

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2023.01.017

# 民用飞机机轮最大刹车能量研究

吕意 李红军 姚雄华\* 张国宁 鱼海涛

(航空工业第一飞机设计研究院,西安 710089)

**摘要:** 机轮刹车装置是飞机起落架的重要组成部分,在地面减速过程中吸收飞机大部分动能,对飞机起降安全至关重要。其中,最大刹车能量设计是刹车装置的关键参数之一,与机轮刹车装置的安全性和经济性紧密相关。对民用飞机机轮刹车装置最大刹车能量的计算进行研究,按照适航规章相关要求,结合适航当局对刹车装置最大刹车能量计算的关注要点和飞机的设计构型,以某民用飞机为例,分析了机轮最大刹车能量计算中的影响因素,并通过计算对比该飞机在预定的不同使用场景与可能遇到的单个及多个故障叠加工况着陆时的刹车能量,确定该型飞机最大刹车能量出现在典型高原机场两个机轮刹车装置失效着陆工况,最大刹车能量为 32.44 MJ,为飞机机轮刹车装置的设计提供关键参数。

**关键词:** 刹车能量;高原机场着陆;中止起飞;襟翼故障;故障叠加

中图分类号: V227\*.5

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

飞机的地面滑跑减速能力对飞机起降安全至关重要,现代民用飞机的滑跑减速主要依靠刹车装置提供的制动力、发动机的反推力(如:发动机反推、螺旋桨反桨)以及飞机的气动阻力,图1为B-1B飞机开启扰流板着陆刹车场景,飞机动能的大部分由机轮刹车装置吸收<sup>[1]</sup>。刹车装置吸收能量的能力称为刹车动能容量,当刹车动能容量设计不足时,会导致制动过程中刹车装置过热,刹车装置温度过高引起热熔塞融化、轮胎泄气,带来飞机滑跑方向控制上的困难,也可能导致轮胎起火和轴承润滑脂或刹车油液泄漏,同时对轮轴、电缆等周边零部件产生危害性影响,严重危害乘员与飞机安全<sup>[2]</sup>。刹车动能容量设计过大时,会导致机轮刹车装置的重量过大,飞机日常背负不必要的重量飞行,造成运营成本增加和经济性降低<sup>[3]</sup>。刹车装置动能容量的设计值由飞机预定的使用场景中可能出现的最大刹车能量确定,因此合理的最大刹车能量对飞机刹车装置的设计、飞机的安全性和经济性

具有重要影响。本文对民用飞机最大刹车能力开展研究,结合适航规章要求和适航当局对民机刹车能量计算的关注要点,以某民用飞机的刹车能量计算为例,详细分析了多种使用场景与工况对飞机最大刹车能量计算的影响。



图1 B-1B“枪骑兵”着陆刹车

## 1 适航规章要求与当局关注要点

民用飞机刹车能量计算时首先要考虑适航条款的要求,中国民用航空规章CCAR-25-R4<sup>[4]</sup>第25.735(f)条对民用飞机刹车能量计算时需要考虑的工况进行了如下规定:

\* 通信作者. E-mail: 1294114602@qq.com

**引用格式:** 吕意,李红军,姚雄华,等.民用飞机机轮最大刹车能量研究[J].民用飞机设计与研究,2023(1):103-107. LYU Y, LI H J, YAO X H, et al. Study on maximum braking energy of civil aircraft wheel[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(1):103-107(in Chinese).

1) 设计着陆停止:设计着陆停止是在最大着陆重量下可操作的着陆停止。

2) 最大动能加速停止:最大动能加速停止是在最临界的飞机起飞重量和速度组合状态下的中止起飞状态。

3) 最严酷的着陆停止:最严酷的着陆停止是在最临界的飞机着陆重量和速度组合状态下的停止。

飞机最大刹车能量根据以上三种工况计算得到的最大能量值确定。

飞机刹车能量关系到飞机起降安全,刹车能量计算是适航当局审查的重点之一,主要关注如下要点:

- 1) 初始刹车时飞机最大速度是否保守选取;
- 2) 初始刹车时飞机最大重量是否保守选取;
- 3) 与刹车相关的故障工况及其叠加是否考虑完整等。

## 2 飞机刹车能量计算影响因素

影响飞机刹车能量的因素有飞机实施刹车时的重量( $W$ )、刹车速度( $V$ )和刹车机轮数( $N$ ),计算刹车能量需要具体考虑如下影响因素:

### 1) 机场条件

随着机场高度增加,空气密度降低,在飞机重量和飞机姿态不变的条件下,获得足够的升力需要的速度就越大,因此飞机的着陆或中止起飞的速度越大<sup>[5]</sup>,需要刹车装置吸收的能量越多。

