

国外烃类喷气燃料和 火箭发动机推进剂发展情况

刘济瀛 杨光华 吕寿斌 編譯

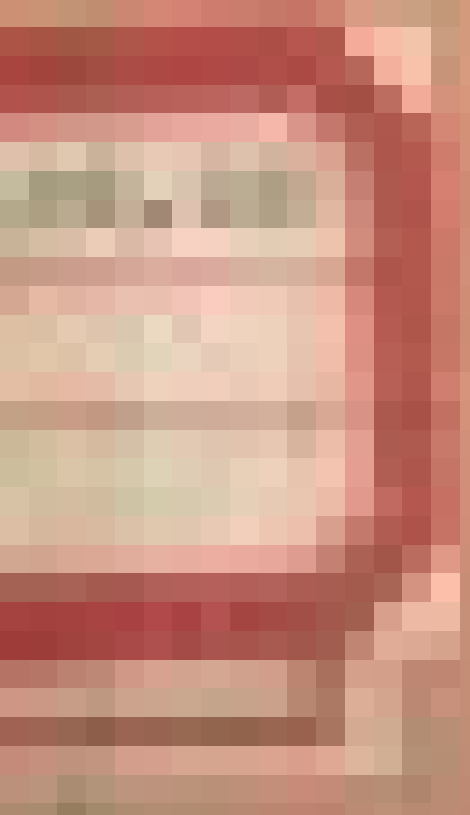
626.23

中国工业出版社

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHILOSOPHY DEPARTMENT

PHILOSOPHY 101



国外烃类喷气燃料和 火箭发动机推进剂发展情况

刘济瀛 杨光华 吕寿斌 編譯

中国工业出版社

本书综述了近年来国外烃类喷气燃料和火箭发动机推进剂（燃烧剂和氧化剂）的发展情况。书中第一部分为烃类喷气燃料。它着重介绍了烃类喷气燃料的品种、使用性能和发展趋势。第二部分为火箭发动机推进剂。它除简单介绍了火箭发动机工作原理和应用场合、发动机能源和推进系统外，还着重介绍了液体和固体火箭推进剂的品种、使用性能和发展趋势。

本书烃类喷气燃料部分由刘济瀛編譯，火箭发动机推进剂部分由杨光华、吕寿斌編譯。

本书供石油炼厂领导干部参考，也可供石油科学研究、炼油生产和油料使用人员以及石油院校有关专业师生参考。

国外烃类喷气燃料和火箭发动机推进剂发展情况

刘济瀛 杨光华 吕寿斌 編譯

*

石油工业部石油科学技术情报研究所图书編輯室編輯（北京北郊六鋪炕）

中国工业出版社出版（北京东黄城根路丙10号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本787×1092¹/₃₂·印张2¹³/₁₆·插頁1·字数57,000

1964年11月北京第一版·1964年11月北京第一次印刷

印数0001—1,580·定价（科六）0.40元

*

統一书号：15165·3435（石油-268）

目 录

烟类喷气燃料

喷气燃料的分类及品种.....	1
喷气燃料的消耗及生产概况.....	6
喷气燃料的使用性能.....	9
喷气燃料添加剂.....	21
喷气燃料的发展前景.....	24

火箭发动机推进剂

火箭发动机的工作原理和应用.....	32
火箭发动机的能源和推进系统.....	37
炼油工业和火箭推进剂的生产.....	42
液体火箭推进剂.....	45
固体火箭推进剂.....	68

烃类喷气燃料

喷气技术在近二十年間获得了广泛的发展和應用。与此相应的是石油烃类燃料找到了新的应用領域。喷气燃料已逐渐发展成为独立的一类产品 and 专门的学科而从一般馬达燃料及学科中分离出来。

本文将从以下几方面对空气喷气发动机燃料（通称喷气燃料）的現狀及发展前景，加以綜合性的叙述。

1. 喷气燃料的分类及品种；
2. 喷气燃料的消耗及生产概况；
3. 喷气燃料的使用性能；
4. 喷气燃料添加剂；
5. 喷气燃料的发展前景。

喷气燃料的分类及品种

从所适用的发动机，喷气燃料可分为涡轮喷气燃料、涡轮螺旋桨喷气燃料和冲压式喷气燃料。前两种喷气燃料完全一样，因为二者的混合物形成过程和燃烧过程相同。但涡轮螺旋桨发动机喷气飞机，飞行高度和飞行速度都較涡轮喷气飞机低，因此，可以使用輕质燃料如汽油型及寬馏分型。冲压式喷气燃料則不同于前二者，因为它主要用于高空超音速 ($M=3.0$ 以上) 的飞机和飞弹，要求燃料在高速气流下具有良好的燃烧稳定性和热安定性。現今消耗量最多的为涡轮喷气燃料。

