

燃料化学性质对燃烧室排气冒烟的影响

北京航空航天大学 金如山 美国普度大学 A. H. Lefebvre

燃气轮机燃烧室烟粒生成所涉及的各种反应机理非常复杂,至今尚未搞清楚。但导致烟粒生成的条件,至少从工程观点,已经相当清楚^[1]。现已明白,排烟是由主燃区富油、缺氧区中生成很细的烟粒引起,如用压力雾化喷嘴,主要烟粒生成区处于燃烧室中心燃油喷雾锥内。这里燃烧产物迴流和雾锥相遇,温度较高,有油蒸汽,但缺氧,故生成大量烟粒,主燃区生成的烟粒子大部分在下游高温区域内氧化消耗掉。因而从排气冒烟的角度可将燃烧室看成为两部分:主燃区,决定烟粒子的生成率;中间区,决定烟粒子的消耗率,最后的排气冒烟是这两个区过程的净结果,烟粒生成并不是燃烧过程的平衡产物,要根据化学动力学或热力学数据来预估烟生成率及其最后的浓度是不可能的。实际上烟生成率更大程度上取决于雾化及油气混合的物理过程,较小程度上受化学动力学影响。烟生成与燃烧室设计有很大关系。早期研究^[2]表明,贫油主燃区燃烧室对燃油性质上的变化不如富油的敏感。

至今已提出许多烟粒生成的机理模型。Graham^[3]的激波管研究表明芳香烃可通过两种机理产生烟粒:(1)芳香烃的环状结构凝聚成石墨结构,即迅速生成途径;(2)慢得多的途径,碳氢化合物裂解成小的碳氢碎片,然后聚合形成大的缺氢分子,最终形成晶核即烟粒。研究表明,温度高于1800K,第二种机理起决定作用,故燃烧温度高时烟粒生成率很快降低。但文献[3~6]指出,上述第一种机理中没有包括芳香烃环可提供相对稳定的核,活化的碳氢碎片可在这些核上凝聚,并由谐振效应而稳定下来,碳原子浓度会显著增大由芳香烃分子和轻的不饱和分子(如乙炔)生成烟的速率。这样在碳原子浓度高情况下($\approx 10^{24}/\text{m}^3$),通过两种机理生成烟的速率就差不多,根据文献[4,5],可以解释为什么可以很容易脱氢以生成萘的四氢化萘以及萘,由于其分子结构复杂,谐振稳定化能量大,能起到更有效凝聚核的作用。

Blazowski^[7]用巯辛烷和甲苯燃料各种比例的混合做试验,得出的试验数值表明与上述机理相符,但文献[8]试验结果表明,对含有高浓度多环芳香烃的燃料,其机理更复杂。

对燃气轮机燃烧室,试验确定主要影响烟粒生成及排气冒烟的因素为:(1)燃料性质;(2)工作参数,包括燃烧室压力、温度、进口空气温度;(3)燃烧室设计,包括主燃区油气比、喷嘴形式(压力雾化或空气雾化),喷雾质量。本文着重于评述燃料性质(特别是化学性质)对烟粒生成及排烟的影响。尤其研究那项组成或指标为燃料性质中对生烟影响最大。这并不意味着只要根据燃料性质就可以概括冒烟数据,只是本文不涉及燃烧室设计及参数的影响。

