

民航飞机起飞过程细粒子排放特征

韩博^{1,2},刘雅婷²,陈鑫³,任强¹,魏志强^{1*} (1.中国民航大学空中交通管理学院,天津市空管运行规划与安全重点实验室,天津 300300; 2.南开大学环境科学与工程学院,国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室,天津 300071; 3.天津航空有限责任公司飞行部,天津 300300)

摘要: 选择 B737-800 作为典型机型,基于 BM2-FOA 耦合模型,通过对飞机性能参数的模拟,获得了其在全推力和减推力等多种方式下,起飞离场爬升至 1000m 高度过程中每一时刻 PM_{2.5} 的排放指数,并计算了精确排放量。同时研究了燃油含硫量对细粒子排放量的影响,分析了不同组分对 PM_{2.5} 排放的贡献率,并将计算结果与 ICAO 基准参数的估算结果进行对比。结果表明,各种方式中 PM_{2.5} 排放指数的差异主要存在于地面起飞段。其中,全推力起飞方式下,非挥发性组分和挥发性有机组分排放指数最高,因此一次起飞过程 PM_{2.5} 排放总量最高,约为 37.6g(普通燃油)。使用减推力起飞后,PM_{2.5} 排放量降至 36.7~35.5g。使用高硫燃油时,PM_{2.5} 排放量约升高 150%。经过对比发现,将 ICAO 的基准参数直接用于 FOA 方法,对 PM_{2.5} 排放量的估算结果偏差较大。与机动车相比,使用普通燃油和高硫燃油的一次全推力正常起飞过程,PM_{2.5} 排放量分别约等于一辆国Ⅳ轻型汽油车行驶 2984km 和 7294km。精确计算方法为编制机场区域飞机污染排放清单提供基础。

关键词: 飞机; 起飞; 细粒子; 排放特征; 波音 737

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2017)05-1620-08

Fine particles emission characterization of civil aviation aircraft during takeoff. HAN Bo^{1,2}, LIU Ya-ting², CHEN Xin³, REN Qiang¹, WEI Zhi-qiang^{1*} (1.Tianjin Key Laboratory for Air Traffic Operation Planning and Safety Technology, College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3.Flight Department, Tianjin Airlines, Tianjin 300300, China). *China Environmental Science*, 2017,37(5): 1620~1627

Abstract: Boeing 737~800 was selected as a typical model in this thesis. Based on BM2-FOA coupling model, PM_{2.5} emission indices in full thrust and reduced thrust takeoff from the takeoff time to the height of 1000m were obtained through aircraft performance parameters simulation, and emission loads were worked out then. At the same time, the influences of sulfur content on emission levels were presented, and then the contributions to PM_{2.5} emissions from different components were calculated. A comparison was made between the results using coupling model and ICAO standard parameters. The result showed that the differences of PM_{2.5} emission indices were mainly during the period of takeoff on the ground before climbout. The PM_{2.5} emission of a full thrust takeoff is the largest which the amount is 37.6g (low-sulfur fuel), because of the highest emission indices of non-volatile and volatile organic PM_{2.5} components. In terms of reduced thrust processes, PM_{2.5} emissions decreased to 36.7~35.5g. PM_{2.5} emissions increased by 150% when high-sulfur fuel is used. It has been found from the comparison that the emissions calculated by ICAO standard parameters lead to relatively large errors. Compared with the light-duty gasoline vehicle (national IV standard), the PM_{2.5} emissions of one full thrust takeoff with low-sulfur fuel and high-sulfur fuel equal the emissions of running 2984km and 7294km respectively. Accurate calculation method is supposed be the basis for the preparation of aircraft emission inventory in the airport area.

Key words: airport; takeoff; PM_{2.5}; emission characterization; B737

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(21407174);天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(14JCQNJC08100);中央高校基本科研业务费专项(3122016A012,ZXH2012C003,3122016D025,3122017063);中国民航大学科研启动基金项目(2012QD03X)

* 责任作者, 副教授, weizhiqia@sina.com

环境空气中的 $PM_{2.5}$ 可显著降低大气能见度, 改变云的形成过程, 对气候变化产生影响^[1-3]; 同时, $PM_{2.5}$ 可直接通过人体呼吸道在肺部沉积, 部分粒径更小的 PM 可进入血液循环, 引起心血管系统、神经系统和免疫系统疾病, 影响人体健康^[4-7]。民航大型客机的发动机, 以航空煤油为燃料, 燃烧后会排放大量颗粒物。这些颗粒物在空气动力学直径 30nm 和 100nm 呈现双峰形式的分布特征。因此, 飞机排放的颗粒物主要为 $PM_{2.5}$ ^[8-9]。相对于高空巡航阶段, 飞机在机场起飞着陆时飞行高度低, 特别是起飞过程, 发动机处于最大推力状态, 且耗油量大, 此时排放的 $PM_{2.5}$ 可对人体健康和城市大气环境, 产生更重要的影响^[10-15]。

