

复合材料平面剪切模量测定方案的比较研究

李家驹

(中国科学院力学研究所)

提要: 本文研究正交复合材料平板剪切模量 G_{12} 的五种较常用的测定方案。从同一板材裁取的试件,在线弹性范围内依次用这些方案进行了试验。试验表明其结果是比较一致的。这一结果给我们提供了根据各自条件采取合适的方案开展 G_{12} 测定工作的依据。

另外,文中还用了较多的篇幅来比较、讨论了各种方案的优缺点、难易程度、试件耗费以及各个方法的使用特点。

一、五个试验方法的回顾

1. 试验方法原理的概述

复合材料平面剪切模量 G_{12} 的测定方法是很多的,且大都与材料的结构型式相对应,可根据复合材料制成棒材、管材、环材、层压板或夹层结构等不同型式而使用不同的方法。本文对应用较广的层压平板结构常用的五种 G_{12} 测定方案进行了比较研究,这些方法分别是(1)方板剪切;(2)双剪;(3)方板扭转;(4)45°偏轴拉伸剪切以及(5)45°偏轴纯弯曲剪切等五种。为了节省篇幅,用列表的方法说明这五种方法的要点,见表1,更详细的内容请参阅〔1〕和〔2〕。

2. 试件的制备及试验的统筹安排

正如大家所知道的,复合材料的力学试

验结果一般比较分散。这主要因为复合材料试件制备过程中每一个环节都引入误差。例如选择了一批纤维,在制成单向布或正交、斜纹布后,还受涂胶量及均匀度、工作环境、温湿度等影响,铺层设计要求的角度准确度、层板加温加压的规范、冷却快慢、后处理情况、机械加工,以及上述诸条件对试件引入的内应力大小,这都给日后的试验数值带来误差和分散性。

为了尽可能减少上述环节对试件带来的影响以突出观察、比较五种方案的优缺点,又要达到节约试条的目的,我们用 ΛA 和 ΛB 两块尺寸为 $320 \times 320 \times 5$ 、27层、 $V_f = 50\%$ 即1:1正交玻璃布/环氧树脂的方板,在材料的弹性范围内按下列程序进行了测定 G_{12} 的各种试验,这个程序可用图1的方框图来表示。

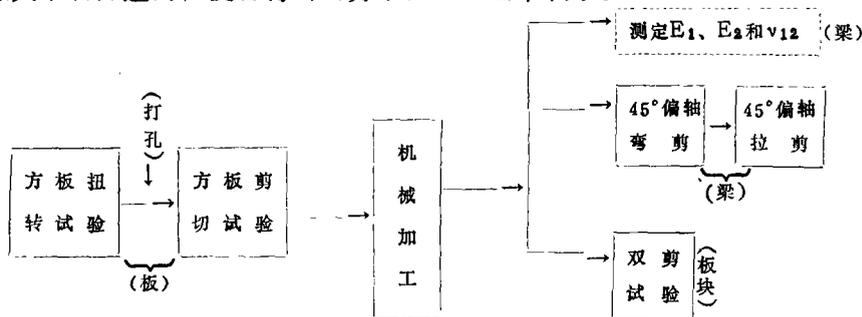


图1 用同一试件完成不同方案测试的程序图

表1 各种方法的受力图式和试验计算公式

方法名称	(1)方板剪切法	(2)双剪法	(3)方板扭转法	(4)45°偏轴拉剪法	(5)45°偏轴弯剪法
试件受力图式及布片测量图					
试验结果计算公式	(a) 当复合材料拉压模量相等时 $G_{12} = \frac{P}{\sqrt{2} a (e_x - e_y)}$ (b) 当复合材料拉压模量不相等时	$G_{12} = \frac{P}{2lt(e_x - e_y)}$	(a) $G_{12} = \frac{8P}{(e_x - e_y)t^2}$ (b) $G_{12} = \frac{6P}{t^2 [(e_x - e'y) - (e_y - e'x)]}$	$G_{12} = \frac{P}{2td(e_x - e_y)}$	(a) $G_{12} = \frac{3pa}{(e_x - e_y)t^2d}$ (b) $G_{12} = \frac{6Pa}{t^2d [(e_x - e'x) - (e_y - e'y)]}$
备注	(1)上列各式中t为试件厚度。 (2)各受力图中之1-2轴为正交复合材料层板结构的材料主轴，贴片沿xoy坐标方向，它与1-2轴夹角为45°，贴片均在试件的中点o。 (3)ex、ey与e'x、e'y是分别贴于试件上下表面同一点处的应变分量。				

