国家质检公益行业科研专项项目（201510067-03）资助

有机热载体运动粘度检测装置及其检测方法研究

彭小兰 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

国家质检公益行业科研专项项目（　　-　）资助

有机热载体运动粘度检测装置及其检测方法研究

彭小兰　著
殷先华　宋　韬　吴丹红　主审

机 械 工 业 出 版 社

本书为著者针对目前国内重油检测自动化仪器的空白，总结了折管式快速运动粘度仪测量方法的研究成果，从而彻底解决了重油（特别是大粘度重油渣油）运动粘度的测量难题。

本书共分为6章，主要介绍有机热载体介质及其运动粘度、有机热载体运动粘度检测方法、有机热载体运动粘度检测装置、有机热载体运动粘度快速测定法（折管法）、运动粘度测试报告及著者近年有机热载体炉相关的学术论文汇编。

本书可供电厂、钢厂及润滑油的生产、测控的检测人员和安全管理人员参考，也可供高校研究有机化学的在校学生及实验管理人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

有机热载体运动粘度检测装置及其检测方法研究/彭小兰著. —北京：机械工业出版社，2016.12

ISBN 978-7-111-54617-7

Ⅰ.①有… Ⅱ.①彭… Ⅲ.①有机热载体炉－运动粘性－检测 Ⅳ.①TK175

中国版本图书馆CIP数据核字（2016）第198089号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：沈 红 责任编辑：沈 红

责任校对：肖 琳 封面设计：陈 沛

责任印制：李 洋

北京新华印刷有限公司印刷

2016年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.5印张·175千字

标准书号：ISBN 978-7-111-54617-7

定价：59.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务 网络服务

服务咨询热线：010-88361066 机 工 官 网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294 机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

010-88379203 金 书 网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版 教育服务网：www.cmpedu.com

前　言

目前，有机热载体运动粘度检测已经有两个很成熟的方法，但是这两种方法均有一定的局限性。随着科技的进步，已经有越来越自动的、方便的、快捷的仪器设备能够更好地进行运动粘度㊀的检测。折管检测方法在国内尚未有统一的检测规范；在国外，美国标准化委员会颁布了一种运动粘度测量的新方法（ASTM D7279《自动折管式粘度仪测量透明和不透明液体运动粘度的标准测试方法》），依据这种测试方法能快速自动测量运动粘度，而此种检测方法在国内尚是一个空白。

随着经济的发展，国家对环保节能尤为重视。检测方法的自动化程度越高，检测速度越快，越能大大地节约时间、减少劳动力，减少检测有机废液的排放。基于标准和检测技术之间存在的滞后性，我们推出了一种全新的检测方法。

书中研究内容为国家级项目——国家质检公益性行业科研专项项目（201510067-03）“便携式炉管泄漏检测技术和方法的开发应用”的主要内容，主要基于湖南省数台有机热载体炉事故。

折管式快速运动粘度仪测量准确度高，测量重复性好，测量时间短、使用方便，容易清洗，完全满足 GB/T 265—1988 和 GB/T 11137—1989 对样品测量重复性的要求，具有很广阔的市场前景，特别适合于电厂、钢厂及润滑油生产企业等小粘度油品的生产、测控使用。

该方法的研究填补了国内重油检测自动化仪器的空白，彻底解决了重油（特别是大粘度重油渣油）运动粘度的测量难题。

著　者

2016. 8

㊀ 本书由于行业使用的延续性和约定俗成，以及前期已发表论文等文献均用“粘度”，所以本书为避免使用混乱和不一致，仍统一使用“粘度”。

目　录

前言

第 1 章　有机热载体介质及其运动粘度 …… 1

1.1　研究背景 …… 1
1.2　研究内容 …… 4
1.3　有机热载体及运动粘度 …… 5
1.3.1　有机热载体 …… 5
1.3.2　有机热载体运动粘度 …… 7
1.4　运动粘度的影响因素及其积炭 …… 8
1.4.1　温度因素 …… 9
1.4.2　液体密度、相对分子质量及分子结构因素 …… 9
1.4.3　高温裂解及积炭 …… 10
1.4.4　锅炉运行中有机热载体运动粘度的变化 …… 10
1.5　案例分析 …… 11

第 2 章　有机热载体运动粘度检测方法 …… 12

2.1　石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法 …… 13
2.1.1　方法 …… 14
2.1.2　仪器和试剂 …… 14
2.1.3　准备工作 …… 14
2.1.4　试验步骤 …… 14
2.1.5　数据计算 …… 15
2.1.6　精密度 …… 16
2.2　深色石油产品运动粘度测定法（逆流法）
和动力粘度计算法 …… 16

