寿命提供技术支撑,达到为油水分离过程提供理论依据和应用技术的目的。

本书共分 9 章。第 1 章介绍了油水分离研究的背景及意义,综述了水分对油液性能影响、油液中水分及理化性能检测技术以及常见的油水分离方法的国内外研究现状和发展趋势。

第 2 章介绍了油液的理化性能指标以及测试方法,分析了油水的稳定性及其检测方法。

第 3 章根据油液的理化性能测试以及中红外光谱实验数据,建立了水分含量、特征波数处红外光谱吸光度值对油水电气性能、流动性能以及氧化安定性能等理化性能的数学模型、ANFIS 模型,并探讨了水分对油水性能指标的影响机理。

第4章从油水基本的传热传质过程入手,对油水分离过程建立数学模型,通过数值求解该模型,获取油水的真空蒸发动态特性。

第5章针对油水分离过程进行了非定常数值模拟,揭示滤油机油水乳化液在一定真空条件下的油、水、蒸汽的三相流体动力学特征。

第6章在油水真空分离基础上,提出一种气体辅助油水真空分离方法,并通过多因素实验,获得充气前后油水分离效率,探讨气体辅助方式对油水真空分离方法的影响规律。

第7章对于油水的真空分离过程,从基本的传热传质过程入手,分析了各个影响因素对油水分离效率的影响规律。

第8章利用 HHT 对油中水分含量的调幅信号进行解调,获取 HHT 包络谱,将油中水分含量的信息从复杂的谐振信号中提取出来,并且根据解调结果判断油中水分含量的数值,建立油中水分含量的检测的知识发现模型。

第9章针对油液真空脱水过程提出了一种 T-S 模糊模型一体化辨识方法,构建气体辅助油水真空分离的决策系统,并根据所建模型分析和优化脱水工艺参数,实现对真空脱水效率较高精度的决策结果。

本书可作为高等学校开设有关油液污染控制、两相分离等课程的本科生、研究生教学用书,也可作为涉及油液污染控制研究的科技人员的参考资料。

本书第1~2章及第7~9章由陈彬撰写,第4~6章由刘阁撰写,第3章内容引自所指导的武宏阳同学硕士论文的相关内容,在此表示感谢!全书由陈彬、张贤明进行统稿和定稿。

本书所引用的参考文献,作者尽最大可能注明出处,并同时向这些文献的作者致以真诚的谢意!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位同行与读者批评指正!

陈彬

2015年6月

目录

CONTENTS

第1章 绪论 1

- 1.1 油水分离的研究背景和意义 1
- 1.2 油水分离的国内外研究现状 5
 - 1.2.1 油液理化性能 5
 - 1.2.2 油中水分检测方法 6
 - 1.2.3 油水分离方法 9
 - 1.2.4 油中水分污染评估 18
- 1.3 油水分离方法展望 18

第2章 油液的稳定性及其检测 20

- 2.1 油液的理化性能 20
 - 2.1.1 油液的物理性能 20
 - 2.1.2 油液的化学性能 32
 - 2.1.3 变压器油的理化性能标准 34
- 2.2 油液的稳定性 35
 - 2.2.1 油水实验样品的制备 35
 - 2.2.2 油水分散系的稳定性 37
- 2.3 卡尔·费休法检测油液中水分(库仑法) 40
 - 2.3.1 测试方法与原理 40
 - 2.3.2 测试结果分析 41
- 2.4 红外光谱法检测油中水分 42
 - 2.4.1 测试方法原理 42
 - 2.4.2 红外光谱测试及结果 42

