

飞机发动机积冰原因探讨

金维明 王炳仁 刘健文 王洪芳 李耀东

(空军航空气象研究所, 北京 100085)

提 要

飞机发动机积冰的预报是航空气象预报业务中的难题之一。作者根据飞机发动机的工作特性, 结合实际的积冰事例作了积冰成因的初步分析。并讨论了有关预报的问题。

关键词: 飞机发动机 进气道 飞机积冰

引 言

冬季, 飞机在云中飞行, 当遇到云中含有过冷却水滴时, 在飞机的某些部分会发生水滴冻结的现象, 即通常所指的飞机积冰。对活塞式飞机, 容易积冰的部位是: 机翼、尾翼、螺旋桨叶、风挡玻璃以及空速管等。喷气式飞机的积冰部位除了上述活塞式飞机的部位之外, 有时还会出现发动机的积冰^[1-2]。飞机发动机的积冰与其他部位的积冰相比较, 要复杂得多, 并有其特殊的原因。由于在飞行实践中出现的事例比较少, 因此对其成因的研究也较少, 对它的预报更是十分困难。但是, 严重的发动机积冰同样会造成飞行事故。所以, 探讨其积冰的原因, 对提高航空气象的保障能力以及保障飞行安全来说, 都是很有意义的。本文对其成因作一初步的探讨。

1 发动机积冰概况及其危害

1.1 积冰的一般情况

喷气发动机的积冰部位主要在进气道(进气道口和整流锥扰流片上)、压气机(进气口和导向叶片处)以及发动机燃油进口过滤器的滤网上等部位。图1为发动机主要部件的截面示意图。由于实际的积冰情况是十分复杂的, 因此每次积冰的部位也不尽相同, 上

面所说的是通常出现的地方。

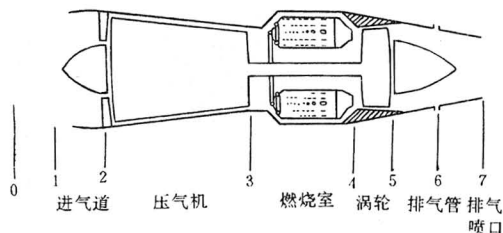


图1 发动机主要部件的截面示意

发动机积冰的出现与飞行状态有密切的关系。对战斗机来说, 往往发生在复杂气象条件下飞行时的穿云下降阶段。发动机处于收油门降低转速的工作状态。空速也相应减小。有时候, 在地面试车时也会发生结冰现象。当油门推到最大转速时, 冰层就融化消失。

发动机积冰与天气条件有着直接的关系。飞机在含有过冷却水滴的云层中飞行时, 除了机翼等部位会积冰之外, 在发动机进气道内也容易出现结冰。但是, 也有不少事例发生在天空无云(空中水汽较大), 气温在 0°C 以上好几度天气条件下, 而且往往在机翼上没有积冰, 可是在发动机进气道内却有十分严重的积冰。这是发动机积冰与机翼积冰有所不同之处。对航空气象预报人员来说, 这种

积冰比云中飞行时的机翼、机身积冰更加难以掌握和作出预报。本文的重点就探讨这个问题。

1.2 发动机积冰造成的危害

发动机积冰的强度直接决定着对飞机危害的程度。在飞机设计中,要求进气道的出口处(图1中的截面“1”位置)的流场要十分均匀。如果气流不均匀将会使发动机不能稳定地工作,严重时会使压气机发生喘振以及燃烧室熄火。飞机就会失去动力。如果进气道发生严重积冰,会使空气进入发动机的流量减少,同时使进气道出口处的流场发生畸变,直接影响发动机的工作特性。再则,进气道积冰之后,当飞机再飞到气温较高的地区,此时冰块会脱落,随气流进入压气机,造成打坏压气机的导向叶片,影响飞行安全。如1984年冬,某部一批战斗机在穿云下降着陆后,检查发现在进气道调节锥扰流片附近有一层约1cm厚的冰,其中一架飞机的压气机一级叶片被打伤9片。又如1986年冬,一架安-24飞机,在兰州到西安的途中,飞机入云后立即出现了机翼积冰,减少了升力。飞行高度由5400m降为3600m。后来又发生发动机进气道积冰,导致右发动机熄火,被迫返航。在着陆阶段失速失事。

2 积冰原因的分析 and 讨论

本文主要分析发动机的进气道结冰,对其他部位的结冰原因不在讨论范围。

2.1 结冰的原因

本文讨论的飞行速度范围为亚音速的飞行。飞机在飞行过程中,发动机前方的空气经过进气道流入压气机,参看图2。图2中O—O截面处的气流速度就是进气道前方未受扰动的气流速度,与飞行速度的大小相等,方向相反。其速度值用 V 表示。1—1截面为进气道进口截面。1—1截面为进气道出口或压气机的入口,该处的气流速度用 C_1 表示。在一

