阿法拉伐自适应燃油系统蓝皮书

技术参考手册（2016 版）

ALFA LAVAL
FUEL
LINE

一本有关催化剂残留颗粒、硫排放标准、燃油兼容性问题以及如何采用现代燃油处理系统应对这些挑战的技术参考手册。

阿法拉伐自适应燃油系统

本刊物旨在概述阿法拉伐自适应燃油系统的概念以及开发背后的基本原理。本文件可作为一本技术参考手册，供感兴趣人员了解某个特定组件的功能和关联性，也可作为燃油处理的总体介绍，或为提高燃油处理效率、降低航行成本而设计整个燃油价值链的介绍。

内视图

关于催化剂残留颗粒、硫排放标准、燃油兼容性问题以及如何采用现代燃油处理系统应对这些挑战，你需要知道的事情。

概述 7

1. 船用燃油 8

1.1 船用燃油 10

1.1.1 残渣燃油 10

1.1.2 馏分燃油和其他液态燃油 10

1.1.3 再生燃油（FAME） 10

1.2 炼油工艺 10

1.2.1 原油 10

1.2.2 常压蒸馏 11

1.2.3 减压蒸馏 12

1.2.4 二次转换工艺 12

1.3 催化剂残留颗粒 13

1.3.1 催化剂残留颗粒装置 13

1.3.2 催化剂残留颗粒的组成 13

1.3.3 催化剂残留颗粒浓度标准 14

1.3.4 测量催化剂残留颗粒含量 14

1.3.5 当今重燃油的催化剂残留颗粒发展趋势 15

1.4 基础分离 16

1.4.1 离心机定型 16

1.4.2 最大推荐容量与认定流量 16

2. 燃油处理——发动机性能 17

2.1 当前燃油处理 17

2.1.1 标准和建议 17

2.1.2 燃油品质和船上处理 18

2.1.3 燃油清洁设备 18

2.2 催化剂残留颗粒和发动机性能 19

2.3 馏分燃油重点关注点 20

3. 法规对船舶航行的影响 21

3.1 含硫限制的重要性 21

3.2 国际海事组织《防止船舶污染国际公约》（IMO MARPOL）附录六 21

3.3 欧盟规定 22

3.4 加利福尼亚硫排放规定 22

3.5 残渣燃油和馏分燃油之间的转换 22

3.5.1 一般注意事项 23

3.5.2 温度梯度 23

3.5.3 粘度变化 23

3.5.4 不兼容 24
3.5.5 润滑性 24
3.5.6 冷流特性 24
3.6 使用洗涤器替代更换燃油 24

4. 燃油处理：现代方式 25
4.1 阿法拉伐自适应燃油系统 25
4.1.1 燃油系统配置优化 25
4.1.2 设备优化 25
4.1.3 进料优化 26
4.1.4 系统监控和自动化 26
4.1.5 多种燃油管理 26
4.1.6 废弃燃油回收 26
4.2 航行参数 27
4.2.1 减速航行有利于更好的分离 27
4.2.2 离心机流量控制 27
4.2.3 温度 28
4.3 燃油系统的设计 29
4.3.1 单一燃油系统 29
4.3.2 多种燃油系统 29
4.3.3 重燃油离心机不能用来清洁船用柴油 / 船用汽油的原因 30
4.3.4 燃油储存舱的设计 30
4.3.5 燃油转换 30
4.4 技术方案 30
4.4.1 Alcap ™技术 30
4.4.2 FlowSync ™——能源效率和流量优化 31
4.4.3 高温分离 32
4.4.4 PureDry——能源效率和燃油回收 32
4.4.5 催化剂残留颗粒在线监测 33
4.4.6 ACS——燃油自动转换系统 34
4.4.7 FCM One——燃油调控模块 35
4.4.8 电子版燃油记录薄，确保合规 35
4.4.9 Moatti 燃油过滤器——发动机保护 36
4.4.10 2Touch——监控燃油清洁 36
4.5 自适应燃油系统 37

5. 首字母缩写词 38
参考文献 39

概述

当今航运业面临众多挑战。硫排放新规驱使行业向低硫新燃油转变。

生产低硫燃油通常需要催化裂化工艺。这个工艺会产生颗粒物质残留物，通常含有铝和硅，简称为催化剂残留颗粒。这些催化剂残留颗粒非常坚硬，尺寸从100 微米到超微米不等。如果未能从燃油中完全分离出来，催化剂残留颗粒则会磨损发动机部件，造成发动机严重损坏。

在竞争激烈的市场中，对高效、低成本的产品需求一直很大。阿法拉伐提供市场领先的船舶燃油处理设备。阿法拉伐自适应燃油系统的概念是在整个燃油处理系统中采用阿法拉伐系列设备，加强单个部件之间的联系，从而优化燃油处理性能。降低航行成本，提高分离效率，使得燃油更为清洁，更少的催化剂残留颗粒降低了发动机维护成本，使船舶航行更为安全。

本刊物主要分为四个章节：

第一章：船用燃油
本章节详述了船用燃油的生产过程，介绍了催化剂残留颗粒，并讨论了当今重燃油中催化剂残留颗粒的趋势以及其他燃油品质特性。

第二章：燃油处理——发动机性能
本章节详述了催化剂残留颗粒对发动机性能的影响以及其他参数对分离效率的影响。

第三章：法规对船舶航行的影响
本章节概述了当前硫排放的标准。讨论了新排放控制区（ECA）的建立以及日益严格的排放标准规定，导致船舶使用多种燃油。本章还讨论了残渣燃油与馏分燃油相互转换的影响。

第四章：面向未来的燃油处理解决方案
本章节描述了面向未来的燃油处理系统，突出了可以通过优化船上设备从而提高能源效率、燃油品质和环保达标的六个不同方向。部件连接和人工智能的加入可以凸显优势。这就是阿法拉伐自适应燃油系统。

1 船用燃油

在使用船用燃油时，船上燃油处理和燃油清洁对于有效的船舶航行来说至关重要。下文详述了船用燃油处理的几点要求和面临挑战，重点关注了日益重要的燃油催化剂含量的问题。

船用燃油主要供给产生螺旋桨推力的主机以及为提供电能的柴油发电机所用。多种燃油可用于海洋运输。ISO 8217 是船用柴油机和锅炉使用未经处理的石油产品相关的国际标准规范。

第三章“法规对船舶航行的影响”所述的环境法规对全球燃油需求的影响越来越大。残渣燃油是当前市场的主导需求，但在未来最有可能被纯馏分燃油和调和燃油所取代。图 1 为海运和能源咨询公司（Marine and Energy Consulting Ltd.）所作的 25 年全球燃油需求预测。[1] 此处的需求变化可看作是环境法规生效的影响:

- 2012 年全球含硫限值为 3.5%。
- 2015 年排放控制区硫氧化物（SOx）的限值为 0.10%，使得排放控制区内对含硫限值为 1.00% 的残渣燃油的需求转变为含硫限值 0.10% 纯馏分燃油。
- 到 2020 年，全球含硫限值在要求为 0.50%。

[1] 初始预测显示全球含硫上限将于 2025 年生效。这个模型已被调整适应海上环境环保委员会（IMO MEPC）就 2020 年全球含硫上限降至 0.50% 的决议。

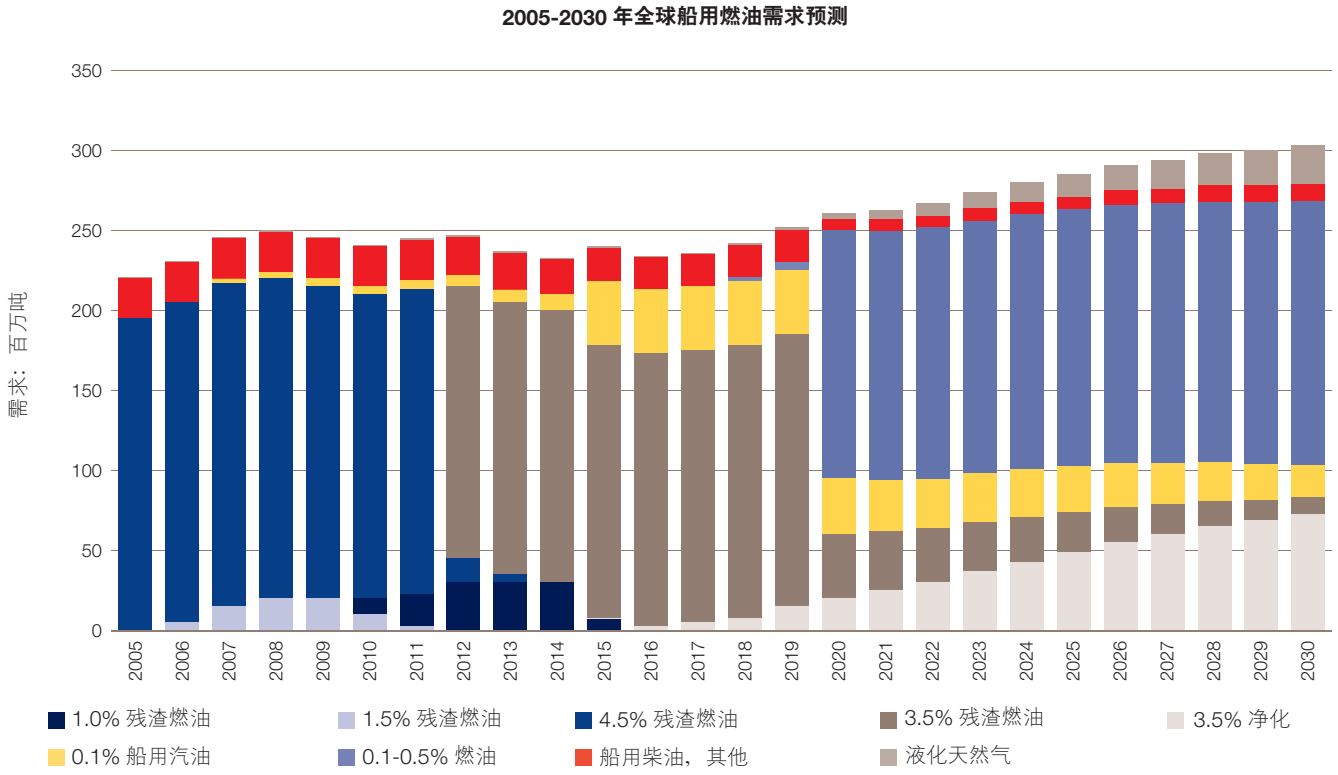


图 1 不同种类燃油的需求

来源：海运与能源咨询公司“2035 年船用燃油展望”，根据 2020 年含硫上限法规进行了修改。

2016 年 7 月，由独立研究和咨询组织 CE Delft 为首的联盟发表了燃油可用性报告，支持国际海事组织海洋环境保护委员会（MEPC）的决议程序。

“主要评估结果是，在所有的情况下，炼油部门有能力提供数量充足且含硫量不高于 0.50%m/m 或不高于 0.10%m/m 的船用燃油，满足市场对这些产品的需求，同时满足非船用燃油的需求。”

根据评估，国际海事组织（IMO）2016 年 10 月宣布船用燃油全球含硫上限（0.5%）规定将于 2020 年 1 月生效。多名利益相关者批评了这项决议，他们认为转换会出现问题，区域燃油供应不能达到这项需求。

海洋产业占全球石油消耗量的十分之一。在 2020 年含硫上限生效之后，由于大部分船舶将从重燃油改为使用船用柴油或其他合规混合燃油（国际燃油工业协会（IBIA），2016 年），馏分燃油的全球需求量预计将增加两百万桶 / 日，从 2800 万桶 / 日上升到 3000 万桶 / 日。洗涤器和液化天然气的使用可降低转换时船用柴油和混合燃油的用量，但有预测显示此类设备和燃油的可用性并不能涵盖所有需求（挪威船级社（DNVGL），2016 年）。

后面的章节简单描述了船舶和炼油工艺所用的不同类型的燃油。

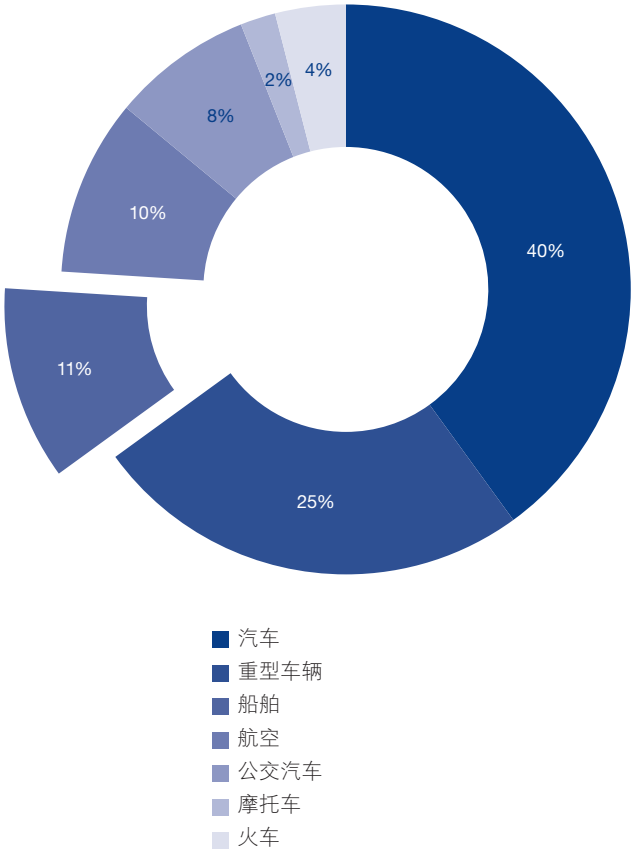


图 2 运输市场的石油消耗量海洋产业的石油消耗量为五百万桶 / 日，相当于全球需求总量的 11%。

1.1 船用燃油

船舶航行需要使用不同类型的燃油，也称为船用燃油。船用发动机较为灵活，只要高效燃油清洁系统安装到位且温度和粘度在推荐的发动机规格范围内，就可使用包括重燃油或船用汽油等轻质馏分燃油在内的多种燃油。

1.1.1 残渣燃油

残渣燃油或重燃油（HFO）从本质上来看都是一种炼油副产品。将其混合，以满足市场对相对低廉能源的需求。炼油行业的主要驱动力是生产中轻等级的馏分燃油产品，用来提取汽油、喷气燃油、车用柴油和化工原料。

1.1.2 馏分燃油和其他液态燃油

由于排放控制区 0.10% 含硫上限已于 2015 年 1 月 1 日生效，航航行业使用馏分燃油变得越来越普遍。据推测，船舶在排放控制区以外使用重燃油，而进入排放控制区则换成馏分燃油。航航行业使用的低硫燃油通常可分为船用汽油和船用柴油两大类，前者是纯馏分燃油，后者则为馏分燃油和残渣燃油的混合物。

2014 年，新型重质馏分燃油进入船用燃油供应市场，以满足对超低含硫量燃油的需求。排放控制区船用重质馏分燃油（HDME）就是其中一个例子，它是一种石蜡产品，同重燃油一样，在内燃机里使用前需要进行预热。另一个例子是减压柴油（VGO），由石油蒸馏产出，再通过催化剂裂化提炼，形成重质油。

1.1.3 再生燃油（FAME）

植物油脂不含硫，可转换为适合柴油机燃烧的燃油。燃油必须经过加工，降低粘度并提高冷流特性。合成燃油称为脂肪酸甲酯（FAME）。由于加工要求，脂肪酸甲酯的成本大大高于从原油分离馏分燃油的成本。由于脂肪酸甲酯是微生物的营养素，微生物可繁殖，特别是在燃油下部的沉淀水中，更易繁殖。因此燃油处理也同样面临重重挑战。再生燃油因其高成本、有限利用度以及商业吸引力较小，目前不考虑作为原油提取船用燃油的替代物。