第3章 油液的理化性能 47

3.1	油液的电气性能	47
3.1.1	油水实验样品电气性能实验分析	48
3.1.2	油水实验样品中红外光谱吸光度与电气性能数学模拟	49
3.1.3	油水实验样品水分含量与电气性能的 ANFIS 模拟	51
3.1.4	基于油水实验样品中红外光谱的综合 ANFIS 模拟	54
3.1.5	水分对油液电气性能影响机理	65
3.2	油液的流动性能	66
3.2.1	油液流动性能实验分析	66
3.2.2	油液中红外光谱吸光度与流动性能数学建模模拟	68
3.2.3	油水实验样品水分含量与流动性能的 ANFIS 模拟	76
3.2.4	基于油水实验样品中红外光谱与流动性能的综合 ANFIS 模拟	81
3.2.5	水分对油液流动性能影响机理	93
3.3	油液的氧化安定性能	94
3.3.1	油液热氧化前后氧化安定性能实验	94
3.3.2	油液特征波数与氧化安定性的数学模拟	100
3.3.3	油液水分含量与氧化安定性能的 ANFIS 模拟	101
3.3.4	油液氧化安定性能的综合 ANFIS 模型	102
3.3.5	综合 ANFIS 模型小结	106
3.3.6	水分对油液氧化安定性影响机理分析	106

第4章 油水真空分离的理论基础

108

4.1	油中水滴蒸发模型	109
4.2	蒸发速率的计算	112
4.3	计算结果与分析	112
4.4	小结	115

第5章 油水真空分离的数值模拟

117

5.1	数值计算模型	117
5.1.1	控制方程	117
5.1.2	雷诺应力模型 (RSM)	118
5.1.3	蒸发模型	119
5.2	数值计算结果和分析	119
5.2.1	计算模型和边界条件	119
5.2.2	数值计算结果与分析	120
5.3	小结	125

第6章 油水真空分离实验 127

6.1	实验仪器及方案	127
6.2	实验结果分析	130
6.2.1	不通入气体时各个因素的影响规律	130
6.2.2	通入气体时脱水率的变化规律	133
6.3	实验结果综合分析	136
6.4	油水真空分离机理	136
6.5	小结	137

第7章 油水真空分离的影响因素 138

7.1	真空压力对油水分离的影响	138
7.2	温度对油水分离的影响	142
7.3	含水率对油水真空分离的影响	145
7.4	运行时间对油水分离的影响	149
7.5	气体速率对油水分离的影响	152
7.6	小结	156

第8章 油水真空分离的知识发现模型 157

8.1	含水油液的谐振信号	157
8.2	HHT 包络谱分析	158
8.3	实验材料与方法	160
8.4	油中水分含量的 HHT 包络谱分析	161
8.4.1	含水率为 0.10% 的油液的 HHT 包络谱	161
8.4.2	含水率与油液 HHT 包络谱关系	163
8.5	最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 知识发现模型	164
8.5.1	实验数据处理	165
8.5.2	连续投影算法	166
8.5.3	结果与分析	167
8.6	LS-SVM 模型的建立及其预测	168
8.7	小结	170

第9章 油水真空分离的决策系统 172

9.1	T-S 模糊辨识原理	172
-----	------------	-----

9.1.1	基于 C 均值模糊聚类的 T-S 模型前件辨识方法	173
9.1.2	基于最小二乘法辨识 T-S 模型后件参数	173
9.2	油水真空分离实验材料与方法	174
9.2.1	实验数据的采集与处理	174
9.2.2	实验方法	174
9.3	真空脱水辨识模型	175
9.3.1	输入变量的选择	175
9.3.2	T-S 辨识模型的建立	175
9.3.3	辨识模型的检测	176
9.4	工艺参数的影响分析和优化	177
9.5	小结	180