般情况下,飞行速度 V 大于压气机进口气流速度 C_1 。此时空气流过进气道时,空气受到了压缩,通常称之为动力压缩。空气受动力压缩时,气体的压力和温度都会升高。反之,当出现飞行速度小于压气机进口气流速度时,流经发动机进气道的空气就不受动力压缩。在整个O—1段内,气流速度从飞行速度 V 增大到压气机进口气流速度 C_1 。在这一段内的气体没有机械功的输入或输出发生,可以看成绝能流动。从伯努利方程可以知道,在绝能流动中,如果气体膨胀加速,其温度要降低,压力和密度也均减少^[3-7]。如图2的下半部所示。计算和实践表明,这种情况的降温值可以是很大的。这个降温作用,正是进气道结冰的主要原因。

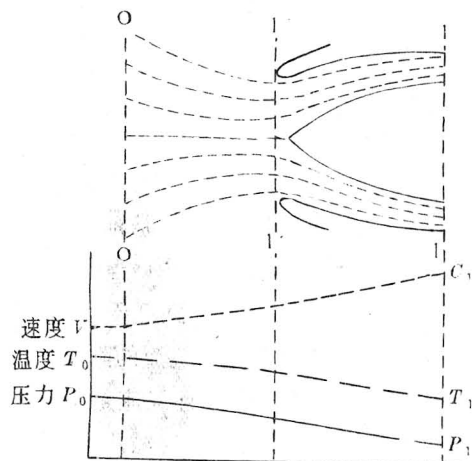


图2 飞行速度小于压气机进口气流速度时空气流过收敛形进气道情形

如果气流(大气)的湿度比较大(接近饱和)或者飞机在云中,只要上述的降温作用的量值超过释放的凝华潜热及飞机表面的增温值,那末,降温作用使空气达到过饱和并在进气道内发生结冰。这个降温作用的量值可以从进气道热力过程的分析中得知,对涡轮喷气发动机进气道气流O—O截面和1—1截

面写出能量方程为:

$$i_0 + A \frac{V^2}{2g} = i_1 + A \frac{C_1^2}{2g} \quad (1)$$

式中, i_0, i_1 分别代表 O—O 截面和 1—1 截面处的气流的焓, A 为功热当量, V 为飞行速度, g 为重力加速度, C_1 为 1—1 截面(压气机进口)处的气流速度。气流的焓 $i = C_p T$, C_p 为定压比热。将它代入式(1), 有:

$$C_p T_0 + A \frac{V^2}{2g} = C_p T_1 + A \frac{C_1^2}{2g} \quad (2)$$

降温的量值 $\Delta T = T_1 - T_0$, 则由上式可得:

$$\Delta T = T_1 - T_0 = \frac{A}{C_p} \cdot \frac{(V^2 - C_1^2)}{2g} \quad (3)$$

由于出现飞行速度 V 小于压气机进口气流速度 C_1 的情况而发生的进气道气流的降温, 其降温值可用式(3)来估计。 C_1 值可以从发动机的热力特性计算中得到。

2.2 有关积冰原因的讨论

2.2.1 发动机积冰与飞机的飞行状态以及发动机的工作状态密切相关。

从前面所讲的原因, 可以推断: 飞机在飞行中, 当减小飞行速度时, 如果飞行速度减小到低于压气机进口气流的速度, 此时便会有气流的降温出现。降温量达到一定的程度并且气流是潮湿的, 就会有积冰发生。与飞行速度减小相联系的低速飞行状态, 一般是飞行的下降阶段, 或者着陆阶段。甚至是起飞阶段的开始时刻, 或者地面滑行、地面试车阶段。实际的事例也表明了这一点。本文的开头例举了1984年冬, 某部飞机穿云下降阶段积冰的情况。又如1982年冬, 某部一架战斗机在地面试车时, 当发动机的油门由最大转速减小到一定程度后, 飞机进气道内出现一层1—2mm厚的冰。推油门到最大转速时, 冰层融化消失。

2.2.2 大气处于温度低、水汽比较充沛的状态是发动机结冰的环境条件。

温度低是指气

层温度在0℃附近(可以是0℃以上好几度)以及0℃以下。水汽比较充沛是指气层的湿度条件可以是未饱和, 但要接近饱和或者是在云中。前者是大气中无云的状况。这一点给航空气象预报员带来了极大的困难。因为目前的航空气象预报业务中还没有水汽分布的预报项目, 无法制作发动机积冰的预报。在目前的预报技术水平情况下, 一种可以考虑的办法是参照飞机机翼积冰的区域预报图做预报。