3. 试件的尺寸

根据〔1〕的介绍，表1中的纯弯剪切试验与拉伸剪切试验的试件可以通用，而且连贴片的位置、方向都相同。所不同的，只是拉伸剪切试件的两端要粘贴铝合金加强块。从320×320的板中截取试件的示意图如图2所示。这一示意图适用于一般的正交各向异性层压板所有弹性参数的测定。

把图1和图2对照起来说明如下：

即我们先用320×320平面尺寸的试件完成了方板扭转试验，随即在边上打孔进行方板剪切试验后，按图2加工出另外三种试验方案所需的试件，此即弯剪、拉剪的梁及双剪的小板块。

从图2还可看到，在这一块320×320的板中，沿周边可切出试件，用于测定该种正

交复合材料的其它主要参数E1、E2、ν12和ν12以及它们的强度极限。这就是图1中用虚线表示的部分。由于本文重点是讨论平面剪切模量G12的测定方案，对其它参数的测量便不予说明。

图2双剪试块可以加工成小块正方形，也可以加工成圆板（见图2的虚线部分）。由于圆是中心对称的，因此可以用双剪法使试件旋转以测量复合材料不同角度的剪切特性。本文所测的G12是采用圆试件测定的，系沿0°或90°（即沿主方向1或主方向2）剪切时所得的数据。

两块320×320的方板在完成扭转及剪切试验后，切出的其它三个方案的试件其尺寸给予表2。

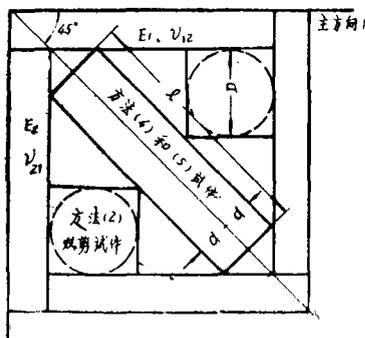


图2 各试验方案试件加工图

表2 单位：mm

试验方法	试件简图	d或D	l	t	数量
45°弯剪法		38	300	5	4
45°拉剪法		38	300	5	4
双剪法		120		5	4

二、试验结果

我们把前述五种试验方法对同一正交各向异性复合材料层板得出的试验结果一起列于表3。

表3中最后的“参考结果”是北京玻璃钢研究所和惠阳机械厂的数据，他们所用的试件之组份和铺层设计均与我们所用的相同，是同期压制的同批试件。他们的弯剪和拉剪试件比我们的尺寸小些，为 $200 \times 30 \times 5$ ；双剪及扭转试验用的方板更小，只有我们的四分之一，即 $160 \times 160 \times 5$ ，但数量比我们多，前者为10件，后者为5件。由于试件较多，他们还计算了 $C_v\%$ 值，这称“变异系数”，是衡量试验结果分散程度的一个指数。我们的试件比较少，一般2~4件，所以我们没有计算 $C_v\%$ 。

表3 各个方案测定 G_{12} 的结果
(单位: $\times 10^4 \text{kg/cm}^2$)

试验方法	No A 板		No B 板		参考结果 ($C_v\%$)
	1	2	1	2	
(1)方板剪切法	4.33		4.22		—
(2)双剪法	3.67	3.48	4.35	4.18	4.41 (7.5)
	平均值 3.58		平均值 4.27		
(3)方板扭转法	5.39		5.35		4.63 (6.6)
(4)45°偏轴拉剪法	3.92	3.80	4.62	4.33	4.67 (4.9)
	平均值 3.86		平均值 4.48		
(5)45°偏轴弯剪法	4.16	4.23	4.96	4.16	4.63 (5.9)
	平均值 4.20		平均值 4.56		