1.1 油水分离的研究背景和意义

石油作为一种基础能源产品,随着石油开采技术的进步和经济的持续发展,润滑油的生产规模和消耗量呈现出直线式增长趋势,以电力绝缘油、汽轮机油、发动机油、液压油为典型代表的润滑油在电力、汽车、钢铁、船舶、机床等相关的行业中都有着广泛的应用。国际能源署(International Energy Agency, IEA)发布的《世界能源展望 2014》(World Energy Outlook 2014)报告明确指出,全球原油需求量将从 2013 年的 9000 万桶/d 提高到 2040 年的 10400 万桶/d。主要推动因素包括汽车行业的不断发展导致的国际市场对运输燃料的需求量增加,发展中国家的石油化工产业的发展等。其中我国将超过美国成为全球最大的石油消费国。据中国国家统计局披露的数据显示,2010 年我国润滑油表观消费量达到了 1081.3 万吨(我国润滑油市场的产量为 856.9 万吨,进口量为 245 万吨,出口为 20.6 万吨),同比增长 13.1%。而与全球润滑油市场 4000 万吨的总需求量相比,占约 1/4 份额。2011 年我国润滑油消费量增长到 710 万吨,年均增速为 6.32%,是全球市场为数不多的一直保持增长的市场之一。2012 年受全球经济下滑的影响,国内润滑油需求下降。2013 年我国润滑油市场需求量约为 750 万吨,2014 年为 760 万吨,实际消费量较上年基本持平。我国润滑油市场在未来 5 年中仍将以每年 5%左右的速度增长。

(1) 润滑油的组成 润滑油主要分为基础油和添加剂两部分。1995 年修订的中国润滑油基础油标准,将基础油主要分为矿物基础油、合成基础油、生物基础油、低凝和深度精制油几类。矿物基础油应用广泛,其用量占润滑油总用量的 97%以上,因此润滑油常指石油润滑油,主要用于减少运动部件表面间的摩擦,同时对机器设备具有冷却、密封、防腐、防锈、绝缘、功率传送、清洗杂质等作用。主要来自原油蒸馏装置的润滑油馏分和渣油馏分为原料,经过常减压蒸馏、溶剂脱沥青、溶剂精制、溶剂脱蜡、加氢精制等工艺而成的矿物油基础油为主要成分,其化学成分包括高沸点、高分子量烃类和非烃类混合物。一般由烷烃(直链、支链、多支链)、环烷烃(单环、双环、多环)、芳烃(单环芳烃、多环芳烃)、环烷

基芳烃以及含氧、含氮、含硫有机化合物和胶质、沥青质等非烃类化合物组成，基础油是润滑油的主要成分，对润滑油的基本理化性质起决定作用。

润滑油中的添加剂由一种或几种化合物组成，用以弥补和改善基础油的某种特性，赋予基础油某些优异的性能，是润滑油的重要组成部分。如低碱值合成烷基苯磺酸钙、高碱值线型烷基苯合成磺酸钙等吸附氧化产物，将其分散在基础油中具有抗氧化、抗腐蚀特性的清净分散剂；硫磷丁辛伯烷基锌盐加入油中形成抗氧抗腐剂，来提高油品氧化安定性，与金属接触生成保护膜具有抗磨性；有机高分子化合物的增黏剂，不仅可以增加油品的黏度，并可改善油品的黏温性能等。

在润滑油生产制造、储存运输及实际的应用过程中，各种复杂的环境条件对油液有着不同程度的污染。润滑油污染不仅影响润滑系统的工作性能和元器件的使用寿命，而且直接关系到润滑系统能否正常工作。日本对液压设备的故障调查研究表明，因润滑油污染而造成的系统故障达 80%，而机械故障与电气故障只占 20%。美国流体协会的调查结果也进一步证实，润滑系统的故障至少有 75% 是由工作介质（润滑油）的污染而造成的。

润滑油污染是指油中污染物的浓度、大小、硬度超量超标，可根据污染物形态分为固体、液体和气体三种形式。其中液体污染主要是指水分、清洗液、化学溶剂、表面活性物以及其他不同种类的润滑油等。在实际工程应用中通过各种途径侵入油液中的水分是一种常见但不可忽视的污染源。有资料表明，当润滑油中混入的水分超过 0.05% 时，随着润滑油流动，在水分、胶质、能量作用下极易形成乳化液，就会浑浊，润滑油就会转变为乳化油。而在油水分离方面的研究，远不如油中固体颗粒污染的研究开展得深入和广泛，主要是由于以下原因。

