

飞机舱盖玻璃应力裂纹成因初探

一三〇厂 旷昌明

摘 要

文中介绍了舱盖后部骨架与玻璃间有XM-18胶的飞机 舱盖玻璃后部槽口应力裂纹 和有关的试验、观测情况,并在这些试验、观测的基础上,对舱盖玻璃上的应力产生作了分析,提出了应力裂纹产生原因的看法。

前 言

1983年9月,我厂生产的飞机舱盖玻璃有两架爆破。在随后的分解检查和排除过程中,发现90%以上的舱盖玻璃(后部边缘有XM-18胶者)在后部槽口处均有轻重不同的裂纹。已经查明,舱盖玻璃爆破的起因就是这些裂纹(见六二一所分析报告:“此次玻璃爆破是应力裂纹快速撕裂破坏”)。然而,这些裂纹(应力裂纹)是如何产生的?是什么应力促使舱盖玻璃在这么短的时间内(不出车间)就出现应力裂纹?这些问题到目前为止,还没有统一的认识。本文在一系列观察、试验的基础上,对应力的产生作了分析,提出了对应力裂纹产生原因的看法。

一、舱盖玻璃上的应力裂纹及其分布情况

从所有出现应力裂纹的舱盖玻璃来看,裂纹及分布有以下几个共同点(见图1):

(1) 应力裂纹分布在玻璃槽口的对称线

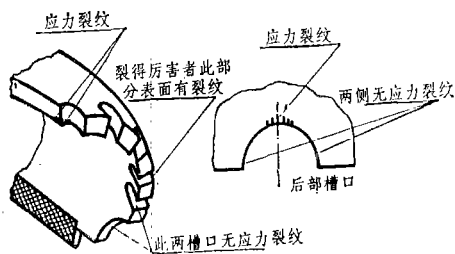


图1 应力裂纹的分布

及其左右,槽口的两侧面均无应力裂纹。玻璃后端面均无应力裂纹。

(2) 应力裂纹是沿厚度方向,在玻璃与骨架相接触的一面(简称内表面)产生,并向另一面(简称外表面)和舱盖纵向发展的。少数裂纹众多且裂得厉害的舱盖,在靠近两端的玻璃槽口外表面上产生裂纹,而内表面没有。

(3) 两架爆破的舱盖玻璃,从断口来看,初次裂纹均长约180mm,其端头正好与涤纶带边相对应,即与骨架型材端头相对应(图2)。

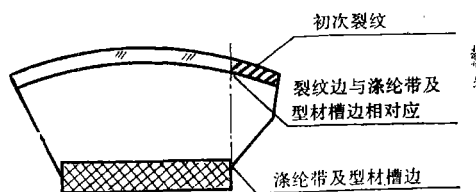


图2 玻璃初次裂纹端头与涤纶带端头相对应

(4) 在有的舱盖玻璃上观察到后端花槽部位有“翻边”现象(图3)。

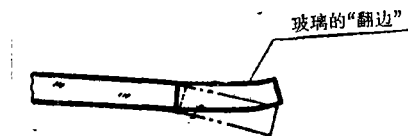


图3 舱盖玻璃后部槽口部位的“翻边”

此外,在舱盖玻璃分解排除过程中,还发现:

(5) 已处于交付状态的一架舱盖在车间分解了后蒙皮,发现玻璃花槽部位已有裂纹。室温停放一二天后,发现裂纹扩展,并有新的

裂纹出现。说明在停放状态下，裂纹的数量、大小随时间增长有增大的趋势；

(6) 分解故障的舱盖，在把两侧通条取出后，若不切断密封胶XM-18(或XM-16)，在拉伸台上甚至充压至0.03MPa，玻璃也取不下来。后部密封胶在切割不充分时，分解过程中(在拉伸台上顶拉玻璃)甚至把玻璃拉坏也不脱胶。

二、试验及观察测量

1.XM-18胶的可塑性试验

试验过程：

在两块玻璃间涂以XM-18胶，在室温下停放，时间与舱盖灌胶至热处理的时间间隔相同。随后检查玻璃的可转动性和XM-18胶的可塑性。热处理后再次检查。试验情况见图4。