3 关于发动机积冰的预报问题

发动机积冰与飞机的飞行状态及发动机的工作状态密切相关。当飞机处于高速飞行的大推力状态(发动机处于大油门位置的状态), 发动机是不会积冰的。只有当飞行速度小于压气机进口气流速度时, 在进气道内就出现降温现象。这个降温的量值随飞行状态而变化。从通常的各种低速飞行阶段的速度范围来估计, 降温的量值约为几度, 最大可达10℃左右。气象预报员在制作飞机积冰预报时, 应根据飞行任务的情况适当考虑这一因素。具体操作时, 可参考使用飞机(机翼)积冰的区域预报图, 把预报有积冰的空间范围向无积冰区外延一个积冰强度等级阈值的距离。在我们研制的区域航空气象数值预报系统中, 采用NCAR的中尺度模式MM4制作飞机积冰的区域预报图。模式的水平网格为31×31, 水平格距为80km, 垂直10层。对于飞机积冰强度的估计, 引用美国国家大气研究中心(NCAR)提出的积冰严重性指数的方法^[8]。该方法是把积冰的严重性用数字0—10共11个数值来表示。严重性随数值的增大而增大。该方法认为影响飞机积冰(机翼上)强度的主要气象因素为: 过冷却水滴的含量、大气环境温度以及云滴的中位数体积直径3个参数。把这3个参数的量值范围划分为若干档次, 构成一个数据矩阵。矩阵的每个

元素是指定的一个严重性指数值。根据实时的地面报资料及高空报资料就可以由数值模式得到计算严重性指数 I 值所需的各项物理量,从而得到 I 值。积冰严重性指数 I 值与预报的积冰强度等级的阈值对应关系为: I 值 1—2 为微量积冰; I 值 3—5 为轻度积冰; I 值 6—8 为中度积冰; I 值 9—10 为严重积冰。图 3 为 1996 年 1 月 26 日预报的 400hPa 高度上飞机(机翼)积冰强度等级的分布情况。在考虑发动机的积冰预报时,可以把图中等值线 I 为“1”的区域向无积冰区延伸一个等值线“1”和等值线“3”之间的距离作为扩展的积冰区。如果飞机在扩展了的区域内作减速下降飞行,就要考虑发动机出现积冰的可能性。

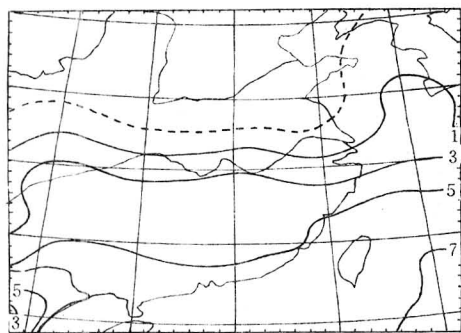


图 3 1996 年 1 月 26 日飞机积冰区域预报图
虚线和 I 值为 1 的等值线之间的区域为扩展区

4 结束语

飞机发动机积冰的预报,尤其是晴空情况下的积冰预报是相当困难的。现代飞机的喷气发动机上一般都装有防冰系统。由于这类装置的功能主要是防冰而不是除冰。如果在结冰已经发生并且积累之后,再打开防冰系统,除冰的效果就差了。因此,比较好的措施是在飞机飞向预报的积冰区之前就打开防冰系统。使得在实际开始结冰之前就对发动机的进气部位加温,达到防冰的效果。

参考文献

- 1 尚义. 航空燃气涡轮发动机. 北京: 航空工业出版社, 1995: 58—59.
- 2 [美]普拉特·惠特尼公司编, 周晓青、金如山等译. 航空燃气涡轮发动机. 北京: 宇航出版社, 1992: 98—125.
- 3 [苏]莱什金著, 秦鹏译. 喷气发动机原理. 北京: 国防工业出版社, 1977: 55—61.
- 4 [苏]聂加耶夫著, 姜树明译. 航空燃气涡轮发动机原理. 北京: 国防工业出版社, 1984: 285—286.
- 5 西北工业大学、南京航空学院、北京航空学院合编. 航空燃气涡轮发动机原理. 北京: 国防工业出版社, 1981: 15—18.
- 6 [苏]斯辽赫钦科著, 王振华等译. 空气喷气发动机原理. 北京: 国防工业出版社, 1982: 48—51.
- 7 [美]利特尔著, 钱翼稷译. 内流空气动力学手册. 北京: 国防工业出版社, 1982: 66—68.
- 8 M. K. Politovich etc. A Proposed Icing Severity Index Based upon Meteorology. 4th International Conference on Aviation Weather Systems, Paris 24—27, June, 1991: 157—162.

A Preliminary Study on the Cause of Aircraft Engine Icing

Jin Weiming Wang Bingren Liu Jianwen Wang Hongfang Li Yaodong

(Air Force Institute of Aviation Meteorology, Beijing 100085)

Abstract

The cause of aircraft engine icing is analysed. It is showed that the engine intake duct icing is due to the decrease in air flow temperature for air flow acceleration. Finally, the aircraft icing forecast problem has been discussed.

Key Words: aircraft engine air intake aircraft icing