① 油中水分污染的危害作用周期较长 当油液中水分含量较低时，对润滑系统造成的突发事故不显著，其危害作用周期相对固体颗粒污染物来讲较长，不易发现，使污染得不到及时处理。如由于水分污染引起油液理化性能的劣化导致系统元器件的磨损（或化学腐蚀比固体颗粒污染对系统的影响并不逊色）。固体颗粒污染严重的润滑油基本上可以通过多级精密梯度过滤得以净化处理，而水分污染引起的油的劣化变质，不仅降低其润滑性能，且加剧元器件的磨损，造成系统出现油液泄漏、功能丧失等问题。另外，水分还会与润滑油中的某些添加剂作用产生沉淀和胶质等污染物，加速油的恶化，最终导致润滑系统动作失灵、堵塞等一系列故障。

② 油水分离方法不够成熟 相对来讲，固体颗粒污染的分离处理即固-液分离技术比较成熟，而油水分离属液-液分离技术，存在油水两相的密度差较小，以及黏度、油水界面张力等物理参数的影响较为复杂等问题，因此在油水分离技术处理方法中采用成熟的离心分离、旋流分离等难度较大，且方法的选择性较强。

③ 润滑油的化学成分构成复杂 由于矿物润滑油均是以石蜡基油或环烷基油作为基础油进一步精制、添加不同种类的添加剂生产而成的，其理化性能的优劣及是否发生变化往往可通过相应的理化性能指标（击穿电压、介质损耗因数、电阻率、凝点、倾点、运动黏度、表面张力、氧化安定性、闪点、密度等）的变化程度

来进行定量分析判断。润滑油的理化性能与润滑油馏分的组成密切相关，最主要的性能是黏度、氧化安定性和润滑性，其中黏度是反映润滑油流动性的重要质量指标；氧化安定性表示油品在使用环境中，在温度、空气中氧以及金属催化作用下所表现出的抗氧化能力；润滑性表示润滑油的减磨性能。而油水混合液的理化性能的变化规律研究较为鲜见，因而油水分离方法的选择就出现一定的难度。

以上原因极大地限制了油水分离的理论研究和实用技术的开发。

(2) 润滑油中水分的危害 油液中水分的来源途径主要是外界的水分（蒸汽）浸入而来的，这里的外界水分一部分指空气中的水分（蒸汽）与润滑油中溶解的水分由于润滑油运行的环境条件的变化而发生的相互转化的动态平衡；另一部分是指润滑油在运行之前由于运输、储存等环节中出现的水分混入现象。

不管哪种途径使水分混入油中，则油中水分的存在状态主要有以下3种。

① 溶解态 润滑油主要由烃类分子组成，有很低的偶极矩，极性比水弱，水分具有很强的极性，水与烃类分子之间的吸引力仅靠诱导力和分散力，能在一定限度内缔合。润滑油中若存在芳香烃和不饱和烃，则它们的分子会与水分子进行缔合，但是溶解在烃内的水分并不离解为离子，而是处于单个分子状态。

水在油中的溶解度另外还受外部因素（如环境温度、湿度以及压力等）影响，油中水的溶解度与这些影响参数大致呈递增变化趋势。因而工业上为了增加油中水分的溶解度，常常采用加入表面活性剂的方法，表面活性剂带有极性和非极性基团，可作为水与烃类分子的中间物质，促使两者在一定程度上相溶，从而使溶解于油中的水分与油一起为均匀的单相物质。

② 游离态（自由态） 水分在润滑油中呈自由分散状态，不与润滑油中的烃类分子进行缔合，呈现出明显的两相界面。游离态的水分液滴直径大小不一，其存在状态很不稳定，在各种场力的作用下，表现为悬浮、互相缔合或逐渐沉降等状态。

因而在油水分离领域，游离态的水分对于控制油液污染具有较彻底的脱除效果，油中水分的其他状态的污染处理的最终阶段都会归结于游离态。

③ 乳化态 当游离水珠被乳化膜包围时，在水分、温度、能量作用下就形成了乳化水，乳化水会相对稳定地存在。通常将乳化液分为两种类型：一类是水为连续相，油为分散相，称为水包油（O/W）型乳化液；另一类是油为连续相，水为分散相，称油包水（W/O）型乳化液。用油系统中的乳化液类型为 W/O 型乳化液，如图 1.1 所示。

