

燃油结焦影响因素及抑制方法综述

王晨臣, 彭孝天, 王苏明, 刘卫华, 冯诗愚

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘要: 燃油温度升高会导致燃油结焦, 而燃油结焦对飞行器会带来极大危害, 因而抑制燃油结焦是亟待解决的问题。在实际应用中, 针对不同的结焦机理, 可采取不同的抑制方法。介绍了燃油结焦的机理, 综述了国内外关于航空煤油特性的影响因素的相关试验情况。结果表明: 温度对燃油结焦影响最大, 由于温度的不同, 结焦机理也会发生变化; 而压力、流动方式对结焦的影响很小。故通常采用溶解氧含量、材料表面处理及使用添加剂来抑制结焦。

关键词: 燃油结焦; 结焦机理; 影响因素; 抑制; 溶解氧含量

中图分类号: V312+.1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.02.011

Summarization on Influence Factors and Suppression Methods of Fuel Coking

WANG Chen-chen, PENG Xiao-tian, WANG Su-ming, LIU Wei-hua, FENG Shi-yu

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

Abstract: The rise of fuel temperature will lead to fuel coking, resulting in great harm to aircrafts. Thus, the problem of fuel coking suppression should be solved urgently. Various suppression methods can be adopted for different coking mechanisms in practical application. The mechanism of fuel coking was introduced, and the situation of relevant experiments on the influencing factors on aviation kerosene characteristics at home and abroad was summarized. The results show that the temperature has the greatest effect on fuel coking, and the coking mechanism changes due to different temperatures. The pressure and flow pattern have little effect on fuel coking. Therefore, the fuel coking is usually depressed by the dissolved oxygen content, the surface treatment of materials and the use of additives.

Key words: fuel coking; coking mechanism; influence factors; suppression; dissolved oxygen content

0 引言

近年来, 世界各国都在进行高马赫数飞行器的研制, 随着马赫数的提高, 飞行器表面由于强烈的气动加热会使滞止温度越来越高, 导致热负荷大幅增加, 同时对航空发动机的性能要求也越来越高, 提高发动机的性能需要更高的增压比和涡轮前温度, 从而使发动机的热负荷进一步增加。于是飞行器上的热管理问题成为高马赫数飞行器发展过程中亟待解决的难题。采用传统的机械制冷系统或制冷剂进行冷却, 会不可避免地增加飞行器的负重, 使用飞机所携带的燃料做冷源进行冷却, 可有效解决这一问题。

使用飞机所携带的燃料作为冷却剂时, 由于吸热

使燃料温度不断升高, 此时会不可避免地结焦。结焦会给飞行器带来许多不利的影响, 如换热管路管壁结焦会使换热管路壁面热阻增加, 导致壁面传热品质恶化同时也影响了燃油的冷却性能。结焦产物脱落后会随着流体流到发动机喷嘴部位堵塞喷嘴^[1], 改变喷嘴喷雾形状, 进而影响雾化品质, 使燃烧室燃烧不充分, 燃烧效率降低, 使局部受热过高等, 严重时可导致发动机停车熄火。结焦还会导致金属管道中渗碳, 使发动机的机械性能降低, 大大缩短发动机使用寿命。

因此, 进行结焦机理及结焦影响因素和抑制方法的研究对于飞机所携带的燃料做冷却剂及飞机上的热管理来说具有重要意义。

收稿日期: 2017-08-21

基金项目: 航空科学基金(20132852040)、中央高校基本科研业务费专项资金、江苏高校优势学科建设工程基金资助

作者简介: 王晨臣(1996), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为飞行器燃油系统; E-mail: 583812642@qq.com。

引用格式: 王晨臣, 彭孝天, 王苏明, 等. 燃油结焦影响因素及抑制方法综述[J]. 航空发动机, 2018, 44(2): 64-69. WANG Chenchen, PENG Xiaotian, WANG Suming, et al. Summarization on influence factors and inhibition methods of fuel coking[J]. Aeroengine, 2018, 44(2): 64-69.

