

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.02.008

民机中央翼后梁油压载荷 设计计算研究

Engineering Calculation of Oil Striking for the After Spar in Central Wing Box

董晓莉 方采文 / DONG Xiaoli FANG Caiwen

(中航沈飞民用飞机有限责任公司, 沈阳 110013)

(AVIC Shenyang Aircraft Civil Aircraft Company Ltd., Shenyang 110013, China)

摘要:

以某型客机中央翼后梁结构为例,从输入条件、受力分析及计算方法分析等方面,阐述了后梁结构受油压冲击的工程初算过程。旨在为后续相关结构的工程初算提供思路和借鉴。

关键词:民机;中央翼;后梁;油压;工程初算

中图分类号:V224

文献标识码:A

[Abstract] Based on the structure of the after spar in central wing, this article expounds the engineering analysis procedure of the oil striking in the structure of the after spar from the inputting conditions, stress analysis and calculation method. This paper aims to provide the ideas and reference for the subsequent related structures engineering analysis.

[Keywords] civil aircraft; the central wing; after spar; oil striking; engineering analysis

0 引言

当前先进复合材料在飞机上应用的部位和用量的多少已成为衡量飞机结构先进性的重要标志之一,其在飞机结构中的应用也从最初的次结构过渡到了主结构甚至是主承力结构^[1]。根据试航文件 CCAR25.561 中规定,飞机坠撞时向后最大燃油压力为 1.5g,本文以某型飞机中央翼复合材料后梁为例,研究此工况下的工程初算方法。

1 输入条件

1.1 几何数模确定

以某型客机中央翼后梁作为研究对象,其中,中央翼内部结构为腹板肋结构形式。为方便分析,取两肋之间几何区域为单元进行分析,如图 1 所示。

简化后梁区域的面积分区如图 2 所示,其详细尺寸见表 1,复合材料结构件力学参数见表 2。

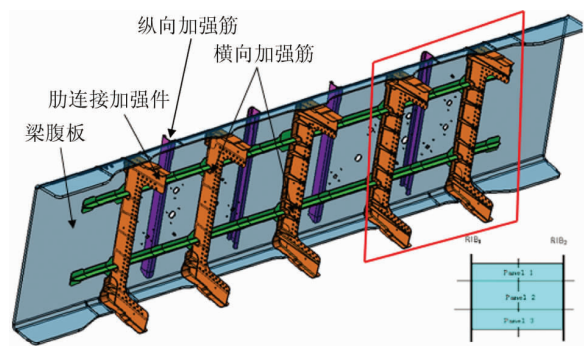


图 1 后梁简化区域视图

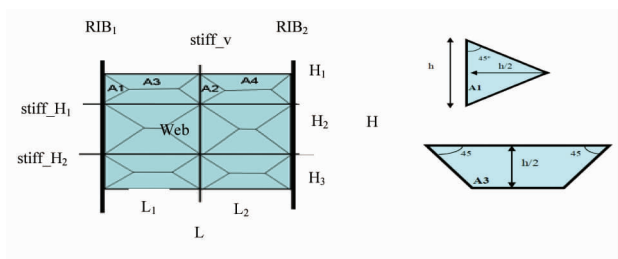


图 2 后梁详细尺寸以及面积分区

表1 后梁详细尺寸

几何参数:							
L	L_1	L_2	H	h_1	h_2	h_3	web_t
[in]	[in]	[in]	[in]	[in]	[in]	[in]	[in]
23	12.45	10.55	33	6	13	4	0.183

表2 力学参数

E_{web}	E_{stiff_v}	$E_{stiff_{H1}}$	$E_{stiff_{H2}}$	I_{stiff_v}	$I_{stiff_{H1}}$	$I_{stiff_{H2}}$
[psi]	[psi]	[psi]	[psi]	[in ⁴]	[in ⁴]	[in ⁴]
10 289 213	12 573 626	11 365 630	11 365 630	0.674	0.097	0.097

其中: E_{web} 为复合材料梁腹板的弹性模量; E_{stiff_v} 为复合材料纵向加强筋的弹性模量; $E_{stiff_{H1}}$ 、 $E_{stiff_{H2}}$ 分别为两个横向复合材料加强筋的弹性模量; I_{stiff_v} 为纵向加强筋的截面惯性矩; $I_{stiff_{H1}}$ 、 $I_{stiff_{H2}}$ 分别为两个横向加强筋的截面惯性矩。

1.2 载荷假设

本文选取中央翼后梁燃油压强载荷为工况,油压载荷为面外载荷,仅提取两肋之间区域进行研究,肋连接加强件以及梁缘条刚度大,约束条件可假设为四边固支,油压载荷 P 以均布力的形式分布到后梁腹板上,参数见表3。

