

# 轻型防弹玻璃的结构研究

## Study on the Structure of Lightweight Bulletproof Glass

陈宇宏, 厉 蕾 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

CHEN Yu-hong, LI Lei

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 改变层合防弹玻璃的面板和背板材料及结构组合形式, 并通过测量防弹性能和面密度, 选出了轻型防弹玻璃的材料与结构。结果表明, 以无机玻璃 (G) 作为面板材料, 聚碳酸酯 (PC) 作为背板的表层材料, 定向有机玻璃 (DYB) 作为中间过渡材料, 即 G/DYB/PC 结构, 具有优异的防弹性能, 与传统防弹玻璃相比, 可减重 20% 以上。同时还进一步研究了间隙装甲结构。

**关键词:** 轻型防弹玻璃; 聚碳酸酯; 无机玻璃; 定向有机玻璃; 防弹性能

**中图分类号:** TQ 171.73<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2002) 06-0007-03

**Abstract:** Materials and structure appropriate for lightweight glass were selected according to ballistic tests and aerial density tests of different structure laminated by various materials. The result show that the G/DYB/PC laminated by glass as front plate, polycarbonate as surface of backing plate, and stretched acrylics interposed between glass and PC, has the best properties. Compared with the traditional bulletproof glass, G/DYB/PC has a weight decrease by more than 20%. Furthermore the structure of gap armor were studied.

**Key words:** lightweight bulletproof glass; polycarbonate; glass; acrylics; bulletproof tests

作为光学结构件和保护罩的座舱透明件是军用直升机抗坠落求生存的关键部件之一。这是由于军用直升机经常进行低空作战, 易受空中和地面火力的双重攻击, 因此其透明件必须具有良好的防弹性能。国内以前研制生产的直升机座舱均采用非防弹的单层有机玻璃, 而其它机型, 如轰击机等采用的防弹玻璃为多层无机玻璃层合结构, 重量大 (面密度超过  $100 \text{ kg/m}^2$ )<sup>[1]</sup>, 无法直接用在直升机上, 因此必须研制新型的轻质防弹玻璃。

单层透明材料很难满足防弹要求。因此必须走层合的技术路线。层合玻璃一般是由面板、背板以及起粘接作用的中间层组成, 其防弹原理是利用硬而脆的面板受冲击后破裂来吸收一部分入射能量, 继而通过中间层和背板的变形来吸收剩余能量<sup>[2]</sup>。本研究首次将聚碳酸酯 (PC) 用于航空防弹玻璃的结构材料, 通过改变 PC 与其它透明材料的组合结构, 设计并制造出不同面密度的防弹试样, 然后进行光学性能和防弹性能测试, 对轻型防弹玻璃进行结构优化研究。同时还研究了间隙装甲结构和抗多发子弹的设计。本研究不仅适用于航空如直升机用的透明件, 而且将在汽车、建筑及金融等涉及到安全防弹玻璃领域获得广泛的应用。

## 1 实验部分

### 1.1 单层刚性透明材料

5mm 物理钢化玻璃; 5mm 化学钢化玻璃; 5, 6, 8, 10mm 无机退火玻璃 (G); 5, 10mm 定向有机玻璃 (DYB); 3, 6, 12.7mm 聚碳酸酯 (PC)。

### 1.2 模具制作

按结构设计要求, 将单层刚性透明材料组合在一起 (用 PVB 胶条封边和控制厚度)。

### 1.3 中间层浇铸料的合成与防弹玻璃的制造

#### 1.3.1 原料

聚醚二元醇: Du Pont 公司; 异氰酸酯: H ls 公司; 丁二醇: 北京化学试剂公司; 其它如催化剂等。

#### 1.3.2 中间层 PU 的合成及防弹玻璃的制造

在四口瓶中将聚醚二元醇进行真空脱水, 温度为  $98 \sim 105^\circ\text{C}$ , 真空度为  $8 \sim 20 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ , 脱水完毕后降温, 加入异氰酸酯和催化剂, 然后在  $80 \sim 100^\circ\text{C}$  下反应  $3 \sim 5 \text{ h}$ , 即制成 PU 预聚体。预聚完毕后加入丁二醇, 并立即灌入模具中, 然后移入热压罐中, 进行加热加压固化。