燃料性质可以从两方面影响冒烟:(1)通过对形成局部过分富油区来影响;(2)对生成烟的

阻止作用有所不同,前者主要决定于物理性质,例如粘性,挥发性。取决于主燃区是贫油或富油、燃油由低挥发性变为高挥发性时可以减少,也可以增大冒烟啊^[9]。

Naegeli^[10]采用 T63 燃烧室来研究燃料性质对火焰辐射和烟生成的影响,选择了十六种不同燃料来研究组成、馏程以及粘性对辐射和冒烟的影响,结果发现物理性质,如粘性及终馏点,对冒烟和辐射影响很小,这意味着烟生成本质上是一种气相现象,这个研究表明燃料的烟生成倾向首先取决于燃料碳氢比,其次是燃料分子结构。其他人的研究^[7,11,14,15]也表明,为比较不同燃料测量对烟生成倾向,碳氢比(或氢含量)是一个恰当的概括参数。但试验数据中的一些不规则性表明分子结构对烟生成的关系,可能比最初想象的更大些。这促使 Naegeli^[8]用 5cm 的 Phillips 燃烧室进行一系列试验,来确定分子结构对烟生成的影响。为此,用配比混合得出六种试验燃料,具有相同的氢含量(12.8%),但由不同分子组成。结果表明不同分子结构对烟生成可起到重要作用。发现含有较高的多环芳香烃(20%)的燃料所产生的烟,比只根据氢含量的关系式所预期的多。但也发现,如果多环结构饱和,如萘烷,则这种燃料就与典型的石油基燃料一样,氢含量是表明燃料生烟倾向的恰当参数,随后用这六种燃料在 T63 燃烧室中试验(额定工况)。用测量主燃区的火焰辐射来评定生烟倾向(因在同样工作参数下火焰辐射和主燃区生烟直接关联)。结果表明这六种燃料基本上产生同样辐射强度,这表示多环芳香烃浓度似乎对烟生成影响不大,但并不能由此得出上述结论。因为燃烧室压力、油气比及火焰光程长度很高,使火焰辐射高度趋近于一,这样不管什么燃料组成、性质,都显示不出对火焰辐射有多大影响。

Naegeli 等人^[12]在 Phillips 5 cm 燃烧室中用火焰辐射和灰度测量来研究氢含量和多环芳香烃对烟生成影响,用几种燃油混合得出氢含量在 11.5~14.2% 范围内,用以下方法来确定多环芳香烃含量的影响:用附加甲基萘和四氢化萘得出一组不同 C/H 的燃料,考察烟生成随(C/H)的变化;比较这两组曲线来显示多环芳香烃的作用,所得结果与其他研究一致:C/H 比(氢含量)是概括燃料化学组成、性质对烟生成影响的主要参数,而多环芳香烃的影响形成对上述经验关系曲线的偏离。他们还发现由多环芳香烃引起烟生成的增大直接与燃料中多环芳香烃的碳成正比。

文献[4~6]研究了喷气燃料组成对排烟和火焰辐射的影响,他们采用一个小型燃烧设备模拟在足尺寸燃气轮机燃烧室的工况。共有十七种试验燃料,氢含量 12.1~15.2%,芳香烃含量 0~47%,烟点 11~45,萘含量 0~11.1%。结果发现总的说氢含量比芳香烃含量可以更好地概括烟生成倾向。烟点同样可以较好地概括数据;与氢含量差不多。对于含有稠环烷(例如四氢化萘)的燃料,不能用芳香烃含量来概括,但如用氢含量则可以。同时也发现,对含萘量高的燃料,用烟点来概括比用氢含量更好。该研究得出看法是:“用氢含量和另一性质(如烟点或萘含量)组合起来,可对总的燃烧质量提供很好的衡量”。其结论是:对很广的燃料组成,氢含量和/或烟点比芳香烃含量,可更好地概括燃料燃烧质量。后来 Bowden^[5]采用同样缩尺燃烧室在 10 大气压下研究含有单环芳香烃或多环芳香烃的燃料的生烟倾向,结果表明含有萘或四氢化萘浓度超过 10% 的燃料,只用氢含量不能概括燃料的烟生成倾向。

近期 Bowden 等^[13]做了个有趣的研究。他们测量三个不同燃烧室的烟粒浓度值,这三个燃烧室是:(1)他们自己发展的 Shell 缩尺燃烧室;(2)Phillips 5cm 缩尺燃烧室;(3)罗-罗公司的 Tyne 燃烧室,这些燃烧室工作压力最高至 12 大气压,进口空气温度最高至 773K。选择七种燃料,代表实际煤油类燃料中广泛变化的燃料性质,这个研究的一个重要结论是:缩尺燃烧室在