1 燃油结焦概述

1.1 燃油结焦分类和机理

随着温度的升高,结焦机理也会发生变化,可分为热氧化结焦和裂解结焦。

热氧化结焦的主要机理是随着燃料温度的升高,燃料产生自由基($R\cdot$),自由基再与燃料中溶解氧反应生成氢过氧化物,从而生成结焦前体,结焦前体与热氧化的其他小分子产物聚合生成大分子,从而结焦^[2],自由基($R\cdot$)参与的链式反应过程如图1所示,具体结焦过程如图2所示。

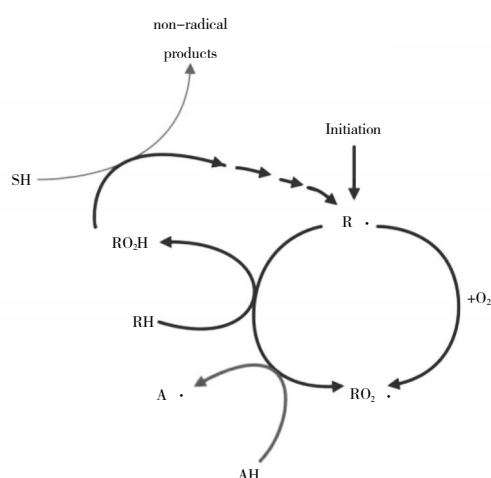


图1 自由基($R\cdot$)参与的反应链过程

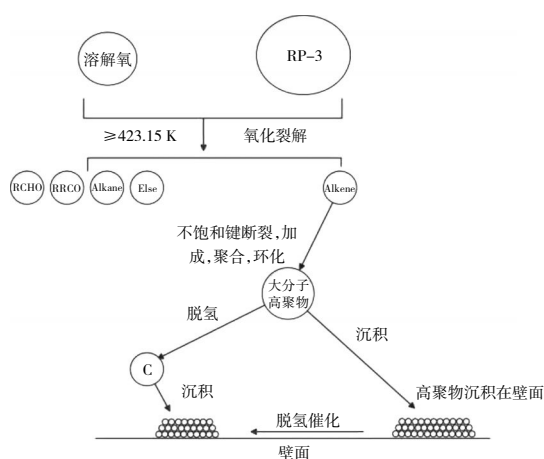


图2 热氧化结焦过程

随着温度继续升高,燃料中溶解氧被消耗,热氧化结焦速率下降,此时由于高温导致的裂解结焦渐渐占据主体地位,由于裂解结焦机理非常复杂,目前还没有完全统一的理论,这里仅作简单介绍。裂解结焦一般分为3种^[3]:第1种为金属催化生焦,高温燃油在金属催化下生成金属碳化物,而金属碳化物作为结焦

前体,继续与裂解产物反应产生结焦;第2种为非催化生焦,主要由于燃料本身裂解产生的小分子产物间聚合、环化而形成大分子,再结合管壁上脱落的焦体和金属粒子产生结焦;第3种为生成自由基导致的结焦,由于前2种原因生成的小分子产物,金属碳须等物质与热裂解后生成的自由基反应,进一步脱氢缩合后产生积碳颗粒,从而产生结焦沉积物。在实际过程中,会有多种结焦机理同时发生作用,所以结焦是一个十分复杂的过程。

1.2 燃油结焦的影响因素

燃油结焦的影响因素主要有:温度、压力、流动方式、管路表面处理、添加剂或微量化合物、溶解氧含量等。其中对燃油结焦影响最大的因素是燃油本身温度,其温度不同不仅结焦的机理不同,而且结焦的速率和结焦量也有很大差异。压力、流动方式以及管路表面处理一般只会导致结焦量或结焦分布位置发生变化。

2 燃油结焦特性研究现状

2.1 温度对燃油结焦的影响

大量的试验数据表明,随着温度的升高,燃油首先发生热氧化结焦,结焦速率逐渐增长到一峰值,然后下降;当温度升高到一定区域时,出现裂解结焦,其速率随温度升高而不断增长。在过渡区域内,热氧化结焦和裂解结焦反应共存,随着温度继续升高,仅存在裂解结焦,且结焦速率随温度的升高而迅速增长。大多数燃油结焦速率随温度变化情况如图3所示。