1.2 炼油工艺

原油是大多数常见燃油的典型来源。本章节描述了适用于残渣燃油生产的多个基础炼油工艺。

1.2.1 原油

原油是一种烃类复杂混合物，通过钻井，从地层中获得。将原油加工成各种类型和数量的石油产品，以满足全球需求。由于密度、粘度、含硫量、含钒量和其他特性的显著差异，没有任何两种原油是相同的，因此炼油厂的终端产品产量也不尽相同。

通常通过蒸馏分离出原油馏分。最初，通过常压蒸馏工艺蒸馏原油，获得所需数量和所需等级的产品。减压蒸馏可进一步提炼常压渣油。常压蒸馏和减压蒸馏都是炼油工艺，将原油组分物理分离为馏分燃油。

这些工艺并不能以化学方式改变原油的结构，通过以合理比例混合所有输出流和组分，可对原始原油进行再造。

1.2.2 常压蒸馏

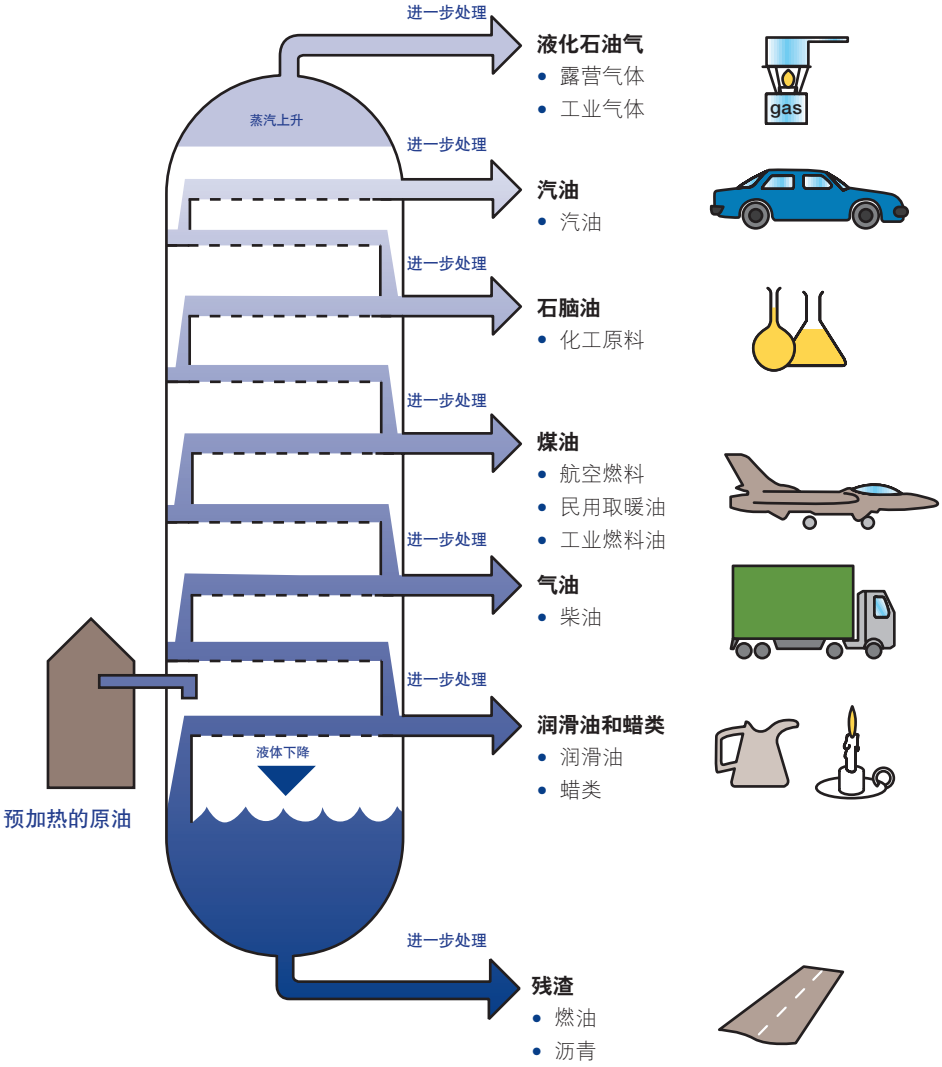
原油提炼的第一步是通过蒸馏法将原油分离成多个部分。这个工艺利用了原油是沸点不同的烃类复杂混合物的原理。最轻和最易挥发的烃类首先被汽化成蒸汽，最重和最难挥发的烃类最后被汽化。如果冷却，蒸汽冷凝成液体的过程则刚好相反，最重的烃类首先被液化，而最轻的烃类最后被液化。

蒸馏工艺在分馏塔中连续进行，分馏塔配有多级有孔盘，用虚线标出（图 3）。加热原油至约 350℃，将其泵送至分馏塔基础附近的隔间。控制温度，以防止发生热分解反应。原油加热之后，除了最重的烃类，其余烃类均被蒸发，并通过各级有孔盘的孔隙上升。

随着蒸汽从塔内上升，由于冷却盘引起的温度下降，其中一些蒸汽发生冷凝。同时，蒸汽的热量引起低沸点的冷凝液部分发生再蒸发反应。油蒸汽在塔内上升，直至塔内温度不足以引起蒸发为止。根据不同的挥发性，分离油馏分，并从分馏塔各级盘排出，进行下一步的加工处理。塔顶收集沸点最低的原油组分，塔底收集沸点最高的原油组分。塔顶最低沸点约为 60℃，而塔底最高沸点超过 300℃。

然而，并不是所有的原油都被分馏成馏分燃油产品。挥发性最强的蒸汽仍以气态方式存在，并从塔顶排出，而沸点温度超过 300℃ 的原油馏分则在塔底被收集起来。这些原油馏分被称为常压渣油，可作为残渣燃油混合组分使用。

图 3 原油蒸馏成不同馏分的过程。



常压蒸馏是一个相对简单的物理过程，利用不同的沸点范围分离燃油。原油种类决定了可获得产物的百分比。相对于高密度、高粘度的原油，低密度、低粘度的原油产出更多的馏分燃油和较少的常压渣油。

如前所述，市场需求导致众多炼油厂采用了常压蒸馏以外的其他炼油工艺。总体目标是减少剩余原料的数量，增加馏分燃油的数量。

1.2.3 减压蒸馏

减压蒸馏与常压整流类似，但需要在真空环境下进行。由于压力和液体沸点之间的关系，如果降低压力，在相同的温度下，常压蒸馏产生的塔底渣油可能发生蒸发反应。这使得更高比例的轻质馏分被排出，而无需超过热分解发生的温度。对于常压蒸馏，并不是全部的液体都被蒸发。减压蒸馏塔底收集的馏分称为减压渣油，可作为海上残渣燃油组分使用。

但是，这两个简单的蒸馏工艺单独产出的馏分燃油产品数量，不足以满足全球日益增长的需求。需要经常使用后续和更复杂的炼油工艺，即二次转换工艺。

1.2.4 二次转换工艺

为了更好的满足全球需求，炼油厂采用二次转换工艺，从原油中提取更高比例的轻质馏分燃油。由于蒸馏法是根据挥发性分离原油馏分，这些工艺改变了原油的化学结构。

二次转换工艺包括“裂化”过程，在裂化过程中，重油馏分的长烃链断裂成较短的分子，更容易加工成所需的燃油产品。有两种基本的裂化工艺：热裂化和催化剂裂化。

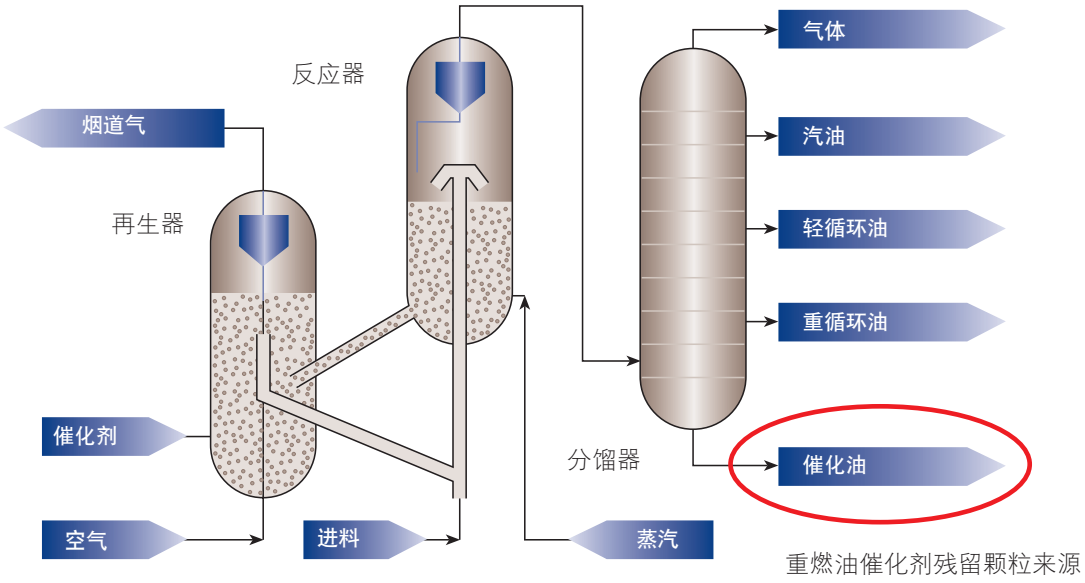
热裂化

热裂化利用温度、压力和时间条件，引起化学反应，改变原油结构。馏分燃油和残渣燃油均可以进行热裂化反应。典型的热裂化工艺包括：减粘裂化和焦化过程，减粘裂化显著降低了重残渣粘度，使其可与其他燃油混合；而焦化过程破坏燃油，仅产出馏分燃油和含碳量高的固体，即焦炭。

催化剂裂化

催化剂裂化工艺也改变了残渣燃油的化学成分。这个工艺采用化学催化剂而非高压，将复杂烃类分解成更简单的分子。催化剂是一种改变化学反应速率但其本身的化学性质在化学反应前后不会发生改变的物质。

图 4 催化剂裂化。



最常见的工艺是流化催化裂化（FCC），用来将气油和残渣燃油转换成高辛烷值汽油和柴油。图 4 显示了在流化床工艺中直径约 20-100 μ m 的细粒催化剂在反应器和再生器之间的循环过程。此工艺中所用的催化剂一般非常昂贵，大型裂化装置通常需要约 500 公吨的催化剂。

再生器中的热催化剂与原料混合，进入反应器。接触到催化剂之后，原料开始蒸发。蒸汽依次反应，打破化学键，获得所需的产品品质。

在反应中，一些碳沉积到催化剂颗粒上。随后在反应器中将催化剂和蒸汽分离，蒸汽上升流进分馏塔进行下一步加工处理。催化剂回流至再生器中，加热烧掉碳沉积物，再将催化剂返回至反应器，重新与原料混合。

连续循环使用催化剂，由于摩擦作用，使其分解成更小的颗粒。一些催化剂颗粒进入分馏塔，通常被称为催化剂残留颗粒。尽管炼油厂试图尽量减少催化剂裂化工艺中的催化剂损失，但催化剂残留颗粒携带情况是不可避免的。

蒸馏塔底排出的产物称为油浆、催化油浆或催化裂化重油。油浆在 15℃时的密度高达 1,000kg/m^3，在 50℃时的粘度较低，约为 30-60cSt。油浆芳香度较高，使得最终燃油产品稳定性较高，是残渣燃油的理想混合组分。催化剂残留颗粒随着催化提炼塔底馏分进入残渣燃油，可能会严重损坏燃烧燃油的发动机。

1.3 催化剂残留颗粒

催化剂残留颗粒是非常坚硬的颗粒，通常包括硅铝混合物。船用残渣燃油中存在的催化剂残留颗粒是燃油提炼工艺（催化剂裂化）的结果。如果燃油处理系统未将催化剂残留颗粒清除，则会严重磨损发动机，因此催化剂残留颗粒是不受欢迎的（阿法拉伐集团、BP 海运公司以及恩曼集团，2016 年）。

1.3.1 催化剂残留颗粒计量单位

区别颗粒浓度和颗粒尺寸是讨论催化剂残留颗粒的核心内容。

- 颗粒浓度的单位是百万分之一（ppm）。对于催化剂残留颗粒来说，颗粒浓度描述的是催化剂残留颗粒和燃油之间的质量比，例如 60mg/kg=60ppm。
- 颗粒尺寸测量单位为 μ m，有时也称为微米，1 μ m=1 微米 =1•10^{-6}m。

1.3.2 催化剂残留颗粒的组成

催化剂残留颗粒的组成是根据原料种类和裂化器主装置是按照汽油（轻质）等级或柴油（重质）等级生产进行优化而决定。如今，催化剂组成从不公开披露，但所有催化剂均含有多种合成结晶沸石。沸石是铝硅酸盐矿物质，因其可能含有大量的阳离子以及其微孔结构，特别适合作为催化剂。FCC 催化剂裂化所用的沸石通常由氧化铝和二氧化硅四面体分子组成，中心有一个铝或硅原子，各边角均有一个氧原子（图 5）的结构。

原油提炼所用的催化剂包括在基体中分散的沸石颗粒，含有铝硅混合物。颗粒体积的 45-65% 均有气孔（图 6），添加特定稀有金属，形成催化性能。气孔使得颗粒表面积增大，可加速裂化工艺中的化学反应。

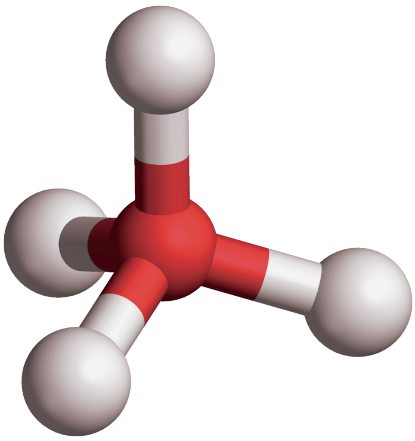


图 5 四面体分子。

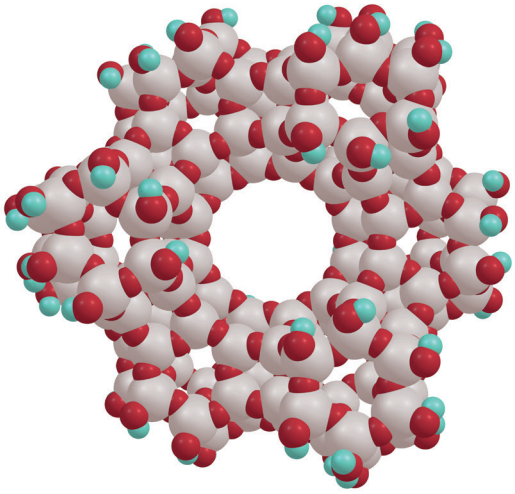


图 6 沸石微孔分子结构。

催化剂通过催化剂裂化器装置循环时，由于摩擦，催化剂被分解形成催化剂残留颗粒。催化剂残留颗粒的形状和尺寸各不相同，尺寸范围从超微米到约 30 μ m 不等，偶尔达到 100 μ m。图 7 为催化剂残留颗粒在重燃油中的粒度分布。