预示燃料烟生成特性上可以代表足尺燃烧室。

最近十年来,美国军方、NASA 及主要发动机公司进行了大量研究来探明预期的未来燃油对现有发动机的影响^[18~22], 提供了大量数据来揭示燃油性质对烟生成及冒烟的影响。这些燃油包括 JP4, 油页岩提炼的 JP4 以四种混合的 JP4, 氢含量从基本 JP4 的 14.5% 变到 11.5%。这些研究的一般结论是: 氢含量是燃料性质影响烟生成倾向的主要因素, 管式燃烧室的数据还表明含萘量低的燃料, 尽管其总的芳香烃含量高, 仍然产生低的排气冒烟^[22]。由 F100 及 TF33 燃烧室得到的数据亦显示萘含量的重要影响。^[21] 同样氢含量的两种燃料, 萘含量 14.9% 的燃料所产生排气冒烟明显地高于萘含量 4.0% 的燃料。

以上综述可见, 影响排烟、烟生成、火焰辐射的燃料性质涉及到 C/H 比。氢含量, 烟点、总芳香烃含量、多环芳香烃含量及萘含量等, 常在一种试验数据中某一个性质可以代表, 但在另一种试验中又显得不行, 因而研究采用那个(或那种组合)参数可以概括绝大多数燃料性质影响的试验数据, 很有实际意义, 否则难以比较不同研究结果, 这是本文后一部分将讨论的。

在燃料规范中广泛使用的烟点定义如下: 将试验燃油放在灯蕊的油灯中, 缓慢增大火焰高度(将灯蕊提上), 直至出现冒烟。此火焰高度(mm)即为烟点。烟点越高则烟生成倾向越低, 可见烟点带有综合性的特色。

在过去研究燃料性质影响的文献中大多数倾向于采用氢含量。氢含量的重要作用最初是 Schirmer 等^[24,25] 用 Phillips 5 cm 缩尺燃烧室, 研究一系列燃油影响(压力高至 15 大气压)时确定的, 他们的结果表明, 随氢含量的降低, 烟生成有规律的增大, 以后用较大尺寸的燃气轮机燃烧室的研究, 一般说证实了 Schirmer 的看法。但也有很多证据表明, 同样氢含量的不同燃料, 其烟生成倾向可以很大的变化。这导致某些研究者(如文献 4)建议用氢含量及另一个燃料性质, 例如芳香烃含量或萘含量组合起来, 可更好地评定燃油的生烟倾向。Naegeli 等^[8,12] 研究表明, 除氢含量外, 还应包括多环芳香烃的影响, 他们建议如下形式的“有效氢含量”作这概括参数:

$$H - m(pA) \quad (\text{参数一})$$

式中 H 为燃料 氢含量(%), pA 为多环芳香烃(%) 根据 Clark^[26] 的研究, m 为 0.055。Clark 亦建议用一个非线性的组合参数, 其中 $0.1 < n < 0.4$ 。

$$H - (pA)^n \quad (\text{参数二})$$

以上两个参数的共同特点是燃油多环芳香烃增大导致有效氢含量降低。

Rosfjord^[27] 研究了燃油组成对火焰辐射换热影响, 结论倾向于减低芳香烃含量的作用。他在近代燃气轮机燃烧室上测量了二十五种燃油的火焰辐射, 得出最好代表燃油影响的是烟点、氢含量与萘含量。他的数据有重要性, 因为试验的燃烧室压力和温度与典型的燃气轮机燃烧室上的数值一致, 且试验的燃料化学性质范围很广, 氢含量 9.1~15%, 总芳香烃量 0~100%, 萘含量 0~30%(容积), 由此他建议用氢含量与萘含量(N)组合来代表燃油组成的影响:

$$H^{1.2}(100 - N)^{-0.4} \quad (\text{参数三})$$

他还认为用参数三来概括试验数据和用烟点差不多, 都比单纯用氢含量为佳。

本文目的是导出更合适概括燃气轮机燃烧室与烟生成有关现象的组合参数。但有两个困难: (1) 有些文献未报导燃料的详细化学组成, 故本文只限于已知燃料组成的数据; (2) 涉及到大量各种燃烧室, 而本文着重于实际发动机燃烧室的数据分析, 包括 TF33 和 F100、TF41、