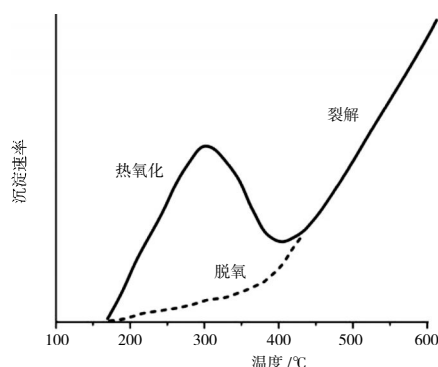


图3 燃油结焦随温度变化

Taylor W F^[4]在1974年通过对包括JP-5在内的6种燃油进行试验得出:饱和空气燃料的沉积物形成速率随着温度的升高而增长,在350~425℃温度范围的过渡区域急剧下降,然后随着温度升高再次增长;

Giovanetti A J 等^[5]在 1985 年对 Jet-A 燃油热稳定性进行了试验,发现温度对燃油沉淀形成具有显著影响;Chin J S 等^[6]在 1992 年的试验中认为影响沉积速率最重要的因素是燃料温度及其管壁温度特别是壁表面和相邻燃料之间的温度差;Spadaccini L J 等^[7]在 1999 年对 Jet-A 和 JP-8 燃油进行了一系列试验,发现压力和持续时间对沉淀速率的影响很小,温度的影响最大。热氧化结焦在 316 ℃左右时达到峰值,然后由于溶解氧和结焦前体的消耗而降低,裂解结焦开始于约 427 ℃,单调增加。

范启明^[8]等在 2002 年对吸热型烃类燃料挂式四氢双环戊二烯 *exo*-THDCPD、甲基环己烷 MCH 以及航空煤油 RP-3 进行了热稳定性研究,结果表明:3 种燃料的热氧化结焦在某温度下存在波峰,热裂解结焦随温度升高迅速增加,基本呈指数关系;王英杰^[9]等在 2009 年研究了进口温度对航空煤油 RP-3 的管内结焦的影响,结果表明:结焦速率随温度的升高先增加后下降,在 80~160 ℃管内壁结焦总量随着油温的升高先不断增加,但当进口油温超过 127 ℃时,结焦总量基本保持不变,但随着温度的升高,结焦峰值向前推移,且结焦峰值增大。

2.2 压力对燃油结焦的影响

压力对燃油结焦的影响较小,一些试验研究数据表明,随着压力的升高,结焦量小幅度减少,结焦分布稍有变化。Taylor W F^[4]在 1974 年对 2 种燃油在不同压力下进行试验表明压力对燃油结焦有一定影响;琚印超^[10]等在 2010 年进行了压力对航空煤油 RP-3 结焦影响的试验,结果表明:压力增大,管壁结焦峰值有略微向下游移动的趋势,且结焦总量有所减少,即提高压力对管壁有一定的结焦抑制。

2.3 流动方式对燃油结焦的影响

流动方式对结焦的影响较小,在水平、垂直的不同流动方式下,结焦量基本相等,结焦分布稍有不同;流速增大,结焦量增加。

Chin J S 等^[6]在 1992 年进行的试验表明流速和管径通过影响雷诺数来影响沉积速率。在试验覆盖的流速范围内,沉淀速率随雷诺数的增大而上升;Szetela E J 等^[11]在 1985 年进行了 RP-1、丙烷和天然气分别流经铜镀和镍镀管壁时壁面温度、燃料流速对燃油结焦影响的试验发现,在铜镀管路流动中,当壁面温度小于 640 K 时,结焦速率随流速加快有所下降,当壁面温度高于 640 K 时,结焦速率随流速加快

