航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
May. 15 2015 Vol. 26 No.05 57-61

结冰对民用飞机飞行性能的影响分析

蒋天俊*，杨媚，王晓江
中国飞行试验研究院，陕西 西安 710089

摘 要：在获取民用飞机适航合格审定证明前，必须通过飞行试验，并在试验中演示验证民用飞机能在CCAR25部附录C确定的连续和间断的最大结冰状态下安全运行。基于此背景，计算并得到某型机两种构型在45min待机冰型下的飞行性能，与无冰状态下对应构型的飞行性能进行对比分析。结果表明，结冰对飞机的飞行性能具有较大的影响。

关键词：民用飞机；冰型；飞行性能；适航；升阻特性；爬升梯度；失速速度

中图分类号：V211.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-5453（2015）05-0057-05

飞机在结冰条件下飞行，其未防护表面会结冰，翼面结冰后会导致飞机的气动力变化，从而影响飞机的飞行性能及操纵品质。CCAR25部明确规定，申请在结冰条件下也能使用的飞机，必须满足其相关的条款要求，才能获得结冰条件下飞行的合格证。此外，美国联邦航空局（FAA）在其咨询通告中对结冰条件下的飞机飞行性能提出了明确的要求。本文针对此要求，采用45min待机冰型对某型飞机的飞行性能进行计算分析，得出结冰对飞机飞行性能影响的结果。

1 适航规定

CCAR25部1419条规定：如果申请带有防冰设施的合格审定，飞机必须能在附录C确定的连续和间断的最大结冰状态下安全运行。§25.117规定，必须在为该飞机规定的使用限制范围内，包括重量、高度以及外界温度等条件下，在每种形态的最不利重心位置，表明符合§25.119和§25.121中的爬升要求，其中分别对全发着陆爬升、起飞爬升（包含第一阶段、第二阶段、第四阶段）、进场爬升做了规定，各阶段的可用最小爬升梯度规定如表1所示[1]。

AC25-7A中关于结冰条件下飞机的性能要求：AC25-1419-1要求确定冰型对失速速度的影响，以及爬升性能的影响，即验证符合§25.121(d)中的进场爬升要求，以及§25.119中的着陆爬升要求。

表1 CCAR25部对爬升梯度的规定
Table 1 Provisions of the CCAR25 to climb gradient

	第一阶段	第二阶段	第四阶段	进场	着陆(全发)
双发飞机	正梯度	2.4%	1.2%	2.1%	3.2%
三发飞机	0.3%	2.7%	1.5%	2.4%	3.2%
四发飞机	0.5%	3.0%	1.7%	2.7%	3.2%

2 试验冰型的选取

待机冰型是指在CCAR25部附录C定义的连续最大结冰条件下，待机飞行阶段在未防护表面最临界的积冰和在防冰系统正常工作时，在防护表面上的任何积冰。本文计算选用的45min待机冰型就是以待机速度飞行45min，各部件积冰形成的组合冰型。此冰型分别加装于机头雷达罩、机翼根部、机翼前缘缝翼未防护表面、翼梢小翼、发动机挂架、垂尾和平尾处。各部位加装的具体冰型见表2。试验采用不同部件带模拟冰型组合的方式来模拟不同状态下的结冰情况：未结冰状态是防护区和非防护区均无冰的状态；未防护表面结冰状态是防护区无冰而非防护区结冰45min的状态，即防冰系统正常工作，结冰的部件组合为A+B+C+D+E。

3 结冰对飞行性能影响计算分析

飞机结冰后，其气动特性将会产生变化，进而对飞机的

收稿日期：2015-01-26； 退修日期：2015-03-02； 录用日期：2015-03-05
*通讯作者. Tel.：13759991206 E-mail：2350612214@qq.com
引用格式：JIANG Tianjun, YANG Mei, WANG Xiaojiang. Analysis on the effect of icing on civil airplane flight performance[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015,26(05)：57-61. 蒋天俊，杨媚，王晓江. 结冰对民用飞机飞行性能的影响分析[J]. 航空科学技术，2015，26(05)：57-61.