国际民航组织(ICAO)研究开发了飞机起降(LTO)循环基准排放模型用于机场排放清单估算, 并提供了部分基准排放数据^[16], 但并缺少颗粒物排放指数^[17]。为此, ICAO 建立了 FOA(first order approximation)方法, 基于烟度 SN 计算 $PM_{2.5}$ 排放指数^[8,18]。国内关于民航飞行活动的污染排放研究^[19-24], 大部分使用了 ICAO 的基准模型, 直接模拟机场气态污染物排放情况。国外学者^[25-27]通过在机场测定飞机污染物排放指数发现, 实际运行中的污染物排放指数与 ICAO 提供的基准数据有较大差异。主要原因是选择不同的起飞方式, 以及飞行高度改变后, 燃油流量 FF 和排放指数 EI 均发生改变。同时, ICAO 基准模型所使用的固定飞行时间是基于 70 年代机型起降时间统计而来, 与当前使用的主流机型飞行时间差异大, 导致基准排放模型估算结果存在较大偏差^[19,28-30]。

截至 2014 年, 我国客机的总架数为 2198 架。其中, 波音 737-800(下文简称 B738)是数量最高的机型, 比例超过 30%。在北上广深机场中 B737 系列机型的起降数量约在 40%左右。因此, 本文选择 B738 作为典型机型, 通过飞机性能模型模拟其在多种不同起飞方式下, 每一时刻的飞行参数, 进而基于 BM2-FOA 耦合模型计算获得每一时刻 $PM_{2.5}$ 真实排放指数, 重点研究了起飞全过程的 $PM_{2.5}$ 排放量, 分析了主要组分对起飞过程细粒子排放的贡献。同时, 评估了燃油含硫量对

$PM_{2.5}$ 排放量的影响, 并与使用 ICAO 基准参数估算结果进行对比, 以期制定机场颗粒物排放清单和民航节能减排提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 飞机发动机基准排放数据

对于 B738 机型常见的选装发动机型号为 CFM56-7B26, 计算所需部分基准排放数据, 来自 ICAO 数据库, 见表 1。

表 1 CFM56-7B26 发动机基准排放数据

Table 1 Standard emission parameters of CFM56-7B26

飞行阶段	发动机 推力(%)	燃油流量 (kg/s)	运行时间 (min)	HC 排放指 数(g/kg)	SN
起飞	100	1.221	0.7	0.10	14.7
爬升	85	0.999	2.2	0.10	11.9
进近着陆	30	0.338	4.0	0.10	4.4**
滑行	7	0.113	26.0	1.90	4.4**
Max*					14.7

注:*仅适用于SN, 即SN_{max}。**此处原始数据为0值, 根据FOA方法使用公式SN_{mode}=0.3·SN_{max}计算而来^[28]。

1.2 真实飞行参数模拟

本文研究的飞机起飞过程, 是指从跑道头开始, 起飞滑跑并爬升至离地面 1000m 的飞行过程, 包括了地面起飞段和空中爬升段。真实条件下, 起飞方式包括全推力正常起飞和减推力起飞。正常起飞时, 飞机发动机推力为最大推力状态。而当飞机重量较低时, 可以使用略小的推力起飞, 即减推力起飞。灵活温度法是目前大型民航飞机最常见的减推力起飞方式, 即在发动机设置中选择一个更高的温度参数, 来减小发动机的推力, 达到延长发动机部件寿命、提高运行可靠性及降低噪音的目的。

选择不同的起飞方式, 以及伴随起飞爬升过程的高度变化, 由于温度、气压等大气环境条件的改变, 飞行参数也将变化, 最终影响污染排放量。因此, 直接使用基准排放数(表 1)将使估算结果存在偏差。而飞机制造商的飞机性能软件, 可以准确模拟不同起飞方式下的飞行参数。因此, 本文使用波音公司 BCOP(Boeing Climbout Program)软件, 计算飞机的起飞离场参数, 包括起飞过程各个时

刻点的地面距离、几何高度、气压高度、温度、马赫数、燃油流量、总推力等.软件所选计算条件为飞机机型:B738;发动机型号:CFM56-7B26;外界温度:20℃;起飞方式:全推力正常起飞和减推力起飞(灵活温度:30、40、50、60℃).

1.3 基准排放数据修正

SN 和 HC 排放指数 EI_{HC} ,是 FOA 方法估算 $PM_{2.5}$ 排放指数 EI_{PM} 的基础.而 ICAO 数据库中的基准排放数据(表 1),仅限定于 4 种固定推力下,和实际情况不符.因此,为精确计算排放量,需要根据每一时刻飞行参数和外界大气条件进行修正.首先根据表 1 中燃油流量 FF_0 与 SN、 EI_{HC0} 数据,分别进行双线性拟合,建立 FF_0 -SN 和 FF_0 - EI_{HC0} 拟合曲线.