油中水分的危害作用日益引起重视。我国从 20 世纪 80 年代初在各工业部门逐步推行油液污染控制技术和措施，在油液污染控制方面取得了一定成效。但是与美国、加拿大、德国、英国、法国、日本等西方发达国家相比，还有相当大的差距。为缩小与西方发达国家的差距，必须注重润滑系统水分污染控制方法的研究，以及重点支持相关的高新技术研究，全方位、多角度、有针对性地落实控制润滑系统污染的有效措施，特别是加强油水分离方法及技术的应用基础研究，为润滑系统的可靠运行提供保障。

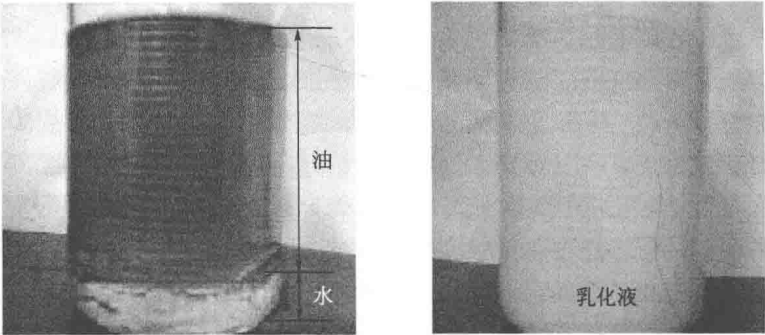


图 1.1 W/O 型乳化液

a. 油中水分会影响油液和系统设备的安全运行。例如，大型液压系统中水分的存在会导致水滴对机械系统的高速撞击形成水蚀进而严重影响设备寿命；在变压器中起冷却绝缘、消除电弧作用的变压器油则会因为水分的污染导致油液绝缘性能显著降低而影响其运行和操作安全性。前苏联空军某机型用航空液压油 75% 的油中含水量为 $300\sim 500\mu\text{L/L}$ ，2% 的油中水分超过 $700\mu\text{L/L}$ 。根据美国联合航空公司对空运货物地面支持设备进行的调研情况（见表 1.1、表 1.2），表 1.1 表明这些设备用油中的水分污染是十分严重的，表 1.2 说明油中水分对油液的污染在很大程度上影响了轴承部件的使用寿命。

表 1.1 初始油液中的水含量及其推荐值范围		
装置的名称	含水量/ $(\mu\text{L/L})$	推荐值/ $(\mu\text{L/L})$
飞机过桥装置	1000	200~400
集装箱回转装置	8000	
运动式装货机	2000	

表 1.2 含水量对轴承疲劳寿命的影响		
油液	含水量/ $(\mu\text{L/L})$	寿命比
SAE20	25	4.98
SAE20	100	1.92
SAE20	400	1.00

b. 水分会引起油液的理化性质发生不同程度的变化。油液性能的变化意味着在其使用过程中对机械设备本身和设备的运行状态会产生不同程度的影响，与此同时也影响到油液的使用寿命，使其在使用过程中更容易发生一系列水解反应和氧化反应而发生老化变质，使得设备不得不提前更换相应的润滑油液，进而加剧了废旧油液的产生量。由此造成了巨大的资源浪费，据统计我国润滑油实际消费量的 20% 左右的废润滑油是由于水分污染引起的，给国民经济中石化资源的高效合理利用带来了很大的压力，不利于当前我国资源环境的可持续发展。

因此，从实验测试、理论分析和建模研究等方面研究水分对润滑油的性能变化的影响规律和影响机理，并通过建立油水真空分离过程中油、水两相动力学模型，探讨油水两相的流动形态特征及其影响因素；重点研究油水分离过程中油水两相运动特征提取、知识发现、真空分离机理、优化决策等问题，构建科学合理的真空作用下的高效真空油水分离和优化决策系统的理论框架，开发新型绿色环保型的油水分离方法减小对相应设备的损害，并提高油液循环使用寿命，实现资源的循环高效