表2 冰型及安装部位

Table 2 Ice type and installation location

符号	使用的冰型
A	机翼防冰系统正常工作,待机状态45min翼梢小翼冰型和前缘缝翼防冰死区机翼冰型
B	平尾待机状态平尾45min临界冰型(7.62cm冰型)
C	垂尾待机状态45min临界冰型
D	发房挂架待机状态45min临界冰型
E	机头待机状态45min临界冰型

飞行性能以及操稳特性产生影响。飞行性能的影响主要包括对参考失速速度V_{SR}、起飞二阶段爬升梯度、起飞最后阶段爬升梯度、进场爬升梯度、着陆爬升梯度的影响。

3.1 对升阻特性的影响

由于发动机推力无法测得,飞机的升阻曲线是无法通过试飞得到的,故本文根据吹风试验的数据,计算得到未结冰与45min待机冰型条件下起飞、进场两种构型的升阻系数。通过图1、图2给出的未结冰与45min待机冰型的计算结果对比,可以发现结冰后飞机的升力系数C_L有所减小,在迎角α较小的情况下,两者差异并不大;当接近临界迎角时,两者的差异变得十分明显,未结冰时最大C_L为21,带45min待机冰型时最大C_L为20;此外未结冰情况下该机的临界迎角约为19°,而带45min待机冰型后,临界迎角明显提前,变为17°;与此同时,结冰后飞机的阻力系数C_D也明显增大。那么飞机的升阻比也将随之下降,从而导致飞机的飞行性能降级。

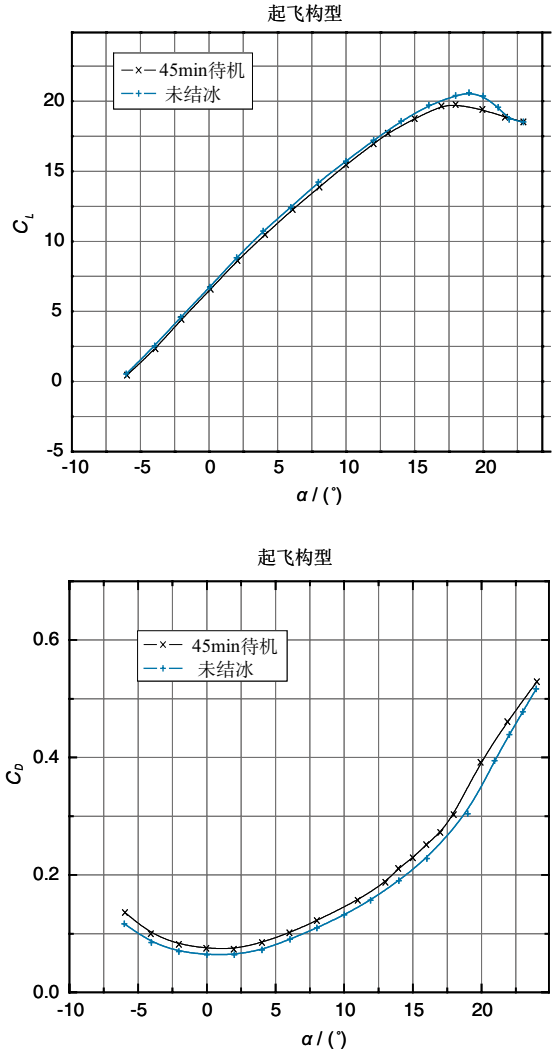

图1 起飞构型无冰与45min待机冰型升阻系数对比

Fig.1 Comparison of lift/drag coefficients between takeoff configuration without ice and takeoff configuration with 45min standby ice type

