

燃料油品添加剂的应用现状及发展建议

王宏¹, 杨庭², 戚建平^{1*}

(1. 西安嘉宏能源化工科技有限公司, 陕西 西安 710016;
2. 中国石油天然气股份有限公司长庆石化分公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要:综述了燃料油品添加剂在改善油品质量、提升油品性能、节能减排等方面的重要作用及主要的燃料油品添加剂品种。其次,介绍了燃料油品添加剂在使用过程中暴露出的一些问题。最后,对燃料油品添加剂的发展方向提出了几点建议。

关键词:燃料油品添加剂;作用;存在的问题;发展建议

中图分类号:TE624

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)01-0041-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.01.010

Application status and development suggestions for fuel oil additives

WANG Hong¹, YANG Ting², QI Jian-ping^{1*}

(1. Xi'an Jiahong Energychemical Technology Co., Ltd., Xi'an 710016, China;
2. PetroChina Changqing Petrochemical Company, Xianyang 712000, China)

Abstract: The important roles of fuel oil additives in quality improvement, performance upgrade, energy conservation and emission reduction are reviewed. The main kinds of fuel oil additives are also introduced. Some existing problems during the application of fuel oil additives have been described. Several development suggestions on fuel oil additives are also proposed.

Key words: fuel oil additives; role; existing problems; development suggestions

国家发改委等七部门印发的《加快成品油质量升级工作方案》提出,2016年1月1日起,包括山东在内的东部11个省市全面供应国V车用汽油、柴油;2017年1月1日起,全国全面供应国V车用汽油、柴油。这一方案,比之前计划的2018年1月1日大大提前。我国国IV车用汽油标准、车用柴油标准分别于2014年1月1日和2015年1月1日开始在全国范围内实施。一些炼油企业刚刚升级到国IV标准,马上又要升级到国V标准,在时间上相当紧迫,再加上改造资金短缺、原料来源受限等问题,成品油质量升级成为压在企业身上的一座“大山”。但对于改善环境、治污减霾,实现绿色、清洁发展,成品油质量升级又是一条必经之路。燃料油品添加剂在提高油品抗爆指数、抑制油品氧化变色、防止积碳生成、降低尾气排放等方面具有显著效果,其作为提高油品质量十分经济而又有效的手段在燃料油中广泛应用。

1 燃料油品添加剂的应用现状

1.1 燃料油品添加剂的作用及主要品种

随着机械、航天、军事工业技术装备的飞速发展以及国家对环境保护重视程度的不断提高,对石油

产品的性能要求越来越高,相应的质量指标要求越来越苛刻。由于石油中自身组分的局限性,单靠石油加工工艺本身往往不能满足使用需要,还需要加入一些具有不同性能的油品添加剂^[1]。油品添加剂在优化油品质量、改善油品品质,提升产品性能、降低制造成本、节能减排、实现绿色发展等方面都具有明显的效果。

1.1.1 优化油品质量、改善油品品质

燃料油品在储运期间,油品中的不安定物质如不饱和烃、环烷芳烃,含有氧、硫、氮以及重金属杂原子的化合物,在氧气的作用下进行氧化、聚合、缩合等反应先后生成低分子或高分子的醇、醛、酮、羧酸和结构复杂的胶质、沥青质,导致油品变色、变臭、黏度增加,燃烧时腐蚀发动机件,甚至会堵塞滤清器或喷嘴^[2-3]。为了有效延缓油品的氧化进程,维持油品品质,需要向油品中添加抗氧化剂、金属减活剂(或金属钝化剂)。常用的有酚类、胺类、酚胺类、酯类,主要产品有T501、T502、T511、T521、T531、T534、T551、T561、GY系列之GY-99、GY-200和GY-201^[4]、2,2-硫代双[3-(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸甲酯]^[5]、N,N'-二亚水杨基丙二胺等。

油品中含有的元素硫、硫化物、硫的氧化物等在

加工过程中会转变成具有腐蚀性的多硫化物、亚磺酸、苯磺酸、酸性磺酸酯等^[6-7],会造成铜片腐蚀。此时,可以通过回炼除去硫以达到标准要求,但更经济的方法是加入适量的腐蚀抑制剂来改善油品质量。铜片腐蚀抑制剂的主要有效成分为苯并三氮唑及其衍生物、*N*-甲基咪唑及其衍生物、噻二唑衍生物等。杨景培等^[8]在 T551 和 T561 的基础上研制出了 YM 型铜腐抑制剂,夏道宏等^[9]开发出了汽油铜片腐蚀抑制剂 UNOP-2,并对其进行了性能评价。