表3 后梁两肋简化区域参数

参数	内容	单位	数值
ρ	燃油密度	磅每平方英寸(lb/in ²)	0.032
L	油箱航向长度	英寸(in)	130
a	加速度	g	1.5

注:加速度为坠撞时燃油晃动对后梁的最大冲击加速度。

$$P = \rho \times a \times L = 0.032 \times 130 \times 1.5 = 6.24 \text{ lb/in}^2$$

2 分析过程

为计算油压工况下腹板上的最大应力,需要考虑腹板和加强筋之间的变形协调^[2]。当垂直和水平加强件不发生变形,腹板承受油压开始弯曲时,腹板最大应力(f_{edge})出现在长边中间点,如图3(A)所示;当垂直和水平加强件也发生变形时,那么长边应力就会增加($f_{edge} + f_{inc}$),如图3(B)所示。

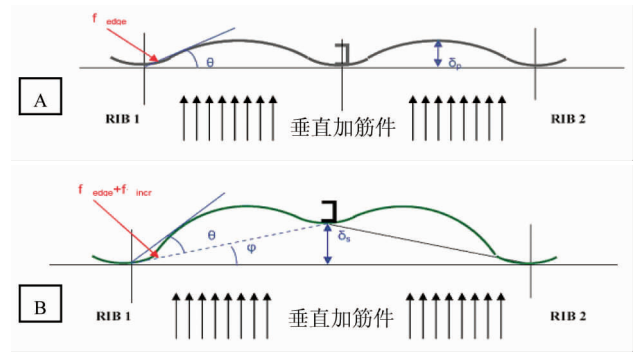


图3 变形协调因素

2.1 面积分解

将区间面积分解为图2所示。其中 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 面积计算公式如下。

$$A_1 = A_2 = \frac{H_1 \times H_1/2}{2}$$

$$A_3 = A_4 = \frac{H_1/2}{2} (L_* + (L_* - 2 \times H_1/2))$$

2.2 载荷计算

2.2.1 计算筋条载荷分布

垂直加筋、水平加筋1、水平加筋2 计算公式及结果见表4。

$$P_{v_stiff} = P \times [(A_1 + A_2)_{panel1} + (A_1 + A_2)_{panel2} + (A_1 + A_2)_{panel3}]$$

$$P_{H1_stiff} = P \times [(A_3 + A_4)_{panel1} + (A_3 + A_4)_{panel2}]$$

$$P_{H2_stiff} = P \times [(A_3 + A_4)_{panel1} + (A_3 + A_4)_{panel3}]$$

表4 筋条载荷分布

	RIB 1	RIB 2	RIB 1	RIB 2	RIB 1	RIB 2
垂直加筋	3		A4		A1, A2	
P_{v_stiff}	3 689.2 lb		2 134.4 lb		2 189.6 lb	
水平加筋 1	A1, A2		A3, A4		A1, A2	
P_{H1_stiff}	2 134.4 lb		2 189.6 lb		2 189.6 lb	
水平加筋 2	A1, A2		A3, A4		A1, A2	
P_{H2_stiff}	2 189.6 lb		2 189.6 lb		2 189.6 lb	

以下为油压对筋条均布力计算公式,表5为筋条均布力结果:

$$w_{v_stiff} = P_{v_stiff}/L$$

$$w_{h1_stiff} = P_{h1_stiff}/L$$

$$w_{h2_stiff} = P_{h2_stiff}/L$$

表 5 筋条均布力

w_{v_stiff} [lb/in]	$w_{H_1_stiff}$ [lb/in]	$w_{H_2_stiff}$ [lb/in]
112	93	95
112	77	79
112	96	98

2.2.2 纵横加筋交叉点变形协调分析

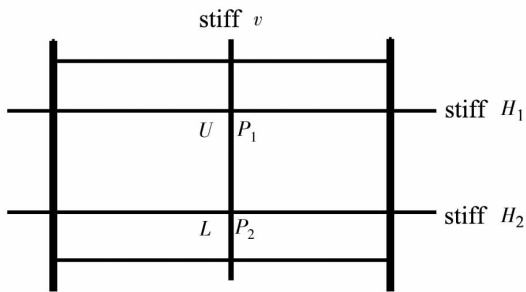


图 4 纵横加强筋交叉点

假设纵横加强筋交叉点 U 、 L 两点的相互作用力分别为 P_1 、 P_2 ，如图 4 所示。以交叉点处纵横筋条挠度收敛为判据，设定收敛阈值为 0.000 1。