### 2) 故障工况

飞机发生某些故障时,可能对飞机的刹车能量产生影响,因此刹车能量计算时需根据飞机的增升装置气动布局 and 刹车控制系统架构,分析与刹车相关的故障工况及故障叠加工况对刹车能量的影响,与刹车相关的故障工况及故障叠加工况有:襟翼放下功能失效、部分机轮刹车功能失效及其叠加。CCAR-25-R4<sup>[4]</sup>第 25.735(f)(3)条中关于最严酷的着陆停止中指出,对于极不可能的失效情况(发生概率 $<1E-9/FH$ )或当最大动能加速停止能量更严酷时,可不必考虑最严酷的着陆停止,因此在计算故障工况对飞机刹车能量的影响时,只考虑发生概率大于 $1E-9/FH$ 的故障工况。

### 3) 其他因素

AC 25.735-1<sup>[8]</sup>中指出,最严酷着陆工况的临界着陆重量为最大起飞重量减去飞行 30 min 消耗的

燃油重量,若飞机安装有放油系统,则应计入 15 min 的放油量。

## 3 飞机刹车能量计算

对不同的飞机而言,由于飞机起降性能与刹车控制系统架构设计不同,刹车能量计算时需要考虑的因素会有一定的差异,但整体思路基本相同。本节以某民用飞机为例,对其机轮刹车装置的最大能量进行计算。该型民机采用摇臂式主起落架,左右对称布置共 4 套刹车装置,刹车系统采用内外轮架构。

根据 AC 25.735-1 中的要求,机轮刹车能量计算采取直接计算法,公式如下:

$$KE = 0.0443 WV^2/N(\text{ft}\cdot\text{lb}) \quad (1)$$

式中:KE 为每个机轮刹车装置所需要吸收的动能, $N$  为装有刹车装置的机轮个数, $W$  为飞机重量, $V$  为飞机速度。

### 3.1 正常工况刹车能量计算

正常工况是指飞机在不同机场条件下的航线着陆工况和设计着陆工况。一般在飞机的总体要求中会根据机场条件对最大着陆速度和最大着陆重量进行规定,计算时取最大值即可。考虑到刹车能量分配时可能在各个轮子之间存在差异,应当预留适当的设计余量,因此在计算飞机正常工况下刹车装置吸收的能量时,飞机气动阻力、螺旋桨反浆和轮胎与跑道摩擦力吸收的能量不做计入。

根据该型客机的总体要求,将其在典型机场高原航线着陆、平原航线着陆、高原设计着陆与平原设计着陆时着陆重量和刹车速度代入式(1),计算得到典型机场正常着陆时的刹车能量。

表 1 该型客机典型机场正常着陆工况刹车能量

着陆工况	刹车能量/MJ
高原航线着陆	14.67
平原航线着陆	10.51
高原设计着陆	16.22
平原设计着陆	11.82

根据表 1 中的数据,正常着陆的单个机轮最大刹车能量出现在高原设计着陆工况,为 16.22 MJ。

### 3.2 中止起飞工况刹车能量计算

统计数据表明,大约在 3 000 次起飞中就会出

现一次起飞决断<sup>[6]</sup>,有可能进行中止起飞刹车。中止起飞一般分为三个阶段,全发加速阶段、过度识别阶段和制动减速阶段<sup>[7]</sup>,飞机的动能主要由刹车装置吸收。《Advisory Circular》<sup>[8]</sup>中指出,中止起飞刹停后的5 min内,不得有持续火焰出现且火苗高度不得超过轮胎最高点,不得对乘员的安全撤离产生威胁。因此刹车装置最大刹车能量必须能够满足飞机最大中止起飞刹车的要求。

根据该型客机在典型平原和高原机场的最大起飞重量和决断速度,计算得到中止起飞最大刹车能量为20.42 MJ,出现在高原机场中止起飞工况。

### 3.3 最严酷工况刹车能量计算

最严酷着陆停止情况是基于典型的单个或多个可预见的失效条件<sup>[3]</sup>,这些失效将导致飞机在超速和超重状态下着陆,而对于极不可能的失效工况(发生概率小于 $1E-9/FH$ ),则可不考虑最严酷的着陆停止。在计算刹车能量时,需筛选飞机可能出现的故障工况<sup>[9]</sup>并考虑故障工况叠加发生对刹车能量的影响。

影响飞机刹车能量的故障工况可以分为两类,一类是直接影响机轮刹车装置工作的故障工况,这类故障可能造成一个或多个刹车装置功能丧失,导致其他刹车装置需要吸收更多的刹车能量。另一类是可能影响飞机着陆速度的故障,通过影响着陆参数引起飞机动能变化,导致刹车装置需要吸收额外的能量。