低温流动改进剂(PPD)可以改善柴油在低温条件下的流动性,以免在使用中堵塞过滤器。乙烯-醋酸乙烯酯共聚物是目前使用最广、效果最好的 PPD,如目前市场上广泛销售的 T803、T1804、T1805、ECA5920、ECA8401、paradyne25 等。此外,还有许多其他类型的 PPD,如含马来酸酐单体的 SMAH^[10]、含(甲基)丙烯酸酯单体的 ASM^[11]、极性含氮类的 EVA^[12]等。以乙二醇单甲醚、二乙二醇乙醚等^[13]为代表的防冰剂可以防止汽油和航空燃料在低温条件下因微量水而结冰。润滑改进剂可弥补油品深加工引起的润滑性降低,降低发动机部件的磨损,常见的类型有脂肪酸类和脂肪酯类。

除以上所述添加剂外,抗静电剂、抗烧蚀剂、消泡剂、稳定剂等也在改善油品质量方面具有不可或缺的作用。

1.1.2 提升油品性能、降低制造成本

汽油的辛烷值是衡量汽油性能的首要指标,是一个国家炼油工业和汽车工业技术先进程度的综合反映。GB 17930—2013《车用汽油》^[14]标准中国 V 汽油与国 IV 汽油相比,硫含量指标限值由 50 mg/kg 降低为 10 mg/kg,要满足这一指标要求需要对油品进行加氢精制,由此造成的辛烷值损失为 1~2 个单位;锰含量由 8 mg/L 降低为 2 mg/L,禁止加入含锰添加剂,因此可导致辛烷值降低 2 个单位左右;烯烃含量指标限值由 28% 降低到 24%,由此也会造成一定的辛烷值损失。炼油企业通常通过改造装置或新建、扩建重整、烷基化、异构化等主产高辛烷值组分汽油的装置达到提高辛烷值的目的,但其成本较高,提升单位辛烷值的成本在 300 元/t 以上。而添加辛烷值促进剂具有提升辛烷值效果显著、添加成本低的优点,目前市场上的有机无灰类辛烷值促进剂产品如对甲酰胺基苯基烷基醚 T1110 等添加 1% 即可提升辛烷值 2 个单位以上,提升单位辛烷值的成本在 100~150 元/t。

十六烷值(CN)是表示柴油抗爆性的主要指标,

CN 高的柴油燃烧均匀,热功率高,节省燃料。随着各国原油重质化趋势的加剧,直馏柴油产量减少,CN 不断下降,各炼油厂普遍采用催化裂化等二次加工工艺以提高轻质油的收率,导致柴油整体 CN 的下降。目前,我国二次加工柴油的 CN 较低,只能与直馏柴油调配使用。但是,由于直馏柴油的产量有限,使得我国柴油十六烷值普遍达不到要求。为了维持柴油的高质量,需要加入十六烷值改进剂。硝酸烷基酯(如硝酸异辛酯)是目前使用最为广泛的十六烷值改进剂,此外,草酸二异戊酯^[15]、草酸二异丁酯^[16]等草酸酯也可显著提高十六烷值。相比于采用加氢的方法来提高 CN,使用添加剂成本更低,效果更好。

1.1.3 节能减排、实现绿色发展

燃料油添加剂中的清净分散剂、燃烧促进剂、消烟剂等能在节能减排方面均具有显著的效果。清净分散剂可以有效抑制燃油系统沉积物的形成,畅通油路,从而降低油耗,改善尾气排放。燃料油用的清净分散剂有无灰类和有灰类 2 种,因有灰类伴有金属氧化物的燃烧产物,可导致二次污染和加剧发动机机件磨损,因而很少使用^[17]。有机无灰类主要成分为聚异丁烯胺、聚醚胺和聚异丁烯苯酚的 Mannich 缩合物^[18]。柴油消烟剂因其自身在一定条件下可生成强过氧化物,进而促使发动机气缸内的柴油在短时间内燃烧完全,提高了发动机的功率,从而实现了节能消烟。