1) 首先计算 U 点变形协调问题

针对垂直加强筋 $stiff_v$ 在 U 点的总挠度为：

$$Deflection\ stiff_v(U) = Deflection_1 + Deflection_2 + Deflection_3$$

其中：油压均布力引起的挠度为 $Deflection_1$ ； P_1 引起的挠度为 $Deflection_2$ ； P_2 引起的挠度为 $Deflection_3$ 。

针对水平加强筋 $stiff_{H_1}$ 的 U 点总挠度为：

$$Deflection\ stiff_{H_1}(U) = Deflection_4 + Deflection_5$$

其中：油压均布力引起的挠度为 $Deflection_4$ ； P_1 引起的挠度为 $Deflection_5$ 。

当 $|Deflection\ stiff_v(U) - Deflection\ stiff_{H_1}(U)| <$ 收敛阈值，认为 P_1 、 P_2 为合理，可带入本文以下章节进行计算。

2) 另外还需计算 L 点变形协调问题

针对垂直加强筋 $stiff_v$ 的 L 点总挠度为

$$Deflection\ stiff_v(L) = Deflection_1 + Deflection_2 + Deflection_3$$

其中：油压均布力引起的挠度为 $Deflection_1$ ； P_1 引起的挠度为 $Deflection_2$ ； P_2 引起的挠度为 $Deflection_3$ 。

针对水平加强筋 $stiff_{H_2}$ 的 L 点总挠度为

$$Deflection\ stiff_{H_2}(L) = Deflection_4 + Deflection_5$$

其中：油压均布力引起的挠度为 $Deflection_4$ ； P_2 引起的挠度为 $Deflection_5$ 。

当 $|Deflection\ stiff_v(L) - Deflection\ stiff_{H_2}(L)| <$ 收敛阈值时认为 P_1 、 P_2 为合理，可带入本文以下章节进行计算。

经迭代计算本文取 $P_1 = P_2 = 565$ lb 进行以下计算。

2.2.3 垂直加筋分别在均布力和集中力作用下的挠度

垂直加筋在均布力作用下的挠度，结果见表 6。

$$R_A = \frac{1}{2} \times (w_{v_stiff}) \times L$$

$$M = R_A \times L - \frac{1}{2}(w_{v_stiff}) \times x^2$$

$$Deflection\ 1 = \frac{(w_{v_stiff})}{EI} \left(\frac{L^3 x}{24} - \frac{Lx^3}{12} + \frac{x^4}{24} \right)$$

表 6 油压均布力作用下的挠度

位置	w_{v_stiff} [lb/in]	L [in]	x [in]	E_{stiff_v} [psi]	I_{stiff_v} [in ⁴]	R_A [lb]	M [lb/in]	Deflection 1 [in]
U	112	33.00	8.00	12 573 626	0.674	1 845	11 179	0.142
L	112	33.00	24.00	12 573 626	0.674	1 845	12 074	0.155
C (板中心点)	112	33.00	16.50	12 573 626	0.674	1 845	15 218	0.204

本结构中存在两处纵横加筋变形协调问题。一处是上侧的横向加筋与纵向加强筋之间的 P_1 集中力作用，一处是下侧的横向加强筋与纵向加强筋之间的 P_2 集中力作用。

以下是变形协调 P_1 集中力作用下的挠度，如图 5 所示，结果见表 7。

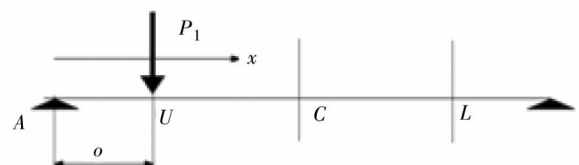


图 5 垂直加筋 P_1 集中力示意图

$$R_B = P_1 - R_A \quad M = R_A x - P_1(x - a)$$

$$\text{teta A} = -\frac{P_1}{6EI}(2L - a)(L - a)$$

$$R_A = \frac{P_1(L - a)}{L}$$

$$\text{Deflection 2} = -\left\{(\text{teta A})x + \frac{R_A x^3}{6EI} - \frac{P_1(x - a)^3}{6EI}\right\}$$

(如 $x < a$, 无解)

表7 集中力 P_1 作用下的挠度

位置	P_1 [lb]	L [in]	A [in]	x [in]	E_{stiff_v} [psi]	I_{stiff_v} [in ⁴]	teta A [rad]	R_A [lb]	R_B [lb]	M [lb/in]	Deflection2 [in]
U	565	33.00	8.00	8.00	12 573 626	0.674	-0.004	428	137	3 424	0.027
L	565	33.00	8.00	24.00	12 573 626	0.674	-0.004	428	137	1 233	0.023
C(板中心点)	565	33.00	8.00	16.50	12 573 626	0.674	-0.004	428	137	2 260	0.033