而不断提高。

范启明^[8]等在 2002 年进行了 3 种航空燃料热稳定性方面的试验研究,表明随着燃料流速的加快,在低流速时热氧化沉积增加较快,在高流速时增加缓慢,基本趋于一定值;热裂解沉积量随流速的加快而增加;吴瀚^[12]等在 2011 年进行了流动方式对航空煤油 RP-3 结焦影响的试验,流动方式分为竖直向上、水平、竖直向下,试验表明,结焦速率随着温度升高先增大后减小,存在峰值区域,在不同的流动方式下,结焦速率分布曲线相似,结焦总量相当;Zhi T 等^[13]在 2014 年进行了物理因素对超临界状态下航空煤油 RP-3 热氧化结焦的影响的试验发现,随着管道质量流速的加快,雷诺数不断增大,此时管路表面结焦速率升高,但单位质量 RP-3 的结焦量先减少,然后增加。

2.4 管路表面处理对燃油结焦的影响

大量研究表明,金属材料对于热氧化结焦和裂解结焦都具有强烈的催化作用。金属表面上催化形成的沉积物促进二次沉积,其通过反应性物质在初始沉积物上的反应进行。因而改善金属表面材料微观晶体结构及材料表面钝化对燃油结焦具有显著的抑制效果。

And O A 等^[14]在 2000 年进行了 JP-8 燃料在壁温为 500 ℃和压力为 3445 kPa 下流经不同壁面时的裂解结焦试验,结果显示管路表面碳沉积量大小排序为:镍 > 不锈钢 316 > 不锈钢 304 > 惰化硅制钢管 > 玻璃衬里不锈钢。管路表面惰化处理可有效减少沉积量;Ervin J S 等^[15]在 2003 年使用 Jet-A 燃料进行了加热管路表面处理和添加剂对结焦影响的试验,表明在不同压力下管路表面惰化处理可大大减少沉积量,管路表面处理和燃料添加剂对于减少沉淀量具有协同效应;Dewitt M J 等^[16]在 2011 年使用不同航空燃料在超临界条件下热裂解结焦的试验中发现,管路表面钝化可有效抑制丝状碳的形成,从而抑制裂解结焦。

金迪^[17]等在 2010 年对航空煤油的试验研究中发现,不锈钢表面高温氧化后生成的氧化物钝化层可有效抑制 RP-3 在材料表面的热氧化结焦,且氧化温度越高,抑制效果越强;朱琨^[18]等在 2012 年研究了不锈钢表面进行磷化、酸洗钝化以及电解钝化对超临界压力下航空煤油 RP-3 热氧化结焦的抑制效果,发现不锈钢表面的钝化膜层可有效降低不锈钢表面的催化活性,按抑制效果排序为:电解钝化 > 酸洗钝化 > 磷化钝化;李范^[19]等在 2014 年采用化学强氧化-阴极还原法,在材料表面得到稳定的富铬氧化层,使得

材料表面平整致密,可有效减少结焦物质的附着。

2.5 添加剂或微量化合物对燃油结焦的影响

添加剂抑制结焦效果因燃油的种类及添加剂或微量化合物的类型和添加量而异。对于热氧化结焦,可使用抗氧化剂来抑制,抗氧化剂可消耗燃油中溶解氧或与热氧化过程中的自由基作用,以抑制结焦前体的生成来达到抑制热氧化结焦的目的;对于裂解结焦,不同的结焦抑制剂具有不同的抑制机理,包括使管路表面材料钝化来抑制管壁的催化效应,或消耗自由基,使其不能与裂解产物结合生焦从而抑制结焦,还可通过改变结焦的物理形态使之松散、易于清除来达到抑制效果,上述机理可同时进行。