此外,前面提到的汽油辛烷值促进剂、柴油十六烷值改进剂因能提高汽油辛烷值和柴油十六烷值而在节能减排方面有不可忽视的作用。这是因为高辛烷值汽油和高十六烷值柴油的燃烧性能更好,可提高发动机功率、降低油耗、减少尾气中有害物质排放。再者,燃料油品添加剂的使用可以降低装置操作的苛刻度,降低能量消耗,从而减少有害气体排放。

1.2 燃料油品添加剂在使用中存在的问题

虽然燃料油品添加剂在改善油品质量、提升油品性能等方面发挥了十分重要的作用,但部分非常规、有毒有害添加剂的滥用严重影响了油品质量,扰乱了油品市场,加剧了环境污染。

1.2.1 非常规添加剂影响油品质量

随着汽油调合市场的繁荣发展,市场上出现了苯胺类、甲缩醛、碳酸二甲酯(DMC)等非常规添加剂^[19],这些添加剂虽然有抗爆、节能等积极作用,但长时间使用会造成严重的危害^[20]。苯胺类物质加

入汽油中会使汽油的颜色变深、缩短汽油的诱导期、产生胶质,最终影响车辆排气系统的正常运行;还会对塑料、橡胶部件产生溶胀作用,引起漏油和尾气污染加重;且其毒性较大,对人体有危害。甲缩醛对橡胶密封件具有较强的溶胀作用,会造成漏油现象;此外,其加入到汽油中会加速汽油的氧化,降低汽油热值。DMC应用在汽油中会增加汽油的氧含量,同时使汽油中的水含量增加,使得发动机的功率降低、负荷增加,影响发动机的使用性能和寿命。这些非常规添加剂的使用不仅会影响油品质量,而且对发动机、尾气排放均有不良影响,非常规添加剂对油品质量的影响由此可见一斑。

1.2.2 有毒有害添加剂危害环境

甲基叔丁基醚(MTBE)研究法辛烷值(RON)118,马达法辛烷值(MON)101^[21],加入MTBE体积分数10%可使汽油RON提高1.8~2.0个单位。MTBE作为汽油添加剂有着良好的化学稳定性,不易生成过氧化物,可以与汽油以任意比例互溶,添加后油品的雷德蒸气压会显著升高,因而作为汽油调和组分在我国广泛使用。但大量研究表明,MTBE极易溶于水,不易被土壤颗粒吸附,会比汽油和其他成分更快地进入地下水中并以辐射的方式向四周扩散,从而造成地下水污染,导致水质恶臭^[22-23]。MTBE不易从水中挥发和萃取,不易降解,对环境具有持久性的不良影响。此外,MTBE对人类健康的危害也十分明显,会引起呼吸困难、哮喘、头晕、头痛、失眠、眼睛充水和皮疹等过敏症状^[24]。欧美等部分国家和地区已禁止使用MTBE,日本规定MTBE在汽油中的添加量应不高于7%。为了更好地保护环境和人体健康,我国也应限制MTBE在汽油中的添加量。

甲基环戊二烯三羰基锰(MMT)在我国应用多年,但早有研究表明,MMT在发动机内部会产生金属沉积物,导致气缸磨损、火花塞点火不良、氧传感器和三元催化剂中毒等故障,进而造成严重的环境污染;MMT本身还具有很强的毒性,可以引起肺气肿、呼吸道和肝、肾的病变^[25-26]。全球多数国家和地区已禁止使用MMT,我国已应用MMT 25年,对环境造成了不可逆的伤害。

1.2.3 缺少统一的规范和标准

导致非常规添加剂滥用的最主要原因是缺少关于油品添加剂的统一的规范和标准。汽油和柴油的相关国家标准中对添加剂的提及较少,GB 17930—2013^[14]和GB 19147—2013^[27]中规定车用汽、柴油

中所使用的添加剂应无公认的有害作用,并按推荐的适宜用量使用;车用汽、柴油中不应含有任何可导致车辆无法正常运行的添加物和污染物。GB 17930—2013还规定车用汽油中不得人为加入甲缩醛、苯胺类、卤素以及含磷、含硅等化合物。可见,上述标准中对添加剂的使用规定比较宽泛,没有具体的评价标准。在实际使用中只有企业制定的企业标准可以参考,各个企业制定的标准大都只有理化指标规定、性能描述,并无有效证据可以表明产品质量的优劣。国家应加强对油品添加剂市场的规范,逐步建立一系列的评价标准,规定在一定试用期内没有出现任何问题的添加剂才能进入市场,从根源上减少甚至消除因添加剂而造成的油品质量事故。世界燃油规范中,已将部分添加剂的评定方法列入其中,可以借鉴其经验,并根据我国国情和实际情况建立合适的评定方法。同时,标准文件中应注明允许或支持的添加剂类型或名称。