以下是变形协调 P_2 集中力作用下的挠度,如图6所示,结果见表8。

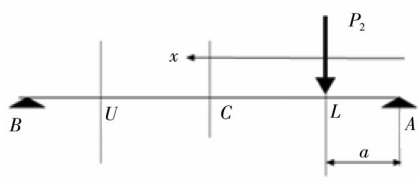


图6 垂直加筋 P_2 集中力示意图

$$\text{teta A} = -\frac{P_2}{6EI}(2L - a)(L - a)$$

$$R_A = \frac{P_2(L - a)}{L}$$

$$R_B = P_2 - R_A \quad M = R_A x - P_2(x - a)$$

$$\text{Deflection 2} = -\left\{(\text{teta A})x + \frac{R_A x^3}{6EI} - \frac{P_2(x - a)^3}{6EI}\right\}$$

(如 $x < a$, 无解)

表8 集中力 P_2 作用下的挠度

位置	P_2 [lb]	L [in]	a [in]	x [in]	E_{stiff_v} [psi]	I_{stiff_v} [in ⁴]	teta A [rad]	R_A [lb]	R_B [lb]	M [lb/in]	Deflection 3 [in]
U	565	33.00	9.00	9.00	12 573 626	0.674	-0.004	411	154	3 698	0.031
L	565	33.00	9.00	25.00	12 573 626	0.674	-0.004	411	154	1 233	0.023
C(板中心点)	565	33.00	9.00	16.50	12 573 626	0.674	-0.004	411	154	2 543	0.037

2.2.4 水平加筋分别在均布力和集中力作用下的挠度

首先计算水平加筋在均布力作用下的挠度,结果见表9。

$$R_A = (w_{\text{horiz}})L/2 \quad M = \frac{1}{8}(w_{\text{horiz}})L^2$$

$$\text{Deflection 4} = \frac{1}{384}\left(\frac{(w_{\text{horiz}})L^4 I(\text{stiff}_H)}{E_{\text{stiff}_H}}\right)$$

表9 油压均布力作用下的挠度

位置	w_{horiz} [lb/in]	L [in]	E_{stiff_H} [in ⁴]	I_{stiff_H} [in ⁴]	R_A [lb]	M [lb/in]	Deflection 4 [in]
U	93	23.50	11 365 630	0.097	1 090	6 406	0.33
L	95	23.50	11 365 630	0.097	1 119	6 572	0.34

本结构中存在两处纵横加筋变形协调问题。一处是上侧的横向加筋与纵向加强筋之间的 P_1 集中力作用,一处是下侧的横向加强筋与纵向加强筋

之间的 P_2 集中力作用。则分别计算变形协调 P_1 、 P_2 集中力作用下两个横向加强筋的挠度,结果见表10。

表 10 集中载荷作用下的挠度

$P_1 = P_2$ [lb]	L [in]	E_{stiff_H} [in ⁴]	I_{stiff_H} [in ⁴]	R_A [lb]	M [lb/in]	Deflection 5 [in]
565.00	23.50	11 365 630	0.097	283	3 319	0.138
565.00	23.50	11 365 630	0.097	283	3 319	0.138

2.2.5 腹板弯曲应力计算

将所选区域分成 6 部分,以纵横加强筋为边界,本文仅计算尺寸较大的分块,如图 2 左侧三块腹板区域。利用牛春云厚板理论,当垂直和水平加筋件不发生变形时,腹板承受油压弯曲时,腹板最大应力 fb_{edge} 出现长边中间点,板中心处的弯曲应力为 fb_{mid} ,板中心处的最大挠度为 δ 。结果见表 11。

$$fb_{edge} = -\beta_1 \left(p \frac{b^2}{t^2} \right) (1b/in^2)$$

$$fb_{mid} = \beta_2 \left(p \frac{b^2}{t^2} \right) (1b/in^2)$$

$$\delta = \alpha \left(p \frac{b^4}{Et^3} \right) (in)$$

式中,系数 β_1 、 β_2 、 α 如图 7 所示。

表 11 垂直和水平加筋件不发生变形时腹板应力

THICK PLATE 厚板理论						
	(mm)	a/b	β_1	fb_{edge} [psi]	β_2	fb_{mid} [psi]
Panel1 左侧	长 12.45 宽 6	2.08	0.500 0	9 890	0.279 1	5 520
Panel2 左侧	长 13 宽 12.45	1.04	0.317 1	27 008	0.142 9	12 172
Panel3 左侧	长 12.45 宽 4	3.11	0.500 0	4 395	0.286 0	2 514