利用,符合我国当前低碳经济、循环经济、绿色工艺以及环境污染治理和保护等的发展要求。

1.2 油水分离的国内外研究现状

1.2.1 油液理化性能

油液中的水分有 3 种存在状态,在不同的温度、压力条件下 3 种状态的水分可以相互转化。油液受到水分污染后,其一系列理化性能将发生变化,且影响程度在不同的性能指标上均有体现。目前,国内外已有诸多专家学者针对油液中水分含量对油液性能的影响规律开展了深入研究,并取得了丰富的理论和实验研究成果。

Harika 等对含水量在 0~10% 的无添加剂油水混合物的实验研究表明,含水量在 0.1% 以下时对油液的黏度增加有微量的影响作用,当油中含水量超过 0.2% 时油液黏度随着含水量的增加而呈现较明显的增大,并导出了油液黏度与温度和含水量的变化关系模型。Mariana 等通过图像分析检测实验在绝缘油表面张力检测研究中发现未经使用的绝缘油的表面张力值通常较大,但随着使用过程中油液老化作用的增加,有机酸性物质、参与链反应的一系列添加剂物质、热氧化产物等极性物质的累积会使油液的表面张力明显减小,这一过程中水分通常会作为中间体参与到链反应中,其对油液表面张力的影响作用需要进一步通过实验进行探究。宫伟军等对含水量在 0.05%~0.25% 的船用润滑油的一系列性能指标进行了实验研究,其研究表明随着含水量的增加,油液的扩散性、抗凝胶实验、DSC 氧化、强化氧化和酸中和速度会相应地变差,其实验结果如表 1.3 所列。

表 1.3 DCA5040 船用气缸油不同含水量性能

实验指标		实验组别					
		S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
DCA5040/%		100	99.95	99.90	99.85	99.80	99.75
水(m/m)/%		0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
L-1 成焦板试验,焦重/mg		31.9	23.7	23.9	22.5	27.1	17.9
强化氧化总评分/分		116.4	103.0	131.2	124.7	109.4	100.2
酸中和速度/s		262	520	266	312	296	256
凝胶试验	沉淀/mL	2.2	2.8	2.8	1.8	1.8	2.2
	凝胶/mL	无	无	无	无	无	无
扩散性试验	250℃×0.5'/mm ²	554	698	507	488	571	579
	250℃×1'/mm ²	687	799	583	582	674	693
抗磨性试验	D/mm	0.33	0.34	0.32	0.33	0.34	0.34
	P _B /N	784	980	833	784	931	686
DSC 氧化	诱导期/min	12.9	12.4	12.6	12.7	12.6	12.3
	最高分解温度/℃	249.8	241.8	244.3	244.9	243.8	239.6

水对运行中润滑油的酸化速率也有一定的影响，在田亚等进行的发电厂润滑油系统水对油酸化的影响实验中表明，在润滑油中含有铁屑等金属的条件下，含水的润滑油在使用过程中酸值增大速度非常明显，结果如表 1.4 所示。

表 1.4 水对油酸化影响

序号	金属	水	时间/h	酸值变化/(mg KOH/g)
1	无	无	3500	0
2	无	有	3500	+0.73
3	Fe	无	3500	+0.48
4	Fe	有	400	+7.93

水分对变压器油性能的影响主要体现在油液的电气绝缘性能上，如介电强度、击穿电压、体积电阻率、介质损耗因数等。变压器油有水分存在将导致油纸绝缘性能降低和绝缘老化加速，而且水分受热后会转化为气泡，极易导致局部放电的产生。Ismail 等对精炼漂白脱臭棕榈油（RBDPO）和 Hyrax 矿物绝缘油用做变压器油时水分的影响作用进行了一系列的实验研究，其结果表明随着油液中水分含量的增加，油液的击穿电压值呈现减小的趋势（如图 1.2 所示），介质损耗因数呈现增大的趋势（如图 1.3 所示）。