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.2.1 方法 …… 16
2.2.2 仪器和试剂 …… 16
2.2.3 准备工作 …… 16
2.2.4 操作步骤 …… 17
2.2.5 精密度 …… 18
2.3 自动折管式粘度仪测量透明和不透明液体运动粘度测试方法 …… 18
2.3.1 方法 …… 18
2.3.2 仪器 …… 18
2.3.3 试剂与材料 …… 20
2.3.4 仪器准备 …… 20
2.3.5 测定过程 …… 20
2.3.6 精密度 …… 20
2.4 直管式全自动粘度仪测定法 …… 21
2.4.1 方法 …… 21
2.4.2 仪器 …… 22
2.4.3 测定过程 …… 23
2.4.4 结果计算 …… 23
2.4.5 精密度 …… 24
2.5 测量方法比较 …… 25
第 3 章 有机热载体运动粘度检测装置 …… 27
3.1 结构 …… 28
3.2 原理 …… 29
3.2.1 仪器的流体示意图 …… 30
3.2.2 硬件结构 …… 30
3.3 性能 …… 31
3.3.1 控温精度和计时精度 …… 31
3.3.2 准确度 …… 31
3.3.3 精密度 …… 32
3.4 相关性能试验 …… 32
3.4.1 样品量对测量结果的重复性影响 …… 32
3.4.2 误差及重复性试验结果及分析 …… 33
3.4.3 恒温过程对测量结果的影响 …… 34
3.5 实验室间分析比对报告 …… 35

第 4 章 有机热载体运动粘度快速测定法（折管法） …… 37

4.1 检测背景 …… 37
4.2 检测方法 …… 37
4.3 检测步骤 …… 39
4.4 检测数据 …… 40
4.5 折管式粘度计技术条件 …… 41

第 5 章 运动粘度测试报告 …… 43

5.1 测试背景 …… 43
5.2 任务来源 …… 44
5.3 测试原则和主要内容 …… 44
5.4 测试依据 …… 46
5.5 测试实验数据分析 …… 46
5.6 测试报告 …… 48

参考文献 …… 62

第 6 章 有机热载体相关学术论文 …… 65

6.1 有机热载体炉运行风险评价方法研究 …… 66
6.2 有机热载体炉积炭层中超声导波的检测试验研究 …… 77
6.3 有机热载体炉积炭导波检测模态研究 …… 87
6.4 Research on the simulation of flow field of organic heat carrier furnace based on FLUENT …… 95
6.5 有机热载体炉事故与积炭检测技术发展 …… 102
6.6 基于超声导波的有机热载体炉积炭检测技术 …… 111
6.7 突变级数法在锅炉煤质结渣预测中的应用 …… 118
6.8 有机热载体锅炉安全法规、标准体系优化完善探讨 …… 126
6.9 鱼刺图法在有机热载体炉安全评价中的应用 …… 131
6.10 有机热载体炉积炭形成原因研究 …… 138

后记 …… 145

第 1 章

有机热载体介质及其运动粘度

1.1 研究背景

有机热载体炉的介质运动粘度检测是影响有机热载体炉安全的关键技术之一：是《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》（简称《规划纲要》）重点领域公共安全及其优先主题重大生产事故预警与救援提高早期发现与防范能力中的重点内容；同时也是《规划纲要》中开展适应特种设备安全检测监测需要的现代检测监测技术研究的重点内容。

本书研究项目依托于国家质检公益项目（201510067-03）“便携式炉管泄漏检测技术和方法的开发应用”和质检总局科技计划类项目（2015QK145）“有机热载体运动粘度检测装置及其检测方法研究”。其背景来源于湖南省两台有机热载体炉事故。事故 1：2009 年 6 月 10 日长沙望城菱格木业有机热载体炉管子积炭泄漏事故，其泄漏盘管如图 1-1 所示（见湘特鉴［2009］第 5 号事故鉴定报告[1]）；事故 2：郴州有机热载体炉事故，其事故积炭管如图1-2所示。