对于飞行中的实际 HC 排放指数 EI_{HC} ,参考 BM2(Boeing Method 2)模型^[31],需要将 BCOP 计算得到的飞机某时刻的实际燃油流量 FF 换算成基准条件(ISA、0m)下的基准燃油流量 FF_0 ,即:

$$FF_0 = \frac{FF}{\delta} \theta^{3.8} \exp(0.2M^2) \quad (1)$$

式中: FF 为实际燃油流量,kg/s; δ 为外界气压与 ISA、海平面的气压 P_0 之比,无量纲; θ 为外界温度与 288K 之比,无量纲; M 为飞行马赫数,无量纲.

再将(1)式计算出的某时刻的基准燃油流量 FF_0 ,代入 FF_0 - EI_{HC0} 拟合曲线,即可获得出当前的 HC 基准排放指数 EI_{HC0} .最后,使用(2)式将基准排放指数转换为考虑实际飞行参数和大气环境条件影响的修正后的实际排放指数 EI_{HC} .

$$EI_{HC} = EI_{HC0} \frac{\theta^{3.3}}{\delta^{1.02}} \quad (2)$$

式中: EI_{HC0} 为 HC 基准排放指数,g/kg; δ 为外界气压与 ISA、海平面的气压 P_0 之比,无量纲; θ 为外界温度与 288K 之比,无量纲.

1.4 $PM_{2.5}$ 排放指数及排放量计算

基于 FOA3.0 方法,估算起飞过程 $PM_{2.5}$ 的排放指数 EI_{PM} .该方法通过对挥发性和非挥发性组分细粒子分别进行计算,进而得到比较精确的飞机发动机 $PM_{2.5}$ 排放指数.

首先,将通过(1)计算得到的飞机某时刻的基准燃油流量 FF_0 ,代入 FF_0 -SN 曲线,获取该时刻

SN 值.其后,非挥发性组分排放指数 EI_{PMvol} ,通过(3)式计算.

$$EI_{PMvol} = 0.054 \cdot (SN)^{1.234} \cdot (AFR) + 0.877 \quad (3)$$

式中:SN 为发动机排气烟度,无量纲;AFR 为空气燃料比,无量纲.

挥发性细粒子组分包括燃油中的有机组分和含硫组分,其中挥发性有机组分排放指数 $EI_{PMvol-O}$ 计算方法为:

$$EI_{PMvol-O} = \delta \cdot EI_{HC} \quad (4)$$

式中: δ 为 FOA3.0 方法测试特定发动机 $EI_{PMvol-O}$ 和 EI_{HC} 比值,mg/kg; EI_{HC} 为发动机 HC 排放指数,g/kg.

挥发性含硫组分排放指数 $EI_{PMvol-S}$ 计算方法如式(5).

$$EI_{PMvol-S} = 3 \cdot 10^6 \cdot FSC \cdot \varepsilon \quad (5)$$

式中:FSC 为燃油含硫量质量百分数,%; ε 为硫转化效率,%.

FOA3.0 方法中,硫转化效率 ε 的默认值为 2.4%.燃油含硫量 FSC 默认值为 0.068%^[8],基于实测数据而来.目前 CFM56 等大型商业飞机发动机使用 JET A-1 型航空煤油,其含硫量在国际标准^[32]中最大限制为 0.3%,但通常航煤含硫量低于此值.因此在本研究中分别使用燃油含硫量 0.3%(高硫燃油)和 0.068%(普通燃油),作为 FSC 数值,进行对比计算,以评估含硫组分细粒子排放量最大和常态的情况.此时,通过计算 $EI_{PMvol-S}$ 为常数,数值为 216.0mg/kg(高硫燃油)和 49.0mg/kg(普通燃油).

最后,依据(6)式计算总 $PM_{2.5}$ 排放指数.

$$EI_{PM} = EI_{PMvol} + EI_{PMvol-O} + EI_{PMvol-S} \quad (6)$$

式中: EI_{PM} 为飞机发动机 $PM_{2.5}$ 排放指数,mg/kg.

最后,结合软件直接输出的燃油流量数据,进行实时排放量计算以及完整起飞离场阶段 $PM_{2.5}$ 排放总量 E_{PM} 的积分计算.

$$E_{PM} = \int_0^t n FF_t EI_{PMt} dt \quad (7)$$

式中: n 为发动机台数,台; t 为飞行时间,s; FF_t 为 t 时间的单发燃油流量,kg/s; EI_{PMt} 为发动机在第 t 时间的 $PM_{2.5}$ 排放指数,mg/kg.

2 结果与讨论

经过计算,获取了 B738 飞机在全推力和减推力起飞方式下,完整起飞过程的飞行参数.各种方式起飞过程飞行时间和耗油量的精确计算结果,及与 ICAO 基准模型估算结果对比,见表 2.总体上,虽然选择了减推力起飞方式后,发动机推力降低,燃油流量 FF 降低,但由于完成起飞过程的时间增加较多,因此总耗油量增加.但所有方式下的总飞行时间和耗油量,均低于 ICAO 基准模型给出对应参数和耗油量估算结果.