从生产方法，噴气燃料可分为直餾燃料和二次加工燃料。現在应用最广的为直餾燃料。利用热裂化和催化裂化等二次产品做为噴气燃料，則至今尚未得出完全滿意的結果。其主要原因是由于它們的安定性不佳。美国的 JP-3 和 JP-4 中，以往允許混对一部分二次加工产品，只要溴价不超过 30，但是只限于非常时期，并指明除注意溴价外，还必须注意燃料的安定性。現在，則限制 JP-4 的溴价不允許超过 3。因为含大量烯烴的高安定性燃料生产問題尚未解决，二次加工燃料的另一个来源为加氢生产超音速噴气燃料。这是当前生产优质超音速噴气燃料的重要途径之一。但由于原料及加工成本比通常的直餾燃料貴 5—10 倍，因而目前的消耗量也很少。新近又发展了異构加氢裂化新工艺，可用来生产低冰点的噴气燃料。直餾燃料按餾分組成又可分为汽油型、里格罗因型、煤油型、柴油型和寬餾分型等燃料。当前使用最广的为直餾寬餾分型燃料如美国的 JP-4，和煤油型如苏联的 Tc-1。

从用途上，噴气燃料可分为軍用和民用两类。軍用噴气燃料和民用噴气燃料的區別，主要在于重点要求不同。軍用的要求資源最广，民用的則要求安全和价格低廉（見表 1）。虽然，較长时期以来，对究竟是煤油型、还是寬餾分型噴气燃料最适宜于民航用的問題，有不同意見，如英国有人认为是煤油型，美国則有人认为是寬餾分型，苏联則广泛使用煤油型的 T-1 和 Tc-1。但是，目前大部分趋向于采用煤油型做为民航用的噴气燃料。

資本主义国家的噴气燃料指标主要来自美国。但英美噴气燃料的規格指标与苏联相应的燃料也大体差不多，只是由于原油性质、各国所处的地理气候环境和飞机結構不同，彼

此之間略有差異。因此，我們將着重介紹美國和蘇聯的噴氣燃料的品種。對其他各國相應的品種，列於表 2。

對民用和軍用噴氣燃料的要求

表 1

指 標	對 燃 料 的 要 求	
	軍 用	民 用
結晶點, °C	-60	-40
點火性 (着火危險性)	次要意義	最 小
資源	最 廣	中 等
價格	中 等	最 低
揮發性	最大燃燒完全度且不生成沉積物	
儲存安定性	1—2年	
熱值	最 大	

各國同型噴氣燃料對照表

表 2

國名或 集團名	相 應 的 燃 料					
美 國	JP-1	JP-3	JP-4	JP-5	JP-6	RJ-1
蘇 聯	T-1 和 Tc-1	—	T-2	—	—	—
英 國	DERD-2482	—	DERD-2486	DERD-2488	—	—
法 國	Air-3405	—	Air-3407	—	—	—
意 大 利	AM/C-141	—	AM/C-142	—	—	—
加 拿 大	3-GR-23	—	3-GR-22A	—	—	—
瑞 典	1 號	—	2 號	—	—	—
日 本	—	3 號	4 號	5 號	—	—
北大西洋 公約集團	NATO-T-33	—	NATO-F-40	NATO-F-42	—	—

蘇聯所用的噴氣燃料：蘇聯現在所用的噴氣燃料有四種，均係從石油中直餾生產的。它們的技術規格載於相應的手冊中。即 T-1, Tc-1, T-2 和 T-5。T-1 為 150—280°C 餾分，T-5 為 195—315°C 餾分，均屬煤油型，硫含量都較