2 对燃料油品添加剂的发展建议

2.1 保证油品质量的前提下,提倡使用添加剂

应提高对油品添加剂的认识,充分认识到油品添加剂的优势,如其在油品质量控制方面的灵活性、使用的简捷性、相比改变工艺过程费用更低。在保证油品质量和使用性能的前提下,合理、有效地选择添加剂,在适当的时机加入添加剂是提高油品质量、实现降本增效的有效途径。虽然我国油品添加剂处于中期发展阶段,但部分添加剂的性质、效果已达到国际领先水平,受到了国内外炼油企业的青睐,而国内一些大型国有企业对系统之外的产品设关限卡、限制应用,在全球一体化的今天,应积极应用这些先进的技术和优良的产品。

2.2 重视作用机理的研究,借鉴国外先进经验

应深入开展添加剂的作用机理研究,将产品开发与作用机理研究结合起来,二者相辅相成、互相促进,有利于开发出效果更优的添加剂产品。同时,要重视国内外相关领域研究中的经验与教训,对于经使用对油品质量、发动机有损害的添加剂坚决不要再用。此外,还应将一些先进的技术应用到添加剂作用机理研究和产品开发中去,例如有的研究者将分子模拟和分子设计应用到柴油降凝剂的开发中,取得了显著的成果^[28-29]。

2.3 重视添加剂之间、添加剂与工艺的协同效应

添加剂之间有协同作用和拮抗作用。在油品添加剂的使用过程中应重视添加剂之间相互作用的研

究,充分利用多种成分、溶剂、助剂之间的协同作用,使添加剂由单一组分转向多元组分,提高添加剂的效果。比如为解决油品氧化变质的问题时往往需要同时加入抗氧化剂、分散剂、防腐剂、金属钝化剂中的一种或几种,抗氧化剂可抑制、减少自由基的生成,分散剂可防止生成的固体颗粒聚集成团,防腐剂可以减少金属离子的形成,金属钝化剂可以抑制金属离子的催化作用,它们之间的相互作用大大提高了油品的稳定性。

事实证明,添加剂能赋予油品某种特殊性能或加强其本来具有的某种性能,但它不是万能的,油品添加剂在一定条件下是工艺的补充,必须与工艺相结合,才能取得预期的效果。在提高油品质量时不能以降低汽油辛烷值为代价,低辛烷值汽油有害气体排放高于高辛烷值汽油,同时也不利于汽车工业的发展。因此,应将添加剂与工艺有机结合,促进油品质量的全面提升。

2.4 重视高端化、绿色环保型添加剂的开发

对添加剂的研究开发不应只注重其效果、局限于短期和局部效应,还应全面考虑发动机体系的综合指标,使油品发挥更大效率,实现节油、降低排放的目标。油品添加剂今后的开发方向是在保证效果的前提下,不但添加剂本身要低毒甚至无毒,而且使用后产生的有害气体要尽量少。化学添加剂是迄今为止应用最广泛的油品添加剂,今后应加大对新型、环保型添加剂的研发力度,多开发可减少污染物排放的添加剂。生物添加剂是一类具有很大环保效应的添加剂,但其在合成过程中质量控制比较困难,作用衰减快,产品稳定性差,应着重解决这些问题,加快研发步伐。物理添加剂是通过物理作用改善燃油特性的,使用中不会产生污染物,且效果较好,应大力加强此方面的研究。

3 结语

目前,我国不仅迫切需要解决油品质量升级、添加剂市场不规范的问题,同时也要积极应对国际市场可能对国内市场造成的冲击。沙特阿拉伯、科威特、阿联酋、阿曼等中东产油大国正在加速炼油项目的建设,欲将燃料油出口到亚太、欧洲地区,我国也将逐步开放燃料油的进出口权。相比之下,中东国家的原油质轻价低,其油品在质量、价格上优势较为明显。应加强对添加剂市场的规范,重视添加剂作用机理的研究,重视添加剂之间、添加剂与工艺之间的协同效应,重视绿色环保型添加剂的开发,在保证

