

# The Development History and Research Progress of Unleaded Aviation Gasoline in America

Hai Xiang\*, Hua Liu, Chuan Deng, Tai Zeng, Zuxi Xia#

The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu Sichuan  
Email: xianghai@fcc.org.cn, #xiazuxi@fcc.org.cn

Received: May 4<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2017; published: May 25<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The development of aviation gasoline (avgas) started in the early 1900s, which is over 100 years from now, while the history on unleaded avgas is near 80 years. This article discusses the development of unleaded avgas, and points out that it originated from motor gasoline, with the octane number from low to high. The different technical indexes are compared and reasons are analyzed in standards of unleaded avgas. Meanwhile, it concludes the research progress about the unleaded avgas in America and Europe. In early research, people mainly focused on the antiknock performance. At the end of 20th century, European researchers mostly are concern to the middle octane number avgas, such as 91 unleaded avgas (UL91). While American was more attention to high octane number avgas, with octane number higher than 100. As a result, Americans strive to develop unleaded avgas by the poison and contamination of leaded avgas. 9 avgas manufactures have been tested and certificated in Technical Center of Federal Aviation Administration (FAA). And it plans to replace the leaded avgas in 2020, in America.

## Keywords

Unleaded Aviation Gasoline, Development History, Technical Index, Research Progress

---

# 美国无铅航空汽油发展历史及研究进展

向海\*, 柳华, 邓川, 曾泰, 夏祖西#

中国民用航空局第二研究所, 四川 成都  
Email: xianghai@fcc.org.cn, #xiazuxi@fcc.org.cn

收稿日期: 2017年5月4日; 录用日期: 2017年5月22日; 发布日期: 2017年5月25日

---

\*第一作者。

#通讯作者。

## 摘要

航空汽油的发展始于20世纪初,距今已经超过100年了。无铅航空汽油的发展也已经接近80年历史。本文论述了无铅航空汽油的发展历程,指明无铅航空汽油蜕变于车用汽油,主要从低辛烷值发展到高辛烷值。文章比较了美国无铅航空汽油标准中不同牌号航空汽油的指标区别,分析了指标区别的原因。同时,文章就美国和欧洲进行无铅航空汽油的研究进展进行了总结。研究表明,早期欧洲和美国主要研究航空汽油的抗爆性能。进入20世纪后期,欧洲主要集中于中辛烷值无铅航空汽油(91号)的研发,由瑞典进行;美国则更多关注高辛烷值无铅航空汽油方面,比如马达法辛烷值超过100的航空汽油。由于含铅航空汽油的毒性及污染,美国正在大力发展高辛烷值无铅航空汽油,目前已经有9家航空汽油生产企业在美国联邦航空局技术中心进行试验验证,并计划在2020年完全取代含铅航空汽油。

## 关键词

无铅航空汽油, 发展历史, 技术指标, 研究进展

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

美国航空汽油的发展已经有超过 100 年的历史了。从 20 世纪初的低辛烷值车用汽油, 20 世纪中期含铅航空汽油, 到 21 世纪初的低辛烷值无铅航空汽油, 再到现阶段的高辛烷值无铅航空汽油。航空汽油类型的每一次改变, 都伴随着航空活塞发动机的发展及环境的要求提高。随着工业水平的发展, 航空汽油也向着更高效、更清洁、更环保的方向迈进。

## 2. 发展历史

### 2.1. 低辛烷值无铅车用汽油阶段

20 世纪中期以前, 由于工业水平的限制, 航空汽油并没有从车用汽油中独立出来, 人们通常将车用汽油作为航空汽油使用。

1903 年, 莱特兄弟制造的第一架依靠动力系统可载人飞行飞机, 使用的是辛烷值低于 40 (美国材料与测试协会(ASTM)估计值为 40~70)的车用汽油[1]。从 1903 年~1918 年, 辛烷值为 40~70 的车用汽油被作为主要燃料应用于航空领域。

### 2.2. 低辛烷值无铅航空汽油阶段

20 世界 20 年代, 第一次世界大战爆发, 空军被作为主要战力投入战场。随着空军的发展, 对航空燃料的研究也进入一个高投入高产出的阶段。1921 年, 美国科学家 Thomas Midgley [2]发现了被誉为改变整个航空汽油历史的抗爆添加剂-四乙基铅(Tetraethyl Lead TEL)。从此以后, 含铅航空汽油开始逐渐占据整个航空汽油领域。1972 年, 使用时间最长, 影响最广泛的 100 号低铅航空汽油(100LL)投入使用。直至今日, 100LL 航空汽油依然占据了超过 90%的市场份额。