根据仅有的文献参考，催化剂残留颗粒浓度范围为 0.9-1.3g/cm^3（相对于典型重燃油密度 0.96-1.1g/cm^3）。相似的密度以及裂化工艺之后沸石气孔最有可能填满燃油的事实意味着通过沉淀分离的成功率被降低。

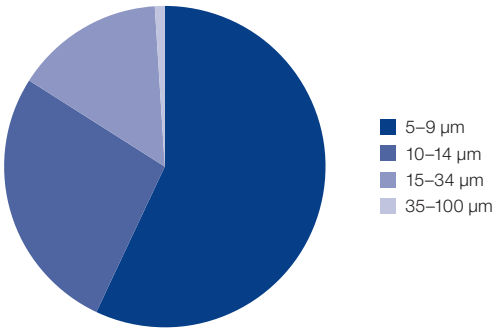


图 7 重燃油中催化剂残留颗粒的粒度分布（BP 2007）

1.3.3 催化剂残留颗粒浓度标准

ISO 8217 是一系列公认的燃油品质标准。这些标准将市场燃油所含的催化剂浓度限定在燃油含量的 60ppm Al+Si（铝加硅）。船用发动机制造商目前规定注射之前燃油所含催化剂残留颗粒的最大可接受比例为 10ppm。

沉淀、分离和过滤等合适的船上燃油清洁程序，可降低传送燃油所含的催化剂残留颗粒比例。

1.3.4 测量催化剂残留颗粒含量

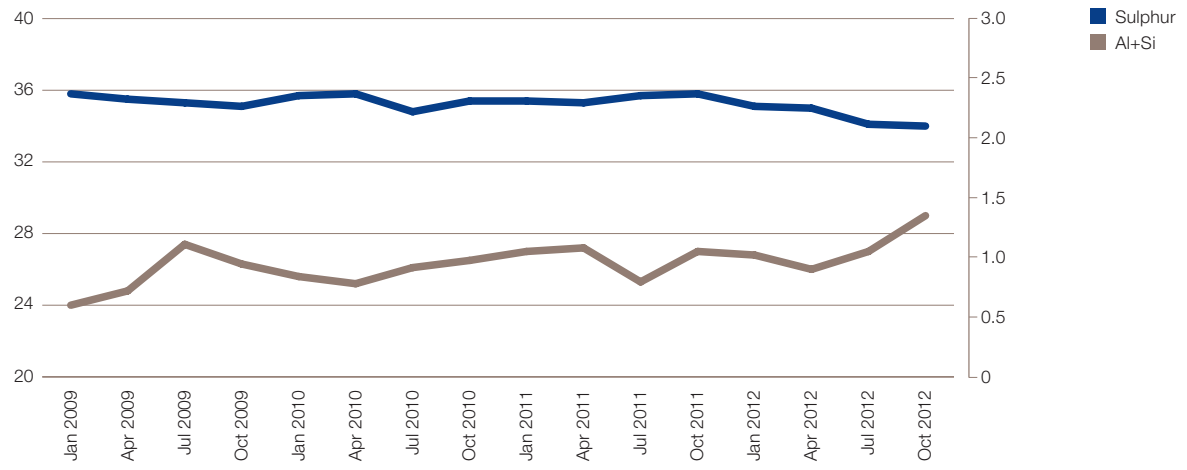
有两个原因需要测定燃油中的催化剂残留颗粒浓度。第一个原因是，检查装置产出的精炼油是否满足 ISO 8217 燃油标准，在传送时所含催化剂残留颗粒比例是否可被接受。第二个原因是，持续更新船上燃油的品质。

ISO 10478 是测定燃油中铝和硅含量的标准化方法。这个方法采用电感耦合等离子体原子发射和原子吸收光谱法。换句话说，首先激发准备油样中的 Al/Si 原子，发射出电磁辐射。随后进行利用激发原子发射特征波长的光谱学分析。铝硅特征波长的辐射强度显示催化剂残留颗粒的浓度。值得一提的是，这个方法测量了燃油中催化剂残留颗粒的浓度，但并未显示催化剂残留颗粒粒度分布情况，而粒度分布则与船上燃油处理密切相关。

测量燃油中催化剂残留颗粒的含量作为船上日常惯例的构成部分，是一个相对较新的概念，但近来，催化剂残留颗粒磨损发动机的事件频频发生。ISO 10478 方法不适用持续船上测量，现有的方法是采用了与医学成像相同的用户友好技术。

这个方法被称为核磁共振（NMR）光谱法，利用催化剂残留颗粒的磁学性能进行检测。阿法拉伐自适应燃油管路包含了船上检测和优化催化剂残留颗粒措施的方法，将在第 33 页*“催化剂残留颗粒在线监测”*部分予以详述。

图 82009-2012 年重燃油催化剂残留颗粒发展趋势（挪威船级社原油服务部门 DNVPS）



1.3.5 当今重燃油的催化剂残留颗粒发展趋势

不同资料来源显示船用重燃油催化剂残留颗粒浓度呈现不断上升的趋势。挪威船级社原油服务部门（DNVPS）收集的资料也支持这一观点（图 8）。

这个趋势图（图 8）是根据不同重燃油供应商所供的多个样品绘制而成。显示了催化剂残留颗粒含量和含硫量之间的关系。环境法规导致对低硫燃油的需求逐渐增加（第三章）。反过来激发了炼油厂加强重燃油混合。正如“*催化剂裂化*”章节（第 12 页）所述，燃油混合是催化剂残留颗粒主要来源。

2006-2007 年北欧引进第一批排放控制区，这对安特卫普 - 鹿特丹 - 阿姆斯特丹区域（ARA）的燃油供应产生了影响。当法规发生变化，新的排放控制区生效以后，也可以观察到相似的趋势。

所有残渣燃油等级中都可以发现携带高含量催化剂残留颗粒的燃油。然而，平均说来，相对于高粘度等级的燃油，低粘度等级的燃油携带的催化剂残留颗粒浓度较低。图 9 显示了 2012 年取样调查中，不同类型燃油中的催化剂残留颗粒平均浓度。不同燃油等级中的 Al+Si 浓度以 mg/kg 表示（按重量等于 ppm），并被分为五个范围。图中栏高代表不同粘度燃油的催化剂残留颗粒浓度。注意，在最常见燃油等级（RMG 380cSt）中，几乎 40% 所含催化剂残留颗粒的范围在 21-40mg/kgAl+Si 之间，几乎 20% 的 RMG 380 燃油含有 41-80mg/kg Al+Si。

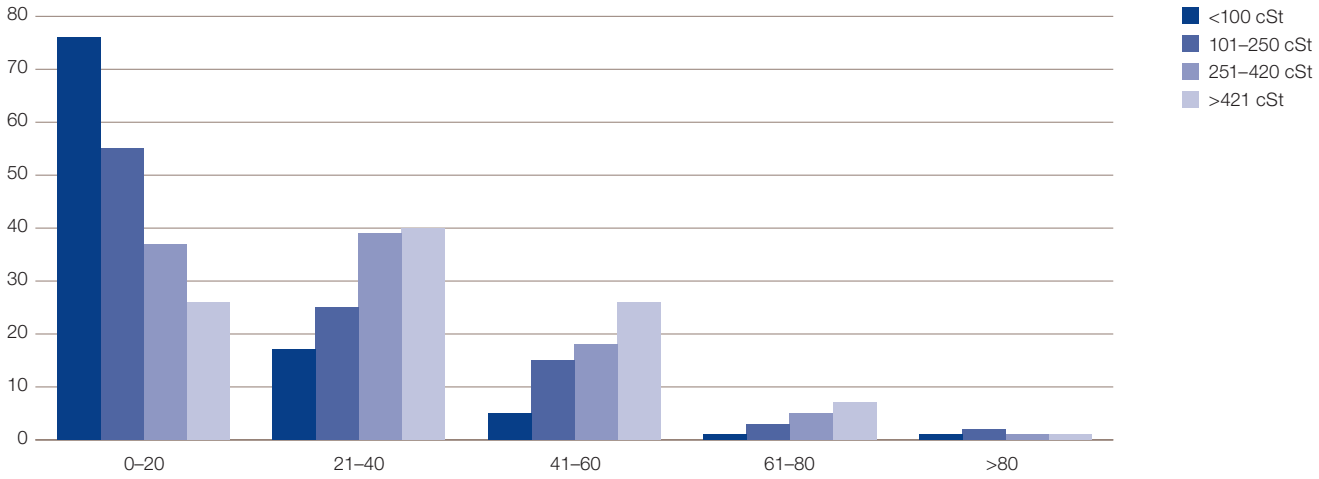


图 9 不同燃油等级中的催化剂残留颗粒评价浓度

来源：挪威船级社原油服务部门

1.4 基础分离

根据颗粒比燃油密度大的原理，在离心机和沉降槽中，从燃油中分离颗粒。在沉降槽中，设定一定的时间，所有颗粒均会沉至槽底。然而，如果颗粒非常细小，沉降则会非常缓慢。

著名的斯托克斯方程描述了决定颗粒沉降速度（$V_{settling}$）的因素：

$$V_{settling} = \frac{d^2 (\rho_p - \rho_l)}{18\mu} \alpha$$

式中：

d = 颗粒直径
ρ_p = 颗粒密度
ρ_1 = 液体密度
μ = 液体粘度
α = 重力或离心加速度（离心机中）

在离心机中，重力沉降的速度从 9.8m/s^2 增加至几千倍。对于催化剂残留颗粒来说，碟式离心机的分离原理与槽的分离原理相同。离心力作用在颗粒上，将其向四周移动，而燃油流推动颗粒向油箱中心移动。当燃油流达到一定速率，催化剂残留颗粒将与燃油一起漏出，而非从燃油中被分离出来。因此，没有时间进行颗粒沉淀。

1.4.1 离心机定型

正确定型离心机至关重要。在规定燃油清洁系统所需的总流量之后，必须考虑到柴油发电机组和锅炉（如有）的燃油消耗量。目前，使用离心机供应商和发动机制造商签发的容积表，选择合适的离心机。

对于发动机最大持续额定出力所消耗的基础燃油消耗量，可采用下列公式进行计算：

$$Q = \frac{P \cdot b \cdot 24}{\rho \cdot T} \ (l/h)$$

式中：

Q = 燃油消耗量（l/h）
P = 最大持续额定出力（kW 或 HP）
b = 发动机供应商规定的特定燃油消耗量（kg/kWh 或 kg/HPh）
ρ = 燃油密度（假定为 0.96kg/l）
T = 每日净航行时间（每天 24 小时的航行小时数）

通常使用馏分燃油进行特定燃油消耗量测定，测定结果可根据所谓的非 ISO 条件进行调整。据推测，发动机供应商将该值纳入上述系数 b 之中。

1.4.2 最大推荐容量与认定流量

有两种用来比较离心机的模型：最大推荐容量和认定流量。

最大推荐容量

离心机供应商根据不同的标准，规定每台装置的最大推荐容量（MRC），标准不常见也没有可比性。

认定流量

根据 ISO 标准 CWA15375:2005“分离性能标准”的规定，测量离心机的认定流量（CFR）。尺寸为 5 微米的人工球形颗粒加入液体燃油中。认定流量被定义为离心机从液体中分离出 85% 颗粒时的流量。采用认定流量规定离心机的容量可以确保选择性能合适的离心机，从而确保发动机安全航行。

2 燃油处理——发动机性能

根据不同的特性，船用燃油可分为多个不同的等级。其中一些特性可能被船上燃油处理系统所影响，而其他特性则不会受到影响。本章详述了国际标准规定的燃油品质。

2.1 当前燃油处理

只要经过船上充分处理，船用柴油机便可以接受所有的市售燃油。为此，需要一套精心设计的燃油处理系统。业内目前普遍认为离心机与沉淀舱可以作为燃油清洁系统。

2.1.1 标准和建议

国际内燃机委员会（CIMAC）和国际标准化组织（ISO）这两个独立协会的声明，与海运业所有利益相关者有很大的关联。CIMAC 是一个非盈利合作组织，旨在促进成员之间的思想、技术和发展交流。组织成员包括发动机制造商、研究机构、供应商、船级社和高校。

一般说来，关于船上燃油清洁（ISO 8217 燃油标准），CIMAC 燃油建议和阿法拉伐产品指南为安全、高效航行离心机提供了三项基本但关键的措施：

- 燃油送入发动机之前，需要预热到一定温度。
- 必须确认正确的离心机容量 / 设计，燃油输送量必须匹配规定的流量。
- 正确航行和维护离心机。

为了解决越来越多的催化剂残留颗粒磨损发动机的问题，ISO 8217 和 CIMAC 规定了传送船舶的燃油所含催化剂残留颗粒的含量不得超过 60ppm。发动机制造商一般要求将燃油注射进入发动机之前，采用船上燃油处理系统进一步降低催化剂残留颗粒最大比例至最大 10ppm。随着供给燃油中的催化剂残留颗粒比例进一步降低，发动机制造厂期望相应减少注入发动机的燃油所含的催化剂残留颗粒数量。

CIMAC
国际内燃机委员会

表 1 燃油重要参数

燃油性能	影响	受分离的影响
密度	燃油价格和离心机调整	不受影响
粘度	喷射温度和所需加热 / 冷却	不受影响
水	腐蚀和舱内沉积物	影响强烈
微量残碳量	发动机内沉积物	不受影响
硫	排放、润滑和基数（BN）	不受影响
沉积物	离心机（和过滤器）负荷	影响强烈
含灰量	发动机磨损	影响适度
钒	发动机内高温腐蚀	不受影响
钠	发动机内 NaCl 沉积物和腐蚀	影响强烈
铝 + 硅	受催化剂残留颗粒磨损	影响强烈至适度
CCAI	发动机点火质量	不受影响
倾点	过滤器堵塞	不受影响
闪点	海上人命安全公约（SOLAS）和船级社规定 通常要求最低温度保持在 60℃	不受影响

2.1.2 燃油品质和船上处理

即使燃油在名义上被划分成相同的类型，但燃油品质也不尽相同。改变燃油供给需求，为市场带来新的燃油。因此，精确规定供给燃油规格是非常必要的。准确解释参数意义以及了解受船上处理系统影响的参数同样重要。表 1 列出了重要的燃油参数及其对船舶航行的主要影响。右侧一栏显示了各项性能受分离影响的程度。表 1 所列的所有参数均包含在 ISO 8217 燃油标准之中。

船上分离系统可有效减少含水量、沉积物、钠和催化剂残留颗粒（表 1）。也可以降低某些含灰量。因为可以用来判断燃油中是否含有润滑油，因此评估燃油中的锌、磷和钙比例同样重要。

2.1.3 燃油清洁设备

图 10 显示了典型的燃油处理系统。主要装置包括沉淀舱、离心机、日用舱和燃油调控模块或 FCM（也称为增压系统）。

沉淀舱

燃油中的重质、大粒组分，如大粒催化剂残留颗粒等，由于重力作用，会沉积在沉淀舱底。然而，公海环境和恶劣天气可能造成这些组分被搅拌、混合进入离心机。由于离心机容量受限，这将影响清洁燃油的纯度。因此，有必要定期排放沉降槽和供给箱，从而降低这种风险。