两个单位对同一复合材料选取不同尺寸、使用不同设备得出各自的结果。比较表3，除了我们的方板扭转结果偏高（原因见讨论(5)），以及他们没给出方板剪切结果外，对于其余各种方法，双方所得的结果基本相符。我们的数据较少，但基本上落在他们的离散带之间。

三、讨论

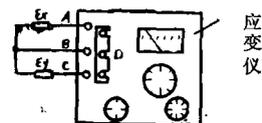
正交复合材料层板的剪切模量 G_{12} 和剪切强度的测定，一直受到国内外从事复合材料工作的工程技术人员的重视。特别是剪切强度的测定，目前尚未肯定那一个方法比较合理和准确，一些著名的从事复合材料的来

华学者在讲学或座谈时都承认这一点。这一参数不能准确测定，对复合材料的设计、理论研究工作，特别是破坏机理方面的研究和验证均带来一定的困难。

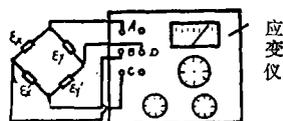
本文由于试件的数量不多，故这里的结论可能是片面的或带倾向性的。但外单位同志利用同类型的试件在不完全相同的条件下做出了相近的结果，有力地支持了某些结论。下面经过讨论，我们提出了最简便的模量测定方案。对于剪切强度测定，由于我们的工作还不多，对选取什么方案进行测定较好，只谈谈我们的意见。

1.45°偏轴纯弯剪切法

这一方法是测量平面剪切模量 G_{12} 最方便、最简单的方法。采用此法时，试件不需要附加任何试验夹具或粘贴金属加强片。如果没有精确的试验机时用砝码加载也可得到可靠的结果。试验时根据材料拉压模量是否相等而决定贴应变片的数目。但不论贴片多少，均不必使用补偿片逐片测量，对应于每级载荷，只需测一次应变。这一方法可以应用到测 G_{12} 的所有其它方案中去。具体应变片接线法如图3所示：



(a) $E_{拉} = E_{压}$ - 半桥接法 - 测出 $(\epsilon_x - \epsilon_y)$



(b) $E_{拉} \neq E_{压}$ - 全桥接法 - 测出 $[(\epsilon_x - \epsilon_x') - (\epsilon_y - \epsilon_y')]$

图3 45°偏轴纯弯剪切法测 G_{12} 的应变测量接线法

有了所测应变与载荷 P 的对应关系后，便可代入表1(5)中公式(a)或公式(b)，计算 G_{12} 。但是采用这一方案，随着载荷的增加受压面将出现失稳破坏，从而妨碍了剪切强度的测定。因此这一方案不能进入既能测模量又能测强度的优良方案之列。

2.45°偏轴拉伸剪切法

国外有人认为, 45°拉剪法是一个比较好的能测定复合材料剪切模量及剪切强度的方法。由于力与主轴不重合, 产生了附加变形, 因而所测剪切强度值偏小。

这一方案所测的模量, 一般与45°偏轴纯弯剪切方案符合。例如对厚度为2mm的正交各向异性碳纤维/环氧树脂层板测定的结果, 两者仅相差0.6%。在表3中A板两方案的平均值相差为8%, B板平均值相差为1.8%。参考结果的数据比我们要好些, 其平均值两方案相差0.9%。在试件形状大小、贴片多少方面, 这两个方案是完全相同的。在拉伸时, 拉剪方案除要粘贴加强片外, 便不需要任何夹具, 因此, 它也是一个比较简单的测定 G_{12} 的方案。在新的弯剪方案尚未出现之前, 这一方案应用颇广, 但在使用这一方法时, 有几点应该注意的事项, 现说明如下。