油品质量的前提下使用合适的添加剂,结合炼油装置的技术改造、升级以及新建加氢、重整、烷基化等装置实现燃料油的提质降本,增强油品的竞争力。

参考文献

- [1] 刘玉梅,廖志英. 石油产品中微量水测定方法对比试验[J]. 甘肃科技, 2013, 29(5): 16-17, 64.
- [2] 王庆,谭卓华. 油品抗氧化剂的研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2013, 42(4): 37-41, 54.
- [3] 李恩田,王树立,姚培. 油品储运过程中的质量管理[J]. 油气储运, 2005, 24(12): 67-70.
- [4] 钟思智,秦文福,张品良,等. 油品用液体抗氧化剂的开发[J]. 合成材料老化与应用, 2002, 31(3): 1-3.
- [5] 肖婷婷,伍钦,林小琼. 溶剂法合成抗氧化剂 2,2-硫代双[3-(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸甲酯][J]. 化工进展, 2012, 31(12): 2766-2770.
- [6] 钟晓宇. 轻质油品硫腐蚀性和脱硫的研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011: 1-9.
- [7] 罗雄,黄忠桥,吕瑞典,等. 加工高硫高酸原油引起的设备腐蚀问题探讨[J]. 化学工程与装备, 2010, (2): 59-62.
- [8] 杨景培,马先贵. YM 高效金属减活剂(铜腐蚀抑制剂)的研制与性能评定[J]. 润滑油, 1997, 12(6): 37-39.
- [9] 夏道宏,项玉芝,朱根权,等. 催化裂化汽油铜片腐蚀原因分析及新型铜片腐蚀抑制剂的研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(6): 92-94.
- [10] 龙小柱,唐磊,张爽,等. SMAH 型低温流动改进剂的研究[J]. 当代化工, 2013, 42(4): 421-424, 430.
- [11] 李瑞丽,张颖,徐春明. 新型 ASM 低温流动改进剂的合成及柴油感受性的研究[J]. 石油与天然气化工, 2012, (5): 453-456.
- [12] 杨智勇,张金利,王平. 柴油低温流动性能改进剂的复配[J]. 化学工业与工程, 2006, 23(4): 331-335.
- [13] 刘多强,关绍春,孙建章,等. 防冰剂在喷气燃料中的应用[J]. 石油化工应用, 2009, 28(5): 1-3, 6.
- [14] GB 17930—2013. 车用汽油[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [15] 白云波. 柴油十六烷值改进剂的评价与应用[J]. 精细石油化工, 2011, 28(4): 49-52.
- [16] 胡应喜,孙少磊. 新型柴油十六烷值改进剂草酸二异丁酯的合成[J]. 化学与生物工程, 2007, 24(4): 26-31.
- [17] 操升敏. 柴油清净剂的合成及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 1-4.
- [18] 张在明. 聚异丁烯胺的绿色制备[D]. 南京: 东南大学, 2009: 1-3.
- [19] 高枝荣,李继文,王川. GC-MS 法检测车用汽油中的甲缩醛、碳酸二甲酯和 N-甲基苯胺[J]. 石油化工, 2013, 42(2): 230-235.
- [20] 邓雪丽. 汽油中非常规添加剂及元素对油品质量和车辆使用性能影响的研究[J]. 化工管理, 2014, (9): 224.
- [21] 张春兰,杨智. 高辛烷值汽油添加剂的研究现状及进展[J]. 内蒙古石油化工, 2011, (14): 13-16.

裂化反应。然而,常规的 Y 型分子筛的外表面积在总的比表面积中所占的比例仅为 2% ~ 3%, 进一步预裂化作用十分有限, 大量的重油分子因无法进入分子筛孔道而不能进行完全裂化, 常常包裹在催化剂的表面, 形成积炭, 加速催化剂的失活^[5]。在 Y 型分子筛中引入介孔结构, 可以将从基质传递过来的中等分子碎片在介孔孔道中进一步裂化, 如断裂环烷烃和芳烃上的侧链, 使更多的反应物进入分子筛的微孔孔道进行选择催化裂化反应, 从而提高重油转化率和改善目的产品的选择性; 同时, 在 Y 型分子筛中引入介孔结构, 还大大改善了反应物和产物分子的扩散, 减少了包裹在分子筛表面和堵塞在分子筛孔道的重油分子, 降低了焦炭选择性, 延长催化剂的使用寿命^[6-8]。但介-微孔结构 Y 型分子筛存在稳定性差、材料制备结构重复性差和成本高等问题。