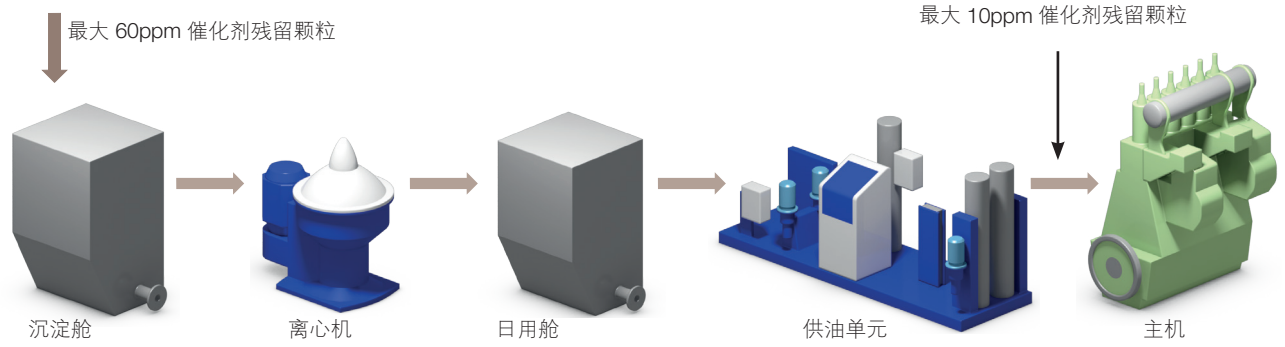


图 10 典型燃油处理系统：根据 ISO 8217/2012 的规定，供给燃油中的催化剂残留颗粒最大含量不得超过 60ppm。
发动机制造商建议喷射入发动机之前的燃油所含催化剂残留颗粒的最大含量为 10ppm。

离心机

在正常运行的情况下，大部分离心机能够 100% 清除尺寸大于 10 μm 的催化剂残留颗粒。然而，以最大推荐流量运行离心机时，无法清除大部分尺寸小于 3 μm 的催化剂残留颗粒。为了检查离心机的效率，建议至少每隔四个月，从离心机进料口和出料口抽取一次样品，送至第三方机构进行分析。

过滤器

过滤器作为额外的保护措施进行安装，防止锈片等大颗粒进入燃油系统。低密度的大颗粒可能会通过离心机，但会被过滤器过滤清除。

2.2 催化剂残留颗粒和发动机性能

催化剂残留颗粒的尺寸从超微米到十分之一微米不等，从一粒灰尘或花粉到粗糙毛发的宽度不等。尽管肉眼看不出来，但催化剂残留颗粒非常坚硬，将会严重划伤（或切割）金属（阿法拉伐，BPMarine 以及恩曼集团，2007 年）。

燃油中有时会夹杂铁锈、砂子和灰尘，但通常在燃油喷射入发动机之前，采用离心机将其从燃油中清除。相对于催化剂残留颗粒，这些成分的危害较低，数量也较少。

离心分离之后留在燃油中的所有催化剂残留颗粒可能造成发动机磨损和损坏，从而形成低效、潜在不安全的航行条件。这就是为什么要采用燃油处理系统尽一切可能减少催化剂残留颗粒比例的原因。

发动机制造厂声称，相对于大颗粒催化剂残留颗粒，小于 4 μm 的催化剂残留颗粒带来的危害性较小（CIMAC，2013 年）。催化剂残留颗粒数量越多，形成不安全航行条件的风险就越大。在此航行条件下，故障风险会上升，相比于发动机制造商推荐的维护间隔，发动机很有可能需要更加频繁的维护。

燃油喷射系统和燃烧室是两个最有可能受到催化剂残留颗粒磨损的燃油处理系统装置。在燃油注入发动机之前，燃油注射泵增加燃油的压力。活塞和活塞筒之间的小公差会导致小颗粒堆集在活塞和活塞筒表面之间并嵌入材料之中。同样的问题也会出现在燃烧室，催化剂残留颗粒可能嵌入活塞环和汽缸衬垫之间。表面之间的相对运动会加速部件之间的磨损。

如果喷射泵受损，则泵送到发动机的燃油性能会低于标准且压力也不够，这样反过来将会降低发动机的效率，增加了航行成本。发动机磨损和间接损害费用昂贵，应该避免。

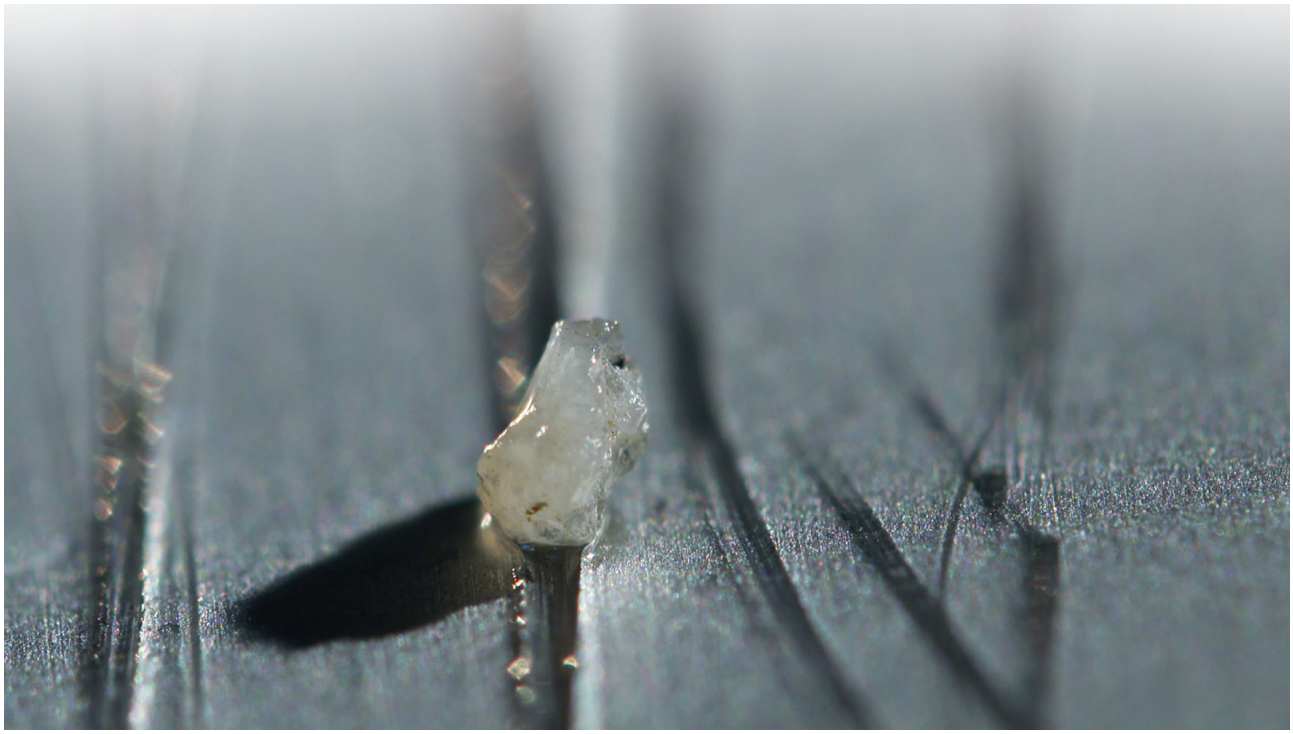


图 11 催化剂残留颗粒是非常坚硬的颗粒，能够划伤和切割金属。

2.3 馏分燃油重点关注点

关于船用燃油最大含硫量的 ISO 8217 标准重点关注的是在设计使用残渣燃油的发动机中使用低硫馏分燃油。馏分燃油的低粘度特性使得发动机制造商重新规定最低粘度和润滑能力的标准。到 2020 年全球含硫上限 0.50% 生效之时，低粘度的馏分燃油使用量会增加。

对柴油机的影响

在柴油机内燃烧馏分燃油会从几个方面极大地影响发动机喷射系统、泵和其他设备。喷射时的燃油粘度会影响燃油喷射部件的润滑能力，是第一个需要处理的问题。由于轻质燃油的喷射温度远低于重燃油的喷射温度，温度梯度产生第二个问题：温度骤变会引起喷射系统内发生热冲击。

为了解决这些问题以及维护喷射点的正确燃油参数，燃油调控装置能够以简单、安全的方式，通过控制系统内的温度梯度，管理燃油切换，并且能够在喷射时保持轻质燃油的合适温度。

燃油调控系统的需求

为了满足发动机制造商的要求，燃油调控系统必须能够：

- 控制重燃油高喷射温度到馏分燃油低喷射温度的转换，以便将温度梯度保持在发动机制造商建议的范围之内。燃油泵燃油入口的标准温度变化率为每分钟 2℃。
- 将馏分燃油的温度和粘度控制在发动机制造商建议的范围之内。

3 法规对船舶航行的影响

排放控制区（ECAs）的建立以及全球日益严格的排放标准规定对燃油应用提出了新的航行要求。

3.1 含硫限制的重要性

硫的氧化物对人类健康造成的负面影响是减少废气含硫量的主要驱动因素。船舶产生的空气污染导致每年约 50,000 人过早死亡。废气中的硫与空气发生反应形成的小颗粒，我们称为含硫酸烟雾。吸入人体后，这些小颗粒会通过肺部进入血液，引起肺部炎症，造成心血管疾病和心肺衰竭（普氏能源咨询，2016 年）。

3.2 国际海事组织《防止船舶污染国际公约》（IMO MARPOL）附录六

MARPOL 附录六关于硫排放的规定可以概括为两条规定:

- 第 14 条规定涵盖了硫的氧化物和颗粒物质。需要注意的是，这条规定不仅适用于新造船舶，也适应于标准发行日期之后航行的所有船舶。该条规定了船用燃油的含硫量，根据船载燃油量而定。排放控制区内外的含流量限制不尽相同，IMO 同意排放控制区需要更高级别的保护。
- 第 4 规定涵盖了同等设备，即船舶配备的装置（废气清洁系统）或船主采取的其他措施，确保在减少排放方面符合第 14 条规定的规定。

图 12 显示了对硫的氧化物和氮的氧化物排放量控制更为严格的当前排放控制区（2016 年），以及未来可能考虑列为排放控制区的地区。排放控制区内外的排放限值都在逐渐降低（图 13）。全球含硫上限 0.50% 规定将在 2020 年生效。

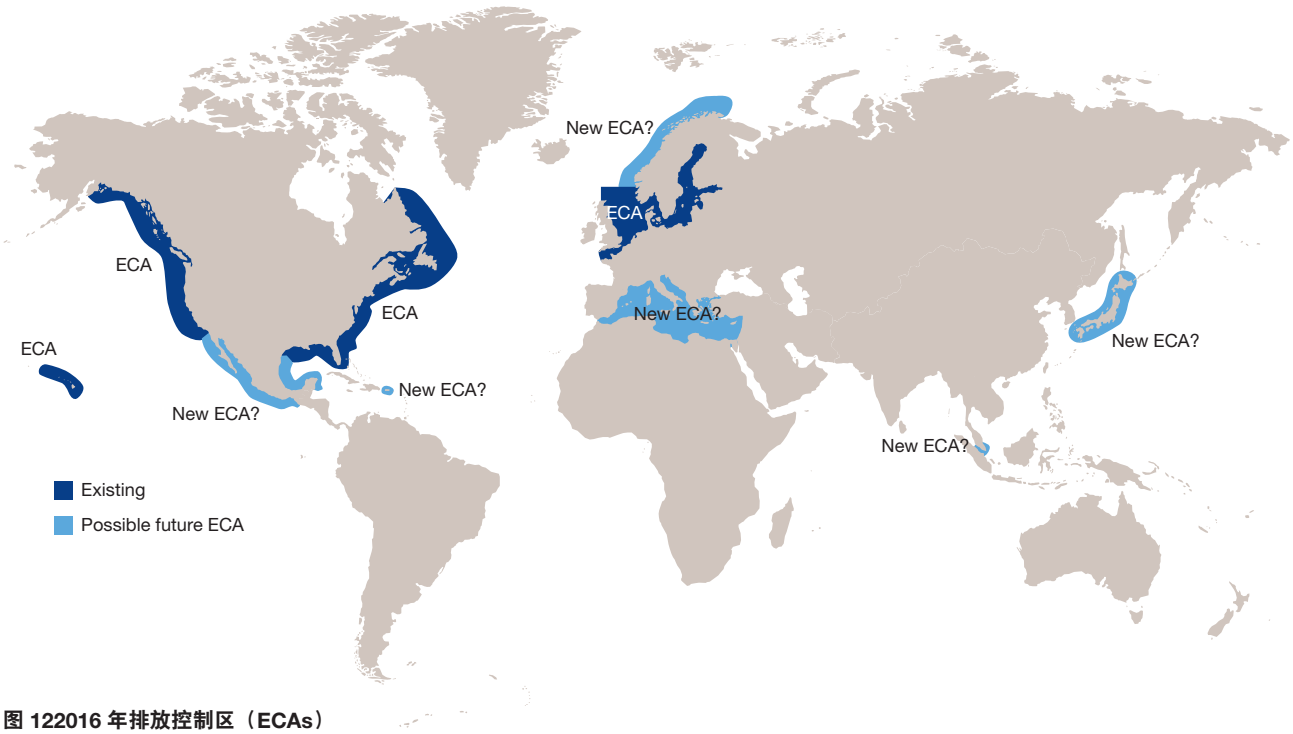


图 12 2016 年排放控制区（ECAs）
来源：国际独立油轮船东协会

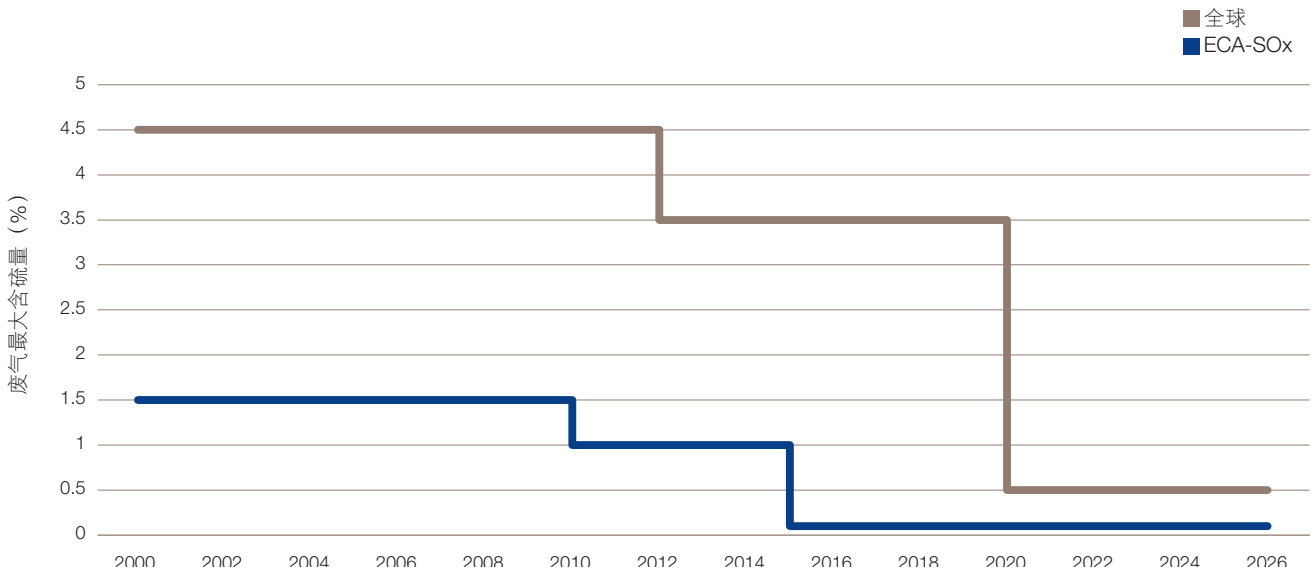


图 13 硫减排时间表

3.3 欧盟规定

为了在欧盟法律中落实 IMO MARPOL 附录六规定，欧盟最初制定了 1999/32/EC 指令，后来修改为 2005/33/EU 指令。然而，这项立法也包含了一些附加要求。值得注意的附加要求（所有限值以质量百分比表示）：