从 20 世纪 20 年代起至今, 虽然含铅航空汽油占据了大部分市场份额, 但是, 对无铅航空汽油的研

究一直没有停止。

1937年,美国相继研发了辛烷值 65, 73, 74 三个不同牌号的无铅航空汽油。随后,美国军方又推出了辛烷值为 87 的无铅航空汽油。无铅航空汽油辛烷值的不断提高,也适应了活塞发动机的发展要求。

进入 20 世纪后期,无铅航空汽油的研发由美国转移到欧洲,瑞典 Hjelmcö Oil Company 开始进行更高标号的无铅航空汽油研究。1982 年 4 月 13 日,工程研究联合委员会的 Kevin Morrison 通过信函确定 Hjelmcö 研发的 91/96 无铅航空汽油完全满足 ASTM D910 中的蒸馏性能和挥发性能的要求[3]。1997 年, Hjelmcö 公司提供资料文件[4]来回复 91/96 号无铅航空汽油在环境影响方面的相关细节问题。美国测试与材料协会(American Society of Testing and Material, ASTM)也于 2009 年出台 91 号无铅航空汽油标准, ASTM D7547 [5], 用于规范在美国使用的该型号航空汽油, 该牌号航空汽油也是目前商业化的唯一无铅航空汽油牌号。

### 2.3. 高辛烷值无铅航空汽油阶段

80 号无铅航空汽油在 1947 年就已经研发成功,91 号无铅航空汽油也在 1981 年开始投入市场。但是,受较低辛烷值的限制,两种牌号的无铅航空汽油都只能应用于压缩比小于 8.0 的活塞发动机。

80 和 91 号无铅航空汽油只能适用于 70%左右的活塞发动机,这迫使美国和欧洲的航空汽油生产企业不得不进行高辛烷值无铅航空汽油的研发,美国 Swift 公司则走在了最前面。2003 年, Swift 公司已经推出了高芳烃无铅航空汽油,其马达法辛烷值超过 102,适用于市面上所有的活塞发动机。2013 年, Total, BP, Shell, Exxonmobil 以及 Gami 等 12 家企业的高辛烷值无铅航空汽油陆续研发成功。目前, FAA 技术中心正在对 9 家企业的 12 种无铅航空汽油进行评估[6], ASTM 也已经相继推出了 ASTM D7719 [7]和 ASTM D7960 [8]两个高辛烷值无铅航空汽油标准。

## 3. 标准情况

随着无铅航空汽油的发展,如何确定不同牌号无铅航空汽油的质量就成了航空领域关注的重点。从 1962 年开始,美国 ASTM 已经陆续颁布了 5 个无铅航空汽油标准,包含了 6 个不同的航空汽油牌号,分别为 UL82, UL87, UL91, UL94, Swift UL102 以及 Shell UL102, 每个标准中都对无铅航空汽油理化性质进行了详细要求,其具体指标要求见表 1。

从表 1 中数据可以看出, UL82, UL87 号无铅航空汽油的指标要求和其他牌号航空汽油差异较大。其原因在于, UL82, UL87 号无铅航空汽油来自车用汽油,更多的采用车用汽油的炼制技术和炼制手段,其指标更接近于车用汽油。比如 UL87,就是常见的 95 号车用汽油,只是在某些非关键指标上略有区别。2000 年,美国联邦航空局(FAA)出台新的安全意识资料手册[11]中,将 UL82 和 UL87 完全作为航空汽油的牌号使用。

UL91, UL94 号无铅航空汽油可以通过添加四乙基铅直接制备 100LL 航空汽油,其炼制技术与生产 100LL 航空汽油基本一致,因此其指标要求与 ASTM D910 类似,只是在 MON, 铅含量的要求上有所不同。

Swift UL102 和 Shell UL102 属于两种全新的高辛烷值无铅航空汽油,其指标要求参照了炼制企业提供的测试用油性质。Swift UL102 属于高芳烃含量无铅航空汽油,芳烃对其馏程,净热值均有较大影响。Shell UL102 [12]研究报告中指出,由于添加了苯胺及乙酸丁酯类抗爆剂用于提高其辛烷值,使得 Shell 无铅航空汽油的净热值,馏程及电导率受到影响。