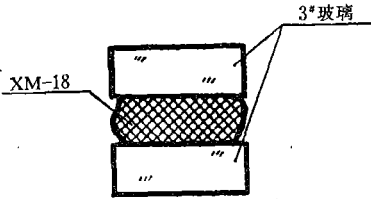


图 4 XM-18胶可塑性试验试件简图

试验及结果：

(1) 采用舱盖型材槽内使用的XM-18胶，室温下停放6天，然后检查。检查发现，

XM-18胶已不粘手，但手按压可见压痕。松开手后，压痕慢慢消失。用手相对转动两块玻璃，玻璃发生相对位移；除去外力后，两玻璃慢慢回复至原位置。

此试验结果说明，在舱盖热处理前，XM-18胶对玻璃运动的限制作用还不大。

(2) 将上述试片随舱盖在90℃热处理6小时，然后检查。经检查，XM-18胶已呈硬橡胶状态，手按压已难产生压痕，转动试片使之发生相对位移也很困难。

此试验结果说明，舱盖经热处理后，XM-18胶对玻璃运动的限制作用已很明显。

2.有机玻璃的“移走”试验

试验过程：

用橡胶板支承于玻璃之下，将玻璃的一端靠在镁合金件上，使A=0；将玻璃的另一端用密封材料粘于镁合金件上(图5)，随后进行热处理。冷却到室温后测量A值。

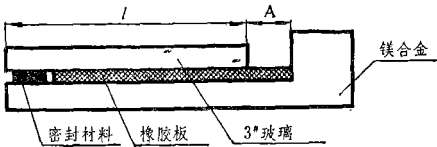


图 5 有机玻璃“移走”试验试件图示

试验及结果：

试验结果见表1。

表 1 有机玻璃“移走”试验结果

| 序号 | 密封材料 | 试件长度mm | 室温停放时间天 | 加热温度℃ | 加热时间h | Amm | | 玻璃加热理论伸长值mm | 附注 |
|----|-------|--------|---------|-------|-------|-----|----------|-------------|-----------------------|
| | | | | | | 加热前 | 加热后 | | |
| 1 | | 363 | | 90 | 6 | 0 | 0.85 | 1.85 | |
| 2 | XM-17 | 102 | | 130 | 0.5 | 0 | 1 | 0.82 | 加热后测 |
| 3 | XM-18 | 102 | 3 | 87 | 6 | 0 | 0.4 | 0.5 | 加热后测 |
| 4 | XM-18 | 352 | 3 | 90 | 6 | 0 | 1.8~1.85 | 1.8 | 偏光镜看，玻璃涂XM-18部位有拉应力产生 |

注：1.3*玻璃。

2.理论伸长值计算 $\Delta l = \alpha \cdot \Delta t \cdot l$, $\alpha = 7.3 \times 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$, 室温20℃。

试验结果表明,在热处理后玻璃移走了一段距离。其原因是:玻璃受热后要伸长。在伸长过程中,保持 $A=0$ 。此时,密封材料(XM-17、XM-18)还不足以阻止玻璃的伸长。在加热的时间内,XM-18胶硫化。在随后的冷却过程中,密封材料拉住(粘住)玻璃,玻璃冷却后回不到原来的位置。在没有密封材料的试片上,玻璃是两端向中心收缩;有密封胶的试片上,玻璃向有密封材料的一边收缩。故移动距离有差异。没有密封胶的试片移动距离约为其伸长理论值的一半,而有密封胶的试片,移动距离与伸长理论值基本一致。

3.热处理中, XM-18胶 对玻璃的拉伸作用试验

试验过程:

玻璃两端用橡胶板架起,紧靠橡胶板,用密封材料将玻璃与镁合金件粘在一起(图6),随后进行热处理。冷却至室温后,检查玻璃的变形,并用偏光镜检查应力情况。

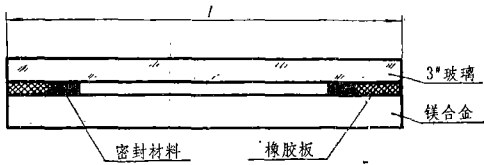


图6 玻璃拉伸试验时密封材料与试件的布置图

试验及结果:

- (1) 试验结果见表2。
- (2) 将试片的XM-18胶切断。经检查,

挠度变为1.05 mm。经偏光镜检查,中部下表面拉应力条纹业已消除。室温停放16小时后检查,挠度变为0.60 mm。试片变形情况见图7。

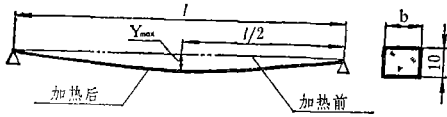


图7 试片变形图

本试验说明,舱盖热处理后,XM-18胶会使其产生应力。试片的弯曲,说明试片下表面有拉应力存在(偏光镜检查也发现有拉应力产生)。切除XM-18胶后的挠度减小,是由于固定端去除,玻璃要回复原状态,其间有弹性变形。

4.舱盖玻璃在热处理 下移情况观测

取消舱盖后部的XM-18胶,代之以密封腻子XM-17后,对热处理前后舱盖玻璃相对骨架的移动进行了测量,结果见表3。

由观测结果可见,玻璃在热处理之后都要向骨架内移动。这是由于玻璃端面与骨架型材槽底有一定的间隙,穿通条和拉伸后,此间隙没有消除。经过热处理,因玻璃热胀及XM-18胶的粘接作用,使玻璃向型材槽内“移走”。涤纶带处的玻璃断面形状(图8),以及分解排故过程中普遍感到通条易取出,不象穿通条时那么困难等现象,均说明这个问题。此外,涤纶带受热收缩也有助于玻璃向骨架内的“移走”。

表2 密封材料对玻璃拉伸试验结果

| 序号 | 密封材料 | 试件长度 mm | 室温停放时间 天 | 加热温度 °C | 加热时间 h | 最大挠度, mm | | 偏光镜观察 | 附注 |
|----|-------|------------|-------------|------------|-----------|----------|------|----------------|------|
| | | | | | | 加热前 | 加热后 | | |
| 1 | | | | 90 | 6 | 0 | 0 | 条纹对称 | |
| 2 | XM-17 | | | 90 | 6 | 0 | 0 | | |
| 3 | XM-18 | 460 | 6 | 90 | 6 | 0 | 1.3 | 条纹不对称,凸出部分有拉应力 | 试件中部 |
| 4 | XM-18 | | 5 | 90 | 6 | 0.5 | 1.86 | 条纹不对称,凸出部分有拉应力 | 试件中部 |

表3 舱盖玻璃热处理后相对骨架的移动

| 机 号 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
|---------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| 测量点相对位移 mm | 左 | 1 | 1.26 | 1.48 | 1.08 | 1.20 | 0.92 | 0.98 | 0.56 |
| | | 2 | 1.12 | 1.58 | 1.02 | 0.98 | 0.80 | 1.10 | 1.08 |
| | | 3 | | | | | | | 1.10 |
| | 右 | 1 | 1.08 | 1.26 | 2.08 | 1.00 | 0.94 | 0.76 | 0.16 |
| | | 2 | 1.20 | 1.18 | 0.94 | 1.08 | 1.84 | 1.06 | 0.80 |
| | | 3 | | | | | | | 0.92 |