- 在欧盟领海、专属经济区和污染控制区（不包括排放控制区），客轮最大燃油含硫量为 1.50%，这包括抵达或驶离欧盟任何港口的定期航行的渡轮和邮轮。
- 自 2010 年 1 月 1 日起，停泊在欧盟港口的船舶必须使用最大含硫量不超过 0.10% 的燃油，但根据已发布的时间表在港口停泊时间不超过两小时的船舶除外。

欧盟议会指令 2009/30/EC 规定，自 2011 年 1 月 1 日起，内河船舶所用的燃油含硫量最大不超过 0.0010%（10mg/kg）。

欧盟立法 2012/33/EU 审查包括了最新版 MARPOL 附录六规定以及下列附加规定:

- 含硫量超过 3.50% 的燃油仅供配备经批准的闭环废气清洁系统的船舶（即不向船外排放洗涤水的船舶）的销售和使用。

关于这个问题的所有欧盟规定可在以下网站中查找:

http://eur-lex.europa.eu/

3.4 加利福尼亚硫排放规定

加州空气资源委员会（ARB）将距加州海岸线或加州南部的海峡群岛海岸线 24 海里的地区划为一个区，只允许使用最严级别最高含硫量的馏分燃油。自 2014 年 1 月 1 日起，最大含硫量为 0.10%。

加州空气资源委员会进行了日落复审，就是否允许使用超低含硫量燃油混合物和洗涤器进行了决议。其他排放控制区域也允许使用这些减硫燃油和技术，复审将评估这些燃油和技术是否达到目前加州远洋船舶燃油规定要求的排放结果。评估计划一直持续到 2018 年。登 录 www.arb.ca.gov/ports/marinevess/ogv.htm 网站，查看最新消息。

3.5 残渣燃油和馏分燃油之间的转换

由于大多数船舶采用重燃油（高硫燃油）作为燃油，除非配有经认可的等效方法（例如减硫技术等），很多船舶在驶入或驶离排放控制区时会进行燃油转换。自 2015 年以来，在驶入排放控制区之前，船舶必须将最大含硫量为 3.50% 的残渣燃油转换成最大含硫量为 0.10% 的馏分燃油。相反地，除非即将再次驶入排放控制区，否则在驶离排放控制区之后，通常会从馏分燃油转换回残渣燃油，以便降低燃油成本。这就是说，在驶入或驶离排放控制区边界之时，航行中一定会发生燃油转换。

大多数航行人员都有残渣燃油和馏分燃油之间相互转换的经验。可以使用燃油自动转换系统，但也可以手动航行。详细程序必须落实，并在船上适时记录，船员必须能够熟练航行。对所需航行掌握不熟悉可能导致部件损坏或发动机故障。对于转换程序的详细建议，应参考具体设备制造商的建议。

3.5.1 一般注意事项

为了避免混合兼容问题，建议不要将残渣燃油和馏分燃油混合物返回至馏分油沉淀舱或日用舱。

如果二冲程发动机需要长时间使用低硫燃油，很多发动机制造商建议从高 BN 型气缸油换成 40BN 或更低气缸油。还应考虑气缸油的供油率，必须遵守发动机制造商的建议。在使用低硫馏分燃油时，如果在高供油率的情况下，二冲程发动机使用高 BN 型气缸油会加速活塞顶沉淀，导致严重磨损。

燃油转换时，面临多个技术问题和挑战。包括:

- 温度梯度
- 粘度变化
- 不兼容
- 润滑性
- 冷流特性

3.5.2 温度梯度

为了确保燃油喷射设备正常工作，建议不要超过燃油转换的最大温度梯度。一般来说，发动机制造商建议的温度梯度为不超过 2℃ / 分钟。燃油温度快速变化将增加泵故障和泵卡死的可能性。

基于上述原因，燃油转换从开始到结束需要相当长的一段时间，有些时候仅仅是燃油温度变化就会超过 60 分钟。很多发动机制造商建议在尽可能减少时间的同时，提供进一步的保护。例如，在进行重燃油和馏分燃油或船用柴油之间的转换时，可以降低发动机负荷，从而减缓温度变化的速率。

3.5.3 粘度变化

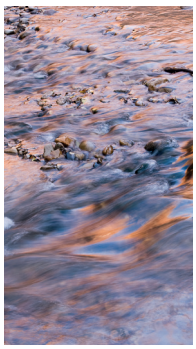
通常来说，尽管确保满足发动机要求是至关重要的，发动机燃油泵中燃油的最佳航行粘度是 10-20mm^2/s（cSt）。为了达到残渣燃油的最佳粘度，可能有必要将燃油加热超过 100°C。然而，馏分燃油的粘度明显低于残渣燃油的粘度，40°C 时通常为 2.0-11.0mm^2/s(cSt)。大部分馏分燃油不能加热，相反可能需要冷却或冷冻。

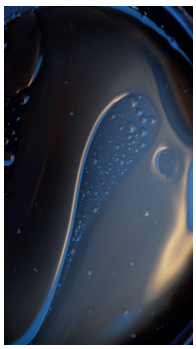
大多数设备制造商建议燃油泵入口的最低燃油粘度为 2.0-3.0mm^2/s（cSt）。粘度过低的燃油可能导致高负荷下作业时燃油泵出现严重泄漏和问题。如果燃油需求非常低且由于过多内部泵泄漏而导致需求进一步降低，尤其在发动机功率设置较低时，可能出现启动困难。由于降低了水力润滑油膜，粘度不足也可能导致燃油泵卡死和过早磨损。除了安装发动机的泵，还需要考虑燃油处理系统的泵航行。

为了满足设备制造商的最低要求，应使用粘度足够的馏分燃油。必要时，可以使用燃油冷却器或冷水机，防止燃油粘度过低。此外，尽早切断管道的蒸汽伴热系统有助于降低燃油转换时的燃油温度。

相反地，将馏分燃油转回残渣燃油时，确保燃油温度足够高是极其重要的，以便达到燃油泵入口所需的粘度要求。可以打开管道工程中的蒸汽伴热系统加速这个过程，但不得加热馏分燃油。

图 14（左图）使用不稳定燃油的离心机拆卸图





3.5.4 不兼容

如上所述，转换程序要求一定的充足时间，在此期间，两种不同类型的燃油会发生混合。残渣燃油和低硫馏分燃油之间的不兼容风险，高于混合不同类型残渣燃油产生的风险。加入馏分燃油可能导致残渣燃油出现沥青质，沉淀成为重质污泥。这可能导致过滤器堵塞，在极端情况下，还会引起发动机燃油不足，出现发动机故障。由于活塞和桶之间存在沉积物，还可能会出现喷射泵粘结。

兼容性测试可在船上装燃油时进行，或通过一个独立的实验室进行。

3.5.5 润滑性

润滑性是指馏分燃油可以润滑运转中不相关部件表面的特性，也称为边界润滑。含硫量低于 0.05% 的馏分燃油的润滑性过低。结果会卡死燃油泵。可通过使用添加剂提高较低的润滑性。

3.5.6 冷流特性

事实上，馏分燃油的特点就是粘度低。然而，他们的化学性质不尽相同，冷流特性的差异很大。低温下的粘度会影响泵送能力。

冷流特性可以采用下列几个方面进行衡量：

- 倾点：燃油可以流动的最低温度。
- 浊点：溶解颗粒沉淀使得燃油呈现云雾状的外观的温度。
- 冷滤点：燃油在特定条件下能够通过过滤器的最低温度。

馏分燃油的冷滤点特性主要取决于蜡含量和长石蜡烃链作为蜡晶体沉淀的能力。

在寒冷地区航行的船舶需要耐寒品质规格的馏分燃油，以便避免燃油贮存柜中出现蜡沉淀。建议在分离之前加热馏分燃油，以便避免处理系统出现蜡沉淀现象。

3.6 使用洗涤器替代更换燃油

洗涤器是一种可以减少硫的氧化物排放量的废气清洁系统。使用洗涤器（图 15）能使船主在排放控制区使用高硫重燃油代替低硫船用汽油的同时，满足 IMO 硫排放规定。这个方法通过了 IMO 法规的批准。然而，虽然美国海岸警卫队批准可以使用低硫馏分燃油，但直至 2016 年，仍在评估尚未批准使用洗涤器。

到 2020 年全球含硫上限 0.50% 生效之时，洗涤器会成为船主另外一项具有吸引力的选择，这些船主想要继续使用比较便宜的重燃油的同时也遵守法规要求。根据 DNVGL（2006），根据船型和贸易，对洗涤器的初始投资将在一到六年之内完成。

图 15 阿法拉伐 PureSOx 系统

4 面向未来的燃油处理方案

跟十年前相比，今日的船上燃油处理要求截然不同。单一燃油作业已被多种燃油作业所取代，并执行更严格的规范管理控制硫排放。这样的例子不胜枚举，当今的燃油处理系统必须适应当前和未来的条件要求。

4.1 阿法拉伐自适应燃油系统

燃油处理系统的现代方式尤其关注以下几点:

- 能源效率
- 燃油品质
- 环保合规
- 发动机保护

可以从六个不同的方面优化燃油处理:

- 燃油系统配置优化
- 设备优化
- 进料优化
- 系统监控
- 多种燃油管理
- 废弃燃油回收

阿法拉伐自适应燃油系统是一个能够使能源消耗最少，为催化剂残留颗粒提供最大保护的全面解决方案。这不是一个单一的产品，而是一个基于多个关键产品和阿法拉伐技术的全面系统解决方案。它利用减速航行协同效应和突破性技术，既提高了总体能源效率，也提高了总体分离效率。

下面是自适应燃油系统的简要概述。概括了燃油处理工艺各部分的不同目标、解决方案和结果。

4.1.1 燃油系统配置优化

采用多种燃油系统替代单一燃油处理系统时，需要特别考虑确保安全和合规航行。

4.1.2 设备优化

为了满足要求，有必要选用采用最新技术的设备。采用过时技术的设备在输出同样的性能时，经常会消耗更多的能源；然而，分离效率一般较差，过程控制不够精确。

表 2 燃油系统配置优化

总体目标	解决方案	结果	参考
燃油系统配置	燃油系统配置改善	• 燃油分离 • 降低风险	第 29 页，燃油系统设计

表 3 设备优化

总体目标	解决方案	结果	参考
设备优化	高速离心机 Alcap ™ 技术	• 测量出油口的含水量 • 提供灵活性 • 清洁密度可变的燃油	第 30 页，Alcap 技术
	FCM One	• 使得燃油精确匹配发动机规格 • 处理多种燃油 • 可以产生燃油混合物 • 处理多种燃油的转换问题	第 35 页，FCM One，燃油调控模块

4.1.3 进料优化

进料优化使得燃油进料速率匹配实际发动机负荷。从而提高了分离效率，降低了能源消耗。

4.1.4 系统监控和自动化

合理设计的燃油处理装置监控系统可以预防不利影响，为可靠航行提供有价值的信息。

4.1.5 多种燃油管理

多种燃油管理能够精确控制燃油混合和转换，并记录燃油混合和转换的相关数据。这确保了发动机安全运转，防止出现不合规现象。

4.1.6 废弃燃油回收

从废弃燃油中回收燃油有利于大量节约燃油总成本以及废弃燃油和固体处理的成本。船舶燃油供给中的2%通常被丢弃，这些其实可以回收再利用。

表 4 进料优化

总体目标	解决方案	结果	参考
燃油流量匹配减速航行 提高清洁效率	FlowSync ™使用 VFD 控制，调节泵流量，匹配实际发动机负荷	• 通过泵、加热器和离心机，减低能源消耗 • 由于燃油在离心机内停留时间更长，可以更高效分离和清除颗粒	第 28 页、第 31 页、第 32 页，高温分离
	高温 分离	• 减少热量损失 • 有效利用热能 • 维持清洗效率 • 维持生产能力	第 32 页，高温分离

表 5 系统监控和自动化

总体目标	解决方案	结果	参考
避免催化剂残留颗粒磨损 为燃油应用提供可靠评估 在损坏和更大的问题出现之前发现问题 确保用户使用方便	Catguard: 催化剂残留颗粒在线监测	• 在燃油喷射入发动机之前，精确测量处理系统中的催化剂残留颗粒比例 • 能够立即采取纠正措施，找到问题的根本原因 • 能使船员优化清洁效率	第 31 页，FlowSync——能源效率和流量优化
	FCM One: 燃油 消耗 监测	• 精确测量燃油用量 • 为燃油处理系统优化提供数据 • 在早期发现燃油损耗	第 35 页和第 36 页，FCM One——燃油调控模块和 Moatti 燃油过滤器

表 6 多种燃油管理

总体目标	解决方案	结果	参考
保障燃油转换 降低馏分燃油消耗 确保遵从排放控制区法规	ACS: 转换 + 混合控制	• 降低馏分燃油消耗 • 优化燃油组分 • 确保安全转换 • 精确匹配硫排放目标	第 33 页，催化剂残留颗粒在线监测
	FCM One: 电子版燃油记录薄	• 记录转换 • 自动提供时间标识和 GPS 数据 • 通过打印输出或安全数字导出记录活动	第 34 页，燃油自动转换系统（ACS）

表 7 废弃燃油回收

总体目标	解决方案	结果	参考
按照 MEPC.1/Circ.642，回收废弃燃油中的重燃油馏分 降低废弃燃油数量和相关处理成本	PureDry: 废弃燃油回收	• 将废弃燃油回收利用 • 减少 98% 的废弃燃油处理、储存和沉降量	第 32 页，PureDry——能源效率和燃油回收

4.2 航行参数

多种航行参数影响分离效率。这些参数包括控制燃油粘度和密度的流量和温度参数。

持续流量控制是一种保证优化分离性能的简单、有效方式。由于船舶并不是经常以最大持续额定功率和设计速度航行，因此有机会降低流速，提高分离效率。建议航行人员使用离心机的全部装机容量，同时并行运转备用离心机。有时应使用安装的人工流量控制系统。

4.2.1 减速航行有利于更好的分离

减速航行是指以明显慢于最大船速的速度行驶越洋货船，尤其是集装箱船。通常情况下，一台燃油离心机的设计值为 100% 发动机燃油消耗加上不同幅度的安全系数。然而，如今船舶很少达到发动机 100% 负荷。减缓通过离心机的流量，降低发动机燃油消耗，使得燃油在离心机停留的时间更长，分离的时间也更长，因此提高了离心机的效率。因此，通过实施自动流量控制，降低实际燃油消耗，极有可能提高分离效率。

4.2.2 离心机流量控制

控制通过分离机的流量，对分离结果来说至关重要。为了保持最高合理分离效率，应使得通过离心机的流量尽量较低且保持稳定。可通过两种方式控制流速:

固定流量控制

在固定流量控制中，在离心机之前安装一个流量调节阀。节流时，压力超过弹簧阀规定的压力值，阀门打开，燃油送回沉淀舱。这个解决方案很简单，但不能获得最大能源效率，因为部分燃油会被泵送至沉淀舱。

流量调节

使用变频驱动系统（VFD）控制输油泵电机的速度，能使进料率匹配实际发动机负荷。与固定流量控制节流不同，使用变速流可以降低输油泵和离心机的能源使用量。以最大持续额定出力 75% 运转的发动机使用变速流可以降低流量，从而提高分离效率（图 16）。