F101, Tyne, 亦包括众所周知的 Phillips 5cm 缩尺燃烧室的数据。由于篇幅所限, 只选出部分曲线结果予以叙述, 代表燃料的性质有氢含量、芳香烃含量、萘含量和烟点。

对所有的燃烧室都发现氢含量可以一定程度上代表燃料性质的影响, 但有些燃料其氢含量一样, 而烟点不同, 例如图 5 所示。这种情况下氢含量作为横坐标就不合适, 正如文献[27]指出, 用烟点可以较好的归纳数据, 但对于同样烟点而萘含量不同的数据又不好概括, 本文研究了芳香烃含量及萘的影响, 证实了萘含量比芳香烃含量更重要, 更确切地代表燃料影响。本文研究亦表明用 $(100-N)^{-0.4}$ 可以恰当代表萘含量的影响, 这证实了 Rosfjord 的结论。但他研究的是燃料性质对火焰辐射(并非烟生成)的影响, 本文考察的是烟生成, 着重研究对烟生成来说采用那个参数更好代表燃料性质影响。本文从整理大量的燃烧室试验数据得出用以下组合参数可以最佳的代表燃油性质对烟生成的影响:

$$SP^{-0.92}(100-N)^{-0.4} \quad (\text{参数四})$$

上述参数可以成功归纳排烟数据的部分例子示于图 2、4、6、9。图 1、2 所示为 TF33 燃烧室在巡航状态下的排烟数据, 图 1 表明用氢含量来概括时其关联性并不很好。图 2 示同样数据用参数四来概括, 结果明显改善。TF33 是八个火焰筒的环管燃烧室, 每个火焰筒装有六个双油路压力雾化喷嘴。

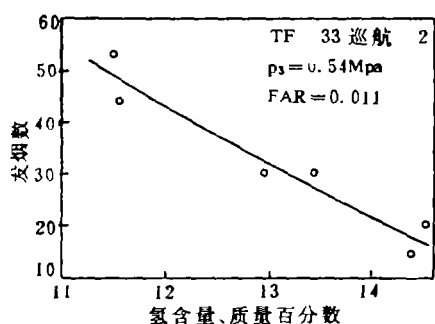


图 1 TF33 燃烧室发烟数与氢含量的关系

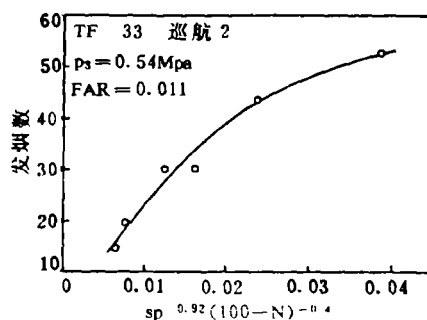


图 2 TF33 燃烧室发烟数与烟点-萘含量组合参数的关系

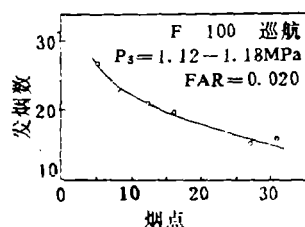


图 3 F100 燃烧室发烟数与烟点的关系

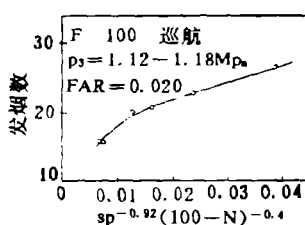


图 4 F100 燃烧室发烟数与烟点-萘含量组合参数的关系

图 3、4 示 F100 燃烧室在巡航状态的排烟数据。F100 是军用的先进涡轮风扇发动机, 采用环形燃烧室, 装有十六个空气雾化喷嘴。图 3 示, 用烟点可以适当的关联数据(只在高烟点情况较差)。图 4 示, 采用本文建议的组合参数, 可以更好的概括试验数据。