(1) 在测量拉伸变形中, 例如用常规的方法, 把引伸计(Extensometer)卡在45°偏轴的试件上, 输给X-Y记录仪, 测得 $P-\Delta l$ 曲线(或转换成 $\sigma-\varepsilon$ 曲线), 利用其斜率并不能求得 G_{12} 。因为这里得到的是一条复合材料在45°方向上的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线, 其 ε 是表1(4)中的 ε_x , 而计算 G_{12} 还得测量 ε_y 。(这可参阅图5便明白)所以不要以为由拉伸试验得到 $\sigma-\varepsilon$ 曲线就能得到所有常数。 G_{12} 的测量仅是特殊情况。

(2) 要注意所用的试验机, 其上下夹头的对中性是否良好。如果对中性较差, 则贴于试件一面的应变片测得的 $(\varepsilon_x - \varepsilon_y)$, 与其所代表的试件剪应变 γ 之间的误差就较大。一般的电子式万能试验机, 由于上夹头上面装有一载荷传感器(Load Cell)而通过一万向节装置再与上夹头连接, 连接件多, 试验机的对中性也就差。例如我们曾用日本的DSS25型电子式试验机拉伸一厚10

mm的钢试件, 最后试件除了伸长还发生弯曲形变, 可见这一类型的试验机其偏心的严重性。使用旧式的油压式试验机情况较好。所以应注意上述问题, 要设法减少所测数据的分散性, 使所测的数据较准确。

(3) 要同时解决(1)、(2)提出的问题, 可如图4所示在试件的每一面各贴两个

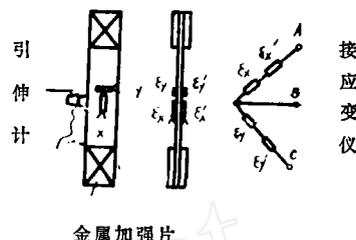


图4 解决剪应变测量及偏心的应变连接法

应变片, 然后分别串联后再接成半桥。这样, 从应变仪测出的应变值便是 $\gamma = (\varepsilon_x - \varepsilon_y)$, 而且偏心也得到消除, 因为在半桥的每一臂都串联了应变片, 所得的应变已是它们的平均值。这一方法, 只适于线弹性范围内小变形的测量, 例如 G_{12} 的测定。而偏心问题并未被解决, 对其它参数的测量影响仍较大, 例如对于强度及断裂伸长等的测定。

由于45°偏轴的复合材料其变形相当大, 应变片可能进入塑性状态或贴片处正好被破坏, 这样试件的 $P-\gamma$ 曲线的全过程便无法记录下来。必须如图4所示, 安装一位移传感器——引伸计, 把 $\sigma-\varepsilon$ 曲线画出, 最后我们便可从曲线中找到破坏强度 σ_b , 从而便得到复合材料的剪切破坏强度 $\sigma_s - \sigma_b/2$ 。

今以表3中A-1试件为例, 说明如何使用45°偏轴拉伸法测取剪切模量 G_{12} 和剪切强度 σ_s , 以及观察材料在受力情况下的全过程。此即把图4的引伸计及应变片回路分别引到X-Y三笔记录仪的两个Y轴去, 在X轴输入载荷传感器的信号, 便可绘出 $P-\Delta l$ 和 $P-\gamma$ 曲线; 通过单位转换, 即得 $\sigma-\varepsilon$ 和 $\tau-\gamma$ 曲线, 其结果如图5所示。