FlowSync 对分离效率的影响

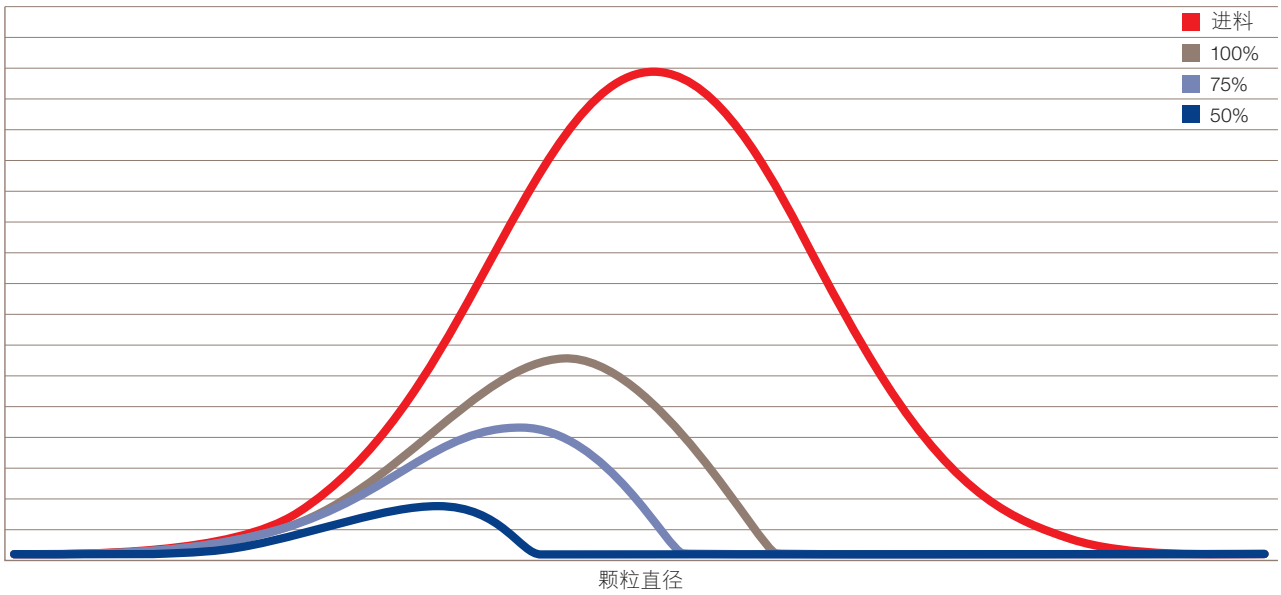


图 16 当流量从最大推荐容量的 100% 降至 75% 和 50% 时，分离后颗粒浓度反映出的分离效率。红色曲线表示离心机入口处的颗粒浓度。

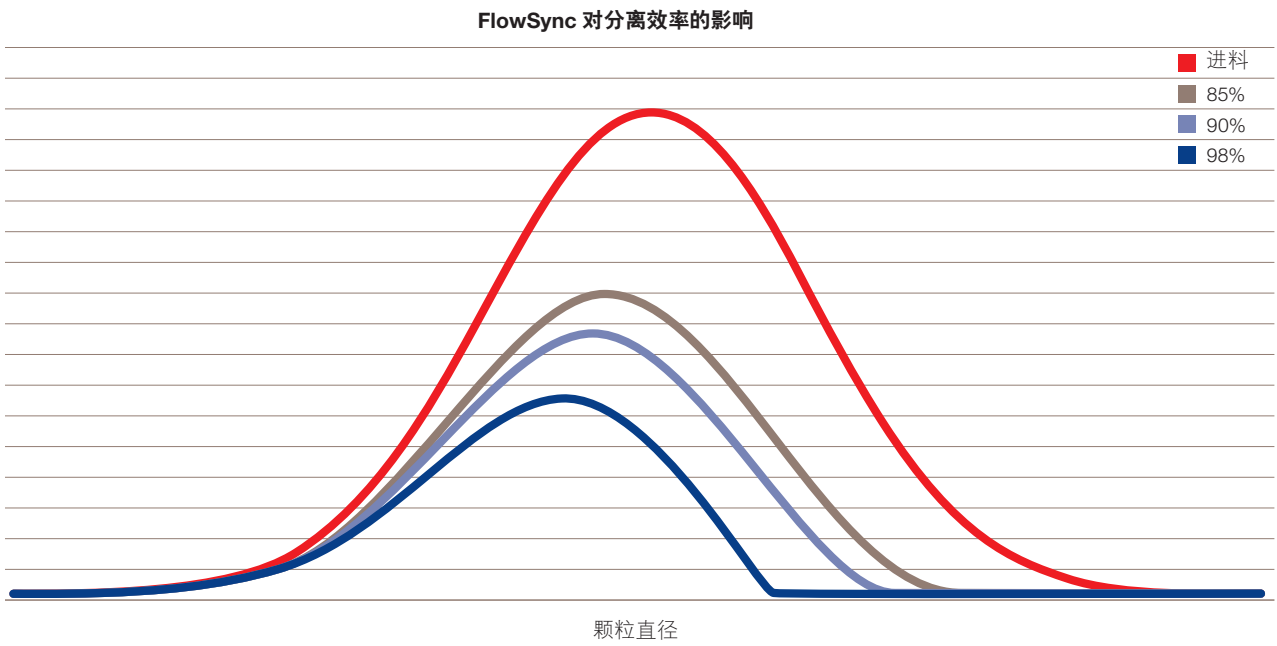


图 17 不同温度下的分离效率。红色曲线表示进料的颗粒浓度，其他颜色的曲线表示分离温度为 85℃、90℃和 98℃下离心机出口的颗粒浓度。

4.2.3 温度

另一个可以提高分离效率的可改参数是燃油粘度。随着燃油温度上升，燃油的粘度下降。如果温度降至 90℃，流量必须降至额定流量的 72%，以便维持 98℃时的同水平分离效率。在 85℃时，流量需要降到 50%。图 17 显示了降低温度且保持流速时分离效率的变化。

由于可能通过提高分离温度来提高效率，在高于 98℃的温度下，考虑燃油的分离效率也许看似自然。然而，需要注意的是，当前 98℃的温度限值设置，是出于安全因素考虑。必须提到的一点是，如今船上离心机是按照开放大气系统而设计。

假定可以安全处理法规问题，分离温度达到 115℃时，在保持性能不变的情况下，流量会增加当前水平的 80%。换句话说，在上升温度的情况下维持流量，可以提高分离效率。

4.3 燃油系统的设计

25 年多来，海运业的船上系统都采用重燃油。投入额外的努力，使柴油发电机能够采用重燃油运转。

这降低了成本，同事简化了燃油系统设置。由于船舶在排放控制区内无法使用重燃油，环境法规对燃油系统的设计和设置提出了额外的要求。2020 年全球含硫上限 0.50% 的规定生效之时，预计船用柴油和其他馏分燃油和残渣燃油的混合物的使用量会增加。然而，排放控制区内，仍然可以使用船用汽油等纯馏分燃油。

4.3.1 单一燃油系统

对于采用单一燃油的船舶燃油处理系统，建议使用两台离心机（图 18）。船舶开足马力行驶时，一台离心机通常能够供应日用舱；另一台离心机通常是备用状态。尽管与多种燃油系统相比，这个系统简单明了，但是灵活性不足。

4.3.2 多种燃油系统

为响应 2015 年排放控制区含硫上限的规定，很多船舶必须在船上做出改变，以处理多种等级的燃油。供给箱后的重燃油、超低硫燃油和馏分燃油的系统需要被明显区分开，以便降低兼容性和合规性等的燃油问题相关风险（图 19）。如果排放控制区所用燃油的含硫量非常接近含硫量限值，即使很小数量的重燃油也会导致不合规定。系统分离至关重要，以便降低燃油兼容性和不合规性的风险。

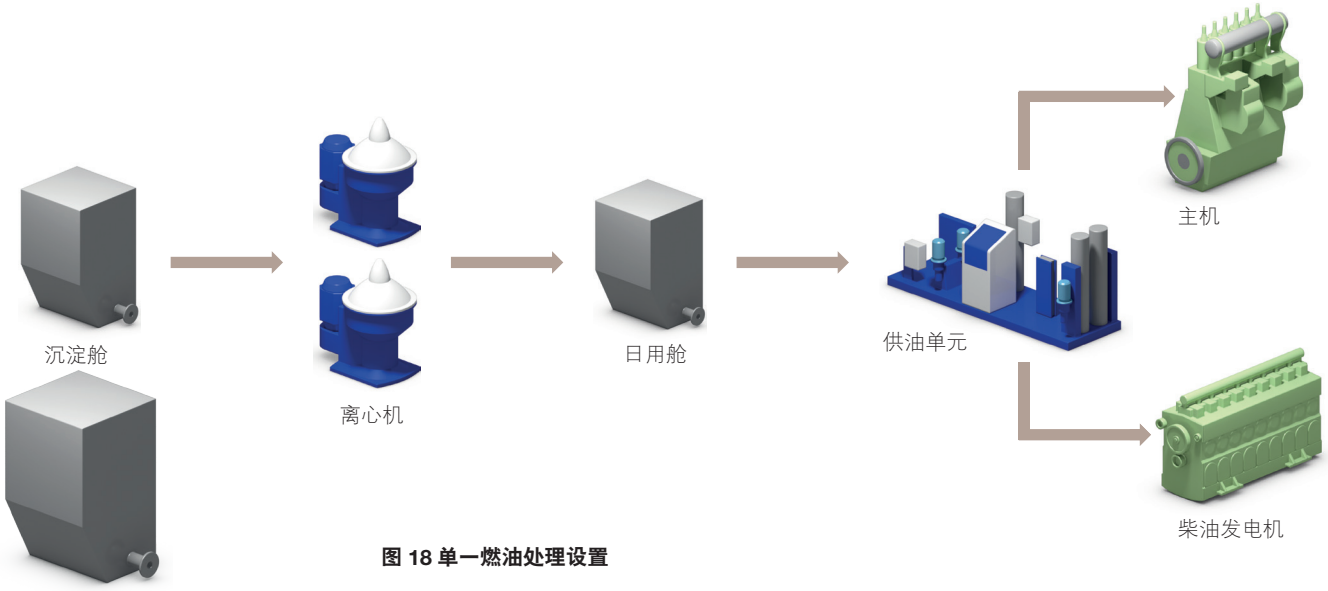


图 18 单一燃油处理设置

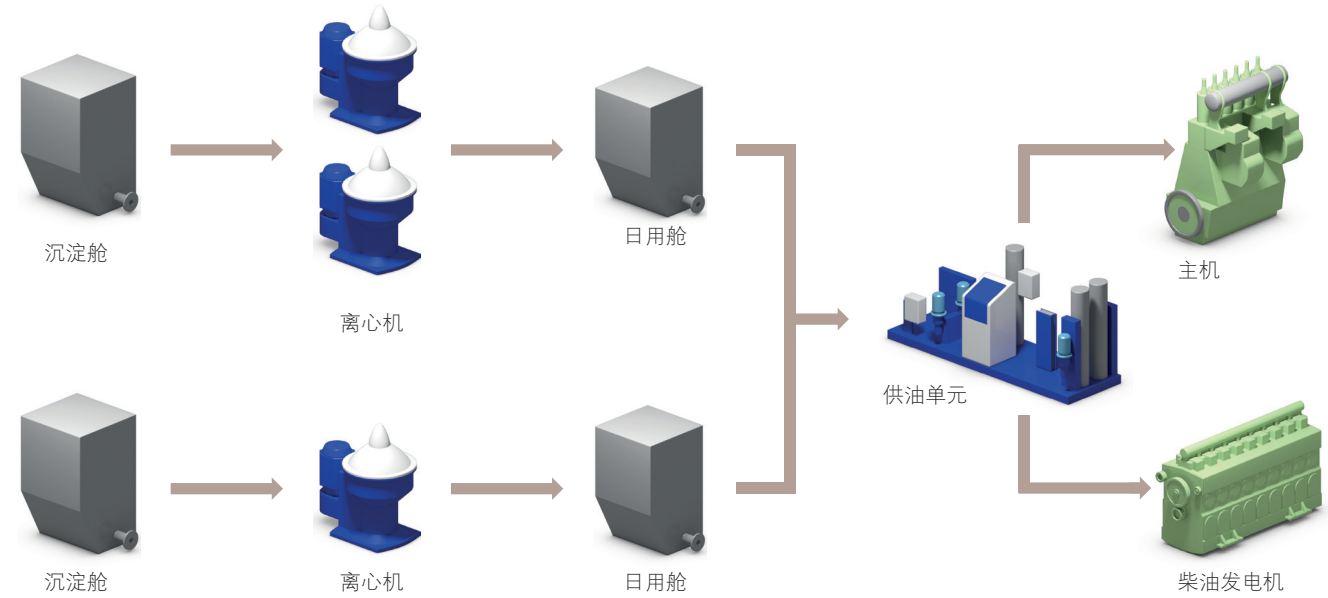


图 19 使用多种燃油船舶的燃油系统配置

4.3.3 重燃油离心机不能用来清洁船用柴油 / 船用汽油的原因

使用现有重燃油离心机清洁船用柴油会带来一些问题。将重燃油转换成船用柴油时，管道、泵和加热器中的燃油含硫量较高。

无意中混合高含硫量燃油和船用柴油，即使是少量混合，也会产生不合规燃油，造成大量的问题。为了防止出现这些问题，必须采用流动的船用柴油通过管道清洗系统，直至系统不含高含硫量的燃油为止。这同样会带来一些问题：

- 稳定性：不建议把混合船用柴油 / 船用汽油混合进重燃油之中。如果重燃油不加热，产生大量难以清理的油泥，这可能引起多个问题，在有些情况下，可能阻塞整个燃油系统。
- 不能确定是否符合 MARPOL 规定：在不取样并把样品送至实验室分析的情况下，无法确定重燃油离心机处理的船用柴油是否符合 MARPOL 含硫量限值以及是否能送至油箱。此类分析花费时间，实际上大多数航行人员并不会选择。

4.3.4 燃油储存舱的设计

倾斜的储油箱底有利于催化剂残留颗粒的收集和清除，防止催化剂残留颗粒在恶劣天气下被搅拌。在发动机负荷降低的情况下，燃油通过供给箱和沉降槽之间的溢流管道回流至沉降槽。供给箱底的溢流管能使含有最大浓度催化剂残留颗粒的燃油远离发动机。

4.3.5 燃油转换

排放控制区的燃油转换是多种燃油管理概念燃油转换和混合控制中一个必不可少的部分。靠近发动机设置一个开关以确保安全，从重燃油切换至馏分燃油时，尽量减少流入管道的高含硫量燃油数量。使用监控系统的 GPS 数据，确保在进入排放控制区之前完成燃油转换，更有利于遵守硫排放的规定。

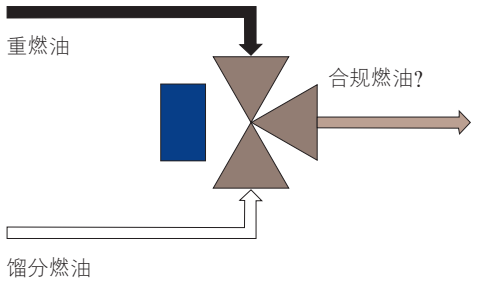


图 20 排放控制区燃油转换

图 21 采用 Alcap ™技术的分离系统

4.4 技术方案

阿法拉伐产品组合包括可用于整个燃油系统的高效燃油处理产品。当前航行的问题是，即使船舶减速航行，也经常在满负荷工况下处理燃油。通过互连燃油处理线上的单个设备，使其适应实际发动机负荷，可以更加高效的方式完成燃油处理工艺。中等船速时，降低通过离心机的燃油流量，不仅可以节约能源，还能够降低催化剂残留颗粒进入发动机的风险。本节详述了阿法拉伐技术以及如何采用智能航行将连接技术，从而提高航行性能。