#### 3.3.1 襟翼失效工况着陆刹车能量计算

在飞机起降过程中,通过控制襟翼的角度改变飞机的气动外形,获得额外升力。当飞机襟翼系统发生故障丧失收放功能时,飞机获得足够的升力需要更高的速度,导致飞机着陆速度增大<sup>[10]</sup>。

故障工况下,机组可能在飞机速度未减速到规定的最大刹车速度时开始刹车,因此计算时需考虑以飞机主机轮或前机轮的接地速度作为刹车速度下的刹车能量。当飞机的主起落架接地而前起落架未接地时,如果此时进行刹车,将导致飞机产生额外的低头力矩,给前起落架造成额外的过载,容易破坏前起落架和机身结构,给飞机和乘员带来危险,故一般不允许在前起落架未接地时进行刹车。因此计算襟翼故障工况下的最大刹车能量时,最大刹车速度取前起落架的接地速度。

对于该型飞机而言,飞机下降和进场过程中襟翼

收放功能丧失的发生概率 $<1E-5/FH$ 。通过筛选,襟翼故障着陆工况下最大着陆能量出现在机场标高为4 000 m,机场温度为ISA+0 °C工况。该工况下,飞机的刹车速度取前轮接地速度,着陆重量取飞机最大起飞重量减去30 min飞行的耗油质量,通过式(1)计算得到飞机襟翼故障着陆工况的最大刹车能量为26.55 MJ。由于飞机气动阻力和螺旋桨反桨(按照AC25.735-1,保守考虑单侧螺旋桨反桨失效)也可以吸收一部分动能,经计算,扣除这两部分能量后需要单个刹车装置吸收的最大能量为23.05 MJ。

#### 3.3.2 单个机轮刹车功能失效

在飞机使用过程中,由于刹车装置或液压管路故障,可能导致单个机轮刹车功能失效。单个机轮刹车功能失效工况着陆时,需要降低飞机的着陆速度,着陆后通过反桨和剩余的刹车装置进行减速,飞机着陆距离明显增加。根据该型飞机失效分析数据,单个机轮刹车功能失效故障的发生概率为 $<1E-3/FH$ ,因此需要考虑这种工况下的刹车能量。

根据3.1中的计算,正常工况飞机最大刹车能量出现在高原设计着陆工况,单轮刹车功能失效时,飞机的刹车能量由其余正常工作的三个机轮吸收,此时单个机轮的最大刹车能量为正常工况的 $4/3$ 倍,单轮最大刹车能量为21.63 MJ。

#### 3.3.3 两个机轮刹车功能失效

在该飞机的故障工况中,还存在两侧各丧失一个机轮的刹车减速功能以及丧失一侧机轮刹车减速功能故障工况。根据该型飞机失效分析数据,两侧各丧失一个机轮的刹车减速功能以及丧失一侧机轮刹车减速功能故障工况的发生概率均为 $<1E-5/FH$ ,进行刹车能量计算时需要进行考虑。该故障工况着陆时,飞机的刹车能量由正常工作的两个机轮刹车装置吸收,此时单个机轮的最大刹车能量是正常工况最大刹车能量的2倍,单轮最大刹车能量为32.44 MJ。

#### 3.3.4 故障工况叠加

在飞机运行过程中,可能发生多个故障工况同时出现的情况,因此需要对多故障工况叠加进行分析,并筛选出其中故障发生概率大于 $1E-9/FH$ 的工况进行分析计算,确定刹车能量。

对于该型飞机,着陆阶段襟翼故障叠加两个机轮刹车功能失效工况同时发生的概率为 $1E-10/FH$ ,为极不可能事件,因此计算刹车能量时不用考虑这

一工况对单轮刹车能量的影响。

襟翼故障叠加单个机轮刹车功能失效同时发生的概率为  $1E-8/FH$ , 发生概率大于  $1E-9/FH$ , 因此进行刹车能量计算时需要进行考虑。此故障叠加工况的单个机轮最大着陆刹车能量为襟翼故障着陆最大能量的  $4/3$  倍, 为 30.73 MJ。

### 3.3.5 最大刹车能量

根据以上的计算结果, 可以得到飞机各个运行工况下的最大刹车能量如表 2 所示。

表 2 各工况下飞机最大刹车能量

着陆工况	最大刹车能量/MJ
高原设计着陆	16.22
高原中止起飞	21.00
襟翼故障着陆	23.05
单轮刹车失效	21.63
两个机轮刹车功能失效	32.44
襟翼故障+单轮刹车失效	30.73