低，不超过0.1%。T-1与T-5的区别在于后者比重较大、馏程较重和精制较佳，用于速度更大的超音速飞机。T-1为苏联使用最早的喷气燃料，后来限于资源，才用含硫原油生产Tc-1燃料代替。现在T-1主要用于民航和作为标准燃料。Tc-1为150—250°C的重里格罗因型，为苏联最通用的一种喷气燃料。T-2为60—280°C的宽馏分型，在公开资料中很少见其使用。此两种燃料的含硫量均允许高达0.25%。上述四种燃料除上述的差别及由于馏分组成和烃族组成的不同以致引起比重、粘度、闪点和芳烃含量略有差别外，其余指标要求全都相同。它们都具有良好的使用性能，能保证喷气发动机可靠地工作。由于它们都是直馏产品，因而安定性较高，可以在油库中储存数年。根据长期地面油罐储存试验结果，T-1及Tc-1在苏联的北部及中部可储存6—7年，在南部可储存4—5年，其基本质量指标仍在规格要求范围内。

美国所用喷气燃料：美国现在使用五种涡轮喷气燃料（JP-型），一种冲压式燃料（RJ-型）。它们的规格要求和实际质量指标载于相应的手册中。其中JP-1、JP-5、JP-6和RJ-1属煤油型，JP-3和JP-4属宽馏分型。JP-1的规格颁布于1950年7月25日，由于资源的限制，用得很少，主要用于老式的亚音速涡轮喷气发动机。曾经主要供给北大西洋公约组织成员国的空军使用。JP-3与JP-4皆于1951年1月23日颁布，二者性质相近，只是前者的蒸汽压高于后者。JP-3曾用于美国海军的海岸空军部队，近来已被JP-5所淘汰。JP-4为美国现今使用最广的燃料，1952年开始试用，其中约含65%的汽油和35%的煤油，可用在飞行速度 $M=1.5$ 以下的喷气飞机。JP-5为高闪点

(60°C)的煤油，以減少航空母艦上受魚雷攻击时着火的危險，可用于飞行速度达 $M=3$ 的噴气飞机。此外，在航空母艦上将 JP-5 与汽油按 2—3:1 的比例混对，則可得与 JP-4 相同的燃料，供飞机使用。JP-5 的結晶点，1957 年以前規定为 -40°C ，1957 年考虑到机翼油箱的不絕緣，将其改为 -50°C 。JP-5 的規格頒布于 1952 年 3 月 11 日。JP-6 为寬餾分組成的煤油，其特点是安定性高、燃烧完全性好，用于飞行速度达 $M=1.8—2.0$ 的噴气飞机。近年来，有人认为 JP-6 将是供 $M=3.0$ 的 B-70 超音速远程飞机使用的較理想的燃料。RJ-1 事实上已接近于柴油型，它有較高的热安定性，但燃烧完全性低，美国不少人认为这是冲压式发动机要求的最起碼的燃料。此外，美国曾經有过 JP-2 牌号的寬餾分型燃料，这只是 1948 年时的試驗性燃料，沒有大量生产和試用过。

对于表 2，需要补充說明的是：英国的 DERD-2482 和 DERD-2488 的低溫性质較美国的同型燃料差，結晶点允許高达 -40°C 。这是由英国的气候及原料等条件所决定。正因为如此，英国对燃料中的水含量非常注意，規格中規定燃料中溶解水不大于 1—2 毫克/公升。

苏联的噴气燃料只有理化技术規格，英美的則除此以外尚有以下几項評价燃料使用性能的指标：热值系数、发烟点、烟点揮发系数、高沸点芳烴含量、热安定性(苏联 T-5 規定必測，但无指标要求)、輝光值、目測油的洁淨度和溶解水含量(英国)等。在理化技术規格中，英美的比苏联的多一項抗氧化添加剂加入量和一項金属鈍化剂加入量。从 1962 年起，美国軍方已正式提出，要求規格中补充防冰添加剂加入量一項。

除此以外，噴气燃料品种中，尚有启动燃料和标准燃料。由于煤油型和柴油型等重质燃料的揮发性不良，低溫下启动发动机有困难，故采用低溫下揮发性較高的輕餾分如汽油型做为启动燃料，最常用的为不加鉛的航空汽油，或是它們与主燃料的混合物。此外，为了保証高空高速下启动，还使用燃烧稳定性較高、火焰传播速度快的金属有机燃料为启动燃料，如英国的 DERD-2489（即三乙基鋁）。标准燃料系用来驗收发动机和发动机翻修后的試車，以及用来进行科学研究工作。英国用 RT-2978 为标准燃料，美国用 MIL-F-5624B，苏联用 T-1。选择标准燃料时，应考虑用应用最广、組成及理化性能都有严格規定的燃料。