表 2 各种起飞方式飞行时间及耗油量分析
Table 2 Flight time and fuel consumption analysis

起飞方式	飞行时间(min)	耗油量(kg)
全推力	1.980	229
30℃	2.036	230
40℃	2.162	232
50℃	2.318	235
60℃	2.526	241
ICAO 基准模型	2.900	366

2.1 非挥发性组分排放指数 $EI_{PM_{nv}}$

非挥发性组分排放指数 $EI_{PM_{nv}}$ 及发动机推力,随高度的变化见图 1.非挥发性颗粒物,也常称为烟灰(soot),主要成分是黑炭,同时包括痕量金属元素及其他无机组分.总体上 $EI_{PM_{nv}}$ 数值,伴随起飞高度的升高,呈现下降趋势,与推力随高度的变化趋势基本一致.

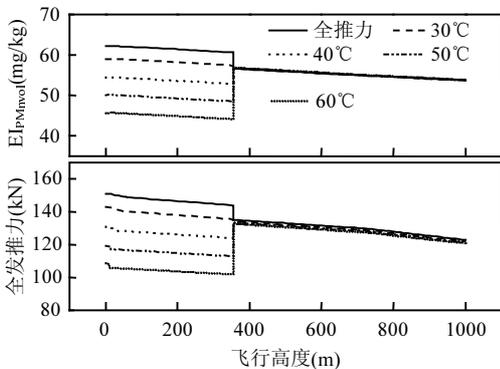


图 1 起飞过程非挥发性细粒子排放指数及发动机推力
Fig.1 Nonvolatile $PM_{2.5}$ emission indices and engine thrust of takeoff

飞机在起飞过程中,当起飞至 350m 高度左右,推力值出现较大改变,在此转换高度前飞行时为地面起飞段,使用起飞推力.因此,根据图 1 可知,选择全推力或减推力等不同起飞方式的发动机推力差异,以及对排放指数的影响主要存在于地面起飞段.FOA3.0 方法基于 SN 计算非挥发性组分排放指数,而 SN 值与推力呈正相关.因此在地面起飞段,全推力正常起飞方式下, $EI_{PM_{nv}}$ 值最高,约为 62.2~60.7mg/kg.若采用减推力方式起飞,伴随选取的灵活温度升高,发动机推力及 SN 值降低,因此 $EI_{PM_{nv}}$ 值也在下降.选择 30、40、50 和 60℃ 灵活温度起飞时,非挥发性组分排放指数分别为 59.1~57.5、54.5~52.9、50.1~48.5 和 45.6~44.1mg/kg.在地面起飞段,各起飞方式的 $EI_{PM_{nv}}$ 值随高度上升下降约 1.6mg/kg.

在 350m 转换高度后,飞机转入空中爬升段,此时所有起飞方式均由使用起飞推力,改为最大连续推力 MCL,继续飞行至 1000m 高度完成全部起飞过程.因此,在空中爬升段,各起飞方式下的非挥发性组分排放指数 $EI_{PM_{nv}}$ 非常接近.其中,全推力起飞方式在转换高度后 $EI_{PM_{nv}}$ 值下降;而选择了 40、50 和 60℃ 灵活温度的起飞方式, $EI_{PM_{nv}}$ 值则出现升高.在 350m 爬升起始点 $EI_{PM_{nv}}$ 为 56.7~56.9mg/kg,在 1000m 爬升结束点为 53.7~53.9mg/kg.由于全推力和减推力起飞方式在地面起飞段的推力、飞行时间及耗油量不同,在空中爬升段的起始点的初始飞行条件也不完全相同,因此在空中爬升段虽然使用相同 MCL 推力,但排放指数会存在微小的差异.

2.2 挥发性组分排放指数 $EI_{PM_{vol}}$

挥发性颗粒物,包括挥发性含硫组分和挥发性有机组分.其中,由于挥发性含硫组分细粒子排放主要来自燃油中的含硫物质,其排放与发动机推力无关.因此当燃油含硫量一定时,排放指数为常数.基于高硫燃油和普通燃油的含硫量差异,通过计算获得 $EI_{PM_{vol-S}}$ 分别为 216.0 和 49.0mg/kg.不同起飞方式下,挥发性有机组分排放指数 $EI_{PM_{vol-O}}$,随高度变化见图 2.

根据计算结果,挥发性有机组分排放指数 $EI_{PM_{vol-O}}$,随高度呈下降趋势.FOA3.0 计算

$EI_{PMVol-O}$ 的系数 δ ,来自特定测试发动机 $EI_{PMVol-O}$ 与 EI_{HC} 排放指数的比值,该系数与推力呈正相关.因此,计算结果的变化趋势与图1 推力-高度的变化一致.