图 1-1 望城菱格木业有机热载体炉泄漏盘管



图 1-2 郴州有机热载体炉事故积炭管

近几年来，随着我国经济的发展，有机热载体炉的使用越来越广泛，数量也越来越多。据调查[2]，全国生产有机热载体（锅）炉的制造厂近百家，其中3/4以上均为液相炉，而液相炉事故较多，因此我们重点分析它。有机热载体炉的主要危险是火灾，若有机热载体一旦从有机热载体炉供热系统中泄漏，由于其温度很高，又接触火焰或接近火焰，就会被点燃或自燃，造成火灾。另外，有机热载体炉也会因有机热载体带水等原因而发生喷油事故。

根据《质检总局关于2012年全国特种设备安全状况的情况通报》[3]可知，2012年全国特种设备安全状况如下：截至2012年底，特种设备总台数达821.67万台，比2011年[4]上升12.7%；其中：锅炉63.53万台，压力容器271.82万台，气瓶13880.84万只，压力管道85.13万km，起重机械190.94万台，电梯245.33万台，场（厂）内专用机动车辆48.29万辆，大型游乐设施1.67万台（套），客运索道845条。各种特种设备数量分类比例如图1-3所示。

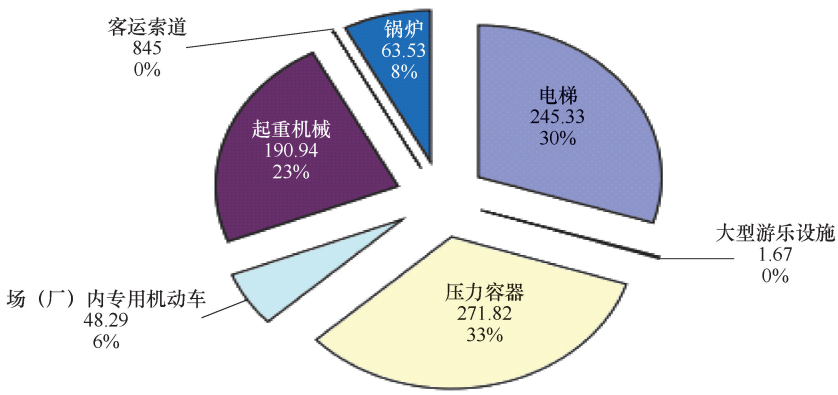


图1-3　2012年特种设备数量分类比例

2012年全国特种设备事故共计228例，死亡人数292人，受伤人数354人，与2011年相比[3,4]，事故总例数减少47例，下降17.1%；死亡人数减少8人，下降2.7%；受伤人数增加22人，上升6.6%。2012年228例事故中，29例压力锅炉事故，26例压力容器事故，8例压力管道事故，26例气瓶事故，76例起重机械事故，42例电梯事故，17例场（厂）内专用机动车辆事故，2例大型游乐设施事故，2例客运索道事故。2012年万台设备死亡率为0.517，比2011年下降13.11%，如图1-4所示。实现了国务院安委会下达的万台特种设备事故死亡率低于0.56的工作目标，事故总体呈稳中有降态势。