噴气燃料的消耗及生产概况

噴气飞机的出現是在 1941 年。一般噴气燃料規格的正式制訂是在 1949—1953 年期間，以后又陆續修訂补充。美国在 1953 年以前，噴气燃料消耗量的統計是合并 in 航空燃料中，1953 年以后，才作为独立产品加以統計。法国則从 1955 年起才有噴气燃料与煤油合并統計的消耗量資料。日本則系从 1960 年起才出現噴气燃料的消耗量数字。苏联一直未公开公布过这方面的資料。英国和西德有关这方面的資料尚未找到。

現在談談美国和日本的噴气燃料国内消耗量（見表 3 和表 4）。

从表 3 可以看出：美国国内噴气燃料的消耗量是与年俱增的。1958 年以前，每年的增长幅度較大，約 12—23%。1958 年至 1960 年每年的增长幅度就較小，約 4—6%。1961 年以后增长幅度又加快。这是由于 1958 年以前正是噴气飞

美国历年国内喷气燃料消耗量^① (单位: 仟立方米/日) 表 3

年 份	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966
消耗量	18.1	20.7	24.8	28.8	33.9	41.0	43.2	44.8	67.4	73.0	79.5	82.7	92.2	97.0
其中民用 ^②	—	—	—	—	—	3.2	6.4	11.1	15.9	25.4	25.4	28.6	31.8	36.0

① 1963年以后的消耗量为预计数字, 系根据美国油气杂志1962年第60卷第34期8月20日D.H. 斯多蒙特的图大致查得(见图), 此外, 此表系笔者根据各期美国油气杂志统计得出。

② 1958年起的民用量也系根据D.H. 斯多蒙特的图大致查得。

日本历年国内喷气燃料消耗量 (单位: 仟立方米/年) 表 4

年 份	1960	1961	1962	1966 ^①
消 耗 量	186	257	326	516

① 1966年为预计数字。

机在军事用途上日益广泛, 喷气飞机的速度日益增加, 耗油量随之增大的结果。1958年至1962年期间, 军事要求趋近于饱和, 飞行速度的继续增大碰到一定的技术上的困难, 民用喷气航空则有了较快的发展, 因而军用量维持一定水平, 民用量则逐步增加, 而这种增加是有限的。1963年以后, 由于飞行速度达 $M=3$ 的远程喷气飞机将投入使用, 它们的耗油量很大, 如B-70飞机的耗油量达每小时38000立升, 比现在的喷气飞机每小时7600立升的耗油量多约5倍, 因而将引起喷气燃料消耗量的大增。

从表4可看出日本喷气燃料年耗量的增长也是很快的, 约27—38%。

美国出口喷气燃料, 1954年不到80米³/日, 1960年以

后为 159 米³/日。

1962 年美国用煤油做为一般喷气燃料的消耗量，约占其全国煤油消耗量的 30% 不到，即不到 12720 米³。

前面已经说过，美国目前使用最广的为 JP-4，其次是 JP-5、JP-6 和 RJ-1。其他品种的燃料耗量很少。表 5 为美国军方对 JP-4、JP-5、JP-6 和 RJ-1 的年耗量。由表 5 可以看出，JP-5、JP-6 和 RJ-1 的消耗量的增长速度是不小的。

美国军用喷气燃料年耗量^① (单位：仟立方米/年) 表 5

年份 油名	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963
JP-4	11355	14383	17033	18295	—	—	—
JP-5	—	—	754.46	928.56	1276.77	928.56	928.56
JP-6	1.89	11.35	15.14	18.9	—	—	—
RJ-1	1.89	1.35	18.9	22.7	—	—	—