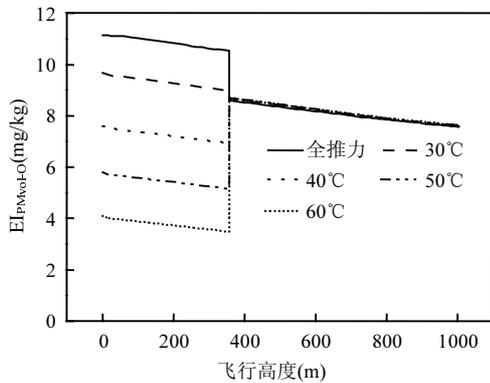


图2 起飞过程挥发性有机细粒子排放指数

Fig.2 Volatile organic $PM_{2.5}$ emission indices of takeoff

在地面起飞段,全推力正常起飞方式下,挥发性有机组分排放指数 $EI_{PMVol-O}$ 数值最高,约为 11.1~10.5mg/kg.而使用减推力方式起飞,选择更高的灵活温度后, $EI_{PMVol-O}$ 值逐渐降低.如在选择 60°C 灵活温度起飞时, $EI_{PMVol-O}$ 最低,约为 4.1~3.5mg/kg.各种方式下,地面起飞至转换高度前,挥发性有机组分排放指数均降低约 0.6mg/kg,与推力降低有关.

在空中爬升段,到达转换高度后,在爬升起始点所有飞行方式均使用 MCL 推力,因此,挥发性有机组分排放指数趋于一致.其中全推力起飞方式在此高度 $EI_{PMVol-O}$ 值出现降低.而选择 40、50 和 60°C 灵活温度的减推力起飞过程,在此高度 $EI_{PMVol-O}$ 值升高.在爬升起始点 $EI_{PMVol-O}$ 值约为 8.7mg/kg,结束点降至 7.6mg/kg.伴随高度升高,空气密度降低,发动机推力值逐渐降低,因此 $EI_{PMVol-O}$ 值也逐渐减小.

2.3 起飞过程 $PM_{2.5}$ 排放量

经过计算,不同起飞方式下, $PM_{2.5}$ 排放总量,以及选择不同类型燃油对颗粒物排放量的影响,见图3.

在使用普通燃油的起飞过程中,全推力正常起飞方式下, $PM_{2.5}$ 总排放量,约为 37.6g,在使用减

推力方式后,起飞 $PM_{2.5}$ 排放量呈下降趋势.选择 30、40、50 和 60°C 灵活温度时, $PM_{2.5}$ 排放量分别为 36.7、35.9、35.7 和 35.5g,排放量略有降低.虽然减推力起飞导致耗油量增加(表2),但在地面起飞段,使用更高的灵活温度减推力后, EI_{PMVol} 和 $EI_{PMVol-O}$ 随之降低,因此 $PM_{2.5}$ 排放量出现较小幅度的下降.

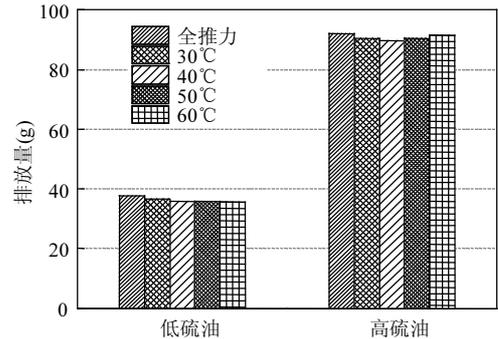


图3 各种起飞方式 $PM_{2.5}$ 排放量

Fig.3 $PM_{2.5}$ emissions of different takeoff processes

在使用高硫燃油的起飞过程中, $PM_{2.5}$ 排放量相比使用普通燃油增加较多.全推力起飞方式,细粒子排放量最高,约为 91.9g.而在使用减推力方式起飞后,选择更高的灵活温度, $PM_{2.5}$ 排放量先降低后升高.其中,选择 40°C 起飞时,排放量为 89.7g,低于其他起飞方式 $PM_{2.5}$ 排放量.选择其他灵活温度时, $PM_{2.5}$ 排放量均超过了 90.0g.一方面,高硫燃油 $EI_{PMVol-S}$ 高,含硫组分颗粒物排放量大.另一方面,减推力起飞后, EI_{PMVol} 和 $EI_{PMVol-O}$ 也降低,而总耗油量却升高(表2),因此 $PM_{2.5}$ 的总排放量的变化受到双重影响.

对比发现,在使用了高硫燃油后,起飞过程的细粒子排放总量,比使用普通燃油的排放量,平均升高约 150%.并且,选择更高的灵活温度减推力方式后, $PM_{2.5}$ 排放增加量更大,显示出燃油含硫量对飞机发动机颗粒物排放量的重要影响.