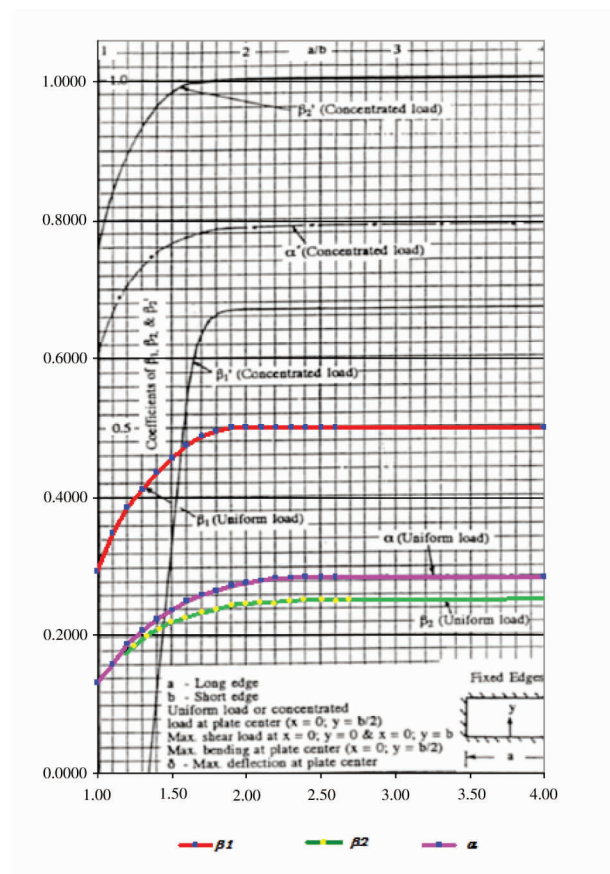


图 7 系数 β_1 、 β_2 、 α 示意图

2.2.6 加筋挠曲引起的腹板弯曲应力增加计算(见表 12)

纵向加强筋中心点处挠度 δ_{incr} 。

$$\delta_{incr} = \text{Deflection 1}(C) + \text{Deflection 2}(C) + \text{Deflection 3}(C) = 0.27$$

$$P_{incremental} = \frac{\delta Et^3}{\alpha L}$$

表 12 加筋挠曲引起的腹板弯曲应力增加计算

δ_{incr} [in]	$P_{incremental}$ [psi]	β_1	fb_{edge} incremental [psi]	β_2	fb_{mid} incremental [psi]
0.27	2.53	0.442 3	17 676	0.228 4	9 127

2.2.7 最终腹板长边中点的最大弯曲应力(见表 13)

$$f_{mid} = fb_{mid} + fb_{mid\ incremental}$$

$$f_{edge} = fb_{edge} + fb_{edge\ incremental}$$

表 13 最终腹板长边中点的最大弯曲应力

	f_{mid} [psi]	f_{edge} [psi]	N_x [lb/in]	M [lb in/in]	材料拉伸极限载荷 ρ_{tu}
Panel1 左侧	14 648	12 918	2 681	72	23 049
Panel2 左侧	17 385	19 299	3 898	131	
Panel3 左侧	11 641	10 430	2 130	58	

2.3 安全裕度(最佳安全裕度 $0 \leq M.S \leq 1$)(见表14)

表14 M.S值

Panel1 左侧	0.58
Panel2 左侧	0.19
Panel3 左侧	0.98

3 结论

民用飞机中央翼通常作为整体油箱,构成中央翼的梁结构必然会受到燃油冲击。本文以某型客机的复合材料中央翼后梁结构方案为例,详细阐述了梁结构受油压冲击的工程初算方法分析过程,解决了计算油压工况下腹板上的最大应力需要考虑的腹板和加强筋之间的变形协调问题,为中央翼梁

的结构优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 陶梅贞. 现代飞机结构综合设计[M]. 西安:西北工业大学出版社,2001.
- [2] 牛春匀,著. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 冯振宇,译. 北京:航空工业出版社,2009.

作者简介

董晓莉 女,本科,工程师,主要研究方向:复合材料结构设计,民机外翼结构设计;E-mail: dong.xiaoli@sacc.com.cn

方采文 女,本科,高级工程师。主要研究方向:复合材料结构设计,民机外翼结构设计;E-mail: fang.caiwen@sacc.com.cn