4.4.1 Alcap ™技术

在 20 世纪 70 年代早期的石油危机中，炼油厂被迫从原油中去除日益增多的轻质馏分，以提高盈利率。为了实现这个目标，他们开发了多种不同的蒸馏方法，导致重燃油品质降低，密度过高，采用传统的净化器无法进行处理。燃油密度和粘度都过高，使得离心机制造厂被迫研发更好的分离技术。旧式传统阿法拉伐离心机的密度限值为 991kg/m^3，粘度限值为 600cSt；然而，新的燃油密度值为 1,000kg/m^3 或更高。阿法拉伐被迫重新设计离心机，以便处理更高密度的燃油，Alcap 应运而生。在 Alcap 技术中，新的离心机密度限值增加至 1,010kg/m^3，粘度限值设为 700cSt。

离心机的设计

Alcap 离心机实际上是一种澄清机，也就是说由于出水口封闭，除水能力非常低。为了解决这个问题，在出水口安装了一个排水阀取代澄清盘，为了在需要时进行排水创造了可能。

从实质上说，Alcap 离心机基本可以当作澄清机使用，但由于可以打开出水口几秒钟，也能够将积水排出。

由于分离筒明显小于类似离心机的分离筒，Alcap 离心机更加节能高效。分离片设计用于处理多种密度的燃油。这使得 Alcap 离心机更加灵活，也能够在无需变更重力环的情况下自动处理不同密度的燃油。

控制排水阀

需要时，排水阀打开排出积水。何时应该打开排水阀排水，需要监控干净出油口的总流量。一旦检测到水位上涨，控制装置根据具体应用，启动排水或泄水。水传感器通过测量出水口燃油电导率，监控燃油的含水量。从技术上说，传感器充当电容器的作用。电容随着液体的电容率而变化，水和燃油的电容率差别巨大。因此，电导率的波动可以敏感测量含水量的变化。可以监测出自由水和乳化水的污染。监测值越高，说明燃油所含水量也越多。燃油的电容率约为 4-6，而水的电容率约为 90-95。这意味着即使是很少量的水，也会导致电导率的读数大幅上升，从而显示燃油中的水含量。

工艺

Alcap 是目前唯一一项能够持续测量干净出油口含水量的分离技术。根据测量值自动调整离心机分离筒中的油 / 水界面。这项技术能够在不改变重力环的情况下分离最大密度为 1,010kg/m^3 的燃油，而对于传统分离机，则需要改变重力环。

油耗损失可以忽略不计。从技术上说，这是因为在进油口关闭时，在离心机排水之前，增加分离筒的排放水，将燃油向分离片推动。这个过程使得排水时燃油损耗量最低。

4.4.2 FlowSync ™ ——能源效率和流量优化

目前离心机的进料率随时保持最大容量。在船舶减速航行时，这意味着需要离心机处理的燃油量大于供给箱输送给发动机的燃油量。因此，燃油循环非常重要。

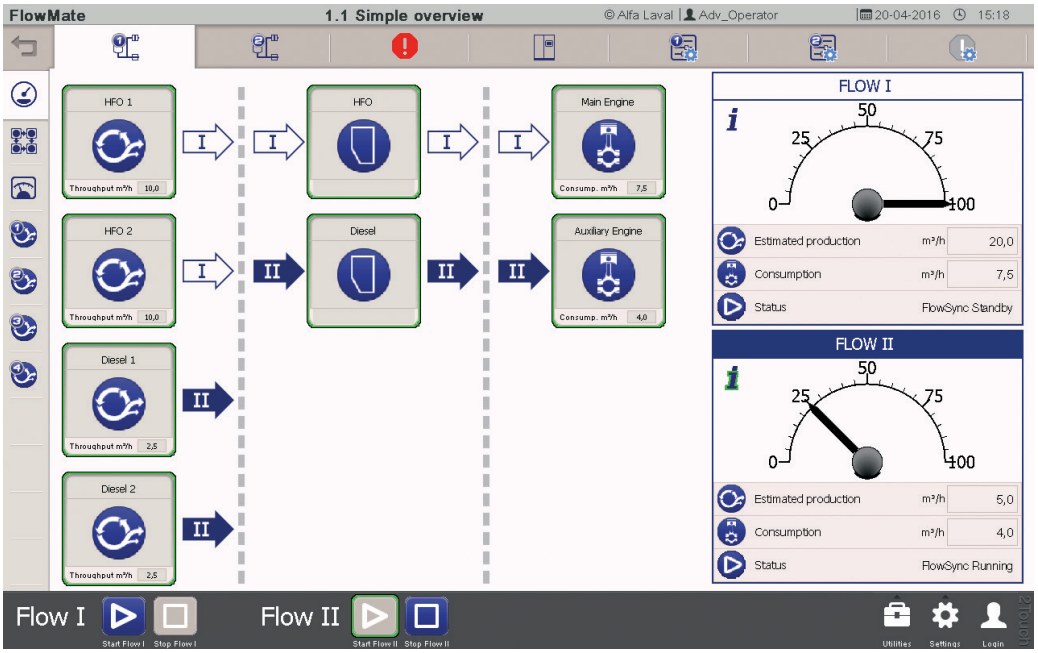
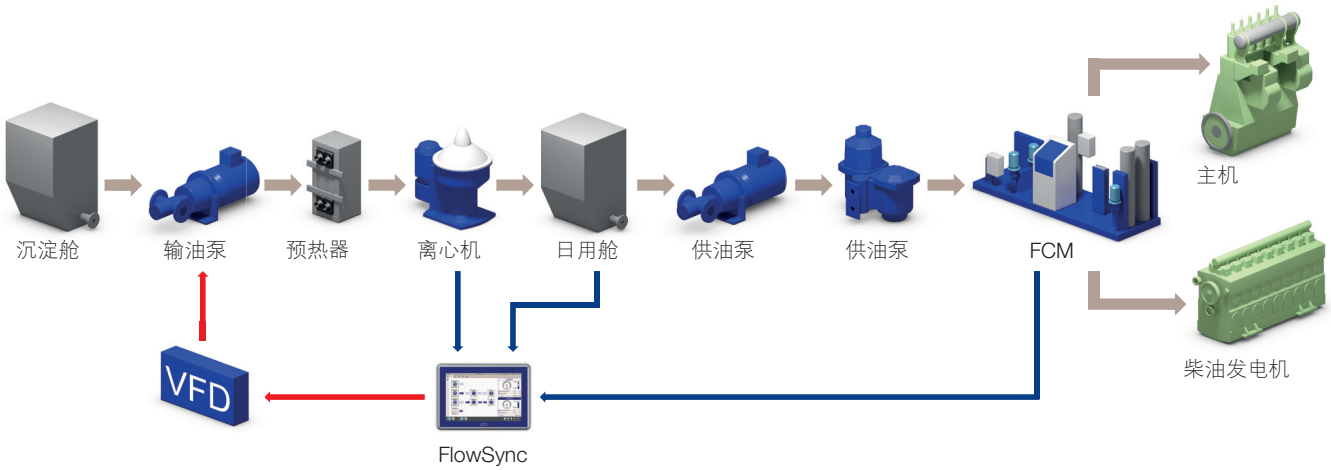


图 22 FlowSync 用户界面（总览标签）

图 23 FlowSync 通过匹配输油泵速度和实际发动机负荷控制流量。



将 FlowSync 引入燃油管路系统能使离心机燃油供给速度匹配实际发动机负荷。在降低离心机燃油供给速度时，能够更有效的分离，输油泵和离心机消耗的能源也更少。由于燃油停留在分离筒的时间更长，能够从燃油中除去沉降速度较慢的颗粒，因此提高了分离效率。

4.4.3 高温分离

燃油粘度很大程度上取决于温度。温度越高，粘度越低；粘度越低，分离效率越高。因此需要尽可能提高离心机液体的温度。通常情况下，将重燃油加热至 98℃防止水沸腾。分离筒内压力防止水蒸发，但在泄水时可能出现严重后果。将 +100℃水恢复到常压就会立即沸腾，导致离心机支架内的压力上升。

增加温度很有可能可以提高分离效率。将温度提高到 115℃，与第 27 页“航行参数”相同的分离筒的分离效率增加 80%。

需要注意的是，馏分燃油的闪点比重燃油的闪点低。因此，过多提高温度会形成爆炸性的大气环境。一般说来，馏分燃油的粘度比重燃油低，因此不再需要进行高温分离。

4.4.4 PureDry——能源效率和燃油回收

燃油储运和处理期间，会损耗一些燃油。根据经验，燃油损耗预计为船舱燃油消耗量的 2%。可回收燃油来源包括:

- 自动燃油过滤器反冲洗（图 24）
- 燃油沉淀舱和日用舱的排水管、舱口围板以及油盘（图 25）
- 喷油泵
- 锅炉燃烧器泄漏
- 输油泵等下方的积油盘
- 管道泄漏
- 燃油溢流
- 燃油净化机
- 燃油净化机

图 24 自动燃油过滤器

图 25 供给箱排水管

图 26 阿法拉伐 PureDry 系统

为了有效地回收燃油，必须将上述回收来源收集到的废弃燃油置于单独的油箱之中，不能与润滑油、液压油以及不能作为回收燃油使用的其他油类的泄漏物混合。阿法拉伐 PureDry 系统在油箱内处理废弃燃油，持续分离水和固体物质，回收可重复使用的燃油。产出的流体包括:

- 含油量 <1,000ppm 的水
- 含水量 <5% 的燃油
- 超干固体物质（24 小时产生 5-15kg 超干固体物质）

回收的可重复使用的燃油送回沉淀舱。分离出的水送至舱底水舱进行进一步处理。固体物质可沉淀为干废料，采用处理油抹布和用过滤器滤芯的相同方式处理。

4.4.5 催化剂残留颗粒在线监测

Catguard（图 28 和图 29）是一种燃油清洁工艺所用的催化剂残留颗粒在线监测技术方案。它是一种额外保护，如果检测到喷入发动机的燃油中，催化剂残留颗粒比例含量过高，会发出信号警报。

Catguard 可自动测量不同取样点的催化剂残留颗粒的比例含量。如果发动机进口达到预设报警限值，它有可能会立即采取应急措施，转到使用备用供给箱提供的更清洁的燃油。更重要的是，它可能分析催化剂残留颗粒比例升高的根本原因，采取应对措施，防止再次出现类似情况。

如上所述，催化剂残留颗粒的密度高于燃油的密度，会沉到舱底。

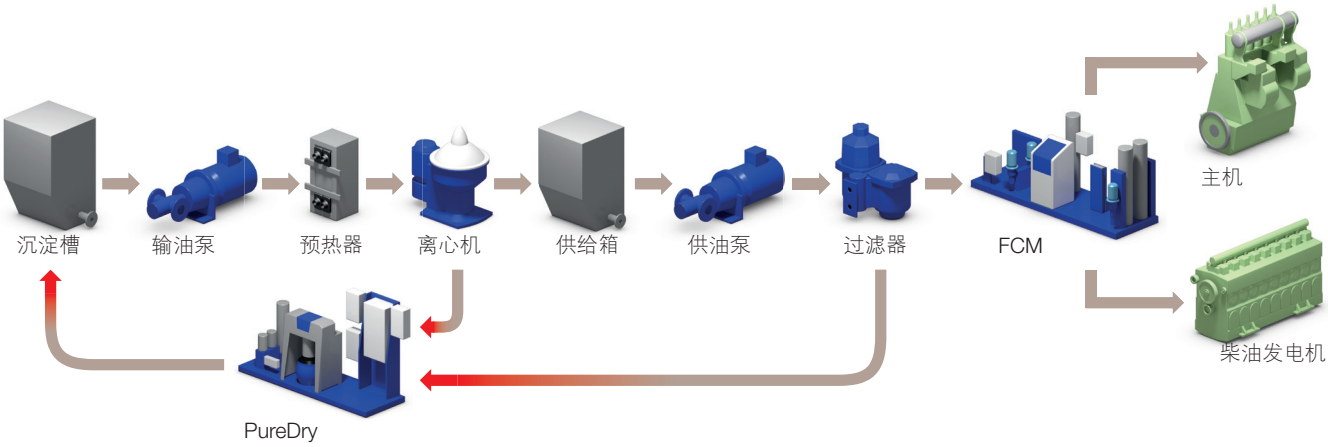


图 27 PureDry 回收废弃燃油并将其分离成为可重复使用的燃油、水和超干固体物质。可重复使用的燃油被泵送回沉降槽。

图 28 Catguard 图片由 NanoNord 提供。

图 30 阿法拉伐燃油自动转换系统

在巨浪汹涌的海面，累积的催化剂残留颗粒会被搅拌，油箱出口的催化剂残留颗粒浓度会突然上升。

为了解决这个问题，在测量装置提示油箱出口处（离心机入口或发动机入口）催化剂残留颗粒比例含量提高时，及时清理油舱是极其重要的。

此外，如果测量设备也显示离心机催化剂残留颗粒去除率过低，发动机入口处的催化剂残留颗粒比例含量也会上升。去除率过低的根本原因通常包括:

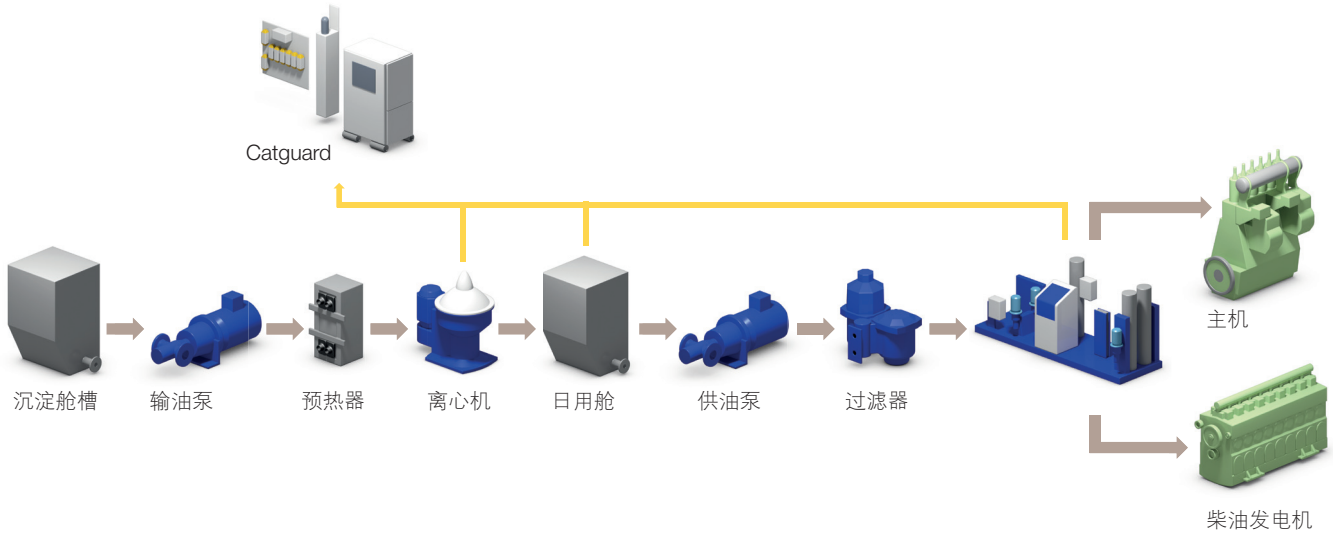
- 燃油粘度高于预期;
- 燃油催化剂残留颗粒尺寸低于平均水平;
- 离心机需要维护;
- 上述几种原因的组合