2.4 各组分对 $PM_{2.5}$ 排放贡献

在使用普通燃油时,各组分对起飞过程 $PM_{2.5}$ 排放总量的贡献率,见图4.此时,非挥发性组分是飞机排放细粒子中贡献最高的组分,而挥发性含硫组分也非常重要.在全推力起飞方式下,

非挥发性组分贡献率达 49.8%。选择减推力方式后,非挥发性组分占比略有降低,约为 49.5%~48.0%。此时,挥发性含硫组分贡献率逐渐上升,由正常起飞方式下 42.3%升高至 46.1%(灵活温度 60℃)。此外,挥发性有机组分,在几种起飞方式下,

对排放量贡献率较低,约为 7.9%~5.9%。全推力起飞时, $EI_{PM_{nvoll}}$ 和 $EI_{PM_{vol-O}}$ 最高。在减推力方式下,选择更高的灵活温度后, $EI_{PM_{nvoll}}$ 和 $EI_{PM_{vol-O}}$ 降低,而 $EI_{PM_{vol-S}}$ 不变,且总耗油量增加,因此挥发性含硫组分对 $PM_{2.5}$ 排放的贡献率逐渐升高。

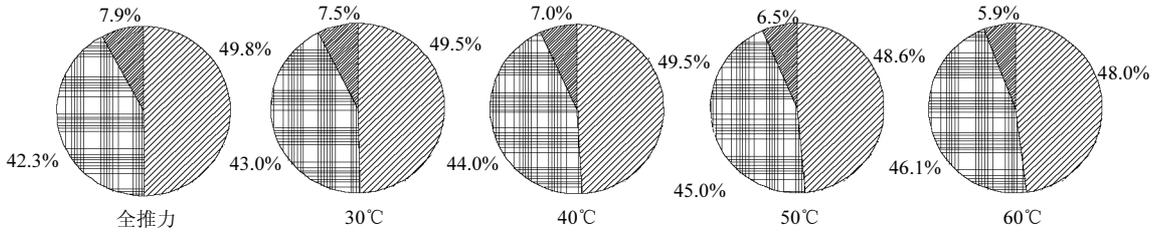


图 4 各种起飞方式 $PM_{2.5}$ 各组分排放贡献率(普通燃油)

Fig.4 Components contributions to $PM_{2.5}$ emissions of different takeoff processes (low-sulfur fuel)

PMnvoll PMvol-S PMvol-O

使用高硫燃油起飞,不同方式中 3 种组分对 $PM_{2.5}$ 排放的贡献,见图 5。此时,挥发性含硫组分的贡献率显著升高,成为贡献率最高的组分。其中,在全推力起飞过程中,挥发性含硫组分贡献率为 76.4%。随后,在减推力方式下,由于耗油量在逐渐升高,而 $EI_{PM_{vol-S}}$ 不变且 $EI_{PM_{nvoll}}$ 和 $EI_{PM_{vol-O}}$ 降低。因此选择更高的灵活温度后,挥发性含硫组分贡献率逐渐升高,在 60℃起飞时,贡献率达 79.1%。

而同时,非挥发性组分在全推力起飞时对 $PM_{2.5}$ 排放的贡献率,约为 20.4%,高于其在减推力方式起飞过程中的排放贡献率。选择更高的灵活温度减推力起飞时, $EI_{PM_{nvoll}}$ 值逐渐下降,使非挥发性组分对细粒子贡献率逐渐降低,约为 20.1%~18.6%。对于挥发性有机组分,在使用高硫燃油后,对起飞阶段 $PM_{2.5}$ 总排放的贡献率进一步降低,约为 3.2%~2.3%。

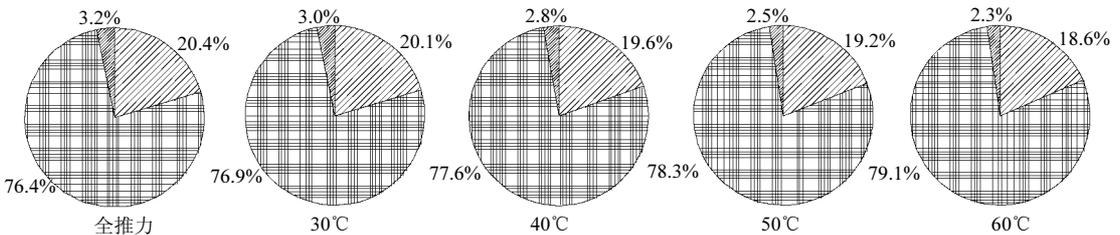


图 5 各种起飞方式 $PM_{2.5}$ 各组分排放贡献率(高硫燃油)

Fig.5 Components contributions to $PM_{2.5}$ emissions of different takeoff processes (high-sulfur fuel)

PMnvoll PMvol-S PMvol-O

2.5 与 ICAO 基准参数估算结果对比

对于 B738 机型,将 ICAO 基准参数直接用于 FOA 方法,估算起飞过程颗粒物的排放结果,与本文使用飞机性能模型和 BM2-FOA 耦合模型联用的精确排放量计算结果的相对偏差,见表 3。

可发现,如使用 ICAO 基准参数进行估算,污染物排放量存在较大的偏差。

其中,使用普通燃油时 ICAO 估算 $PM_{2.5}$ 排放量为 43.9g。此结果将各方式起飞过程 $PM_{2.5}$ 排放量高估约 16.8%~23.6%。在使用了更高的灵活温度

减推力起飞后,ICAO 基准参数估算结果偏差增大.对于高硫燃油,使用 ICAO 基准参数进行排放量的估算,结果约为 52.6g.与修正参数后的 FOA 方法计算结果对比,此基准参数估算结果,将各种起飞方式颗粒物排放量高估约 14.5~15.0%.