1.2 制备介-微孔结构 Y 型分子筛的方法

1.2.1 介孔材料的沸石化

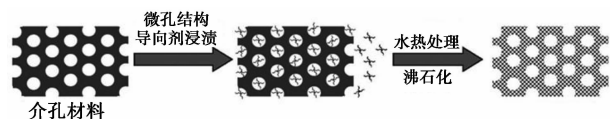


图 1 有序介孔材料的沸石化途径示意图

实现介孔材料沸石化的一种方法是先使用微孔结构导向剂浸渍介孔材料, 随后在水或蒸汽条件下适当水热处理, 通过异质成核而使介孔孔墙部分晶化, 如图 1 所示^[9]。另外一种方法是在高温下, 将制备好的介孔材料浸渍沸石晶种, 使介孔材料作为沸石前驱体, 经水热晶化使介孔孔墙部分晶化^[10]。采用介孔材料沸石化的方法制备介-微孔结构 Y 型分子筛, 其优点是可以得到规整有序的介孔, 且微孔和介孔直接相连, 有利于提高重油分子扩散和反应的效率。缺点是很多情况下, 沸石晶化的条件非常苛刻, 且结晶的沸石不能适应介孔的弯曲结构, 导致随

着介孔墙晶化的进行, 会引起介孔结构的扭曲或坍塌。

1.2.2 沸石的介孔结构化

沸石的介孔化是在已制备好的沸石中引入介孔, 具体的方法大致有 3 种, 分别是纳米晶组装、沸石溶解-重结晶和后处理脱铝脱硅。Liu 等^[11]首先提出通过纳米尺寸的沸石前驱体与表面活性剂的组装来实现沸石的介孔化。100℃ 老化 20 h 后, 降低 pH 至 9 的 Y 型分子筛晶种和十六烷基三甲基溴化铵作用, 形成具有 MCM-41 介孔结构且对蒸汽稳定的硅铝酸盐 (MSU-S)。Ivanova 等^[12]先使沸石部分溶解, 然后加入介孔模板剂和矿化剂, 在一定条件下重结晶, 将微孔沸石晶体转晶为含有介孔的沸石晶体。但目前工业广泛应用的沸石的介孔结构化方法为破坏性的脱铝脱硅处理, 即通过化学后处理选择性地脱出沸石结构中的结构原子来获得介孔结构, 如图 2 所示。这种方法的优点是工艺简单, 易于实施。缺点是造成环境污染, 溶解的物种容易堵塞孔道, 而且难以得到规整有序的介孔结构。



图 2 沸石后处理脱铝脱硅介孔结构化途径示意图

1.2.3 一步合成法

一步合成法是在 Y 型分子筛的合成体系中, 直接加入介孔模板剂, 在一定条件下晶化, 直接得到具有介-微孔结构的材料。陈平娥^[13]在 Y 型分子筛的合成体系中加入炭黑作为介孔模板剂, 得到具有介-微孔结构的 Y 型分子筛, 其中介孔的孔径为 3.8 nm, 但介孔结构呈无序分布。Kloetstra 等^[14]采用双模板剂法, 其凝胶相中包含了 Y 型分子筛的模板剂四甲基氯化铵和 MCM-41 的模板剂十六烷基

(上接第 44 页)

[22] Hong M S, Farnayan W F, Dortch I J, et al. Phytoremediation of MTBE from a ground water plume[J]. Environmental Science and Technology, 2001, 35: 1231 - 1239.

[23] 张胜寒, 贾利, 权宇珩. MTBE 环境行为研究[J]. 环境工程, 2008, 26(6): 96 - 99.

[24] 徐怡珊. 甲基叔丁基醚的研究进展[J]. 化工环保, 2004, 24(6): 416 - 419.

[25] 董君. 汽油抗爆剂使用现状及对汽油质量影响探讨[J]. 山东化工, 2013, 42(5): 63 - 67.

[26] 付余英, 刘小玲, 李瑞楨, 等. 国内外汽油抗爆剂的发展现状[J]. 广东化工, 2009, 36(8): 83 - 84, 117.

[27] GB 19147—2013. 车用柴油(V) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

[28] 李妍, 赵毅, 段庆华, 等. 低温流动改进剂在柴油蜡晶形成阶段的晶型控制作用[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(4): 431 - 437.

[29] 陈照军, 安高军, 张宏玉, 等. 丙烯酸酯类降凝剂的 Monte Carlo 模拟计算及分子结构设计[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(6): 140 - 144. ■