Taylor W F^[20]在1976年研究了微量硫化物对脱氧烃类航空燃料结焦速率的影响,通过向高度稳定的JP-5燃料中加入质量分数为3‰的各种硫化物,发现沉淀量随硫化物浓度的升高而增加,但并非线性变化,燃油脱氧对结焦形成过程的抑制作用取决于燃油中存在的微量硫化物的类型和含量;Taylor W F等^[21]又在1978年使用脱氧JP-5燃料,研究了微量氮、氧含量的存在对结焦速率的影响,发现氮化合物在高温下基本无影响,但其中一些氮化合物在一定环境条件下将导致燃油储存期间沉淀的形成,在研究的氧化合物中,发现过氧化物对燃料的稳定性的危害非常大,一些酸、酯和酮危害次之,而其它物质对沉积物的形成基本无影响;Pickard J M等^[22]在1997年进行了微量Fe₂O₃对Jet-A燃油热氧化结焦影响试验,通过在空气饱和的Jet-A(POSF-2827)燃油(0.065‰的O₂)中添加质量分数为0.004‰的氧化铁,发现由于氧化铁的催化自氧化,使得表面沉积的最大值和速率均有所降低;Wickham D T等^[23]在2000年进行的试验表明,二苯基硒化物可在高压状态下在金属表面形成非常稳定的铁、镍硒化物,在低浓度下可显著减少90%的丝状碳的形成,从而有效抑制燃油结焦;Strohm J J等^[24]在2004年在JP-8航空燃料中添加体积分数为2%的四氢化萘,发现管路表面的碳沉积量减少81%以上,几乎不存在丝状碳和硫化物,表明加入四氢化萘不仅能有效抑制结焦,还可降低JP-8燃料中存在的有机硫化物;Coleman M M等^[25]在1992年通过对Jet-A航空燃油的相关试验发现,苯甲醇、1,4-苯二甲醇和类似分子的物质可抑制高温下燃料的裂解结焦。

潘富敏^[26]等在2001年分别进行了含磷化合物、

含硫化合物、碱金属盐及复合剂对航空煤油RP-3结焦抑制试验,结果表明:含硫化合物的抑制效果优于含磷化合物及碱金属化合物,复合剂的抑制结焦性能比单剂大大提高,最佳配比时能抑制99%以上的结焦量;郭永胜^[27]等在2004年进行了P-2含磷结焦抑制剂的添加对吸热型碳氢燃料NNJ-150裂解结焦速率影响的试验,发现P-2含磷结焦抑制剂可明显降低燃料裂解结焦速率,且不改变燃料裂解气态产物分布,同时有效改善结焦物质的形态结构以及碳氢元素的组成,对清焦工作有较大帮助;郭永胜等^[28]又在2005年进行了含硫结焦抑制剂对吸热型碳氢燃料S-1裂解结焦速率影响的试验,结果表明:含硫抑制剂可明显降低燃料裂解结焦速率,且抑制效果好于含磷结焦抑制剂,但含硫抑制剂对燃料裂解产物的分布情况有一定影响;Guo W等^[29]在2009年进行了氢供体和有机硒对正十二烷和航空煤油RP-3结焦影响的试验,分别使用了四氢化萘(THN)、R-四氢萘酮(THNone)和苄醇(BzOH)、二苯基硒化物(Ph₂Se)和二苯基二硒(Ph₂Se₂)及其混合物,试验发现这些添加剂可有效抑制正十二烷和航空煤油RP-3的结焦,并改变了沉积物的形态,氢供体主要通过降低裂解速率来抑制结焦,含硒化合物可同时降低由表面催化引起的热氧化结焦和裂解结焦,二者还具有协同效应;张强强等^[30]在2013年进行了添加抑制剂对航空煤油RP-3裂解和结焦影响的试验,发现添加抑制剂后,燃料热稳定性有所提高,燃料裂解率降低,但降低幅度不明显,添加剂同时抑制了表面催化结焦与自由基生长结焦的形成,由于添加剂的作用,积炭覆盖表面效果更好,结焦速率下降,稳定后结焦速率更低。

2.6 溶解氧含量对燃油结焦的影响

大量试验研究证明,燃油中溶解氧含量对热氧化二次反应结焦过程起着至关重要的作用。降低燃油中溶解氧含量可显著降低热氧化结焦量。

Jones E G等^[31]在1993年对Jet-A燃油的试验中发现沉淀总量与溶解氧含量成比例,并将溶解氧与沉积物之间的紧密关系归因于有害硫化物的存在,试验表明:分别在205、195、185、175、165、155℃的等温条件下测量空气饱和和燃料中溶解氧的耗尽,发现溶解氧消耗速率与温度有着密切关系,在185℃的壁面和燃料温度下,当Jet-A燃料中溶解氧完全耗尽时,表面沉积量达到最大值,说明表面沉积速率和溶解氧消耗相关;Taylor W F^[5]在1974年进行了6种燃油在

