

PVB夹层玻璃边缘脱粘问题研究

林敦仪 张云阁 林万义 厉蕾

用不增塑的聚乙烯醇缩丁醛(PVB)胶片作中间层的歼击机前风挡玻璃,使用中间层边缘产生脱粘故障。本文从风挡的结构组成、中间层的性能及使用条件等方面,分析了脱粘的主要原因,提出在中间层的基本组成不变的条件下,改进夹层的性能防止脱粘的技术途径。

破坏分析

夹层边缘脱粘是由于应力的作用而引起,应力的性质和大小与夹层玻璃的工作条件及中间层的性能有关。一般认为应力产生的主要因素有:制造工艺不良使夹层边部产生拉应力;PVB中间层与玻璃面层膨胀系数的差异,在温差条件下产生的热应力;座舱增压和风挡玻璃安装框的反作用造成的结构应力。这些因素的叠加,将在夹层边部沿板面方向诱发界面剪应力和垂直于板面的拉应力,当应力超过夹层的粘接强度时即产生脱粘。

1. 歼击机前风挡夹层边部的应力状态

前述分析都是针对夹层带电加热的客机和运输机风挡玻璃,本文讨论的歼击机前风挡,其结构组成和使用条件与客机的风挡有许多不同点。歼击机风挡的结构组成如图1,与一

般客机比较,除结构和尺寸外,还有如下的差别,见表1。

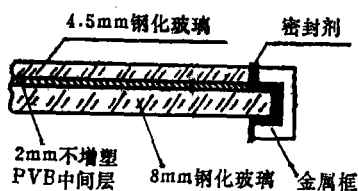


图1 前风挡结构组成示意图

歼击机前风挡夹层没有电加热,不存在边部“冷浸”问题,因而也就不明显产生由于夹层的温差引起的那种应力状态,但歼击机在巡航时,风挡表面处于 $-20\sim-30^{\circ}\text{C}$ 下,整个夹层受到“冷浸”。由于PVB中间层的线膨胀系数比玻璃大一个数量级,分别约为 $9\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 和 $9\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,低温下中间层沿平面方向收缩,夹层界面产生大的剪应力。由于飞行状态的急剧变化,引起风挡表面温度交变,使夹层处于非恒定热载荷的循环疲劳状态。歼击机座舱较高的和不恒定的增压压差产生的结构载荷,使夹层边部的拉应力和剪应力比客机高,并处于另一种形式的交变载荷循环疲劳状态。这些应力的叠加会导致粘接界面的弱化。水分的侵入会加速夹层边缘脱粘。

表1 两类飞机前风挡的差别

	客 机	歼 击 机
PVB中间层组成	含有约17%的癸二酸二丁酯(DBS)增塑剂	中间层不含增塑剂
夹层状态	带电加热元件或导电膜,工作时中间和边部温差较大,边部“冷浸”	不带电加热元件或导电膜,夹层温差较小,但在低温下整个夹层处于“冷浸”状态
工作条件	飞机速度、巡航高度、座舱增压基本恒定,风挡表面长时间处在 $-55\sim-35^{\circ}\text{C}$ 下	飞行速度、飞行高度、座舱增压不恒定,风挡玻璃表面在 $-55\sim 120^{\circ}\text{C}$ 之间交变

2. 不增塑PVB中间层的问题

歼击机前风挡玻璃采用不增塑PVB中间层是考虑到由于高速飞行气动加热带来的夹层耐高温问题。不增塑PVB中间层的玻璃化温度 T_g 约为 65°C ，其最佳工作温度区比通用的含17% DBS的PVB中间层上移了近 40°C ，耐热性较高，但其室温和低温的拉伸模量和剪切模量也相应地较高，柔性较差。夹层的热应力是中间层的弹性模量 E 、中间层与面层玻璃的膨胀系数差 $\Delta\alpha$ 和温度 T 的函数，可用下式表示：

$$\sigma_T = \frac{E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu}$$

式中 ΔT 为 $T_g - T$ 实际； ν 为中间层的泊松比。假定不同中间层的 ν 的差别忽略不计，在室温以下的相同条件下，显然，不增塑PVB中间层比通用的增塑PVB中间层，夹层的热应力要大。前者僵硬得像块有机玻璃，不再能有效地使热应力松弛而起热应变调节作用。这样的夹层玻璃实际上已成为整体刚性梁，座舱增压时，梁受弯曲，在夹层边缘产生的拉应力和剪应力也比增塑的PVB高。

分析结果认为：不增塑PVB中间层高的弹性模量和剪切模量是夹层玻璃使用中边缘产生脱粘的重要原因。适当地降低其 T_g 和 E ，改善低温柔性，并提高夹层界面粘接力和耐久性，可以防止边缘脱粘。