3.2 对爬升梯度的影响

运输类飞机通常采用锯齿爬升的方法获取爬升梯度,即选择几个目标高度,从目标高度以下200m等速爬升至目

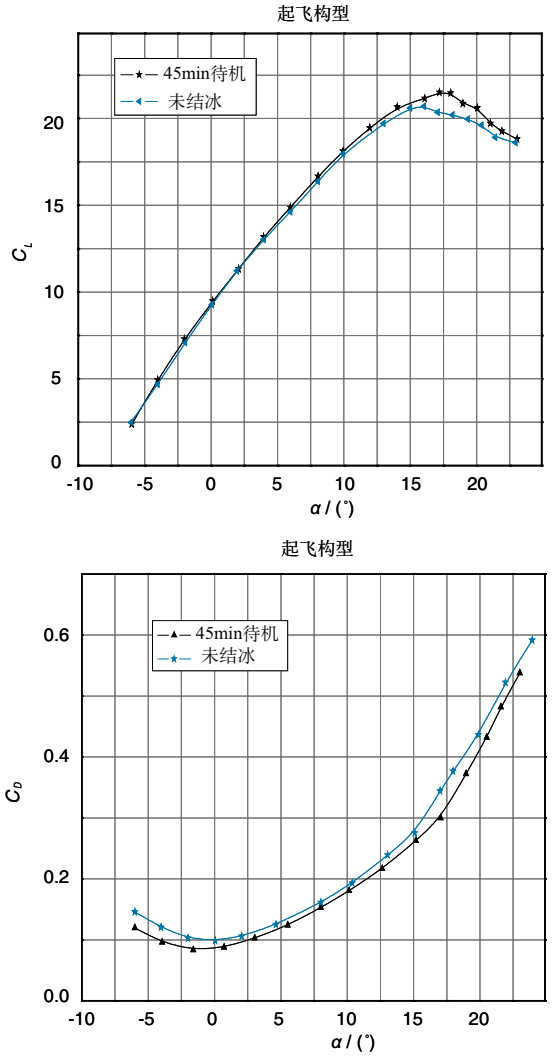

图2 进场构型无冰与45min待机冰型升阻系数对比

Fig.2 Comparison of lift/drag coefficients between approach configuration without ice type and approach configuration with 45min standby ice type

标高度以上200m，然后反航向重复一遍，据此来获取试飞数据，进而计算这一目标高度的爬升梯度，具体计算步骤如下。通过对试飞数据进行处理，分别得到了起飞二阶段、进场爬升阶段和着陆爬升阶段的45min待机冰型与未结冰条件下的爬升梯度[2]，结果见图3、图4。由图可见，结冰明显对飞机的起飞、进场和着陆爬升阶段的爬升梯度有影响。

(1) 通过爬升过程中的马赫数Ma与静温T_S，计算真空速V_t：

$$V_t = 38.97Ma\sqrt{T_S} \tag{1}$$

(2) 通过爬升过程中气压高度H_p随时间t的变化曲线，计算出爬升率V_y：

$$V_y = \frac{\mathrm{d}H_P}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

(3)计算爬升梯度：

$$\eta = \frac{V_y}{\sqrt{V_t^2 - V_y^2}} \tag{3}$$

结冰对飞机的爬升梯度有显著的影响，尤其对起飞二阶段的爬升梯度影响比较大。取起飞阶段飞机平均质量为39t，进场阶段飞机平均质量为37t，重心为3% MAC。对于起飞二阶段爬升梯度来说：未结冰条件下，飞机的爬升梯度约为3.1%，带45min待机冰型时的爬升梯度则变为2.4%，影响量约为23%；对于进场阶段爬升梯度：未结冰情况下爬升梯度约为2.5%；带45min待机冰型时的爬升梯度则变为2.2%，可见结冰对进场阶段的爬升梯度影响较小，影响量约为12%。当然2种情况下的爬升梯度，都能满足25部中2.4%和2.1%的验证要求。

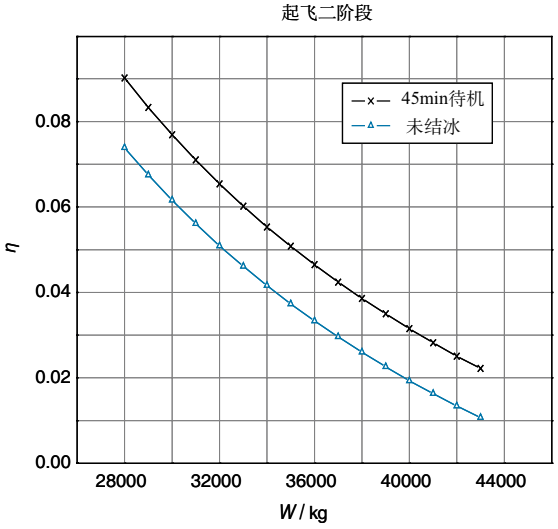

图3 起飞二阶段未结冰与45min待机冰型爬升梯度对比

Fig.3 Contrast of climbing gradient between take off phase two without ice type and take off phase two with 45min standby ice type