表 3 ICAO 基准参数估算与耦合模型结果的相对偏差
Table 3 Relative deviation of results calculated by ICAO standard model and coupling model

起飞方式	相对偏差(%)	
	普通燃油	高硫燃油
全推力	16.8	14.4
30℃	19.7	16.2
40℃	22.4	17.2
50℃	22.9	16.1
60℃	23.6	14.9

由于 ICAO 基准参数使用较长的起飞过程总时间,造成总耗油量偏高.同时,使用固定的 SN 及 HC 排放指数进行计算,也没有考虑每一时刻燃油流量的变化,因此导致结果偏差较大.

2.6 与机动车排放情况对比

以 B738 机型起飞过程 $PM_{2.5}$ 排放量最高的全推力方式为例.根据现有研究数据^[33],某二线城市调查结果估算,排量 2.0L 以下的国 IV 型轻型汽油车,以平均行驶速度 38km/h 条件, $PM_{2.5}$ 综合排放因子为 0.0126g/km.日均行驶里程约 55km,估算该轻型汽油车 $PM_{2.5}$ 日排放量约为 0.7g.依据此数据,B738 飞机,在机场区域使用普通燃油和高硫燃油的一次全推力正常起飞过程, $PM_{2.5}$ 排放量分别约等于一辆轻型汽油车行驶 2984km 和 7294km,或分别相当于 54 和 132 辆此型车单日的排放量.

在 2016 年 4 月,北京、广州两机场,B737 系列机型,单日起飞数量分别为 311 和 203 架次.假定使用高硫燃油,单日的仅 B737 系列机型起飞过程排放的 $PM_{2.5}$ 即相当于 4.13 万辆和 2.70 万辆轻型汽油车的单日排放量.

3 结论

3.1 利用飞机性能模型,并基于 BM2-FOA 耦合模型,计算了 B738 机型所有起飞方式,在起飞高

度、飞行参数变化后的 $PM_{2.5}$ 主要组分排放指数的变化情况.结果发现,选择不同的起飞方式对细粒子排放指数的影响主要存在于地面地飞段.其中,全推力起飞方式, $EI_{PM_{novl}}$ 和 $EI_{PM_{vol-O}}$ 最高.减推力起飞方式,使用更高的灵活温度后, $EI_{PM_{novl}}$ 和 $EI_{PM_{vol-O}}$ 逐渐降低.空中爬升段,所有方式排放指数趋于一致.此外, $EI_{PM_{vol-S}}$ 主要受到燃油含硫量的影响,与起飞方式和飞行高度无关.

3.2 在使用普通燃油的起飞过程中,全推力起飞方式 $PM_{2.5}$ 排放量最大,约为 37.6g.其中,非挥发性组分和挥发性含硫组分对细粒子排放的贡献率均超过 40%.使用减推力起飞方式,选择更高的灵活温度,排放量略有下降.相同的起飞方式,如选择使用高硫燃油后,起飞过程的 $PM_{2.5}$ 排放量约升高 150%.同时,挥发性含硫组分对 $PM_{2.5}$ 排放贡献率升高至 75%以上.并且选择更高的灵活温度减推力起飞后,挥发性含硫组分的贡献率升高.结果表明燃油含硫量对起飞过程细粒子排放量具有重要影响.挥发性有机组分在所有起飞方式中的细粒子排放贡献率低于 8%.

3.3 相比本文的精确计算,ICAO 基准模型的起飞、爬升的推力以及时间等参数均为固定值,导致耗油量计算不准确.如直接将基准参数用于 FOA 方法,对使用普通燃油和高硫燃油的 $PM_{2.5}$ 排放量的高估约 16.8%~23.6%和 14.4%~17.2%,偏差较大.

3.4 与国 IV 轻型汽油车相比,B738 机型使用普通燃油和高硫燃油的一次全推力正常起飞过程, $PM_{2.5}$ 排放量分别约等于其行驶 2984km 和 7294km,或分别相当于 54 和 132 辆此型车单日的排放量.2016 年 4 月,北京、广州两机场,假定使用高硫燃油,单日的仅 B737 系列机型起飞过程排放的 $PM_{2.5}$ 相当于 4.13 万辆和 2.70 万辆轻型汽油车的单日排放量.

参考文献:

- [1] 唐孝炎,张远航,邵敏.大气环境化学 [M]. 北京:高等教育出版社,2006:274.
- [2] Wu D, Bi X Y, Deng X J, et al. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta [J]. Journal of Meteorological Research, 2007,21(2):215-223.