改进与验证试验

1. 改进试验

前风挡夹层玻璃在模拟飞行极限高温条件试验时，外层玻璃—中间层界面最高温度为 $63 \sim 75^{\circ}\text{C}$ ，大致相当于不增塑PVB中间层的 T_g ，比通用增塑PVB的起始粘流温度 T_f 高 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 。在PVB中间层组成与性能的试验中发现，中间层的 T_g 随组分中DBS百分含量增加而降低，并有良好的线性关系。考虑到中间层既要在极限高温条件下具有一定的承载能力，又要在较低温度下具有柔性和较高的粘接力以防止脱粘，研制了改性PVB中间层，组分为：PVB树

脂：DBS：硅偶联剂=100：9：1， $T_g \sim T_f$ 范围 $43 \sim 73^{\circ}\text{C}$ ，介于不增塑的和增塑的PVB之间。

配制了边部处理底胶，组分为：618环氧树脂：聚乙烯醇缩甲醛：p·p'-二氨基二苯基甲烷=100：75：15。

2. 夹层性能验证试验

用不增塑的PVB、通用的增塑PVB和改性PVB三种中间层作对比试验。

试验方法：

夹层悬臂梁弯曲应力脱粘试验。试样尺寸如图2，用砝码加载，每个砝码重 8.14N 。

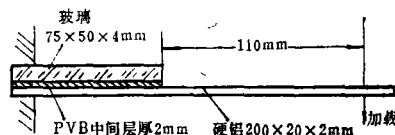


图2 悬臂梁弯曲试验示意图

夹层应力—环境耐久性试验(楔入试验)。试样尺寸如图3，楔子为硬铝，尺寸 $30 \times 25 \times 2\text{mm}$ ，楔子使两片玻璃张开量为 0.6mm ，试验在 $>95\%$ 湿度下进行，每8小时为1个试验周期。

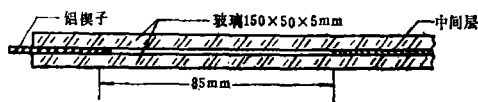


图3 应力—环境耐久性试验示意图

结果与讨论

1. 三种中间层的性能

不同增塑剂含量的PVB中间层的性能见表2。

改性PVB中间层的 $T_g \sim T_f$ 范围比不增塑PVB下移了 20°C ，比增塑的PVB约高 20°C ，其拉伸性能介于两者之间，但线膨胀系数却比不增塑的PVB几乎小 $1/2$ ，可能与硅偶联剂加入有关，这对降低夹层的热应力是有利的。

2. 不同中间层及涂底胶对夹层应力脱粘的影响

试验结果见表3。

表 2 三种PVB中间层的性能

中间层组成	T _g °C	T _f (起始) °C	膨胀系数 ×10 ⁻⁵ 1/°C	拉伸强度, MPa			拉伸模量, MPa		
				20°C	40°C	60°C	20°C	40°C	60°C
不增塑的PVB	63	94	8.90	39.8	37.5	37.8	2058	867	65
改性的PVB	43	73	5.02	26.2	15.3	9.6	1539	164	—
增塑的PVB	25	53	—	18.8	6.3	0.4	225	—	—

表 3 弯曲应力和水分对夹层脱粘的影响

中间层组成	夹层边缘	干		湿*	
		加砝码数	脱粘速度 mm/min	加砝码数	脱粘速度 mm/min
不增塑的PVB	无底胶	5	>100	2~3	>100
	涂底胶	5	<2	5	0
改性的PVB	无底胶	5	<1	5	2~5
	涂底胶	5	0	5	0
增塑的PVB	无底胶	5	>100	1~2	>100
	涂底胶	5	0	5	0

* 试验时在应力作用下于玻璃—中间层胶接端滴水。

可以看出,不增塑的和增塑的PVB夹层,在干的和湿的条件下承受应力的能力均比改性的PVB差,在湿条件下尤为明显,表明不增塑的PVB中间层由于模量较高,应力松弛能力较差,因而受载时难于通过形变降低胶接端面产生的应力集中。增塑的PVB中间层的模量较低,有较好的应力松弛能力,但由于增塑剂含量较高,降低了夹层界面的粘接力,两者的抗应力脱粘能力均较差。水分对应力脱粘起加速作用,涂底胶明显改善了两种夹层的抗脱粘能力。改性的PVB夹层良好的抗应力脱粘性能,除了具有适中的弹性模量和应力松弛能力外,最主要的是硅偶联剂的加入改善了粘接界面状态,减少微量水分对粘接力的影响。