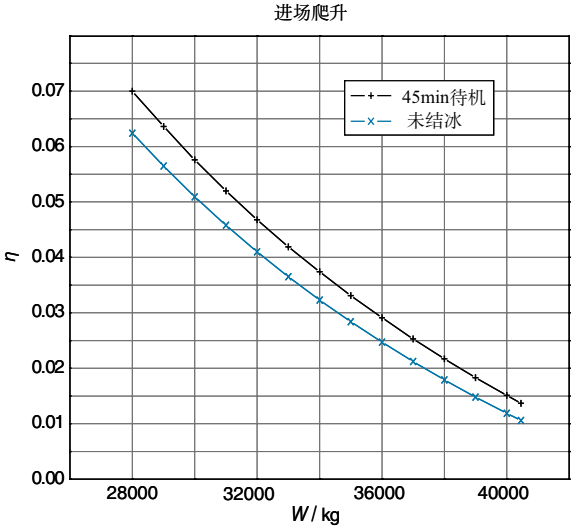

图4 进场阶段未结冰与45min待机冰型爬升梯度对比

Fig.4 Contrast of climb gradient between approach phase without ice type and approach phase with 45min standby ice type

3.3 对失速速度的影响

失速试飞具有相当高的风险，通常采用推拉杆的方法进行，即配平飞机于某个发动机功率状态，然后开始拉杆增大迎角，以不大于1.85km/h的减速率减速，直至飞机出现抖杆器告警或任何不可制止的机头下俯现象，立即推杆改出。通过以上方法对飞机几个构型进行了失速试飞，计算得到了未结冰与45min待机冰型条件下的飞机的参考失速速度V_{SR}，具体计算过程如下，结果见图5、图6，图中给出了起飞、进场构型结冰与未结冰情况下的参考失速速度对比。

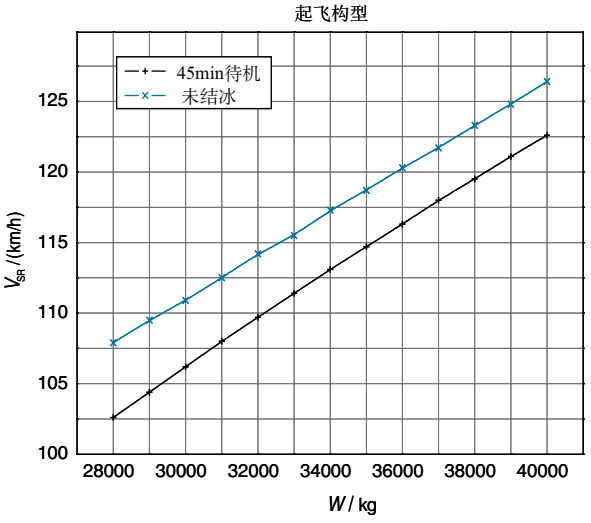

图5 起飞构型未结冰与45min待机冰型V_{SR}对比

Fig.5 Contrast of V_{SR} between takeoff configuration without ice type and takeoff configuration with 45min standby ice type

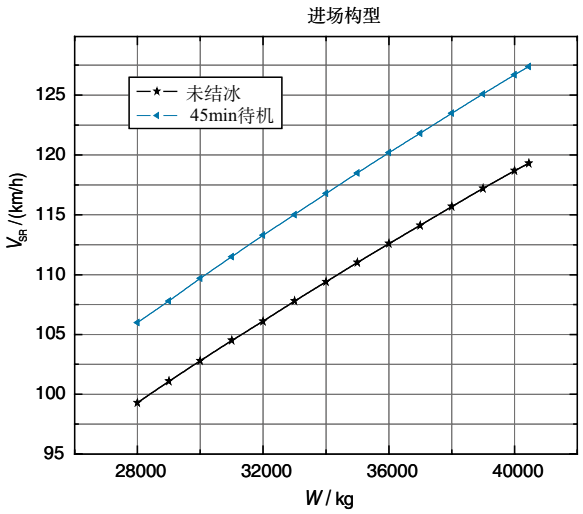

图6 进场构型未结冰与45min待机冰型V_{SR}对比

Fig.6 Contrast of V_{SR} between approach configuration without ice type and approach configuration with 45min standby ice type

按照式(4)计算升力系数,取推杆器工作点为失速点:

$$C_{L_PUSHER}=\frac{n_{zw}W}{q_{PUSHER}S} \tag{4}$$

式中:q_{PUSHER}表示推杆时的速压;n_{zw}表示推杆前0.5s的平均法向过载。

计算减速率:

$$\dot{V}=\frac{1.1V_{esp}-V_{esp}}{t_{1.1V_{esp}}-t_{V_{esp}}} \tag{5}$$

式中:$\dot{V}$表示减速率;V_{esp}表示推杆的当量空速;$t_{1.1V_{esp}}$表示$1.1V_{esp}$出现的时刻;$t_{V_{esp}}$表示V_{esp}出现的时刻。