## 4. 研究情况

美国无铅航空汽油的发展始于 20 世纪初,最早一直将车用汽油作为航空汽油使用,其管理方式也与

**Table 1.** Comparison of the American Unleaded Avgas Standards  
**表 1.** 美国无铅航空汽油标准对比

项目	单位		ASTM D6227-14 [9]		ASTM D7547-15 [5]	ASTM D7592-15a [10]	ASTM D7719-15 [7]	ASTM D7960-14 [8]
			UL82	UL87	UL91	UL94	Swift UL102	Shell UL102
马达法辛烷值(MON)		不低于	82.0	87.0	91.0	94.0	102.2	102.5
研究法辛烷值(RON)		不低于	—	95.0			—	
净热值	MJ/kg	不低于	40.8			43.5	41.5	42.0*
颜色			紫色	黄色			无色	
蒸气压	kPa		38~62				38~49	
馏程								
10%蒸发温度	°C	不高于	70				75	
40%蒸发温度	°C	不低于	-				75	
50%蒸发温度	°C	不低于	66				—	
		不高于	121			105	165	105
90%蒸发温度	°C	不高于	190			135	165	135
终馏点	°C	不高于	225			170	180	210
10%+50%	°C	不低于	—			135	135	135
回收体积,	%	不低于	95.0				97.0	
残留体积	%	不高于	2.0				1.5	
损失体积	%	不高于	3.0				1.5	
硫含量,	mass %	不高于	0.07				0.05	
氧化安定性								
潜在胶质	mg/100mL	不大于				6		
显见铅沉淀	mg/100mL	不大于	—			3		—
实际胶质	mg/100mL	不大于	—			—		1
水反应体积		不大于	—				±2	
电导率	pS/m	不大于	—			450		50~2500
总芳烃含量	% (m/m)	不低于			—		70	—
苯含量	% (m/m)	不高于			—		0.1	—
醇和醚含量								
甲醇/乙醇总含量		不大于	0.3				—	
脂肪醚/甲醇/乙醇总氧含量	mass %	不大于	2.7				—	

说明：1、6个牌号无铅航空汽油对铅含量要求一致，均为不大于0.013 g Pb/L。2、6个牌号无铅航空汽油对密度和初馏点的要求一致，均为报告。3、6个牌号无铅航空汽油对冰点要求一致，均为不大于-58℃。4、6个牌号无铅航空汽油对铜片腐蚀要求一致，均为不大于1级，但是UL82，UL87采用的测试条件为50℃，3小时；其他牌号无铅航空汽油的测试条件为100℃，2小时。

车用汽油一致，采用补充型号合格审定(Supplemental Type Certificates (STCs))的方式。1921 年，美国成立 CFR (Co-operative Fuels Research Committee)，专门进行航空汽油的研发。

1936 年，CFR 爆震小组 C. B. Veal 以及 H. K. Cummings 等[13] [14]研究了含铅及无铅航空汽油在活塞发动机中的抗爆性能。研究发现，无铅异辛烷和辛烷值大于 84 的基础油进行调合后制备的航空汽油，在发动机抗爆性能上低于同等辛烷值的含铅航空汽油，该含铅航空汽油要求至少含有 2 mL/Gal.的四乙基铅。1938 年，CFR 爆震小组的 S. D. Heron 等[15]进一步研究得出了与以上相同的结论。

1948 年，W. C. Holliman 等[16]调研了美国的航空汽油市场，对在用航空汽油的牌号及使用情况进行分析。调研发现，美国航空汽油市场主要使用 80 号无铅航空汽油及辛烷值大于 80 的含铅航空汽油。1954 年及 1960 年，进一步的调查发现[17] [18]，航空汽油市场仅存 80 号一种无铅航空汽油，其余的均为含铅航空汽油，且以含铅航空汽油为主。

进入 20 世纪末期，无铅航空汽油的研究进入高产阶段，主要以欧洲的 91/96 无铅航空汽油为主。1992 年，瑞典皇家技术研究所(Swedish Royal Institute of Technology) [19]研究了 91/96 无铅航空汽油在 Piper PA28-161 Warrior II 飞机上的使用情况。研究结果表明，91/96 的性能与 100LL 没有任何区别。

2002 年，GAMI (General Aviation Modifications, Incorporated)采用莱康明的 TIO-540-J2BD 发动机，研究了 91/96 号无铅航空汽油的部分性能。研究表明，在功率 350 马力，气缸头温度 500°F 条件下，91/96 号航空汽油没有出现爆震及提前点火等问题。