- [3] 陈多宏,李 梅,黄 渤,等.区域大气细粒子污染特征及快速来源解析 [J]. 中国环境科学, 2016,36(3):651-659.
- [4] 孙兆彬,陶 燕,崔蕊蕊,等.北京地区奥运会期间PM_{2.5}对心脑血管疾病的影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(11):3481-3488.
- [5] 李友平,刘慧芳,周 洪,等.成都市PM_{2.5}中有毒重金属污染特征及健康风险评估 [J]. 中国环境科学, 2015,35(7):2225-2232.
- [6] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东.大气细颗粒物控制对我国城市居民期望寿命的影响 [J]. 中国环境科学, 2014,34(10):2701-2705.
- [7] Huang X F, Sun T L, Zeng L W, et al. Black carbon aerosol characterization in a coastal city in south China using a single particle soot photometer [J]. Atmospheric Environment, 2012, 51:21-28.
- [8] Wayson R, Fleming G, Iovinelli R. Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines [J]. Journal of Air & Waste Manage Association, 59:91-100.
- [9] Petzold A, Doppelheuer A, Brock C A, et al. In situ observations and model calculations of black carbon emission by aircraft at cruise altitude [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104:22171-22181.
- [10] 杜鹏瑞,杜 睿,任伟珊,等.城市大气颗粒物毒性效应及机制的研究进展 [J]. 中国环境科学, 2016,36(9):2815-2827.
- [11] Choi W, Hu S, He M, et al. Neighborhood-scale air quality impacts of emissions from motor vehicles and aircraft [J]. Atmospheric Environment, 2013,80:310-321.
- [12] Pope C A. Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: biologic mechanisms and who's at risk? [J]. Environmental Health Perspectives, 2000,108:713-723.
- [13] Viana M, Querol X, Alastuey A, et al. Characterising exposure to PM aerosols for an epidemiological study [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(7):1552-1568.
- [14] Kan H D, London S J, Chen, G H, et al. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China [J]. Environment International, 2007,33(3):376-384.
- [15] Finkelstein M M, Jerrett M, Sears M R. Environmental inequality and circulatory disease mortality gradients [J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2005,59(6):481-487.
- [16] Exhaust emission data bank [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 1995.
- [17] ICAO. International standards and recommended practices, environmental protection, annex 16 to the convention on international civil aviation, Vol. II: Aircraft engine emissions, 2nd ed. International Civil Aviation Organization: Montreal, Quebec, Canada, 1993.
- [18] Unal A, Hu Y, Chang M, et al. Airport related emissions and impacts on air quality: application to the Atlanta international airport [J]. Atmospheric Environment, 39:5787-5798.
- [19] 韩 博,黄佳敏,魏志强.民航飞机起飞过程大气污染物排放特征分析 [J]. 环境科学, 2016,37(12):69-75.
- [20] 夏 卿,左洪福,杨军利.中国民航机场飞机起飞着陆(LTO)循环排放量估算 [J]. 环境科学学报, 2008,28(7):1469-1474.
- [21] 黄清凤,陈桂浓,胡丹心,等.广州白云国际机场飞机大气污染物排放分析 [J]. 环境监测管理与技术, 2014,26(3):57-59.
- [22] 何吉成.30 年来中国民航运输行业的大气污染物排放 [J]. 环境科学, 2012,33(1):1-7.
- [23] 黄 勇,周桂林,吴寿生.中国上空民航飞机 NO_x 排放量及其分布初探 [J]. 环境科学学报, 2000,20(2):179-182.
- [24] 黄 勇,吴冬莺,王金涛,等.中国上空民航飞机 NO_x 排放分布再探 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001,27(3):289-292.
- [25] Herndon S, Shorter J, Zahniser M, et al. NO and NO₂ emission ratios measured from in-use commercial aircraft during taxi and takeoff [J]. Environmental Science & Technology, 2004,38:6078-6084.
- [26] Herndon S, Jayne J, Lobo P, et al. Commercial aircraft engine emissions characterization of in-use aircraft at Hartsfield-Jackson Atlanta international airport [J]. Environmental Science & Technology, 2008,42:1877-1883.
- [27] Carslaw D, Ropkins K, Laxen D, et al. Near-field commercial aircraft contribution to nitrogen oxides by engine, aircraft type, and airline by individual plume sampling [J]. Environmental Science & Technology, 2008,42:1871-1876.
- [28] Airport Air Quality Manual [R]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2011:38-39.
- [29] 魏志强,刁华智,韩 博.民用飞机巡航阶段污染物排放量计算研究 [J]. 科学技术与工程, 2014,14(19):1671-1815.
- [30] 李 娜,魏志强.飞机 QAR 数据的空气污染物排放量计算研究 [J]. 环境科学与技术, 2015,38(1):159-163.
- [31] Fuglestvedt J S, Shine K P, Bernsten T, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: metrics [J]. Atmospheric Environment, 2010,44(37):4648-4677.
- [32] DEF STAN 91-91 (Jet A-1), Turbine fuel, aviation kerosene type, Jet A-1 [S].
- [33] 徐伟嘉,李红霞,黄建彰,等.佛山市机动车尾气颗粒物PM_{2.5}的排放特征研究 [J]. 环境科学与技术, 2014,37(3):152-158.

作者简介: 韩 博(1982-),男,天津人,讲师,博士,主要研究方向为大气环境、民航环境管理等.发表论文 10 余篇.