近5年锅炉使用安全状况如图1-5所示，2012年锅炉事故为28例，比上一年下降3.57%，锅炉事故整体也呈稳中有降态势。

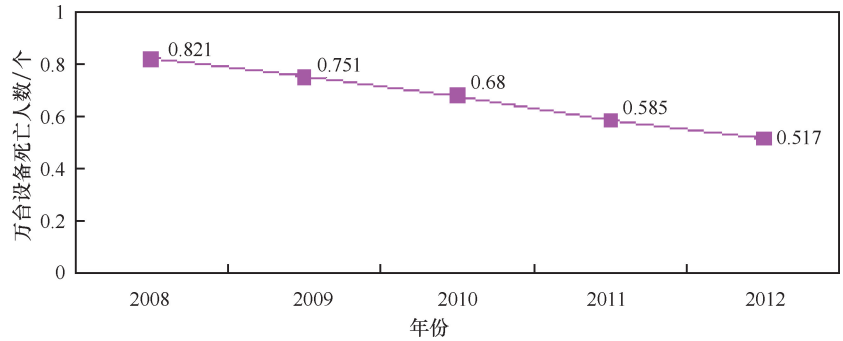


图 1-4　2008～2012 年万台设备事故死亡人数趋势

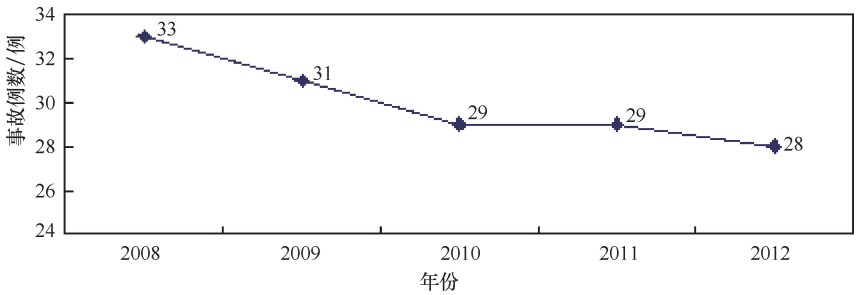


图 1-5　2008～2012 年锅炉事故例数趋势

但是对比图 1-4 和图 1-5 可知，锅炉事故死亡下降比例只有特种设备事故死亡下降比例的 27.24%，这说明锅炉事故下降不明显。分析锅炉事故的主要特征是：中小锅炉爆炸或有机热载体炉泄漏着火等比例一直居高不下。结合文献[1]中的近年来国内有机热载体炉事故案例汇总表可知：有机热载体炉事故小则数万元经济损失，大则 1～3 人死亡，1～15 人重伤。所以对有机热载体炉火灾事故原因的分析研究十分迫切。

由 2012 年统计数据[3]进一步分析事故原因可知：228 起特种设备事故中，按事故发生的阶段分类发现：事故发生在使用阶段的 179 起，占 78.5%；安装和拆除阶段的 12 起，占 5.3%；维修和检验阶段的 19 起，占 8.3%；充装和运输阶段的 14 起，占 6.1%；其他阶段 4 起，占 1.8%。由此可见，有机热载体炉在使用阶段，也就是运行时发生事故的现象较多。

统计数据[3]显示：违规操作、违章运行是事故发生的主要原因。从技术层面上来看，特种设备事故集中度最高的原因为：锅炉事故是司炉工违章操作运行或操作不当及设备本体的缺陷和安全附件失效等引起的。其中，9 起为小锅炉事故（主要为有机热载体炉积炭泄漏火灾事故），5 起为安全附件或保护装置失灵事故。

近几年来，人们发现有机热载体炉运行一段时间后，炉管内会因运动粘度过小而影响其管壁换热效率，导致受热面超温过热，严重时爆管形成火灾。统计数据及研究表明：有机热载体炉热效率降低是因为管壁有机热载体运动粘度过大，有机热载体炉发生火灾的根本原因也是如此[5,6]，有机热载体炉运动粘度检测成为特种设备检验检测机构必须认真考虑并解决的问题。因此，作为特种设备检验检测机构，积极开发有机热载体炉监控有机热载体品质的指标之一如运动粘度的检测设备和技术，是一个很值得研究的课题。

美国 20 世纪 50 年代开始采用矿物型有机热载体，70 年代加入添加剂使性能得到提高。我国于 70 年代开始研制和生产。目前，国内外生产厂家较多，品种繁多。

随着有机热载体的广泛使用，有机热载体炉也应运而生，通过图 1-4 分析可知：以有机热载体炉为首的中小锅炉事故一直高发不断。通过详细查阅国内近十年有机热载体炉火灾事故相关技术项目，火灾原因及预防措施汇总可知，有机热载体炉事故原因主要有直接原因和间接原因两种。

由于间接原因导致有机热载体超温变质或管内流速降低等从而形成运动粘度过大最终导致爆管泄漏引发火灾事故。

有机热载体炉火灾事故的原因通常不止一个，一般有多个，既有结构设计、有机热载体质量、循环泵匹配性、焊接质量等技术上的原因，又有未进行有机热载体化验、未按升温曲线操作或不懂操作知识等管理上的原因，最终导致形成运动粘度过大；而运动粘度过大如果不能及时检测出来，往往会导致火灾事故的发生。因此如何检测运动粘度，是火灾预防的关键之一。

有机热载体与常规锅炉内水工质在化学物理性质方面存在巨大的差距，有机热载体受热条件下的变化更为复杂，至今尚缺乏针对有机热载体失效过程的详细研究。虽然通过引入雷诺数，综合了粘度、管径、流速三个因素对工质过程进行了更进一步分析，但两者实际上都是对工质侧平均状况的分析。通过研发有机热载体运动粘度检测方法，对有机热载体炉定期检验中对运动粘度及流速的控制等相关标准的制定、安全监管和使用维护，提供理论基础和数据支撑。