① 表中划〔—〕号者，系未找到资料。

一般直馏喷气燃料的生产比较简单，但也因此它们的质量不能保证超音速飞行对燃料提出的更高要求。1960年美国超音速飞机和导弹消耗的烃类燃料已达 322000 吨，约占喷气燃料总耗量的 2.3%，因此必须采用另外的途径。生产超音速喷气燃料的途径有二：其一是纯粹利用现代深度加氢和加氢精制的工艺过程获取，另一途径为于广泛使用的一般喷气燃料中加入有效的添加剂以改进其质量。这两条途径，从经济效果和生产简便来讲，后者比前者优越，但目前仍处于研究试用阶段。从当前实际条件来讲，则前者比后者现实可行，是目前正在使用的途径。以美国为例，1958年其工厂加氢精制能力为 3500 万吨/年，到 1960 年则增至约 6500 万吨/

年。1959—1963年期間，資本主义国家的炼油总能力約增长15%，其中加氢过程的增长达24.8%。就原料来源来讲，美国在1957年已生产单环芳烴达200万吨以上，其中130万吨来源于石油。1956年煤焦油的生产量已达220万吨以上，这是制取双环环烷的原料，足以保証超音速高溫噴气燃料生产的需要。当前主要的問題是成本高，約比一般噴气燃料貴5—10倍。

噴气燃料的使用性能

噴气燃料的使用性能，可归納为两类。第一类为燃烧性能，如：能量指标（发热量、比重、燃烧完全度），起动力性能，积炭生成性能，輝光值及高溫气相腐蝕性及粘度等；第二类为燃烧性能以外的其他使用性能，如：蒸发性，常中溫液相腐蝕性，貯存安定性，热安定性，防火安全性，空气及水在燃料中的溶解度，低溫性能及洁淨度等。現在先介紹第二类使用性能。

1. 蒸发性：噴气燃料的蒸发性主要是受餾分組成及蒸气压决定的。餾分組成愈輕，蒸气压愈高的燃料，蒸发性也愈大。此外，飞机起飞时燃料的初溫也有相当大的影响。

燃料的蒸发性高，則其起动力性能和燃烧完全性較好。因此，要求燃料具有一定的蒸发性，在規格中反映在餾分組成中的10%的餾出溫度和燃料的蒸汽压上。但蒸发性太高时，将对发动机的工作和飞机的性能，产生三方面的影响：其一是在空中在燃油系統中产生气阻現象，以致供油中断，从而限制了飞机的飞行高度。在亚音速飞机上，餾程为140—280°C，蒸气压不低于100毫米汞柱的煤油型燃料（如苏联的T-1和Tc-1，美国的JP-1和JP-5），在油箱不密封和不加

压的情况下，可以飞到 12—14 公里的高空。而馏程为 60—280°C、蒸气压为 100—150 毫米汞柱的宽馏分燃料，在同样情况下，只能飞到 10—12 公里的高空。在超音速飞机上，由于燃料受空气动力加热和用做冷却剂，油温可达 120—150°C，使燃料的蒸气压增高。因此，必须采用馏分更重的燃料如 T-5、JP-6 等，才能在相当的飞行高度和飞行速度下避免产生气阻现象。评价燃料产生气阻的倾向，系根据气相与液相的比例来确定。油泵容许的气液相的比例为 2。

其二是蒸发性高将招致燃料的大量蒸发损失。蒸气压为 0.136—0.21 公斤/平方厘米的燃料，当起飞时的油温为 37.8°C 时，在高空的损失就很可观。如果燃料的蒸气压为 0.351—0.492 公斤/平方厘米，起飞时的油温为 15.5°C，在 18300 米的高空，燃料的蒸发损失可达 10%。如果起飞时的油温为 37.8°C，则燃料的蒸发损失更可高达 20%。由于蒸发损失，使宽馏分燃料失去其原有的优点，蒸气压、蒸发性及爆炸极限都变差，油箱受压增高，需要复杂的活门或开孔以降低压力，或者采取油箱密闭增压或在起飞前进行燃料预冷却等措施加以防范。煤油型燃料则无此问题发生。

其三是蒸发性高的燃料将影响泵送量。在相同的泵入口油压下，泵送同样量的汽油的油泵体积将较泵送煤油的大 2—4 倍。因此，当所用的油泵不变时，泵送挥发性高的油，必须提高油泵的入口压力。

2. 空气在燃料中的溶解度：空气在喷气燃料中的溶解度，视燃料的特性而定。主要的影响因素为燃料的表面张力、比重和粘度。随着它们的增大，空气在其中的溶解度要减小。空气在芳烃中的溶解度比在同沸点的烷烃中小。燃料中有溶解水时，将略微增大空气在其中的溶解度。汽油型燃