### 1.4 防弹玻璃的面密度、光学性能和防弹性能测试

面密度是单位面积下试样的质量, 采用称量法测

试。

光学性能（包括透光率和雾度）采用 XL-221 按 HB2410 进行测试。

防弹性能实验在中科院力学所进行。对不同面密度的防弹试样，采用不同子弹，包括钢珠弹，54 式手枪/51-1 式 7.62mm 手枪普通弹，53 式步枪/53 式 7.62mm 普通弹、穿甲弹进行打靶实验，测定弹穿极限速度  $V_c$ 。防弹试样尺寸为 150mm×150mm，每种结构取 5 个试样。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 聚碳酸酯 (PC) 与定向有机玻璃 (DYB) 的防弹性能比较

轻质防弹玻璃必须使用密度小的有机透明材料以适应减重要求。常用的有机透明材料主要有聚碳酸酯 (PC) 和有机玻璃。PC 的冲击强度在所有的透明材料中是最高的 (PC 的  $I_{zod}$  缺口冲击强度是 DYB 的 10 倍)。表 1 所示是 PC 和 DYB 的防弹性能比较。实验采用钢珠作为子弹，结果表明 3mmPC 和 10mmPC 的防弹性能相当。说明 PC 适合于轻质防弹玻璃轻重量、高性能要求。

表 1 PC 与 DYB 的防弹性能比较

Table 1 The comparison of bulletproof tests of PC and DYB

材料	厚度/mm	弹穿极限速度 $V_c / (m \cdot s^{-1})$
PC	3	240
DYB	10	250

### 2.2 PC 和无机玻璃的不同组合对防弹性能和面密度的影响

PC 符合轻质防弹要求。但单纯的 PC 防不住高速的真实子弹。这是由于手枪或步枪射出的子弹体积小 (尖锐体)、硬度高、速度快，而 PC 是高分子材料，在极短的时间内，其高分子链段可能来不及反应，就被子弹穿透。根据防弹理论，理想的防弹材料应该既有硬度又有韧性<sup>[3]</sup>，而 PC 虽然韧性好，但硬度低，因此表 2 中纯 PC 结构(PC6/PC6) 不能防 54 式手枪弹。同样，纯粹无机玻璃结构 (G6/G6) 的防弹性能也不好，这是由于无机玻璃虽硬度高但韧性很低。而表 2 中以无机玻璃为面板，PC 为背板的 G6/PC6 结构却具有最好的防弹性能。这是由于该结构兼有无机玻璃和 PC 的优点。无机玻璃的硬度高，当子弹撞击它时，会使子弹发生钝化 (改变尖锐的外形)，同时无机玻璃破裂也消耗一部分入射能量，剩余能量正好通过 PC 板的高冲击韧性 (变形) 得以消耗。表2中的全无机结

表 2 PC 和无机玻璃的不同组合对防弹性能和面密度的影响

Table 2 Effect of different structure laminated by PC and glass on bulletproof and aerial density tests

结构	面密度/ ( $kg \cdot m^{-2}$ )	射击距离 /m	防弹效果
PC6/PC6	16.8	5	子弹穿透试样
G6/G6	31.2	5	子弹穿透试样
G6/PC6	23.4	5	不透，背面 PC 略变形，无碎片溅出
PC6/G6	23.6	5	子弹穿透试样
G6/G8	36	5	不透，但背面 G 有碎片溅出

注：打靶采用 54 式手枪/51-1 式 7.62mm 手枪普通弹

构 G6/G8 也可以防住 54 式手枪弹，防弹水平相当于 G6/PC6，但其面密度为 36kg/m，比 G6/PC6 的面密度大 50% 以上；而且全无机结构受弹击以后，背面有可以伤人的玻璃碎片溅出。因此以硬度高的材料如无机玻璃为面板，以韧性好的材料如 PC 为背板的“硬-韧”结构 G/PC，在减重和防弹效果上，均优于其它结构。