用 Tyne 燃烧室试验的数据由图 5 表明, 用氢含量来表示, 数据相当分散。同样氢含量, 相对烟浓度可变化 90%。图 6 表示用本文建议的参数四, 数据的关联性显得相当好。采用 Phillips 5cm 缩尺燃烧室, 在 10 和 12 大气压, 进气温度 623 和 773k 下的烟浓度数据示于图 7

~9。从图9与图7、8的比较看出,采用 $SP^{-0.92}(100-N)^{-0.4}$ 的组合参数来代表数据,比只用氢含量或烟点来代表都有改善。

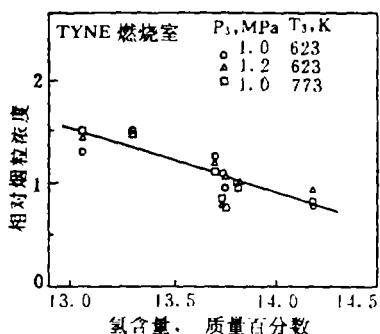


图5 Tyne 燃烧室烟浓度与氢含量的关系

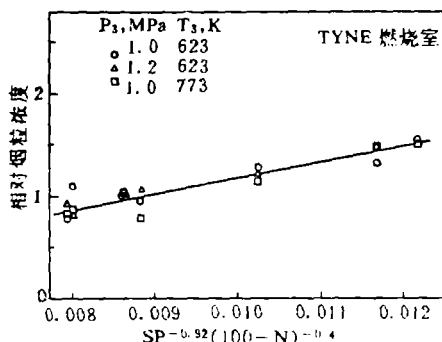


图6 Tyne 燃烧室烟浓度与烟点-氢含量组合参数的关系

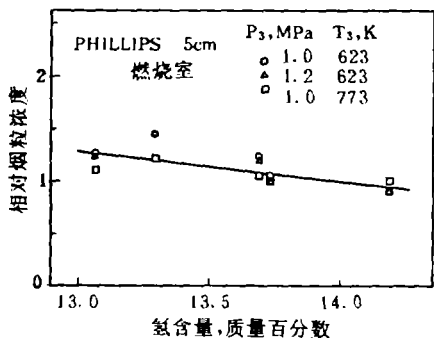


图7 Phillips 5cm 燃烧室烟浓度与氢含量的关系

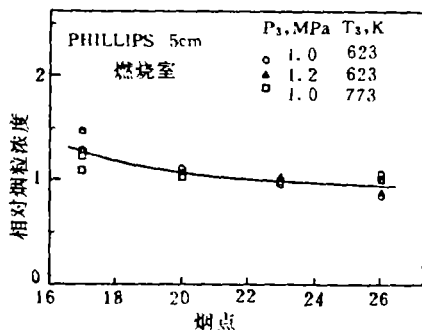


图8 Phillips 5cm 燃烧室烟浓度与烟点的关系

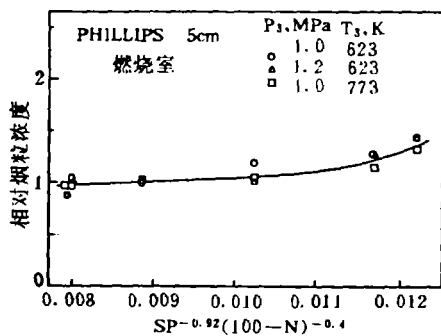


图9 Phillips 5cm 燃烧室烟浓度与烟点-氢含量组合参数的关系

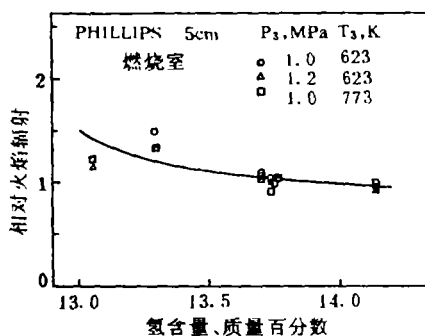


图10 火焰辐射与氢含量的关系

由于火焰辐射与烟生成是直接有关的,所以用什么参数代表火焰辐射数据,亦能说明问

题。图 10 示 Phillips 5cm 缩尺燃烧室的相对火焰辐射数据不能用氢含量很好地概括, 同样数据, 用本文建议的组合参数可以很好地概括(图 11)。图 12 中的数据用氢含量来表达, 看不出任何规律性, 而用 $SP^{-0.92}(100-N)^{-0.4}$ 来整理, 大致的规律性是很明显的。

本文的结论是, 从燃料的化学组成性质对烟生成的影响来看, 用烟点和萘含量的组合参数

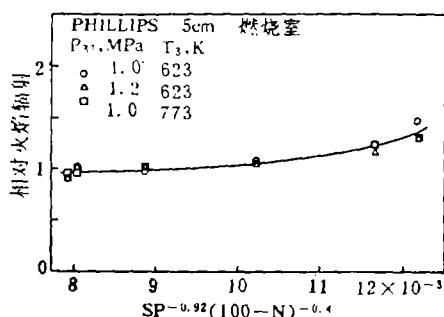


图 11 火焰辐射与烟点-萘含量组合参数的关系

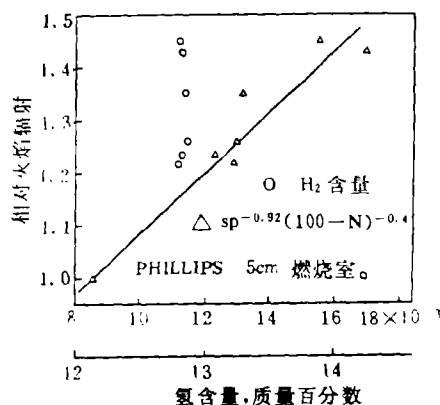


图 12 用氢含量或用烟点-萘含量组合参数来概括火焰辐射数据的比较

$SP^{-0.92}(100-N)^{-0.4}$ 可以最佳的概括试验数据。

参 考 文 献

- [1] Lefebvre, A. H., "Gas Turbine Combustion," Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [2] Lefebvre, A. H., and Durrant, T., SAE Paper 204C, Published in Esso Air World, Vol. 13, No. 3, 1960.
- [3] Graham, S. C., Homer, J. B., and Rosfjord, T. J., Proc. Roy. Soc., A344, 1975.
- [4] Bowden, T. T., and Pearson, J. H., I. Mech. E. Conference Publication C70/83, Vol. 2, 1983.
- [5] Bowden, T. T., and Pearson, J. H., ASME Paper 83-GT-90, 1983.
- [6] Bowden, T. T., Pearson, J. H., and Wetton, R. J., ASME Paper 84-GT-6, 1984.
- [7] Blazowski, W. S., ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 102, 1980, pp403-408.