料中約溶解20—25%体积的空气，煤油型燃料中——約13—15%。其对燃料使用性能的影响，主要是当飞机高速爬高时，到达某一高度，空气剧烈地从燃料中逸出，产生泡沫，引起燃料的携带损失。此外，由于空气中各单元气(氧、氮等)在燃料中的溶解度不同，飞机爬高时，燃料中逸出的空气系富氧空气，氮与氧的体积比为2.07:1(普通空气中氮氧体积比为3.76:1)，其与燃料蒸气所形成的混合气，虽然无巨大爆炸的危险，但比普通空气易侵蚀燃油系统部件。因此，英国的喷气燃料使用性能中有此项测定指标。防止燃料起沫而造成的携带损失，有两种途径，一为油箱加压，一为加入相应的添加剂(见第四部分)。

3. 常温、中温下的液相腐蚀。这里主要是指燃料对燃油系统部件的金属，在常温和中温下的腐蚀性。造成这类腐蚀的因素有四：一为硫及活性硫化物。首先是硫化氢，能引起锌、铁、铜、黄铜、铝和其它金属的严重腐蚀。燃料中硫化氢的浓度达0.0005%时，即将出现铜片腐蚀，因此，必须去除燃料中的硫化氢。一般说来，燃料中不易有硫化氢存在，因为硫化氢与空气接触，容易受氧化变成元素硫。元素硫主要腐蚀铜合金，特别是在120—150°C下，更有助于元素硫的腐蚀。苏联资料中谈到，在120—150°C下，燃料中50—95%的元素硫渗入ВБ-24、ВБ-24Н、ВБ-24НЦ青铜深处，与它们组合，从而破坏青铜的原始结构。硫醇主要腐蚀铜和青铜。钢、铝合金及Бражн-10-4-4青铜，在常温下不受硫醇的腐蚀。硫醇的腐蚀性强弱，视硫醇的结构不同而互异。低沸点硫醇(存在于宽馏分燃料中)的腐蚀性大于沸点较高的硫醇(存在于煤油型燃料中)，柴油馏分中的硫醇则可视为中性硫化物。脂肪族硫醇(含于直馏燃料中)的腐蚀性最

大，巯基位于苯环上的芳香族硫醇的腐蝕性最小，巯基位于側鏈上的芳香族硫醇的腐蝕性則介乎二者之間（芳香族硫醇含于裂化燃料中）。硫化氫的存在，將加劇硫醇的腐蝕作用。防止硫腐蝕的方法是嚴格控制燃料中的元素硫含量不超過0.002%。當有硫化氫存在時，不許超過0.001%。硫醇的含量不超過0.001—0.005%。另一防止硫腐蝕的途徑是加入某些添加劑。

其次一個引起常溫中溫液相腐蝕的因素是環烷酸。它主要腐蝕鋅和鉛。環烷酸主要含于煤油餾分中。因此必須認真地進行鹼洗以除去之。

第三個引起常溫中溫液相腐蝕的因素是燃料中含水。燃料中含水主要是由於燃料中的芳烴吸水作用。其腐蝕性能表現為兩方面：一是水分以單獨相進入燃料系統的部件而引起電化學腐蝕；另一方面是水中積聚着燃料中來的腐蝕性物質（如硫化物及氧化物等），使各種牌號鋼制的燃料系統部件加速腐蝕。一般說來，首先是間歇運動及慢速運動的燃油系統滑動部件易受腐蝕。因此，英國的噴氣燃料的使用性能指標中，規定水的溶解度，20°C時不大于0.006—0.007%（重），50°C時不大于0.025—0.028%（重）。英國之所以特別規定水溶解度，系與其島國所處地理位置、空氣濕度大等有關。

第四個引起常溫及中溫液相腐蝕的因素為細菌腐蝕。某些細菌會吞噬燃料中的硫化物，它們的排泄物對油罐有相當的腐蝕。

由於燃料的液相腐蝕性，不只是縮短燃油系統和附件的提前報廢，更嚴重的是腐蝕下來的物質和腐蝕生成的沉積物會隨着燃油帶至過濾器、精密部件和噴嘴等處，引起油路堵塞，影響正常供油、燃料的正常調節和使噴霧惡化，以致影