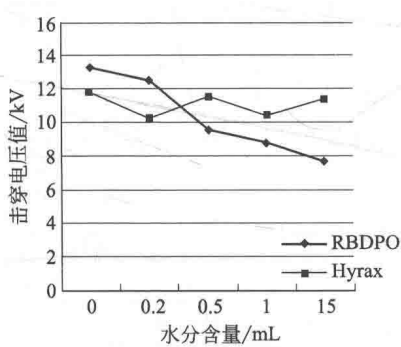


图 1.2 不同水含量的 RBDPO 和 Hyrax 绝缘油击穿电压测试

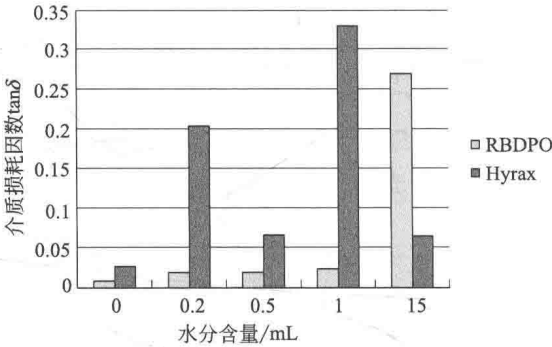


图 1.3 不同水含量的 RBDPO 和 Hyrax 绝缘油介质损耗因数测试

刘玉仙等研究表明变压器油中水分质量分数每增长一倍，油液的绝缘寿命将会减半；赵艳丽等研究表明水分的存在会严重影响变压器油的击穿电压值，当油中含水量仅为每升几十微升时，其耐压值就已下降至较低水平，油中的含水量为 30 μ L/L 时，击穿电压为 40kV 左右，而油中含水量为 50 μ L/L 时击穿电压只有 20kV 左右。

1.2.2 油中水分检测方法

目前对油中水分含量的检测主要分为离线检测和在线监测两大类。因此对油液中水分含量检测的研究可分为通过对油水实验样品进行实验室检测的离线型方法研

究和对实验室油水实验样品进行现场取样即时测量得到结果的在线监测方法研究。

(1) 油中水分的离线检测方法 国内外常用的离线检测方法有卡尔·费休滴定法(库仑法)、蒸馏法、气相色谱法、红外光谱法等,这几种方法有其各自的优缺点。卡尔·费休滴定法的测量结果可达到 $10\mu\text{L/L}$ 以下,但是测定试剂费用相对昂贵;蒸馏法测量下限为 $300\mu\text{L/L}$ 不够精确;色谱法仪器要达到稳定的时间较长,标样的重复性相对较差。而红外光谱法是近年来十分热门的一种定量测定方法,其检测原理是:当红外光通过被测物质时,一定频率的红外光被吸收,吸收强度与被测物质的浓度有关,其定量关系符合朗伯-比尔定律:

$$A = \frac{I_0}{I_1} abc \quad (1.1)$$

式中, A 为吸光度; I_0 为入射光强度; I_1 为透过射光强度; a 为吸光系数; b 为被测介质厚度; c 为水分含量。

可见吸光度 A 与水分含量 c 成正比,因此通过对油液中液体水分子在其红外特征波数处吸光度值的测量并建立相应的化学计量学模型即可求得含水量。这种检测油中水分的方法可在不破坏被检测油液物相的条件下实现快速准确的检测。例如,韩晓等采用遗传算法结合神经网络用于 FTIR 检测航空润滑油中水分含量相关研究表明,对不同含水量油液通过进行傅里叶红外光谱数据预处理,神经网络模型参数优化选择,运用遗传算法提取最优波数点信息,经过反复优化确立了最佳的 GA-BP-ANN 红外光谱定量分析模型。其模型预测精度与卡尔·费休法测定结果相比有很好的精确度,对比结果如表 1.5 所列。