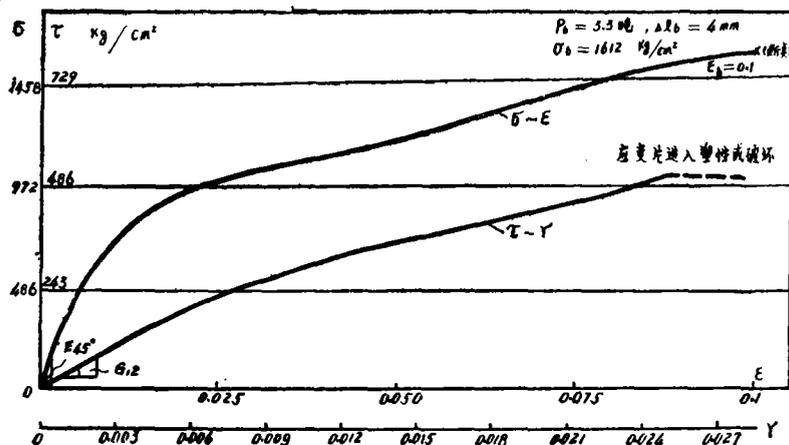


图5 45°偏轴拉伸剪切№A-1试件 σ - ε 及 τ - γ 曲线的测定

根据图5,我们从 σ - ε 曲线中得到 $\sigma_b = 1612 \text{ kg/cm}^2$ 及断裂时最大伸长 $\Delta l = 4 \text{ mm}$,因我们所用的引伸计长为40mm,故知断裂时最大应变为 $\varepsilon_b = 0.1$,剪切强度 $\sigma_s = \sigma_b / 2 = 806 \text{ kg/cm}^2$ 。而从 τ - γ 曲线的斜率中,我们得到 $G_{12} = 3.73 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$,它与用静态应变仪测的 $G_{12} = 3.92 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 相差为4.8%(见表3 №A-1(4)的 G_{12} 测值)。

北京玻璃钢研究所及惠阳机械厂对相同的复合材料亦采用这一方案测定了剪切强度值 $\sigma_s = 958 \text{ kg/cm}^2$,而他们用平板剪切法所测的结果 $\sigma_s = 1140 \text{ kg/cm}^2$ 。后者与我们的测值相差29.6%,与他们自己的测值相差14%。所以国外有人认为拉剪所得数据可能已使设计偏于保守。

不过,这一方案使用试件较省,不需要加工夹具,而得到的数据也多,还使我们能看到材料在整个受力过程中的特性。例如从图5,我们可看到,试件沿45°拉伸时树脂起的作用是很大的,塑性很好,最大应变 ε_b 达0.1以上。这一复合材料,如沿0°或90°方向拉伸时, σ - ε 曲线基本上是一条直线,断裂时的最大伸长 $\Delta l_b = 0.9 \text{ mm}$,而最大应变 ε_b 只有0.02左右。

3. 双剪试验法

双剪试验相对于前两种试验方法就比较复杂些。它要求有一适合于加载及测量相对位移的夹具,即如图6所示的三对钢制的矩形截面加力条,使用螺钉紧紧地使试件与加力条夹住,通过摩擦传递剪切力。

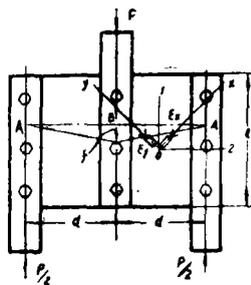


图6 双剪法测 G_{12} 示意图

剪切变形的测量方法有二,(i)如图6沿与主方向1或2成45°的方向贴两应变片 ε_x 及 ε_y 测定剪应变 γ ; (ii)测取外侧加力条与中间加力条AB两点间的相对位移 f 。前者 $\gamma = \varepsilon_x - \varepsilon_y$; 后者 $\gamma = f/d$ 。把这些关系代到表1(2)中去,便可求得正交层板的 G_{12} 。这一方案看来比较简单,但对中却很麻烦。即在试验机的压头作用下,载荷 P 要严格通过对称中心试件的中面。前后左右都应对中才成。如图6所示,只贴两个应变片是不能把位移测准的。较简单的解决办法如图7所示,把外侧的加力条用一联接

块紧紧联接，然后用一固定于中间加力条的千分表测取加力条与联接块的相对位移。前后都用相同方法处理，然后取平均值即为 f 。这样测得的 f 相对于载荷 P 分散性很小。