注：热处理后，玻璃进入骨架内的相对位移为正
值。

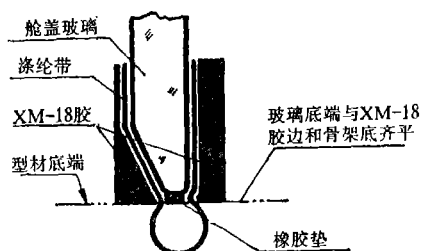


图8 涤纶带处玻璃断面形状

不同的舱盖，移动值不同。这与工人操作有关。但一般说来，都有1mm左右的移动量。

5. 后部(图9)无XM-18胶和有XM-18胶的舱盖玻璃在热处理过程中热间隙的变化情况观测

(1) 后部无XM-18胶的舱盖玻璃与骨架阶差(B值)在热处理过程中的变化情况

加热过程：室温升至88℃，保温1小时后测量。测量结果见表4。

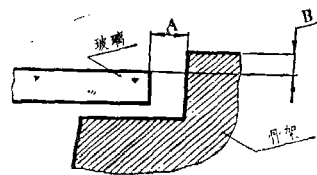


图9 舱盖后部简图

从观测结果来看，在加热过程中，阶差值基本上都是减少的。即是说，在加热状态下（此时两侧 型材槽内的 XM-18胶 业已硫化），玻璃 是高起来的（实际上，在型材槽内的XM-18胶未硫化时，玻璃向骨架内“移走”，同时也要高起一些）。此时，玻璃内表面与骨架之间的间隙增大。

(2) 后部无XM-18胶的舱盖玻璃后部热间隙(A值)在热处理过程中的变化情况

加热过程：

- 1) 室温→90℃，保温1小时后测量；
- 2) 90℃→60℃（降温时间为20分钟），保温20分钟测量。

测量结果见表5。

3) 后部有XM-18胶的舱盖玻璃后部热间隙(A值)在加热过程中的变化情况

加热过程：室温→66℃，保温2小时后测量。测量结果见表6。

从以上测量结果来看，后部有、无XM-18胶的舱盖玻璃，其热间隙在加热状态下都要发生变化。但二者变化情况有所不同。后部无XM-18胶的舱盖，中间部位的热间隙变化比两端的大一些。而后部有XM-18胶的舱盖，则

表4 后部无XM-18胶的舱盖B值在热处理过程中的变化

单位：mm

| 测量点 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|-----|-------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 加热前 | 1.4 | 1.76 | 2.64 | 2.24 | 1.64 | 2.1 | 1.8 | 2.26 | 1.88 | 1.6 | 1.44 | 2.03 | 1.98 | 1.78 | 2.16 | 2.36 | 2.24 | 0.3 |
| 加热后 | 1.58 | 2.18 | 2.26 | 2.24 | 1.38 | 1.9 | 1.74 | 1.98 | 1.66 | 1.88 | 1.58 | 1.14 | 1.08 | 1.32 | 1.48 | 1.44 | 1.6 | 0.3 |
| 变化值 | -0.18 | -0.42 | 0.38 | 0 | 0.26 | 0.2 | 0.06 | 0.28 | 0.22 | -0.28 | -0.14 | 0.94 | 0.90 | 0.46 | 0.68 | 0.92 | 0.64 | 0 |

注：1.加热过程中减少值为正。

2.测量点由左向右排列。

表5 后部无XM-18胶的舱盖A值在热处理过程中的变化

单位: mm

| 测量点 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
|-------------|---|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
| 加热前 | | 12.0 | 11.62 | 11.22 | 11.72 | 10.90 | 11.0 | 10.00 | 10.90 | 11.20 | 11.48 | 10.60 | 10.36 | 9.88 | 10.40 | 11.06 | 12.0 | 12.2 | 11.24 | |
| 加 热 后 | a | 数值 | 8.8 | 8.42 | 8.14 | 8.24 | 7.3 | 7.1 | 7.1 | 7.0 | 7.3 | 7.46 | 6.6 | 6.1 | 5.8 | 6.58 | 7.3 | 8.4 | 8.9 | 8.4 |
| | | 差值 | 3.2 | 3.2 | 3.08 | 3.48 | 3.6 | 3.9 | 3.8 | 3.9 | 3.9 | 4.02 | 4.00 | 4.26 | 4.08 | 3.82 | 3.76 | 3.6 | 3.3 | 2.84 |
| | b | 数值 | 9.82 | 9.48 | 9.1 | 9.22 | 8.3 | 8.16 | 8.2 | 8.1 | 8.36 | 8.52 | 7.8 | 7.42 | 7.00 | 7.7 | 8.3 | 9.6 | 10.2 | 9.4 |
| | | 差值 | 2.18 | 2.14 | 2.12 | 2.50 | 2.60 | 2.84 | 2.70 | 2.80 | 2.84 | 2.96 | 2.8 | 2.94 | 2.88 | 2.7 | 2.76 | 2.4 | 2.0 | 1.84 |