不同溶解氧浓度下的试验,大量试验数据表明,降低溶解氧浓度可有效减少燃油结焦;And J S E 等^[32]在1996年在对2种Jet-A燃油的试验中发现,降低燃油中溶解氧含量,加热段沉淀量反而增加,并将该现象与溶解氧部分消耗联系在一起,当溶解氧只有部分消耗时,存在1个并非最高的溶解氧浓度,其产生最多的沉积量;Ervin J S 等^[33]在1997年对航空燃油JP-8的试验中发现沉积物的形成可能受到上游溶解氧含量的影响,在某些条件下,较少的溶解氧可以产生更多的沉淀物。

孙海云^[34]等在2006年分别进行了2,6-二叔丁基对甲基酚(BHT)和茶多酚(TPP)2种酚型抗氧化剂作用下对吸热型碳氢燃料NNJ-150的热氧化稳定性影响的试验,发现加入BHT和TPP后,结焦量减少,颜色深度降低,抗氧化剂可延长燃料的氧化诱导期,提高燃料热氧化稳定温度;Pei X Y 等^[35]在2016年进行了航空煤油RP-3热氧化结焦特性试验,试验数据表明:在压力为3 MPa和质量流量为1 g/s的条件下,降低入口燃油的溶解氧浓度可显著降低燃油热氧化结焦量,在相同加热条件下,与空气饱和和燃料相比,脱氧燃料的结焦量可降低31%,而更高的溶解氧含量将会导致更高的结焦量。

3 结束语

(1) 根据对国内外大量试验数据的归纳分析可知,温度是燃油结焦最大的影响因素,温度不同,结焦机理不同。而压力、流动方式对其影响很小,故常通过溶解氧含量、表面材料改性及添加剂来达到抑制结焦的目的。

(2) 抑制燃油结焦,除进行燃料精制外,还可针对不同的结焦机理采取不同方法。对于热氧化结焦,可通过去除燃油中溶解氧(如氮气洗涤、使用分子筛吸附剂、化学还原剂、膜过滤器等)或通过添加抗氧化剂来抑制;对于裂解结焦,可通过添加结焦抑制剂(如供氢剂、金属钝化剂、分散剂、复合添加剂等)或通过反应管路表面处理(如降低粗糙度和表面化学改性等)来抑制。

(3) 燃油除氧系统具有可自循环、环保的优点,该系统在理想效果下可将燃油中的溶解氧含量降到非常低的水平,从而杜绝热氧化结焦。将其与添加抑制剂配合使用,将会比使用多种添加剂的方式更加可靠、实用,该方面研究必定被重视。

(4) 对于裂解结焦,除添加结焦抑制剂外,通过化学方式对材料表面改性也为抑制结焦提供了新方向。该方法被认为是今后解决燃油结焦最有希望的手段之一。

参考文献:

- [1] Morris R E, Johnson K J. Examination of JP-8 fuels for contaminants responsible for KC-130J nozzle fouling[R]. NRL/MR/6180--06-8960. Navy Technology Center For Safety And Survivability Washington DC, 2006.
- [2] Edwards T, Harrison W, Zabarnick S, et al. Update on the development of JP-8+100[R]. AIAA-2002-3886.
- [3] 张玲玲. 吸热型碳氢燃料的裂解与结焦研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
ZHANG Lingling. Pyrolysis and coking of endothermic hydrocarbon fuels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [4] Taylor W F. Deposit formation from deoxygenated hydrocarbons. I. general features [J]. Industrial & Engineering Chemistry Product Research & Development, 1974, 13(2): 133-138.
- [5] Giovanetti A J, Spadaccini L J, Szelata E J. Deposit formation and heat-transfer characteristics of hydrocarbon rocket fuels [J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 1985, 22(5): 574.
- [6] Chin J S, Lefebvre A H. Experimental study on hydrocarbon fuel thermal stability[J]. Journal of Thermal Science, 1992, 1(1): 70-74.
- [7] Spadaccini L J, Sobel D R, Huang H. Deposit formation and mitigation in aircraft fuels [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2001, 123(4): 741.
- [8] 范启明, 米镇涛, 于燕, 等. 高超音速推进用吸热型烃类燃料的热稳定性研究 I. 热氧化与热裂解沉积[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(1): 78-82.
FAN Qiming, MI Zhentao, YU Yan, et al. Study on thermal stability of endothermic hydrocarbon fuels for hypersonic propulsion I. thermal oxidation & pyrolytic deposit [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, 30(1): 78-82. (in Chinese)
- [9] 王英杰, 徐国强, 邓宏武, 等. 进口温度影响航空煤油结焦特性试验 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(9): 1972-1976.
WANG Yingjie, XU Guoqiang, DENG Hongwu, et al. Experimental study of influence of inlet temperature on aviation kerosene coking characteristics [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9): 1972-1976. (in Chinese)
- [10] 琚印超, 徐国强, 郭隽, 等. 压力对航空煤油 RP-3 结焦的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(3): 257-260.
JU Yinchao, XU Guoqiang, GUO Jun, et al. Effects of pressure on the coking characteristic of jet fuel RP-3[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(3): 257-260. (in Chinese)
- [11] Szelata E J, Giovanetti A J, Cohen S. Fuel deposit characteristics at low velocity [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1985, 108(3): 460-464.
- [12] 吴瀚, 邓宏武, 徐国强, 等. 流动方式对航空煤油 RP-3 结焦的影响