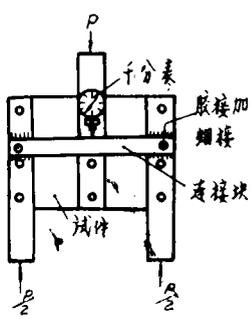


图7 解决偏心的位移测量简图

另一点应该注意的是，在试验开始时，在试验的最大载荷下预压若干次，然后观察前后两个千分表每次卸载后的残余应变是否为零（或接近

零）。当表示整个双剪结构已协同工作，才可开始正式试验。

试验结果表明，这一方案用于测剪切模量 G_{12} 还是可行的。但在测剪切强度时，由于中间加力条所加载荷比两侧加力条大一倍，如中间几个螺钉所加的摩擦力不够大，则很容易产生滑移，致使剪力加不上。在我们试验的情况下，使用 $\phi 6$ 的螺钉仍不能产生足够的剪力来传递剪力，结果导致螺钉挤压试件，试验失败。为解决这一问题，可加大螺钉直径并改进夹具与试件的接触面（即设法增加摩擦力）。或如〔3〕所建议的改用单剪，如图8所示，这就可免除中间加力条载荷过大的危险。

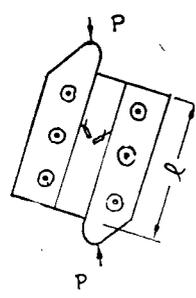


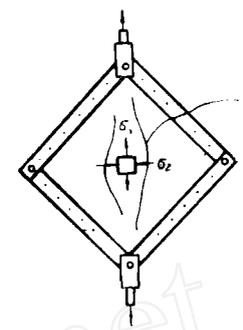
图8 单剪试验示意图

单剪在国外称为“轨道剪切”试验，广泛应用于航空工业，可测定剪切模量及剪切强度。此法比较简单便宜，而且和双剪一样，也解决了试件的失稳问题，且较容易推广到高温或别的环境试验中去。单剪的缺点在于也有对中心问题，夹具要求更高，加载时载荷必须共线，试验时这一单剪体不易

放稳等。双剪和单剪的共同缺点是，上下两自由边剪应力不均匀而发生突变，据〔2〕介绍， l 适当地加大后，剪应力不均的误差就可能减少，更详细的分析请参阅〔3〕。

4. 平板剪切

平板剪切这一方案，从理论上讲，当远离加力边界后是比较接近纯剪的。见图9，



沿压应力方向失稳

σ_1, σ_2 是板内同一点上的两个主应力

图9 方板剪切实验简图

它以四对加载边条用螺钉把四周夹住，然后在对角线上拉伸或压缩施加剪力。为了得到中间部份有较大的纯剪区域，夹具及试件都适当地取得较大，而为 320×320 的平面尺寸。我们取厚2mm的铝板进行试验，证明板的中部确实比较均匀，而且测得剪切模量 $G = 2.76 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ，与材料手册公布的数据比较符合。因此这一方案能较好地解决复合材料 G_{12} 测定问题。

但应用这一方案进行剪切模量以及剪切强度测定时，如板较薄，平面尺寸较大，也会如图9所示，在对角线压应力区产生失稳破坏，因而妨碍了剪切强度的测定。

另外，当板较薄，载荷较大时，边界上的螺孔又在同一直线上，因而螺孔容易穿通，使加载边刚度减弱，而加不上载荷。为解决这一问题，最好用金属板条以胶粘在试件边上加固之，然后再打孔。

在测定剪切强度时，特别要注意加强试件，否则数据测不出来，试件却被破坏了。

资料〔4〕介绍碳纤维/环氧树脂方板剪切的模量及强度的测定，系采取如下的方法来解决上述提出的问题并获得成功。首

先，他们把试件本体做得较小，并在试件本体外加工四片厚而宽的同种材料的加强边，加强边上打两排孔，孔的距离较宽而且相互错开，因而在载荷比较大时，孔就不易穿通。具体形状和尺寸如图10所示。当然，图