1.2 研究内容

有机热载体即热传导液，有机热载体加热技术是伴随现代工业而产生发展的。在我国，自 20 世纪 90 年代以来，有机热载体加热技术的应用领域迅速扩展，显现出巨大的发展潜力。作为传热介质，有机热载体无论从使用性能还是安全性能都有其特殊性能要求，其中运动粘度对于有机热载体的性能要求具有重要的影响。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

本研究重点探讨了有机热载体及其运动粘度的影响，并采用试验比对的方法，开展如下几个方面的研究工作。

1）系统阐述了有机热载体炉的介质超温过热、氧化变质和化学污染三种变质情况，并重点叙述了其积炭形成与运动粘度的关系。

2）研制出一套有机热载体介质（变质介质，也即重油）运动粘度的检测装置和方法。该折管式快速运动粘度仪测量准确度高，测量重复性好，测量时间短、使用方便，容易清洗，完全满足 GB/T 265—1988 和 GB/T 11137—1989 对样品测量重复性的要求。与现有的采用乌氏粘度管加工的全自动运动粘度仪比较，体积轻便小巧，价格低廉，具有很广阔的市场前景，特别适合于有机热载体变质介质运动粘度的检测。

该运动粘度检测装置和检测方法就是借鉴国外标准，能达到以下效果：①测量速度快；②样品分析微量化；③清洗自动且耗费少；④适用透明和不透明样品。

该方法的研究将填补国内重油检测自动化仪器的空白，且彻底解决重油（特别是大粘度重油渣油）运动粘度的测量难题。

1.3 有机热载体及运动粘度

1.3.1 有机热载体

有机热载体作为传热介质，在我国起步于 20 世纪 60 年代，90 年代后迅速扩展，并仍呈快速发展趋势。与蒸汽锅炉相比，有机热载体锅炉具有低压、高温、高效的突出优点，但有机热载体存在毒性、易燃性、渗透性等特性，锅炉一旦发生事故，往往造成泄漏、爆炸、火灾等后果。

在日常运行中，有机热载体也存在高温劣化等问题，为确保锅炉安全、节能、经济、环保运行，国家加强了有机热载体及锅炉生产、使用的监管力度，相继颁布实施了 GB 23971—2009《有机热载体》、GB 24747—2009《有机热载体安全技术条件》、GB/T 17954—2007《工业锅炉经济运行》、TSG G5001—2010《锅炉水（介）质处理监督管理规则》、TSG G0001—2012《锅炉安全技术监察规程》等国家标准和特种设备安全技术规范，对有机热载体的使用质量提出了明确要求，本书探讨的运动粘度就是其中一项重要指标。

有机热载体是作为传热介质使用的有机物质的统称。有机热载体根据化学组成可分为合成型有机热载体和矿物油型有机热载体；按其产品热稳定性可分为 L-QB、L-QC、L-QD 三类 GB 23971—2009《有机热载体》。氧化安定性是指有机热载体在高温下接触空气等外来污染物而老化的程度。有机热载体发生氧

化后生成氧化降解产物和高分子缩聚产物，导致其粘度、酸值和残炭增大，并加剧进一步的劣化进程。GB 23971—2009《有机热载体》中规定了 18 项技术指标。其主要指标的意义和影响见表 1-1。

表 1-1　有机热载体物理化学性质控制指标的机理及旧油检测意义

指　　标	新油控制指标的机理	旧油检测意义
外观	精制深度的表现	在一定程度上反映了老化或分解程度
水分	减少水分可防止有机热载体介质的腐蚀、汽化和突沸等现象	—
密度	产品构成的反应，是系统的设计参数	—
粘度	可用来评价流动性和传热效率	可作为氧化、缩聚程度的判据
馏程	馏分轻重与宽窄的判据	—
残炭	反映产品精制深度	确定裂化、缩聚程度
热稳定性	在高温条件下，化学组分抵抗高温的能力	—

液体的粘度分为运动粘度和动力粘度。运动粘度是液体在重力作用下流动时内摩擦力的量度；动力粘度是液体在剪切应力作用下流动时内摩擦力的量度。两者存在以下关系：液体的运动粘度之值为相同温度下液体的动力粘度与其密度之比。粘度反映液体的运动阻力，决定了在一定温度下液体的流动性和泵送性，在满足热稳定性要求的前提下，有机热载体应具有良好低温流动性，GB 24747—2009《有机热载体安全技术条件》对此作了明确要求（见表 1-2）。