2004 年，FAA 技术中心发布 CRC (Coordinating Research Council)关于 30 种无铅航空汽油在活塞发动机中运行情况的研究报告[20]。该研究报告旨在找寻新的高辛烷值无铅航空汽油，用以替代现行的 100LL。研究报告采用莱康明 IO-540-K 发动机，主要测试了 MON 从 96.2 至 105.6 的无铅航汽，也采用 100LL，无铅参比燃料和含铅参比燃料进行对比。研究结果表明，仅用 MON 来预测航空汽油对发动机的爆震性能是完全不够的。而且，在同等爆震条件下，发动机对无铅航空汽油的 MON 和 PN (Performance Number)要求更高。

2007 年，FAA 技术中心[21]发布中 MON ( $MON < 100$ )和高 MON ( $MON \geq 100$ )无铅燃料和含铅燃料，在莱康明 IO-540-K 及 IO-320-B 发动机上运行情况的报告。该报告分为高 MON 燃料和中 MON 燃料两个部分。

关于高 MON 燃料，1) 100LL 比 100MON 无铅异辛烷燃料和 100MON/161PN (简称为 100/161)无铅含苯胺燃料有更优异的发动机性能；2) 100LL 对发动机的性能低于 104/161 无铅含苯胺燃料；3) 对比 100LL 和 100/100 含铅燃料，在巡航状态下，两者的性能基本一致，但是起飞状态下，100LL 的性能更优。

关于中 MON 燃料，1) 91/98 含铅航空汽油的发动机性能优于 91/98 无铅航空汽油；2) 91/98 含铅航空汽油的发动机性能优于 93/98，但略逊于 94/98 无铅航空汽油；3) 不含金属添加剂，品度值为 98 的无铅航空汽油，其 MON 需高于 91/98 含铅航空汽油 2~3 个单位，才能达到与其相等的发动机性能。

2007，SFOCA (Swiss Federal Office of Civil Aviation) [22]研究了 Hjelmc91/96，无铅车用汽油，100LL 的排放情况。研究结果表明，Hjelmc91/96 燃烧后排放尾气中包含的颗粒物大小及数量均优于 100LL。

## 5. 最新研究进展

无铅航空汽油替代含铅航空汽油已经势在必行。从 20 世纪末开始，全球多家大型炼油都开始研制高辛烷值无铅航空汽油，同时也进行无铅航空汽油和发动机相关关系研究。

2013 年 8 月，Swift 公司向 ASTM 提交了其高芳烃无铅航空汽油的研究报告[23]。研究报告中详细列举了 Swift 公司 UL102 航空汽油从配方筛选，理化性能测试，发动机试验，材料相容性试验以及环境试

验方面的结果。该研究报告已经提交 ASTM, 也根据该报告颁布了相应的技术标准。目前, Swift UL102 正在 FAA 技术中心进行验证, 已经成为 9 种候选燃料中进入第二阶段的 2 中燃料之一, 预计将于 2018 年完成所有测试, 进入市场。

2014 年 5 月, Shell 公司也向 ASTM 提交了其公司的无铅航空汽油研究报告[12]。报告中详细列举了 Shell 无铅航空汽油的理化性能测试, 特性试验, 发动机试验, 金属及非金属相容性试验以及发动机试验等内容。该验证方法完全参照 2013 年发布的 ASTM D7826 [24] 进行。根据该研究报告, ASTM 也出台相应的标准用于规范油品质量。目前, Shell UL102 正在 FAA 技术中心进行验证, 已经进入第二阶段试验。

由于 MON 并不能准确反应航空汽油对活塞发动机的爆震性能, Shell 公司已经开始研究航空汽油其他性质与发动机爆震之间的关系, 而不仅仅考虑其理化性质。目前的研究成果表明, 航空汽油的 MON 和 RON 与发动机的气缸压力和温度存在联系。发动机运转条件不仅仅对辛烷值有要求, 也对气缸条件有相应要求。Shell 公司希望找到一个关系式, 通过 RON 和 MON 来预测航空汽油对活塞发动机爆震性能的影响, 目前研究正在进行中。

## 6. 结论及讨论

无铅航空汽油发展至今已经经历了多种变革, 每一次的变革都伴随着航空发动机的发展和工业技术的提升。

无铅航空汽油出现之初, 由于受到其辛烷值较低, 抗爆性能低于含铅航空汽油的影响, 其使用一致受到限制。但是, 由于四乙基铅的毒性及含铅航空汽油排放对环境污染的影响, 美国环境保护署(EPA) 已经明确要求使用更清洁的无铅航空汽油来替代现行的含铅航空汽油, 并计划 2020 年全面实施无铅航空汽油。目前, FAA, 发动机公司以及炼油企业正在积极合作, 对新研发的高辛烷值无铅航空汽油进行适航验证, 为 2020 年取代含铅航空汽油做好储备。