### 2.3 不同面板材料对防弹性能的影响

表 3 所示的防弹玻璃都是以三层 6mm 的 PC 作为背板材料，面板材料分别采用无机玻璃 (包括普通退火玻璃、物理钢化玻璃和化学钢化玻璃) 和有机玻璃。结果表明以无机玻璃为面板的层合玻璃防弹能力高于有机玻璃为面板的层合玻璃，这是由于无机玻璃的硬度和模量比有机玻璃高，因此它更有利于子弹的钝化和减速，从而可以耗散更多的能量。

表 3 不同面板材料对防弹性能的影响

Table 3 Effect of front plate materials on bulletproof tests

面板材料	背板材料 PC 板	中间层 材料	总厚度 /mm	面密度 / $kg \cdot m^{-2}$	$V_c$ / $m \cdot s^{-1}$
5mm 化学钢化玻璃	3 层 6mm	2mmPU	28.3	38.7	400
5mm 物理钢化玻璃	3 层 6mm	2mmPU	29	41.3	380
5mm 普通退火玻璃	3 层 6mm	2mmPU	29.5	39	370
5mm 定向有机玻璃	3 层 6mm	2mmPU	27.4	31.8	291

注：打靶采用 53 式步枪枪/53 式 7.62mm 穿甲弹

表 3 同时表明，采用不同的无机玻璃作面板对防弹性能影响不大。虽然从强度上来看，化学钢化玻璃 > 物理钢化玻璃 > 普通退火玻璃，但是作为防弹材料，它们并无太大差别，这是由于尽管玻璃钢化后强度可以提高 5 倍以上，但其硬度和模量变化不大<sup>[4]</sup>，而防弹性能主要与材料的硬度和韧性有关，与强度无直接关系。因此从防弹角度讲，钢化玻璃并无明显优

势。而且钢化玻璃在破坏以后，视野会完全或部分失去，不利于驾驶员的安全。

2.4 不同的背板材料对防弹性能的影响

由前面的分析可知，以无机玻璃为面板比较理想。表 4 列出了不同背板材料对防弹性能的影响。按防弹能力排序为：

$$G10/G10/DYB12/DYB12 < G10/G10/PC12.7/PC12.7 < G10/G10/DYB12/PC12.7$$

显然以纯 PC/PC 作为背板的防弹性能不如定向有机玻璃/PC，这种结果似乎与表 1 不一致，在表 1 中 PC 的抗弹性能远大于 DYB。根据 PC 和 DYB 的弹击破坏特征，可以看出 PC 主要是通过受冲击后产生大的塑性变形（鼓包）来吸收能量，而 DYB 则是通过自身的破裂来吸收能量。当单层 PC 与 DYB 比较时，PC 板的变形不受限制，而这种变形所吸收的能量，远大于 DYB 通过破裂所吸收的能量，因此单层 PC 的抗弹性能远大于 DYB，但表 4 中的 G10/G10/PC12.7/PC12.7，由于 PC12.7 处在夹层中间，其变形能力受到限制，当它受到冲击时，无法象单层那样通过大的变形来吸收能量，因此抗弹性能降低；而 G10/G10/DYB12/PC12.7 中的 DYB12 尽管处在夹层中间，但由于它主要不是通过变形而是通过破裂来吸收能量，因此防弹作用不受影响，而 DYB 硬度（洛氏硬度为 98）又比 PC（洛氏硬度为 78）高，因此 G10/G10/DYB12/PC12.7 防弹性能好。

表 4 不同背板材料对防弹性能的影响

Table 4 Effect of back plate materials on bulletproof tests

结构	厚度 /mm	面密度 / (kg · m <sup>-2</sup> )	V <sub>c</sub> / (m · s <sup>-1</sup> )
G10/G10/PC12.7/PC12.7	48.4	77.7	555
G10/G10/DYB12/PC12.7	48.1	77.2	647
G10/G10/DYB12/DYB12	47.2	76	452