用相同的试验方法测定三种夹层在各种温度下加载40.70N时得出表4的结果。

在较高温度下,不增塑的PVB夹层的抗

脱粘性能比其他中间层好,而在其T_g以下则很差。改性的PVB夹层在试验的各种温度条件下,均有良好的抗应力脱粘能力。

表 4 温度对应力脱粘的影响

中间层组成	脱粘程度*, mm			
	25°C	50°C	75°C	100°C
不增塑的PVB	速脱	速脱	7	25**
改性的PVB	微量	6	10~15**	35~40**
增塑的PVB	速脱	速脱	速脱	—

* 加载时间为20min。

** 夹层混合破坏。

3. 不同中间层对夹层的应力—环境耐久性影响

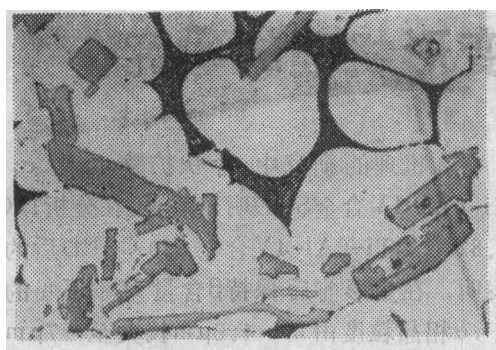
楔入试验结果见表5。

表 5 不同夹层的应力—环境耐久性

中间层组成	试样数量	脱胶量 mm/周期数	初始脱粘周期	试验时试样(玻璃)断裂数
不增塑的PVB	5	1~1.5/10	2	3
改性的PVB	5	0/10	—	1
增塑的PVB	5	1~1.2/10	0*	0
含8%DBS的PVB	5	1~1.3/10	5	1
含1份硅偶联剂的增塑PVB	5	0/10	—	0

* 楔子打入后立即脱粘。

表5的结果表明,不增塑的和增塑的PVB夹层耐久性较差,前者在试验过程中有3个试样粘接端部玻璃断裂,说明应力集中程度高,并且产生脱粘的时间短。中间层加入适量的增塑剂,可以降低应力 (下转第19页)



× 500

图9 Al-5.65Zn-4.26Mg-1.17Cu-0.12Mn-0.57Co-0.49Zr-0.30Ti铸锭合金金相组织 0.5HF



× 6000

图10 铝合金粉末TEM照片

形式偏聚在枝晶间的倾向。

刘年青、张德福、董玉琢、王淑芝、冯立增等同志参加了部分测试工作，在此表示谢意。

参考文献

- [1] Hotch, J.E., ASM, (1984), 38~39, 387~395.
- [2] Kler, E., ASM, (1983), 235~246.
- [3] Domalavage, P.K.etal, Metall. Trans., 14A (1983), 8, 1599~1606.
- [4] Millan, P.P., J.of Metal, (1983), 3, 76~83.
- [5] Mondolfo, L. F., Aluminum Alloys Structure and Properties, Butterworth and Co., Ltd., (1976), 247~249, 375~378, 413~415.

四、结 语

1. 通过普通气雾法氮气雾化的Al-Zn-Mg-Cu系合金粉末粒度范围为40~154μm的可达70%，所达到的冷却速度为 $10^3 \sim 10^4$ ℃/s。

2. 普通气雾法的Al-Zn-Mg-Cu系合金粉末呈椭圆形、液滴形或其它不规则形状，颗粒内的枝晶网呈胞状和树枝状。

3. 粉末颗粒内的合金元素有以微细质点的

(上接第24页) 集中程度，延长产生脱粘时间。增塑剂用量进一步增加，将降低粘接力，以致增塑的PVB打入楔子时立即脱粘。中间层中加入少量的硅偶联剂能显著提高夹层的耐久性。

结 论

不增塑的PVB中间层高的弹性模量，在较低温度下应力松弛能力差，是夹层玻璃边缘脱粘的重要原因。

改性的PVB中间层可改善夹层应力松弛性能，提高夹层边缘抗应力脱粘能力和耐久性。

涂底胶可提高夹层的界面粘接力，改善各种PVB夹层的抗应力脱粘能力。中间层中加入少量硅偶联剂同样可起到提高粘接力的作用。

(上接第47页) 车所得结果可靠性要大得多，并且试验费比一次试车要低得多，尤其对那些寿命长的零部件，经济效果更显著。其次，基于发动机延寿、定寿是一项长期的涉及许多专业领域而且是不断发展的系统工程，必须有一个包括各主要专业在内的强有力的组织，按照系统管理的方法组织实施。

“发动机结构完整性”这一技术思想，是关系到航空工程技术领域的全局性问题，技术发达国家对此十分重视。在“对外开放”的今天，我们不仅应该引进技术，也应引进先进的技术思想。只有这样，才能将我国的航空技术水平提高一步。