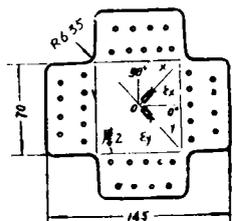


图10 国外使用的一种方板剪切试件

10那样的试件不容易制造，同时相应的试验夹具也比图9复杂得多(具体请参阅[4])。这一切都会使试验经费提高和试验周期加长。

方板剪切的剪应变测量采用应变片较好。和其它方法一样，它仍可组成一半桥，把表1(1)中的 $(\epsilon_x - \epsilon_y)$ 一起测得，从而也可求得 G_{12} 。我们在[1]中曾介绍过直接测定剪切角 γ 的方法，但要注意剪切角的夹具和加载边要紧紧联接，否则对剪切角的测量会带来误差，致使 G_{12} 的测量很不准确。因此经过比较，我们认为测量用应变片比较好，因为它们一般贴在试件的中点，因边界上螺钉加力而引入的误差很小。而剪切角夹具却正好固定在加载边上，因此它所测的变形很容易受到边界受力不均或局部破坏的影响。

如果方板剪切试件能像图10那样缩小又简化其加强边而发展成图9那样，它便是比较有前途的一个方案，既能测定模量也能测定强度，而且也很容易把它推广到低温或其他环境试验中。

5. 扭转试验方案

以方板扭转法测定 G_{12} 在国内外应用也很广。这一试验要有一合适的夹具，使用这一夹具应既能给试件在顶角上加四个集中力，而在试件变形后又能毫无约束地让试件产生扭转变形。所以，这一夹具最好为一点接触的球体支座，如图11所示，加力后既能产生集中力又能让试件自由旋转。

在过去以及这一次实验中，我们在复合材料试件的四个顶角附近分别打了四个圆

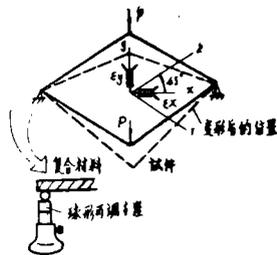


图11 试件受扭后的扭转变形及其球形支座

孔，然后把在一对角上的两圆孔落在球上，另一对圆孔悬挂加载夹具加上载荷P。如果板薄，洞打得小，则误差小些。如果板厚，洞也打得大，则在加载后，球就可能把板拉住，旋转不灵，限制了板的扭转变形，因而增加了板的刚度。我们对支座限制变形的问

题注意不够，这就是表3(3)中，方板扭转的数据偏高的原因。其实试件不必打洞，直接放在支座上效果更好。表3也给出兄弟单位对同一材料所得的结果，他们是采取直接放置的方法，试件大小为 160×160 ，试验结果与其它方案符合较好。

试件变形的测量也是通过贴应变片来进行的，如图11所示，应变片沿对角线分布，即与两轴方向成 45° 夹角。和 45° 偏轴纯弯曲剪切法相同，根据(a)、(b)两种情况来决定贴两片还是贴四片。然后测得变形后即可利用表1(3)的公式进行计算求得 G_{12} 。具体方法可参阅[1]来进行。

这一方法也为受压区失稳破坏所干扰，故只能测取模量 G_{12} 。

这五种测定复合材料剪切模量 G_{12} 的方案中，变形测量都可使用应变片来完成，而且均可不使用补偿片，而是根据不同的情况接成半桥或全桥测量。这是为了提高测量精度，消灭偏心影响或解决材料拉压性能的不同而提出的。

四、结论

根据以上的讨论，我们可得出下面的初步结论。

- (1)通过我们的研究工作以及外单位的
(下转第51页)