- [8] Naegeli, D. W. and Moses, C. A., ASME Paper 80-GT-62, 1980.
- [9] Dodds, W. J., Peters, J. E., Colker, M. B., and Mellor, A. M., J. of Energy, Vol. 1, No. 2, 1977, pp. 115-1.
- [10] Naegeli, D. W. and Moses, C. A., SAE Paper 781026, 1978.
- [11] Moses, C. A. and Naegeli, D. W., ASME Paper 79-GT-178, 1979.
- [12] Naegeli, D. W., Dodge, L. A., and Moses, C. A., J. Energy, Vol. 7, 1983.
- [13] Bowden, T. T., Carruer, D. B., and Courtenay, L. W., ASME Paper 87-GT-89, 1987.
- [14] Jackson, T. A., and Blazowski, W. S., Technical Report AFAPL-TR-79-2014.
- [15] Friswell, N. J., Combustion Science and Technology, Vol. 19, 1979.
- [16] Gleason, C. C., Oller, T. L., Shaysen, M. W., and Bahr, D. W., AFAPL-TR-79-2015, June 1979.
- [17] Gleason, C. C., Oller, T. L., Shaysen, M. W., and Bahr, D. W., AFAPL-TR-79-2018, June 1979.
- [18] Vogel, R. E., Troth, D. L., and Verdouw, A. J., AFAPL-TR-79-2072, April 1980.
- [19] Gleason, C. C., Oller, T. L., Shaysen, M. W., and Kenworthy, M. J., AFWAL-TR-80-2092, November 1980.
- [20] Oller, T. L., et al., AFAWAL-TR-81-2100, May 1982.
- [21] Russel, P. L., AFWAL-TR-81-2081, Sept. 1982.
- [22] Gratton, M., Critchley, I., and Sampath, P., AFWAL-TR-84-2042, July 1984.
- [23] Gleason, C. C. and Bahr, D. W., ASME Paper 80-GT-55, 1980.
- [24] Schirmer, R. M. and Miller, E. C., "Radiation from Jet Combustor Flames", presented at Gas and Fuel Chemistry Session, American Chemical Society, Urbana, Illinois meeting, 15-16 May 1958.
- [25] Schirmer, R. M. and Quigg, H. T., Phillips Petroleum Company Report No. 3952-65R, 1965.
- [26] Clark, J. A., AIAA Journal, Vol. 20, No. 2, 1984.
- [27] Rosfjord, T. J., AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 3, No. 6, 1987.