表 1-2　有机热载体运动粘度指标要求

项　　目		允许使用质量指标	安全警告质量指标	停止使用质量指标
运动粘度（40℃）/（mm^2/s）	L-QB、L-QC 类	<40	40～50	>50
	L-QD 类	<40	40～60	>60

过热超温，氧化及化学污染给有机热载体带来的品质变化基本上都是不可恢复的变化，由此造成的有机热载体组分发生的是不可逆的化学反应，如图 1-6 所示。

综上所述，有机热载体介质的过热超温、氧化和化学污染虽然是不可避免的，但又是可以预防的。预防的关键在于科学的设计系统和锅炉，合理的选择有机热载体和工艺操作参数，正确地进行设备和系统操作运行，定期的检测有机热载体运动粘度变化和及时的解决系统中存在的缺陷问题[5]。

有机热载体在系统中积炭，有机热载体变质是一个复杂过程，涉及有机物

聚合、裂解。大组分有机热载体是混合物，这种变质更为复杂。在这些化学反应中，其主要反应产物路线即有机热载体裂解脱氢示意图如图 1-7 所示。

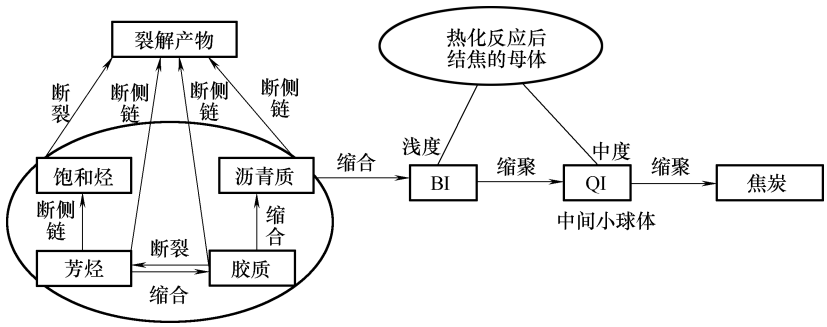


图 1-6　有机热载体不可逆化学反应示意图

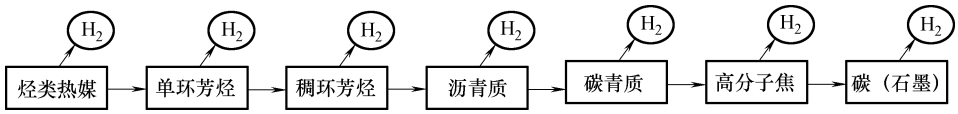


图 1-7　有机热载体裂解脱氢示意图

从以上有机热载体裂解脱氢示意图可以分析：顺着介质的裂解脱氢，介质的相对分子质量增大很快，如一般胶质在 650 ~ 900，而沥青在 800 ~ 30000。众所周知，大分子物质在有机热载体中是不溶的，并且会从介质中分离出来。而分离出来的物质又是黏糊的，增大运动粘度，在运行循环传热过程起诱导因子作用，导致进一步恶化。

1.3.2　有机热载体运动粘度

运动粘度为液体在重力作用下流动时内摩擦力的量度，其值为相同温度下液体的动力粘度与其浓度之比。在国际单位制（SI）中，运动粘度的单位以 m^2/s表示，通常使用的单位为 mm^2/s。

动力粘度为液体在剪切应力作用下流动时内摩擦力的量度，其值为所加于流动液体的剪切应力和剪切速率之比。在国际单位制（SI）中，动力粘度的单位以 Pa · s 表示，通常使用的单位为 mPa · s。

粘度是液体的内摩擦力。润滑油受到外力作用而发生相对移动时，油分子之间产生的阻力使润滑油无法进行顺利流动，其阻力大小称为粘度。粘度是使发动机保持正常运转的最重要因素，粘度大，机油流动速度慢，在摩擦面之间形成的油膜较厚，设备在起动时则零部件因暂时缺油而造成磨损；在发动机较大负荷的情况下（特别是超重载运输车辆的发动机），润滑效果比较好，但粘度

大时润滑油的冷却和冲洗作用较差。反之，粘度较小，润滑油的流动性较好，容易流到较小间隙的摩擦表面之间，可保证润滑、冷却等效果；如果发动机工况较差而选用机油的粘度又过小（即选用不当），在较大负荷下就会引起润滑不足而加速机件的磨损。

在流体中取两面积各为 $1cm^2$，相距 1cm，相对运动速度为 1cm/s 时所产生的阻力称为动力粘度。以 CCS 测定仪来测量，在国际单位制中，动力粘度单位是 mPa·s。流体的动力粘度与同温度下该流体的密度的比值称运动粘度，国际单位为 mm^2/s。