表1 常用光学塑料注射成型工艺

项	原料名称	聚甲基丙烯酸甲酯	聚碳酸酯	聚苯乙烯	醋酸纤维	372*	613*
目	注塑成型机	柱塞式	螺杆式	柱塞式	柱塞式		
温 度	料筒温度						
	后(°C)	160 —180 (170)	210 —240 230	140 —160	150 —170 (160)	(170)	(1.0)
	中(°C)		—280				
	前(°C)	210 —240 (190)	240 —285 240	170 —190 (180)	170 —190 (175)	(190 —200)	(190 —200)
	喷嘴温度(°C)	—200	—250				
模具温度(°C)		90 —110					
压 力	注射压力	800 —1300 (45kg表压)	800 —1300	600 —1100 (45kg表压)	600 —1300 (40kg表压)	45kg表压	45kg表压
	注射时间(秒)	20—60 (50)	20—90	15—45 (40)	15—45 (30)	(50)	(50)
时 间	高压时间(秒)	0—5 (3)	0—5	0—3 (3)	0—3 (3)	(3)	(3)
	冷却时间(秒)	20—90 (20)	20—90	15—60 (15)	15—45 (20)	(20)	(20)
	总周期(秒)	50—150 (80)	40 —190	40—120 (65)	40—100 (70)	(80)	(80)
	螺杆转速	转/分	28				
后 处 理	方 法	红外线灯鼓风烘箱	红外线灯鼓风烘箱	红外线灯鼓风烘箱			
	温度(°C)	70 (70)	100— 110	70			
	时间(小时)	4(4)	8—12	2—4			

(上接第45页)试验结果,我们认为本文所列举的五种复合材料层板平面剪切模量 G_{12} 的测量方法都是可行的、可靠的,即它们在试验的理论基础和试验技术上都是成熟的。只要有可靠的设备,并且掌握这些方案的特点和技术,这五种方法中任何一种都可以测得合理的模量值。

(2)在五种测定模量的方法中,以 45° 偏轴纯弯剪切法最为简单,它既不需要任何夹具也不必粘帖加强片。目前使用的试件较大,还可进一步把所用的梁试件缩小。

(3)最完善的测量剪切模量的方案必须是既能测定模量又能测定强度的方案。故在这些方案中,最有发展前途的是方板剪切方案,因为它在理论上,特别在板的中心区域可得到一纯剪的应力状态。而其他方案或受到失稳的干扰,或因附加变形的渗入,或受应力不均的影响,均不宜于测量剪切强度。

对于方板剪切,国内外的复合材料工作

及眼镜片的最佳工艺参数)。

在实际生产过程中,除了采用最佳工艺参数外,还需注意下列两点:

1.烘料温度为 $80^\circ\sim 85^\circ\text{C}$,时间为四小时左右最适宜,否则塑料容易发黄。

2.在烘料过程中,由于炉内温度不均匀,故要经常更换塑料的位置,以避免塑料发黄(不能用鼓风方法,否则灰尘将进入料内)。

五、结 论

通过反复试验,成功地确定了:

- 1.光学塑料模具的典型结构。
- 2.光学塑料模具的典型型腔及型芯所用的合理的材料。
- 3.型腔和型芯的加工方法。
- 4.阵列平凸透镜用372*或613*有机玻璃生产时的最佳工艺参数。

致谢:承蒙五三所张国卫、夏风轩、邢希增等同志热情帮助,表示感谢。

者作了不少工作,正力图把测模量和测强度统一起来,并把试件缩小为 $70\sim 160\text{mm}$ 边长的方板,当然这一尺寸大小的确定是与板厚相联系的,应当让试件主要发生强度破坏而不是稳定破坏。

致谢:本研究工作得到惠阳机械厂及北京玻璃钢研究所的大力支持和帮助,特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1]李家驹,复合材料的测试,工程塑料应用,1979年第1期p.25—39.
- [2]张和善编译,国外几种测定复合材料剪切模量的简易方法,国外航空,1978年第5期
- [3]Whitney, J.M., D.L. Stans barger and H.B. Howell, "Analysis of the Rail Shear Test Applications and Limitations", J. Composite Materials January 1971, P.24—34.
- [4]G.TERRY, A comparative investigation of some methods of unidirectional, in-plane shear characterization of composite materials, composites, Vol.10, No.4, 1979, 10.