## 基金项目

中国民用航空局科技创新引导资金(MHRD20130205)。

## 参考文献 (References)

- [1] Ogston, A.R. (1981) A Short History of Aviation Gasoline Development. 1903-1980, SAE Technical Paper 810848.
- [2] 奇货. 汽油抗爆剂发展方向[J]. 中国科技信息, 2002(10): 52-53.
- [3] Morrison, K. (1982) Letter to Mr. Lars H. Hjelmberg.
- [4] Hjelmc Oil Inc. (1997) 1993, 1995, 1997 the Unleaded Aviation Gasoline with Improved Environmental Qualities, Aviation Gasoline 91/96 Unleaded (AVGAS 91/96 UL). Hjelmc Oil.
- [5] American Society for Testing and Materials (2015) Hydrocarbon Unleaded Aviation Gasoline. ASTM D7547-15. <https://doi.org/10.1520/D7547-14B>
- [6] FAA (2013) About Aviation Gasoline. <http://www.faa.gov/about/initiatives/avgas/>
- [7] American Society for Testing and Materials (2015) High Aromatic Content Unleaded Hydrocarbon Aviation Gasoline. ASTM D7719-14d.
- [8] American Society for Testing and Materials (2015) Unleaded Aviation Gasoline Test Fuel. ASTM D7960-14. <https://doi.org/10.1520/D7960-14>
- [9] American Society for Testing and Materials (2014) Unleaded Aviation Gasoline Containing a Non-Hydrocarbon Component. ASTM D6227-14. <https://doi.org/10.1520/D6227-14>
- [10] American Society for Testing and Materials (2015) Grade 94 Unleaded Aviation Gasoline Certification and Test Fuel. ASTM D7592-15a. <https://doi.org/10.1520/D7592-15A>
- [11] American Society for Testing and Materials (1998) ASTM Specification Background on Grade 82UL Aviation Gasoline. ASTM Research Report D02, 1427.

- [12] Shell Global Solutions (US) Inc. (2015) Unleaded Aviation Test Gasoline. D02.J.02 ASTM D7960 Task Force Report.
- [13] Veal, C.B. (1936) Rating Aviation Fuels—in Full-Scale Aircraft Engines. Cooperative Fuel Research Committee Report No. 360112.
- [14] Cummings, H.K. (1938) Rating Aviation Fuels in Full-Scale Aircraft Engines. Cooperative Fuel Research Committee Report No. 380177.
- [15] Heron, S.D. and Beatty, H.A. (1938) Aviation Fuel. Presented at the Section Meeting of the Institute of the Aeronautical Sciences, at the Summer Meeting of the American Association for the Advancement of Science, Ottawa.
- [16] Holliman, W.C., Barker, M.G. and Potts, N. (1948) Survey of Commercial Aviation-Gasoline Characteristics. Department of the Interior Bureau of Mines, 4273.
- [17] Blade, O.C. (1955) National Annual Survey of Aviation Gasoline and Aviation Jet Fuel. Department of the Interior Bureau of Mines Report of Investigations, 5132.
- [18] Blade, O.C. (1961) Mineral Industry Surveys. Aviation Fuels, United States Department of the Interior Bureau of Mines Petroleum Products Survey No. 19.
- [19] Wiedling, S. and Martinsson, B. (1992) Flight Test of Leaded vs. Unleaded Aviation Gasoline in a Light Aircraft. ISRN KTH/FPT/AR-63-SE.
- [20] Atwood, D. and Canizales, J. (2004) Full-Scale Engine Knock Tests of 30 Unleaded, High-Octane Blends. DOT/FAA/AR-04/25.
- [21] Atwood, D. (2007) High-Octane and Mid-Octane Detonation Performance of Leaded and Unleaded Fuels in Naturally Aspirated, Piston, Spark Ignition Aircraft Engines. DOT/FAA/AR-TN07/5.
- [22] Rindlisbacher, T. (2007) Aircraft Piston Engine Emissions Summary Report. J 0/3/33/33-05-003 ECERT.
- [23] Swift (2013) Research Report on ASTM D7719 Highoctane Unleaded Test Fuel—A Collection of Third Party Data. D02.J.02ASTM D7719 Task Force Report.
- [24] American Society for Testing and Materials (2013) Evaluation of New Aviation Gasolines and New Aviation Gasoline Additives. ASTM D7826-13. <https://doi.org/10.1520/D7826-13>

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjctet@hanspub.org](mailto:hjctet@hanspub.org)