运动粘度和动力粘度是评定润滑油粘度的两项指标。动力粘度越小，润滑油低温流动性越好；反之，动力粘度越大，润滑油低温流动性越差。而运动粘度越小，润滑油粘度越低；运动粘度越大，高温粘度保持越好，润滑油粘度越大。

有机热载体运动粘度按照 GB 24747—2009《有机热载体安全技术条件》规定，测定 40℃条件下，有机热载体的稀稠度和流动性能，单位为 mm^2/s。当有机热载体使用温度高及长时间使用时，有机热载体内部基团发生裂解或聚合，裂解会使粘度下降，而聚合和氧化使粘度上升。粘度的变化会引起液体在管道中的流动性能变差，造成边界层过热，形成残炭沉积管壁，影响传热。GB 24747—2009 规定，L-QB、L-QC 型有机热载体超过 $50mm^2/s$，L-QD 型有机热载体超过 $60mm^2/s$ 时停止使用。

造成导热油变质的原因如下：导热油超过其规定的最高使用温度便会局部过热，产生热分解和缩聚，析出碳；闪点下降，颜色变深，粘度增大；残碳含量升高，传热效率下降，结焦老化。导热油与空气中的氧气接触发生氧化反应，生成有机酸并缩聚成胶泥，使粘度增加，不仅降低介质的使用寿命，而且造成系统酸性腐蚀，影响安全运行。导热油的氧化速度与温度有关，在 70℃以下，氧化不明显；超过 100℃时，随着温度的升高，导热油氧化速度加快，并迅速失效。导热油使用多年后，由于受热分解、碳聚合形成炉管结焦，使管内径缩小而造成导热油流量降低，循环泵克服的阻力增大，严重时会导致堵塞炉管；另一方面生成的大分子缩合物使导热油的粘度增高，炉管结焦，热阻增大会导致炉管寿命降低。

1.4 运动粘度的影响因素及其积炭

有机热载体炉介质的选择应根据有机热载体介质的物理化学性质，运动粘度反映有机热载体的运动阻力。在一定温度下，有机热载体的流动性和泵送性也取决于介质的运动粘度。标准规定：运动粘度需要报告 0℃、40℃、100℃时的粘度值，供用户考察该产品在不同温度条件下的流动性和传热性。

1.4.1 温度因素

液体粘度随温度升高而减小，在低于正常沸点下有机热载体粘度的对数值与温度的倒数近似呈线性关系。因此可用下列关联式计算：$\ln\eta/(\rho M) = A + BT$，其中 A、B 为各基团贡献值，无量纲；当温度高于沸点，则用 Vogel 式比较好，即 $\ln\eta = A + BT + C$，其中 $C = 187 - 0.19T_b$，T_b 为液体的沸点，T 为液体的热力学温度。有机热载体运动粘度与温度之间的关系图如图 1-8[20] 所示。

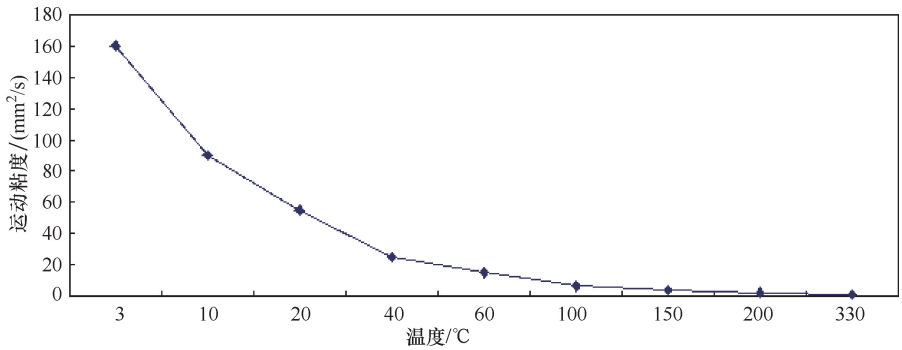


图 1-8　有机热载体运动粘度与温度之间的关系

图 1-9 反映的是根据三种常见的有机热载体炉用的介质产品进行的使用温度与变质率的关系。从图 1-9 可以看出，有机热载体超过一定的温度极限则相应的有机热载体热分解速度成倍的增长。