表 1.5 GA-BP-ANN 模型预测航空润滑油中水分含量结果 单位: %

样号	卡尔·费休法测定值	模型预测值	偏差
1	0.0847	0.0853	0.0006
2	0.0802	0.0883	0.0081
3	0.0902	0.1018	0.0106
4	0.1303	0.1387	0.0084
5	0.1092	0.1052	-0.0040
6	0.1501	0.1478	-0.0023

Van. De. Voort 等采用傅里叶变换红外光谱方法对 58 个不同含水量的油水实验样品进行检测(其中 23 个样品为军用车辆废旧润滑油,35 个样品为筛选油水实验样品),其检测结果与卡尔·费休法相比,如图 1.4 所示。

离线检测是“在线抽样,离线测量”的方式,具有准确度和灵敏度高、方法成熟、应用广泛的优点,其缺点在于不具有实时性、连续性、同步性,不能同步反映油液中水分的含量,需要定期地抽取油水实验样品,分析费时,且在油水实验样品的采集储存过程可能发生变化。为了克服离线检测的缺点,国内外针对润滑油在线监测技术开展了许多研究。在线监测可在机械设备正常运转过程中,对机械设备中的油液进行实时、连续的监测并及时动态地获取被监测油液对象的运行

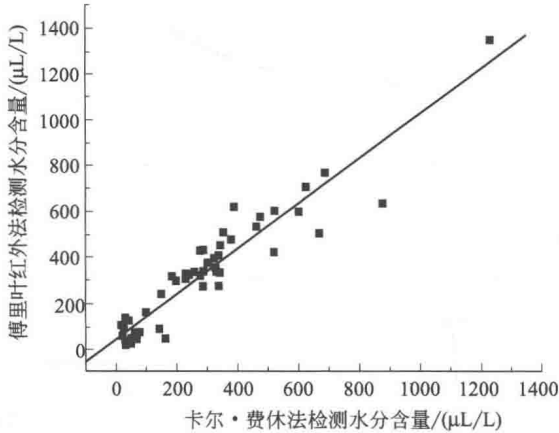


图 1.4 油水实验样品傅里叶红外法水分预测与卡尔·费休法检测结果的回归分析

状态等信息。

(2) 油中水分的在线监测方法 国内外常用的润滑油中水分含量在线监测的机理主要有光谱射线法、微波衰减法、电容法等。光谱射线法是利用润滑油和水对某一特定的光谱射线的吸收、反射、折射能力不同，由此计算出润滑油含水量；微波法原理是微波可以被物质吸收，而水对微波的吸收最为显著，润滑油和水对微波的吸收比可达 1 : 75，因此采用微波水分传感器，将由水分引起的微波衰减量转化为电流信号输出，建立输出电流与含水量之间的关系来得到含水量；电容法将油液及其中的污染物作为一个特别构造的电容器电介质，水分等存在及数量的变化引起介电常数变化，从而改变这个电容器的电容量，传感器通过对电容量变化大小的检测实现对油液中水分的状态监测。其中对光谱射线相关水分传感器和电容式湿度传感器方面的研究最为丰富。S. Laskar 等采用光纤传感器结合神经网络对变压器油中水分含量在线监测进行研究，利用以油水混合液为光谱传导介质时，不同水分含量油液的折射率不同，光束穿过光纤弯曲部分时，会发生相应的变化，在光纤的输出端借助检测器分析输出光和输入光的差别，结合校正过的人工神经网络模型判别分析即可实现油液中水分的在线监测，其在不同的油液温度条件下所做的水分试验检测结果如表 1.6 所列。

表 1.6 不同含水量和温度的变压器油水实验样品折射率测定

温度/℃	温度 (以折射率换算数值表示)	折射率/%				
		0%	0.2%	0.8%	2%	3%
50	102	204	312	356	425	438
45	92	141	283	270	368	347
40	81	125	180	194	235	261
35	71	82	128	137	165	188
30	61	60	88	95	104	115