by using heterogeneous Well Stirred Reactor Analysis (WSR). Considering real combustion processes and different combustion structures, the General Reactor Analysis and Simulation Program (GRASP) are improved and supplemented. A new method is put forward to process the distribution of mixture mass with different Φ and to determine exit flow parameters in the primary zone. This paper also deals with the secondary air flow and its mixture with primary gases, the local fuel-rich treatment and the calculation of equilibrium temperature and compositions. In this way, the GRASP has been developed from one only for a simple model combustor to a modification able to predict 17 emission compositions and combustor exit temperature for two real gas turbine combustors. The results predicted by the modified GRASP are in good agreement with measured data. The prediction also confirms the conclusion drawn from experiments that the emission pollution performance of the vaporiser tube combustor is better than that of the single tube combustor. Moreover, it is found that the errors in prediction of the exit temperature are one of the reasons which cause the errors in NO_x prediction.

EFFECTS OF FUEL CHEMICAL PROPERTIES ON EXHAUST SMOKE FROM GAS TURBINE COMBUSTOR

Jin Rushan (Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Lefebvre A. H. (Purdue University)

Abstract The state-of-the-art of the study on soot formation and exhaust smoke from gas turbine combustor has been reviewed with stress on the effects of fuel chemical properties. Based on a great amount of experimental data obtained on a variety of gas turbine combustors, the best correlation parameter representing the fuel effect has been determined as $SP^{-0.92}(100 - N)^{-0.4}$, where SP is smoke point, N is the naphthalene content (in percentage) of the fuel.

A DYNAMIC DIGITAL MODEL FOR THE TURBOJET WITH PULSE-MONITORED FUELLER

Tang Diyi and Cai Yuanhu (Northwestern Polytechnical University)

ABSTRACT The ingestion of the hot gas from armament firing or recirculation of exhaust gas from VTOL- and STOL-type aircraft will bring engine into unstable and cause troubles for flight. It is good practice to use a pulse-monitored fueller for improving the engine instability. A digital model for this purpose is presented, which consists of a first order fuel feed model, a components volume model and a rotor dynamic model. The steady-state performance and transient behaviour of a double spool turbojet are predicted on the basis of this model. Then, the steady-state performance is compared with the sea-level acceptance curve to check the validity of the model in specific case of steady state. The transient behaviours, such as the time histories of the secondary fuel line pressure, the speeds of two spools and the thrust, are also calculated and compared with the experimental curves of the same behaviours but of another engine. The results indicate that the simulation effect of this model is satisfactory.