注：打靶采用 53 式步枪枪/53 式 7.62mm 穿甲弹

2.5 与传统防弹玻璃的综合性能比较

传统战斗机上防 53 式步枪/53 式 7.62mm 穿甲弹的玻璃结构不含 PC，例如某机型上的防弹玻璃结构为 G5/G23/YB21<sup>[1]</sup>，面密度均超过 110 kg/m<sup>2</sup>（见表 5）；而本研究中的 G10/G10/DYB12/PC12.7 防弹极限速度 V<sub>c</sub> 达到 647m/s，可以防住 53 式步枪/53 式 7.62mm 穿甲弹，但其面密度只有 77.2 kg/m<sup>2</sup>，比传统防弹玻璃轻 20% 以上。这种结果表明，以无机玻璃作为面板材料，聚碳酸酯作为背板的表层材料，定向有机玻璃作为中间过渡材料，即 G/DYB/PC 结构，不仅具有优异的防弹性能，而且可以减重 20% 以上，适

合轻型防弹要求。显然这种减重效果是因为使用了高冲击韧性低密度的 PC 以及采用了更有效的防弹结构 G/DYB/PC。

表 5 传统防弹玻璃与轻型防弹玻璃的性能比较

Table 5 The comparison of traditional and lightweight bulletproof glass

类别	结构	中间胶层	厚度 /mm	面密度/ (kg · m <sup>-2</sup> )	防弹性能
传统防弹玻璃	G5/G23/YB21	PVB 和丙烯酸丁酯	62	> 100	防 7.62mm 穿甲弹
轻型防弹玻璃	G10/G10/DYB12/PC12.7	聚氨酯	48.1	77.2	防 7.62mm 穿甲弹

2.6 间隙装甲结构对防弹性能和面密度的影响

所谓间隙装甲结构，是指两层透明材料之间由气体（如空气）形成一定的间隙，而没有胶层（如 PU）。国外结构为“无机-有机”类防弹玻璃，经常倾向于无机和有机之间不用中间胶层而采用“间隙”结构<sup>[2]</sup>。但表 6 表明，间隙装甲的防弹性能略有降低，这说明中间层 PU 有利于防弹。但间隙结构有利于减重，而且无机和有机材料之间没有应力，因此间隙装甲结构可根据实际情况选用。

表 6 间隙装甲结构对防弹性能的影响

Table 6 Effect of gap on bullet proof tests

结构	厚度 /mm	面密度/ (kg · m <sup>-2</sup> )	V <sub>c</sub> / (m · s <sup>-1</sup> )
G10/DYB10/PC12.7/PC3	38.7	58.1	749
G10/2mm 间隙/DYB10/PC12.7/PC3	37.7	57	704

注：打靶采用 53 式步枪/53 式 7.62mm 普通弹

3 结论

(1) PC 适合轻型防弹玻璃的要求，但必须与其它硬度高的材料如无机玻璃进行层合形成“硬-韧”结构。采用不同的无机玻璃为面板对防弹性能影响不明显。

(2) 以无机玻璃作为背板表层板材料，聚碳酸酯作为背板表层材料，定向有机玻璃作为中间过渡材料，即 G/DYB/PC 结构，具有良好的防弹性能和较低的面密度，与传统防弹玻璃相比，减重 20% 以上，适合轻型防弹要求。

(3) 间隙装甲结构有利于减重和降低应力，但对防弹有一定的不利影响。

（下转第 36 页）

据 Ti-H<sub>2</sub>O 系电位-pH 平衡图, 在碱性条件下, 不同价态的钛氧化物的耐蚀性为, TiO<sub>2</sub>> Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>> TiO, 由 XPS 分析可知, 重铬酸钾的加入使钛被氧化的更加完

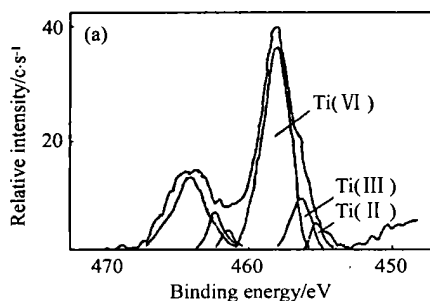
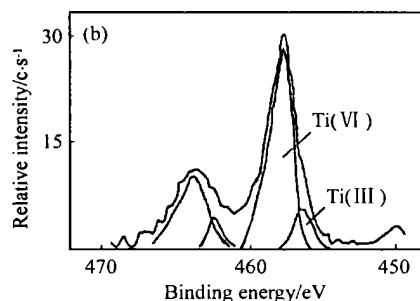