注: 1. 差值均与加热前比较, 加热中减小为正值。

2. 测量点由左向右排列。

表6 后部有XM-18胶的舱盖A值在热处理过程中的变化

单位: mm

| 测量点 | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
|-----|------|----|------|-------|------|------|-----|------|-----|------|------|---|------|------|-----|-----|------|-----|
| 加热前 | 9.82 | 10 | 12.4 | 11.18 | 10.9 | 10.6 | 9.9 | 9.82 | 9.1 | 9.08 | 8.4 | | 10.1 | 10.3 | 9.8 | 9.5 | 10.2 | 9.8 |
| 加热后 | 9.04 | 9 | 11.4 | 10.3 | 9.9 | 9.6 | 9.1 | 8.9 | 8.6 | 8.24 | 7.66 | 8 | 9.9 | 9.72 | 9.4 | 9.1 | 9.8 | 9.4 |
| 差值 | 0.78 | 1 | 1.0 | 0.88 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.92 | 0.5 | 0.84 | 0.74 | | 0.2 | 0.58 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |

| 测量点 | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | | 14 | | 15 | | 16 | | 17 | | 18 | |
|-----|------|-----|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 加热前 | 10.2 | 9.8 | 10.1 | 9.54 | 9.6 | 9.82 | 9.6 | 9.1 | 10.3 | 10.2 | 11 | 11.4 | 11.4 | 11.1 | 10.06 | 9.88 | 9.84 | 10 |
| 加热后 | 9.4 | 9.2 | | 9.2 | 9 | 9.1 | 8.8 | 8.44 | 9.8 | 9.5 | 10.4 | 10.8 | 10.8 | 10.3 | 9.24 | 9.2 | 9.2 | 9.32 |
| 差值 | 0.8 | 0.6 | | 0.34 | 0.6 | 0.72 | 0.8 | 0.66 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 0.82 | 0.68 | 0.64 | 0.68 |

注: 1. 差值在加热中减小为正值。

2. 测量点由左向右排列。

中间部位比两端要小一些。从同样在60℃左右温度下的变化情况看, 有XM-18胶的舱盖玻璃, 其热间隙变化比没有XM-18胶的舱盖玻璃热间隙变化小得多。这个测量结果, 说明XM-18胶在限制玻璃热胀冷缩方面的作用是很大的。

三、结果分析

从玻璃上应力裂纹的分布、分解检查的情况以及试验观测的结果来看, 在舱盖的制造过程中, 热处理是产生应力的主要工序。

有机玻璃的热膨胀系数大。为避免舱盖玻璃上产生较大的热应力, 软固定舱盖玻璃在设计时均留出热间隙, 且后部边界一般均为夹支, 让玻璃能够自由地胀缩。当玻璃的边界部位有XM-18胶将玻璃和骨架粘住时, 玻璃的边界将变成固支状态。这样, 一旦玻璃的热状态发生变化, 其热胀冷缩受到限制, 不可避免地在玻璃上要产生热应力。

在舱盖装配过程中, XM-18胶在热处理前并未得到充分硫化(从舱盖玻璃穿通条安装、灌涂XM-18胶至热处理, 一般3天左右)。

从试验1可看出这一点。此时, XM-18胶对玻璃胀缩的限制还不明显, 热状态的变化, 还不足以使玻璃上产生很大的热应力。在试验2中, 在密封胶XM-18未充分硫化时, 玻璃虽然用XM-18胶与镁合金粘接, 但其移动并未受到限制。