- [J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1341-1345.
- WU Han, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Effects of flow orientations on the coking characteristic of jet fuel RP-3 [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(6): 1341-1345. (in Chinese)
- [13] ZHI T, FU Y, XU G, et al. Experimental study on influences of physical factors to supercritical RP-3 surface and liquid-space thermal oxidation coking[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9): 6098-6106.
- [14] And O A, Semih Eser. Analysis of solid deposits from thermal stressing of a JP-8 fuel on different tube surfaces in a flow reactor [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001, 40(2): 596-603.
- [15] Ervin J S, Ward T A, And T F W, et al. Surface deposition within treated and untreated stainless steel tubes resulting from thermal-oxidative and pyrolytic degradation of jet fuel [J]. Energy & Fuels, 2003, 17(3): 577-586.
- [16] Dewitt M J, Edwards T, Shafer L, et al. Effect of aviation fuel type on pyrolytic reactivity and deposition propensity under supercritical conditions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(18): 10434-10451.
- [17] 金迪, 徐国强, 王英杰, 等. 不锈钢表面氧化对 RP-3 航空煤油热氧化结焦的影响[J]. 航空发动机, 2010, 36(1): 34-37.
- JIN Di, XU Guoqiang, WANG Yingjie, et al. Influence of stainless steel oxidizing on the thermal oxidation coking of RP-3 aviation kerosene[J]. Aeroengine, 2010, 36(1): 34-37. (in Chinese)
- [18] 朱锐, 邓宏武, 徐国强, 等. 表面钝化对超临界航空煤油静态结焦特性影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(6): 745-749.
- ZHU Kun, DENG Hongwu, XU Guoqiang, et al. Surface passivation effect on the static coke deposition of kerosene at supercritical pressure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(6): 745-749. (in Chinese)
- [19] 李范, 朱岳麟, 黄艳斐, 等. 发动机喷嘴表面化学改性抗结焦积碳[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(4): 564-568.
- LI Fan, ZHU Yuelin, HUANG Yanfei, et al. Anti-coking performance of nozzle materials' surface chemical modification [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(4): 564-568. (in Chinese)
- [20] Taylor W F. Deposit formation from deoxygenated hydrocarbons. II. effect of trace sulfur compounds [J]. Industrial & Engineering Chemistry Product Research & Development, 1976, 15(1): 64-68.
- [21] Taylor W F, Frankenfeld J W. Deposit formation from deoxygenated hydrocarbons. 3. effects of trace nitrogen and oxygen compounds [J]. Industrial & Engineering Chemistry Product Research & Development, 1978, 17(1): 86-90.
- [22] Pickard J M, Jones E G. Catalysis of jet-A fuel autooxidation by Fe_2O_3 [J]. Energy & Fuels, 1997, 11(6): 1232-1236.
- [23] Wickham D T, Engel J R, Karpuk M E. Additives to prevent filamentous coke formation in endothermic heat exchangers [J]. American Chemical Society Division of Petroleum Chemistry Preprints, 2000, 45(3): 459-464.
- [24] Strohm J J, Altin O, Song C S, et al. Significant reduction of carbon deposit by hydrogen donor addition to JP-8 jet fuel at high temperatures [J]. Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem, 2004, 49(1): 34.
- [25] Coleman M M, Selvaraj L, Sobkowiak M, et al. Potential stabilizers for jet fuels subjected to thermal stress above 400. degree.C[J]. Energy & fuels, 1992, 6(5): 535-539.
- [26] 潘富敏, 何龙, 林瑞森. 吸热型碳氢燃料的结焦研究(II) 结焦抑制剂的性质评价[J]. 推进技术, 2001, 22(3): 241-244.
- PAN Fumin, HE Long, LIN Ruisen. Coking property of the endothermic fuel (II) evaluation on coking-inhibitors' functions[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(3): 241-244. (in Chinese)
- [27] 郭永胜, 林瑞森. 吸热型碳氢燃料的结焦研究 I. 含磷结焦抑制剂[J]. 石油学报(石油加工), 2004, 20(3): 13-17.
- GUO Yongsheng, LIN Ruisen. Study on coking of endothermic hydrocarbon fuels I. phosphorous coking inhibitor [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2004, 20(3): 13-17. (in Chinese)
- [28] 郭永胜, 林瑞森. 吸热型碳氢燃料的结焦研究 I. 含硫抑制剂[J]. 燃料化学学报, 2005, 33(3): 289-292.
- GUO Yongsheng, LIN Ruisen. Study on coking of endothermic hydrocarbon fuels I. sulf-inhibitor [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(3): 289-292. (in Chinese)
- [29] Guo W, Zhang X, Liu G, et al. Roles of hydrogen donors and organic selenides in inhibiting solid deposits from thermal stressing of n-dodecane and chinese RP-3 jet fuel[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(18): 8320-8327.
- [30] 张强强, 汪旭清, 刘国柱, 等. 主动冷却通道内吸热型碳氢燃料热裂解结焦抑制机理[J]. 推进技术, 2013, 34(12): 1713-1718.
- ZHANG Qiangqiang, WANG Xuqing, LIU Guozhu, et al. Inhibition mechanism of pyrolytic cokes from endothermic hydrocarbon fuels in regenerative cooling channels [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(12): 1713-1718. (in Chinese)
- [31] Jones E G, Balster W J, Post M E. Degradation of a jet a fuel in a single-pass heat exchanger [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1995, 117(1): 125-131
- [32] And J S E, Williams T F. Dissolved oxygen concentration and jet fuel deposition[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1996, 35(3): 899-904.
- [33] Ervin J S, Williams T F, Heneghan S P, et al. The effects of dissolved oxygen concentration, fractional oxygen consumption, and additives on JP-8 thermal stability [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1997, 119(4): 822.
- [34] 孙海云, 方文军, 郭永胜, 等. 抗氧剂对燃料 NNJ-150 热氧化安定性的影响[J]. 高校化学工程学报, 2006, 20(3): 455-459.
- SUN Haiyun, FANG Wenjun, GUO yongsheng, et al. Effects of antioxidant on thermal-oxidation stability of fuel NNJ-150 [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2006, 20(3): 455-459. (in Chinese)
- [35] Pei X Y, Hou L Y. Effect of dissolved oxygen concentration on coke deposition of kerosene [J]. Fuel Processing Technology, 2016, 142: 86-91.

(编辑: 李华文)