安装 Catguard 后，船员可以按照分离工艺，作出必要的修正，确保送进发动机的燃油清洁。

4.4.6 ACS——燃油自动转换系统

在柴油机内燃烧馏分燃油会从几个方面极大地影响发动机喷射系统、泵和其他设备。喷射时的燃油粘度，会影响燃油喷射部件的润滑能力，是第一个需要处理的问题。由于轻质燃油的喷射温度远低于重燃油的喷射温度，温度梯度产生第二个问题：温度骤变会引起喷射系统内发生热冲击。

为了解决这些问题以及维护喷射点的正确燃油参数，燃油运输装置能够以简单、安全的方式，通过控制系统内的温度斜坡，管理燃油转换，并且能够在喷射点保持轻质燃油的合适温度。



阿法拉伐燃油自动转换系统（ACS）是一个可靠的全自动系统，能够促进不同品质的燃油转换，同时保持发动机制造商设置的燃油粘度限值（图 30）。作为燃油增压器高压段的组成结构，ACS 使得加热器与一个平行的控制系统相结合。

ACS 能够:

- 控制重燃油高喷射温度到馏分燃油低喷射温度的转换，以便将温度梯度保持在发动机制造商推荐的限制范围之内。
- 将馏分燃油的温度和粘度控制在发动机制造商设定的限制范围之内。

ACS 可与阿法拉伐 FCM 或其他燃油增压系统配合使用，由于配置，ACS 也可作为改造系统安装。

4.4.7 FCM One——燃油调控模块

燃油调控是由增压系统对燃油进行的处理过程，以使燃油的清洁度、压力、温度、粘度和流速符合柴油机制造商的规定。这些参数对发动机燃烧性能来说是至关重要的。这使得参数合规成为能源效率和减少排放的一个重要部分。

当前，燃油调控不仅仅涉及重燃油，特别是船用装置的燃油。排放法规强迫船主使用更轻质的、更为昂贵的燃油和馏分燃油，而燃油价格的因素却使船主更多依赖残渣燃油。大多数船舶目前采用两种或以上的燃油，这就提出了燃油转换的航行和安全问题。

不同船舶采用不同的方式应对挑战；有些甚至在船上混合燃油。因此，尽管一些船舶具有相同的发动机规格，但其增压系统的要求却不尽相同。

阿法拉伐 FCM One 是原始阿法拉伐燃油调控模块的升级版，提供了新的功能（图 31）。除了能够调控燃油精确匹配发动机规格之外，FCM One 可以配置处理多种燃油，生成混合燃油，并管理燃油之间的自动转换。

4.4.8 电子版燃油记录薄，确保合规

为了满足 IMO 的环保法规要求，通过设计带有自动监控和记录功能的指定系统，满足加州空气资源委员会和欧盟排硫指令。但是除了技术方案以外，对法规的熟悉以及了解如何在特定条件下进行航行也同样重要。例如，熟悉检查标准、不合规后果以及技术故障对不合规的影响是很重要的。表 8 列出的技术方案能够帮助船主和航行人员避免因为不合规而受到的处罚。

图 31 阿法拉伐 FCM One

表 8 电子版燃油记录薄的输入数据

混合	转换	燃油仓信息	GPS 信号
% 燃油 1	位置 CV1	燃油供油通知参考	纬度
% 燃油 2	位置 CV2	燃油等级	经度
含硫量	含硫量	含硫量	协调世界时 / 格林威治时间（UTC/GMT）
燃油消耗量	粘度	分析报告参考	
粘度	温度	MARPOL 样品封箱号	
温度		供应燃油数量	

电子版燃油记录薄（eFRB）

FCM One 提供了一个安全的数字记录薄，船主可以方便记录、展示其是否遵守法规，可以生成数字文件或打印文件。[2]

4.4.9 Moatti 燃油过滤器——发动机保护

一台自动过滤器安装在系统末端，截取、清除进入发动机的颗粒和杂质。为了最好的保护发动机，过滤器应尽量靠近发动机安装。过滤器筛网尺寸按照柴油机制造商的要求决定。通常情况下，自动过滤器与手动旁路过滤器平行放置。

[2] 正在做船级社认证。

阿法拉伐 Moatti 燃油过滤器能够持续自动反冲洗，过滤的燃油驱动反冲洗过程的进行（图 32）。在系统中再循环之前，通过再过滤清洗反冲洗燃油。

4.4.10 2Touch——监控燃油清洁

为了优化燃油清洁设备，采用最新燃油清洁技术和燃油清洁知识是极其重要的。目前的信息技术为优化装置的能源效率和燃油品质性能提供了良机。举例来说，阿法拉伐2Touch HMI与控制系统一同监控分离工艺。

阿法拉伐 2Touch HMI 采用彩色触摸屏面板（图 33）。用来输入系统配置数据，调整、校对系统部件，注册警报，提供系统技术诊断和工艺优化所需的参数值处理方式，存储趋势和方法，并提供多种功能。

图 32 阿法拉伐 Moatti 燃油过滤器

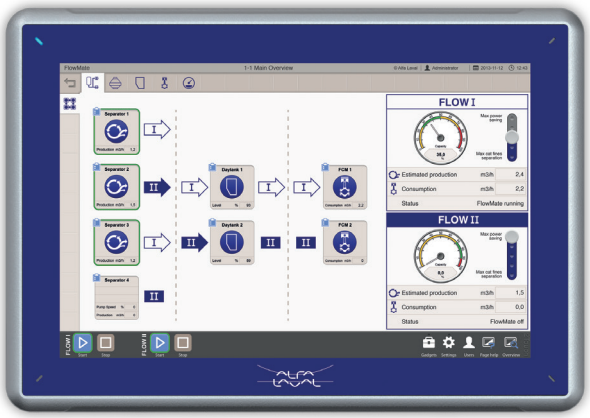


图 33 阿法拉伐 2Touch HMI

4.5 自适应燃油系统

自适应燃油系统的概念是将燃油处理链上的所有单独部件组合在一起进行优化，以便降低燃油消耗，提高效率，同时提高航行安全性。

燃油处理系统的核心是 Alcap ™离心机，可以十分灵活处理不同密度的燃油。由于重燃油的密度变化显著，结合不同低硫混合燃油，保持不同燃油良好的分离效率是极其重要的。

如果发动机不是处于满负荷的工况下，这是经常发生的情况，FlowSync 降低了通过离心机的燃油流量，并将其与实际发动机负荷匹配。在这种方式下，由于燃油停留在分离筒的时间更长，可以降低能源消耗，提高离心机的效率。FlowSync 确保供给箱经常装满并有少量燃油溢流再循环。

FCM One作为增压装置，确保燃油的温度、粘度、压力、流量和清洁度满足最佳发动机效率的规定范围。模块还可以处理多种不同类型燃油之间的转换，例如，在驶入或驶离排放控制区进行燃油转换。

在燃油进入发动机之前，通过燃油过滤器。Moatti 过滤器是一个自动反冲洗系统，保护发动机免受灰份和其他大粒固体物质的损害。颗粒在过滤器底部被集中成油渣排出。

PureDry 系统将处理离心机、过滤器、供给箱排水管以及其他来源排出的油渣。这个三相系统将油从水中分离开，并在装置底部生成超干固体物质。回收的油相随后再循环进入沉降槽，再次进行燃油处理工艺。

Catguard 模块作为额外的保护装置，在燃油处理链不同的位置点监控催化剂残留颗粒的比例含量。如果出现暴风雨天气，湍流会使得供给箱中大浓度的沉降颗粒被搅动，从而进入发动机。在此情况下，该系统可切换到另一种更加清洁的燃油。

整个自适应燃油系统的可能配置如图 34 所示。

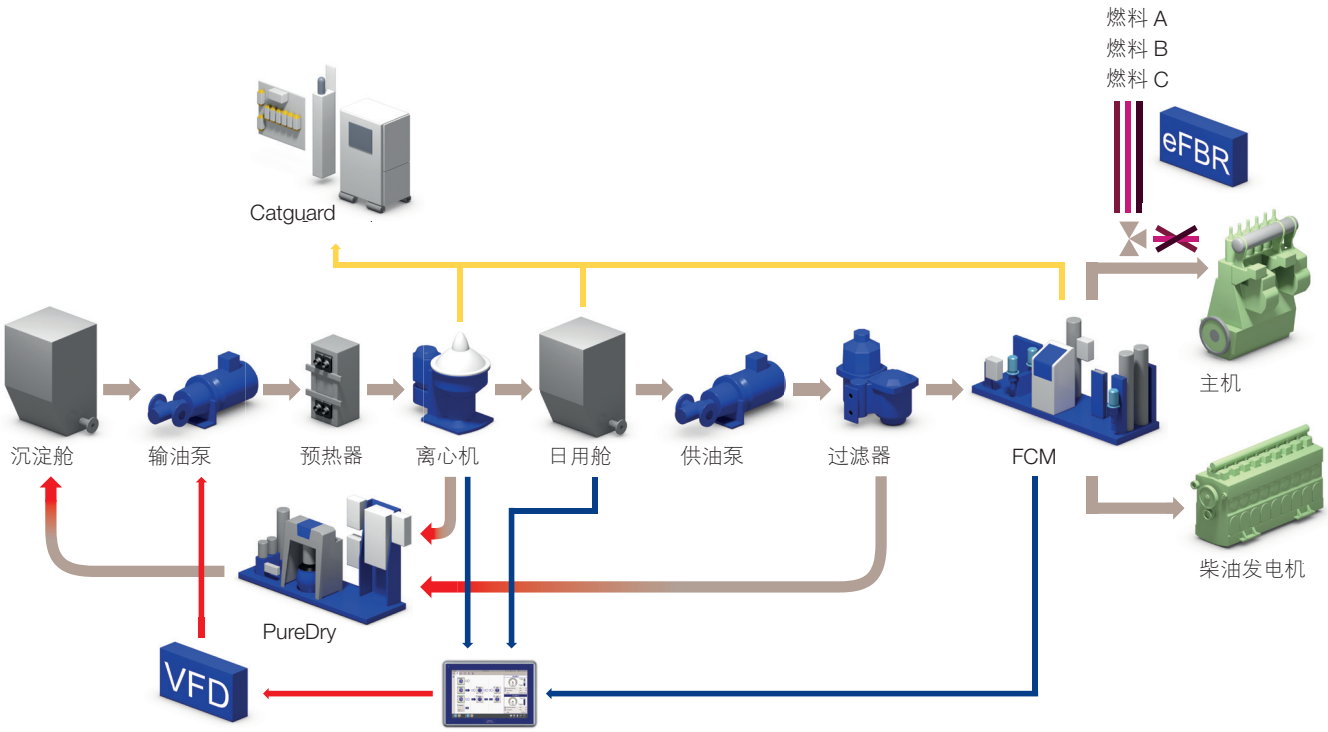


图 34 阿法拉伐自适应燃油系统的典型配置

5 首字母缩写词

首字母缩写	说明
ACS	燃油自动转换系统
ARA	安特卫普 - 鹿特丹 - 阿姆斯特丹
(C)ARB	（加州）空气资源委员会
CFR	认定流量
CIMAC	国际内燃机委员会
ECA	排放控制区
eFRB	电子版燃油记录薄
FAME	脂肪酸甲酯（生物柴油）
FCM	燃油调控模块
HDME	排放控制区船用重质馏分燃油
HFO	重燃油
HMI	人机界面
IMO	国际海事组织
ISO	国际标准化组织
MCR	最大持续额定出力
MDO	船用柴油，馏分燃油和残渣燃油的混合
MEP	平均有效压力
MGO	船用汽油，馏分燃油，几乎不含硫
MRC	最大推荐容量
VFD	变频驱动

ALFA LAVAL
FUEL
LINE

参考文献

1. CIMAC“使用低硫馏分柴油的船用发动机航行指南”，2013 年。
2. CIMAC“船上燃油清洁被忽视的过程：如何抑制催化剂残留颗粒损害二冲程船用发动机的增加”第 51 页，2013 年。
3. CE Delft，燃油可用性评估——最终报告，2016 年。
4. Alfa Laval AB、DNVPS“燃油处理过程”，EPS002-E-1V3，2013 年。
5. Alfa Laval AB“阿法拉伐自适应燃油管线”，2013 年。
6. Alfa Laval AB、BP Marine Ltd、MAN B&W Diesel A/S“船用柴油机、催化剂残留颗粒和确保安全航行的新标准”，2007 年。
7. Alfa Laval AB“Alcap”，EPS012-I-1V1。
8. DNVGL，2020 年全球含硫上限指南，2016 年。
9. 欧盟指令 1999/32/EC。
10. 欧盟指令 2005/33/EC。
11. 欧盟指令 2009/30/EC。
12. 欧盟指令 2012/33/EU。
13. IBIA“2020 年实施 0.50% 全球含硫上限的暗示信号”，2016 年。
14. IMO MARPOL 附录六
15. IMO，IMO 规定船舶遵守低硫燃油要求的日期为 2020 年，2016 年 10 月 28 日新闻发布会。
16. ISO 8217-2012 石油产品——燃油（F 类）——船用燃油规格。
17. Marine and Energy Consulting Ltd.“2035 年船用燃油供油展望”。
18. Platts“IMO 2020 年全球含硫上限：2020 年世界含硫限制对航线、炼油厂和燃油供应商的意义”，2016 年。

阿法拉伐公司简介

阿法拉伐在全球范围内提供专业产品以及工程解决方案。

我们致力于开发设备、系统和服务，不断优化客户的运作和生产，达到最佳的表现。

我们向客户提供的服务，包括对其产品，如石油、水、化学品、饮料、食品、淀粉和药品进行加热、冷却、分离及输送。

我们遍布全球近一百个国家的机构网络更保证我们贴近客户，帮助客户始终居于领先地位。

如何联系阿法拉伐

业务热线：021 5385 8000
电子邮箱：china.info@alfalaval.com
公司网站：www.alfalaval.com.cn

阿法拉伐(上海)技术有限公司
上海市淮海中路98号金钟广场25楼
邮编: 200021

北京办事处
北京市朝阳区东四环中路56号
远洋国际中心A座410室
邮编: 100025

香港办事处
香港北角英皇道338号
华懋交易广场12楼1206-1209室

广州办事处
广东省广州市
流花路109号之9达宝广场601室
邮编: 510010

成都办事处
四川省成都市青羊区
青龙街51号倍特康派大厦12楼1210室
邮编: 610013

大连办事处
辽宁省大连市中山区
人民路68号宏誉大厦1801室
邮编: 116001

青岛办事处
山东省青岛市市南区
闽江路2号国华大厦A座2403室
邮编: 266071

沈阳办事处
辽宁省沈阳市和平区
和平北大街69号总统大厦C座2308室
邮编: 110003

武汉办事处
湖北省武汉市江汉区
珞瑜路10号百脑汇大厦12楼1221室
邮编: 430000

西安办事处
陕西省西安市高新区
锦业路1号都市之门C座10409室
邮编: 710065

MDD00534ZH 1706

www.alfalaval.com

阿法拉伐是阿法拉伐集团的注册商标，供阿法拉伐集团使用。
阿法拉伐保留未经事先通知更改规范的权利。