在试验3中, 情况就不同了。在由室温升至90℃的过程中, 玻璃的受热膨胀未受到XM-18胶的限制, 玻璃在90℃的环境下伸长。在保温6小时的过程中, XM-18胶得到充分硫化, 变成了硬橡胶。此时, 玻璃的下表面(与XM-18胶粘接的表面)已被XM-18胶固定到90℃的伸长状态。热处理结束后冷却到室温, 玻璃上表面收缩, 下表面则因被固定而无法收缩, 相当于玻璃的上下表面处于有温度差的环境中。但此时的环境是室温, 故下表面是被拉伸到90℃的状态, 因而下表面有拉应力产生。从偏光镜的观察情况可知拉应力的存在。此拉应力在边界处形成弯矩, 故试片在热处理后相当于承受弯矩而处于纯弯状态的简支梁, 因而产生弯曲变形。

与以上的试验相类似, 在后部有XM-18胶的舱盖上, 经过热处理, XM-18胶对玻璃的“移动”、“变形”作用都会发生, 玻璃的内表面会被固定到90℃状态, 而外表面则力图恢复室温状态, 玻璃的内外表面相当于处在不同的温度环境, 而此时因舱盖的结构及XM-18胶, 玻璃的边界成为固支, 故玻璃产生热应力。两侧的XM-18胶(型材槽内)把玻璃向下拉(由以上的试验观测可知, 在加热过程中, 玻璃两侧向型材槽内移动, 后部抬高。而玻璃与骨架的间隙则被XM-18胶填满。与此同时, XM-18胶充分硫化变成硬橡胶。在冷却到室温的过程中, 玻璃有由抬高状态下移回复原状的趋势, 在后部被形成硬橡胶的XM-18胶所阻止, 因而形成两侧型材槽内的XM-18胶对玻璃的下拉), 后端的XM-18胶则使玻璃产生弯曲的趋势。这两种作用, 都使玻璃产生应力。

1. 后部XM-18胶的作用

把舱盖玻璃近似看作一个圆筒, 可以利用圆筒热应力公式来估算后部使用XM-18胶固定了的玻璃经过热处理所产生的热应力值。

由板壳理论可知, 在端头固支的圆筒上, 若圆筒内外表面有温度差 Δt , 则圆筒表面在周向产生热应力:

$$\sigma_1 = E\alpha \Delta t / 2(1-\nu) [1 - \nu + \sqrt{1-\nu^2} / \sqrt{3}]$$

其中: E—弹性模量;

α —线膨胀系数;

ν —泊桑比。

若取室温为20℃, 热处理温度为90℃, 线膨胀系数 $\alpha = 7.3 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$, 3#玻璃 $E = 2.84 \text{ GPa}$, 泊桑比 $\nu = 0.40$, 则得 $\sigma_1 = 1.37 \text{ MPa}$ 。

2. 骨架型材槽内XM-18胶的作用

同样把舱盖玻璃近似看作一个圆筒, 可以利用板壳理论估算在热处理后两侧型材槽内和后部均有XM-18胶的玻璃上产生的热应力。

取室温为20℃, 有机玻璃 $\alpha = 7.3 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$, 3#玻璃 $E = 2.84 \text{ GPa}$, 舱盖玻璃后部半径 $R = 30 \text{ cm}$ 。当加热到90℃时, 后部玻璃圆周伸长为: $\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta t = \pi R \cdot \alpha \cdot \Delta t \approx 0.48 \text{ cm}$ 。

半径增加为: $\Delta R = \Delta l / \pi = 0.15 \text{ cm}$ 。

可以认为这1.5%的半径增加量, 在加热过程中被XM-18胶填满。而冷却到室温后, XM-18胶的硫化阻止玻璃回复室温状态。也可认为, 玻璃的后端波顶是约1.5%的位移, 从而使玻璃周向产生应力。