将升力系数修正到对应重心前限位置(所有状态全部换算到重心3%MAC):

$$C_L=C_{L-test}[1+\frac{MAC}{L_t}(X_{CG-std}-X_{CG-test})] \tag{6}$$

式中:C_{L-test}表示没有经过重心修正的升力系数;$X_{CG-test}$表示试验重心位置,X_{CG-std}表示目标重心位置;L_t表示从机翼25%MAC到平尾25%MAC之间的平尾力臂。

绘制C_{L_PUSHER}和减速率的关系曲线,确定1.85km/h减速率时的升力系数;同时绘制C_{L_PUSHER}和飞机推力的关系曲线,并外推到零推力状态。

根据零推力状态升力系数,按式(7)计算给定重量下的推杆的当量速度:

$$V_{e_PUSHER}=\frac{3.6}{1.852}\sqrt{\frac{2W}{\rho_0 s C_{L_PUSHER}}} \tag{7}$$

式中:V_{e_PUSHER}表示失速时的当量空速。

将通过式(7)计算出的推杆当量空速修正成校准空速V_{sp}。

按照以下公式计算对应构型、重量的参考失速速度:

$$V_{SR}=\max(1.02V_{sp},V_{sp}+2)$$

给出各个构型下失速速度随重量变化的曲线图。

试飞时飞机平均质量为38t,重心为3% MAC,发动机慢车功率,由图可见,计算起飞构型结冰后的V_{SR}比未结冰时大7km/h,影响量为3.2%;计算进场构型结冰后的V_{SR}比未结冰时大15km/h,影响量为6.9%,可见结冰对进场构型失速速度影响程度要比起飞构型失速速度的大,当然两种构型的不同条件下的失速速度仍然满足25部中对应条款的要求。

4 结论

飞机飞行中所结冰型(形状、位置、厚度等)主要取决于大气的物理条件,尤其是大气中水滴直径、液态水含量、云层温度、云层范围等关键参数。另外,飞机的外形、飞行速度、飞行高度、飞行姿态(主要是飞行迎角)等也影响冰型的不同。从以上计算结果可以看出,结冰对飞机的性能是有影响的,归纳总结起来主要体现在:结冰使飞机的气动特性变差,导致飞机的飞行阻力增大,升力减小,升阻比变小,失速,参考速度明显增大,临界迎角减小,各种形态的爬升梯度减小。

综上,结冰会降低飞机的飞行性能,危及飞机的飞行安全,所以飞行中应尽量避开结冰云区。对于结冰试飞来讲,还必须遵循循序渐进,逐步逼近的原则,有效降低试飞的风险,最终得到结冰条件下飞机的性能操稳特性。 AST

参考文献

[1] CCAR25-R.运输类飞机适航标准 [S].中国民用航空总局,2001.
CCAR25-R.Transport category aircraft airworthiness standards [S].General Administration of Civil Aviation of China,2001.(in Chinese)

[2] 黄太平. 飞机性能工程[M] . 北京:科学出版社,2005.
HUANG Taiping. The flight performance engineering[M]. Beijing: Science Press,2005.(in Chinese)

[3] AC25-7A.运输类飞机合格审定飞行试验指南[S].中国飞行试验研究院,2003.
AC25-7.Transport category aircraft certification flight test guide[S]. Chinese Flight Test Establishment,2003.(in Chinese)

作者简介

蒋天俊(1982—) 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机性能品质试飞。

Tel:13759991206

E-mail:2350612214@qq.com

Analysis on the Effect of Icing on Civil Airplane Flight Performance

JIANG Tianjun*, YANG Mei, WANG Xiaojiang

Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: To obtain civil airplane's aviation airworthiness certification , flight test must be operated. The flight test need demonstration that civil aircraft can operate safety in the conditions of continuous or discontinuous maximum ice state that are required by CCAR25 of appendix C. Based on this background, the flight performances of a certain airplane's two configurations which were in the condition of 45min stand-by ice type were calculated, then they were analyzed contrast to the flight performaces of two configurations without ice type. Results show that the ice has a great influence on aircraft flight performance.

Key Words: civil airplane; ice type; flight performance; icing; airworthiness; lift-drag characteristic; climbing gradient; stalling speed

Received: 2015-01-26; **Revise:** 2015-03-02; **Accepted:** 2015-03-05

***Corresponding author. Tel. :** 13759991206 **E-mail:** 2350612214@qq.com