图 3 膜层中 Ti2p 的 XPS 解谱图

Fig. 3 XPS spectra of the Ti2p region



(a) 未加 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>; (b) 加 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>

(a) without K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>; (b) with K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>

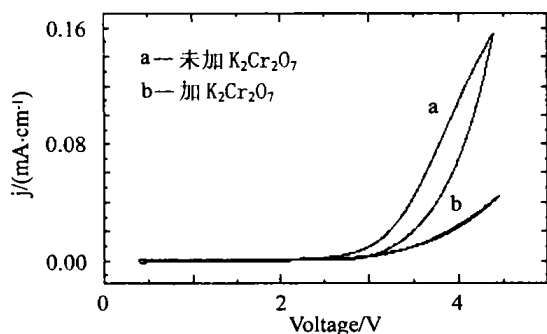


图 4 膜层的循环伏安图

Fig. 4 Circulating volt-ampere curves of ceramic films

的致密性增大, 使得对基体钛的保护性能增强。

### 3 结论

采用微等离子体氧化法在钛合金表面上原位制备陶瓷膜时, 在磷酸盐电解液中加入重铬酸钾, 可使陶瓷膜厚度增加; 钛的氧化较为完全, 生成的陶瓷膜更加致密, 且其抗点蚀能力增强。

#### 参考文献

- [1] LIU Fengling, LUO Gengxin. Micro-arc Oxidation and Surface Ceramics of Materials [J]. Materials Protection, 1998, 3 (3): 22- 24.
- [2] SUN Hanmin. Surface treatment technology of Ti alloy [J]. Materials Protection, 1992, 25 (12): 12- 17.
- [3] MALYSHEV V. Mikrolitbogen Oxidation [J]. Metalloberfläche, 1995, 49 (8): 606- 608.
- [4] XUE Wenbin, et al. Phase and micro-hardness analysis for Micro-plasma Oxidation Ceramic Films on LY12Al [J]. Materials Science and technology, 1999, 7 (2): 18- 21.
- [5] XUE Wenbin, et al. Analydid of Phade Distribution for Ceramic Coations Formed by Microarc Oxidation on Aluminum Alloy

全, 所以膜层的抗腐蚀性增强。从循环情况看, a 膜层被腐蚀较严重, 即其抗点蚀能力较差; b 膜层抗点蚀能力的增强, 正是由于重铬酸钾的加入, 所得膜层

[J]. J Am Ceram Soc, 1998, 81 (5): 1365- 1368.

- [6] DYER C K, LEACH J S L. Breakdown and Efficiency of Anodic Oxide Growth on Titanium [J]. J Electrochem Soc, 1978, (7): 1032- 1038.
- [7] JOUVE G, LEACH J S L. The Increase in Temperature of The Anodic Film Formed on Titanium During Growth in Acid Media [J]. Thin Solid Film, 1983, 110: 263- 273.
- [8] JIANG Zhaohua, XIN Shigang, WU Xiaohong. The Study on Micro-plasma Oxidation of Ti Alloy [J]. Rare Metal, 2000, 24 (3): 178- 181.

收稿日期: 2001-03-01

作者简介: 姜兆华 (1956-), 男, 博士, 哈尔滨工业大学应用化学系系主任, 教授兼博导, 主要研究方向为界面物理化学, 陶瓷化学, 1995 年 10 月~1997 年 4 月去日本千叶工业大学化学学科清水研合作研究, 在 J Ceram So Japan 杂志上发表论文四篇, 联系地址: 哈尔滨工业大学应用化学系 (150001)。

\* \* \* \* \*

(上接第 9 页)

#### 参考文献

- [1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1988, 258- 264.
- [2] HUYETT R A, et al. Transparent Polymer Development and Modeling for Improved Helicopter Blast/ Fragmentation Barriers [C]. The American Helicopter Society 51<sup>st</sup> Annual Forum, Forth Worth, Texas, May 9-11, 1995: 266- 271.
- [3] 钱伟长. 穿甲力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [4] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1996, 284- 295.

收稿日期: 2001-12-14

作者简介: 陈宇宏 (1969-), 男, 湖北蕲春人, 工学学士, 工程师, 主要从事透明材料的研究和开发, 联系地址: 北京市 81 信箱 12 分箱 (100095)。