对于端头受剪力Q(图10)的圆筒壳来说, 当Q使圆筒径向位移为y, 而圆周半径为R时, 则Q产生的周向应力为:

$$\sigma_2 = Ey/R。$$

它可用于估算此时玻璃上产生的应力。

取 $y = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $R = 30 \text{ cm}$, $E = 2.84 \text{ GPa}$, 则有: $\sigma_2 = 1.42 \text{ MPa}$ 。

由于玻璃向外翻, 故内表面是拉应力。

这样, 由于XM-18胶的存在, 经过热处理, 玻璃内表面将产生约 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = 2.79 \text{ MPa}$ 的周向拉应力。

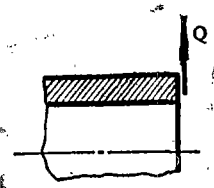


图 10 圆筒端面受剪力 Q

考虑到后端玻璃槽口的应力集中，以及机械加工粗糙（特别是有径向凹槽存在时，加剧了应力集中）形成的机加残余应力等，亦可能在玻璃上形成裂纹。

由以上分析可知，舱盖玻璃上的应力裂纹是由于XM-18胶在热处理后改变了玻璃的边界条件引起的。这个应力主要由两部分组成，一部分是由于后部XM-18胶引起；另一部分是由于两侧型材槽内的XM-18胶引起。

在估算中，把舱盖玻璃近似看作圆筒。实际上，舱盖玻璃只是一个旋转曲面的一半。这使得后部边界上的应力不呈均匀分布状态。

对于后部XM-18胶产生的应力来说，玻璃两侧端由于型材槽内外表面都有XM-18胶，于是玻璃两侧部分内外表面的“温差”比中部小，加上边界（两侧端）上骨架型材并不是完全刚性的，玻璃外表面的收缩，使玻璃有张开的趋势。这些都使得玻璃两侧的弯曲趋势（即玻璃内表面拉应力值）要比中部玻璃小。

由于舱盖玻璃只是半个旋转曲面，XM-18胶向下拉的力向两侧逐渐变成切向，由此引起的玻璃弯曲趋势也逐步减小，因而玻璃内表面的拉应力也是中部的比两侧大。

这样，应力的这两个主要部分都是舱盖中部比侧边部大，因而应力裂纹也就主要产生在中部槽口上。应力是内表面周向拉应力，槽口部分是半圆形状，故由槽口对称线部分的内表面上产生。

另外，在飞行使用过程中，由于边界变成固支状态，除了正常使用应力外，还会由于座舱的增压等引起附加的弯曲趋势产生，从而形成附加的应力（图11）。这样，玻璃的应力裂

纹会扩展或产生，最终致使玻璃爆裂。

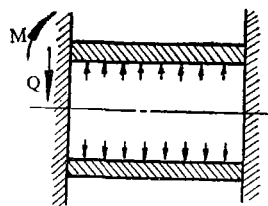


图 11 端头固支圆筒承受内压后端头形成弯矩和剪力

四、结 论

1. 在后部有XM-18胶的舱盖上，后部槽口中心部位产生的应力裂纹，主要是由于热应力引起的。

2. 热应力的产生是在舱盖热处理后。

3. 热应力的产生，是由于XM-18胶的存在改变了玻璃的边界条件，使玻璃边界成为固支状态，因而热状态的变化便形成了热应力。

4. 热应力主要由两部分组成，一部分是后部XM-18胶形成，另一部分是由两侧XM-18胶形成。

5. 机加不良增加了附加应力和应力集中程度。

6. 舱盖使用中，应力有变化，最终导致玻璃的爆裂。

（参考资料从略）



陶瓷涡轮增压器转子

首先制成孔隙率为39.5~55%、收缩率不大于0.5%的几个模塑陶瓷体。经热等静压形成的这些模塑体的连接表面，应进行机加工以便互相贴合，然后将待连接的陶瓷体装配在一起，连接表面之间不加陶瓷膏，只进行热等静压，所装配的陶瓷体于常压烧结后即形成一个整体。模塑陶瓷体最好是由氮化硅、碳化硅、氧化锆、三氧化二铝或堇青石制成，至少陶瓷体中的一个注射模塑的。（卿）