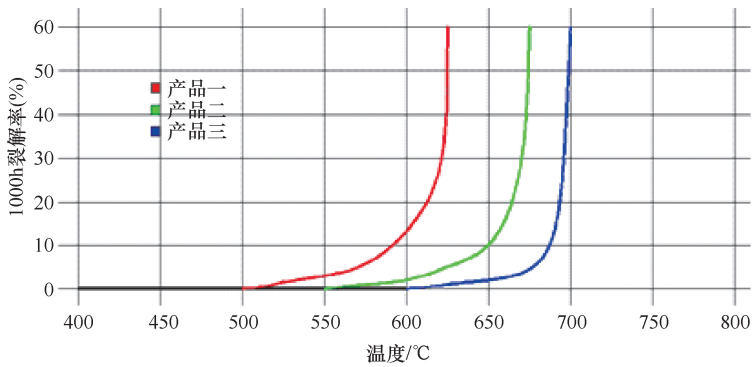


图 1-9　有机热载体使用温度与其变质率之间的关系

1.4.2 液体密度、相对分子质量及分子结构因素

粘度与液体密度、相对分子质量及分子结构有关。低温下液体粘度可用 Orrick 和 Erbar 法：

$$\ln\eta/(\rho M) = A + BT \tag{1-1}$$

式中：A、B 为各基团贡献值，无量纲；ρM 为液体粘度，ρ 为 20℃ 的液体密度（$g \cdot cm^3$），M 为相对分子质量；T 为热力学温度（K）。

1.4.3 高温裂解及积炭

在正常运行时，有机热载体也会因管壁高温而发生裂解，其中的轻组分会使有机热载体的粘度有所下降，但部分低分子有机物会聚合生成粘度更大的胶质高分子有机物，因此有机热载体的粘度通常随着使用时间的加长而增大。

根据流体力学理论：流体在管壁流动，当雷诺数 <2100 为层流，雷诺数在 2100～4000 为过渡流，雷诺数 >4000 为紊流。从热传导的角度来看，在紊流状态，炉管内的流体才能将受热管壁传来热量迅速分散到整个流体，紊流越强烈则传热效率越高。

根据雷诺数的定义式：$Re = wd/\nu$，其中 w 为流体流速，d 为管径，ν 为流体运动粘度，当运动粘度增大时，有机热载体在炉管内的流速将逐渐变慢，随着流速 w 减小、运动粘度 ν 增大，雷诺数 Re 会加速下降。当流动状态由紊流转为过渡流（甚至层流），将严重影响热传导。管壁上的实际液膜温度将超过有机热载体的最高允许液膜温度，进而导致有机热载体品质劣化加剧，并加速高粘度胶质物的生成。这些胶质物是有机热载体中残炭的主要来源，而且这些胶质物由于粘度大容易黏附在管壁上。当黏附在受热面管内壁时，因受热而造成炉管结焦和积炭；又由于碳膜的传热系数只有钢铁的几百分之一，将导致炉管过热。如此恶性循环，导致炉管内径变小甚至堵塞，严重时会造成锅炉爆管或炉管烧损等。

1.4.4 锅炉运行中有机热载体运动粘度的变化

有机热载体锅炉日常运行主要分为三个阶段（冷起动、正常运行、停炉），有机热载体在各个阶段运动粘度变化如图 1-10 所示。

由于矿物油型有机热载体在常温（低温）时粘度一般较大，在锅炉冷态起动时也存在有机热载体实际液膜温度超过最高允许液膜温度的问题。冷起动时，该有机热载体流动状态为层流或过渡流，为此，TSG G0001—2012《锅炉安全技术监察规程》中要求："锅炉制造单位应当在锅炉出厂资料中提供锅炉最高液膜温度和最小限制流速的计算结果"，由于锅炉的设计

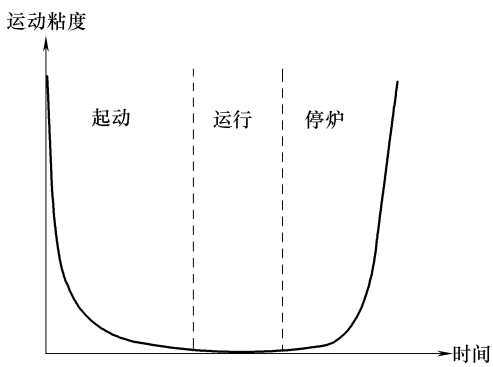


图 1-10 锅炉运行中有机热载体粘度的变化

需要全本请访问 www.ertongbook.com