通过对比以上各工况下的刹车能量, 得到飞机的最大刹车能量按高原设计着陆时两个机轮刹车功能失效工况给出, 即单个机轮刹车装置的最大刹车能量按照 32.44 MJ 要求。

以上分析与单个机轮的最大刹车能量确定已得到适航当局认可。

## 4 结论

本文以某民用客机为例对飞机最大刹车能量的计算进行了研究, 分析了飞机在不同机场条件正常着陆、中止起飞、故障工况和故障工况叠加下着陆时的刹车能量, 确定该型飞机的最大刹车能量, 计算方法可作为类似飞机最大刹车能量计算时的参考。计算结果表明:

- 1) 正常工况和中止起飞工况时, 飞机在高原机场的刹车能量更大;
- 2) 单个故障工况着陆时, 两个机轮刹车功能失效工况着陆的刹车能量最大;
- 3) 考虑故障叠加时, 需分析发生可能性, 发生概率  $<1E-9/FH$  的叠加工况可不予考虑; 故障叠加工况着陆的最大刹车能量出现在襟翼故障叠加单轮刹车功能失效工况。

通过对比各工况的刹车能量值, 得到该型客机的单个机轮最大刹车能量为 32.44 MJ, 该值可作为该型飞机机轮刹车装置的设计依据。

### 参考文献:

- [1] 何永乐, 毕燕洪, 张艺. 利用 ABAQUS 软件进行航空机轮刹车热分析[J]. 飞机设计, 2008, 28(3): 62-65.
- [2] 何永乐, 毕燕洪, 赵文庆. 飞机刹车能量确定方法和计算公式比较[J]. 飞机设计, 2009, 29(1): 44-46;56.
- [3] 王晓梅. 民用飞机最严酷着陆刹车能量定义和验证[J]. 科技创新与应用, 2018(23): 11-12.
- [4] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011: 70-71.
- [5] 邵斌, 李柯, 黄文广, 等. 高原机场飞机减载使用分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 547(6): 2525-2532.
- [6] 吕海波. 论中断起飞和继续起飞的决断[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2010, 10(3): 41-44.
- [7] 刘静. 最大能量刹车试飞滑行距离和刹车能量工程估算技术[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(18): 308-312.
- [8] Federal Aviation Administration. Advisory Circular: Brakes and braking systems certification tests and analysis: AC25.735-1[S]. Washington D. C.: Federal Aviation Administration, 2002: 10-11.
- [9] 袁焯. 民用飞机刹车能量适航要求研究[J]. 科技创新导报, 2014, 11(25): 27.
- [10] 段容宜, 刘英. 襟翼故障分析与维护[J]. 科技视界, 2013, (35): 89;150.

### 作者简介

吕意 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 起落装置结构设计。E-mail: lvyi0059@163.com

李红军 男, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 起落装置结构设计。E-mail: 15332389910@189.cn

姚雄华 男, 硕士, 航空工业第一飞机设计研究院副总设计师、研究员。主要研究方向: 飞机结构强度总体设计。E-mail: 1294114602@qq.com

张国宁 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 起落装置结构设计。E-mail: 18091805926@163.com

鱼海涛 男, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 起落装置结构设计。E-mail: yuhetao324@163.com

## Study on maximum braking energy of civil aircraft wheel

LYU Yi LI Hongjun YAO Xionghua\* ZHANG Guoning YU Haitao

(AVIC First Aircraft Design and Research Institute, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Wheel brake device is an important part of aircraft landing gear. It absorbs most of the kinetic energy of the aircraft during ground deceleration, which is critical to the safety of aircraft takeoff and landing. Among them, the design of maximum braking energy is one of the key parameters of the brake device, which is closely related to the safety and economy of the wheel brake device. This paper studies the calculation of the maximum braking energy of the wheel brake device of a civil aircraft. According to the relevant requirements of the airworthiness regulations, combined with the focus of the airworthiness authority on the calculation of the maximum braking energy of the brake device and the design configuration of the aircraft, taking a civil aircraft as an example, this paper analyzes the influencing factors in the calculation of the maximum braking energy of the wheel, and by calculating and comparing the braking energy of the aircraft when landing in different predetermined use scenarios and possible single and multiple fault superposition conditions, it is determined that the maximum braking energy of the aircraft occurs in the failure landing condition of two wheel brake devices in typical plateau airport. The maximum braking energy is 32.44 MJ, which provides key parameters for the design of the aircraft wheel brake device.

**Keywords:** brake energy; landing at plateau airport; reject take off; flap failure; fault superposition

---

\* Corresponding author. E-mail: 1294114602@qq.com