

横观各向同性材料动态力学性能 试验中的试件最佳尺寸

唐志平

(1984年8月27日收到)

本文根据张量变换和能量法,得到了横观各向同性材料在SHPB高应变率试验中完全消除惯性影响的试件的最佳长径比公式,并对几种重要的复合材料作了计算和讨论。

一、引言

用分段式Hopkinson压杆(简称SHPB)测量材料在高应变率下应力应变关系的实验中,试件尺寸(即长径比)的选取主要取决于三方面因素:均匀性假定、惯性效应和摩擦效应。为满足均匀性假定,要求试件的长径比愈小愈好;但为减小端面摩擦的影响,则要求长径比愈大愈好。Davies和Hunter^[1]对这三方面因素作了讨论,给出满足均匀性假定的公式为

$$l \sim \frac{TC_s}{\pi} \quad (1)$$

式中 l 为试件长度, T 为加载脉冲持续时间, C_s 为试件中纵波波速。并利用前人^[2,3,4]结果,得到可忽略摩擦影响的试件尺寸公式为

$$l/R \geq 0.04 \quad (2)$$

这里 R 是试件的半径。据此,Davies和Hunter提出试件长度 l 的最小值至少应和半径同量级,即

$$l/R \sim 1 \quad (3)$$

他们得到的各向同性材料在SHPB实验中消除惯性效应的最佳试件尺寸公式为

$$l = \sqrt{3} \nu R \quad (4)$$

ν 是试材的动态泊松比。

长期来,这几个公式在SHPB实验中被广泛采用。为统一用长径比作比较,我们不防把(1)式和(2)、(3)式改写为

$$\frac{l}{R} \frac{TC_s}{\pi R} \quad (5)$$

$$\frac{l}{R} \geq 0.4 \quad (6)$$

亦即试件长径比 l/R 须落在区间 $[0.4, TC_s/\pi R]$ 内。

(4) 式显然不适用于各向异性材料。各向异性材料在自然界是大量存在的, 为页岩, 木材等。目前在工程上有广泛应用前景的人造复合材料, 多数属各向异性材料。关于这些材料的动态性能的研究, 日趋增多, 但迄今为止关于各向异性材料在 SHPB 实验中试件最佳尺寸的选取准则尚未见诸文献报道, 在有些文献中甚至是随意选取的^[5]。本文着重对这一问题作了探讨, 并给出了横观各向同性材料 (这种材料也许是分布最广的^[6]) 的惯性修正公式和试件最佳尺寸选取准则。

二、各向异性材料的应力—应变关系

众所周知, 具有应变能函数的各向异性材料, 其柔度 (或刚度) 张量中包含 21 个独立弹性常数, 而正交各向异性材料则包含 9 个独立常数。如果材料内任一点都有一个各个方向的力学性能都相同的平面, 且这些平面相互平行, 那末, 该材料称为横观各向同性材料, 例如增强纤维以单向排列的复合材料即属此。对于横观各向同性材料, 某柔度张量中, 只有 5 个独立常数^[7]。应力—应变关系可写为

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中假定 1-2 平面为各向同性平面。柔度矩阵中 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 、 S_{33} 、 S_{44} 为 5 个独立常数, 其与工程常数之关系为

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\ S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} \\ S_{13} &= -\frac{\nu_{13}}{E_1} \\ S_{33} &= \frac{1}{E_3} \\ S_{44} &= \frac{1}{G_{31}} \end{aligned} \quad (8)$$

(8) 式中独立工程常数的含义是： E_i 为 i 方向上的弹性模量， G_{31} 为 3—1 平面内的剪切模量， ν_{ij} 为 i 方向作用正应力时， j 方向的横向应变泊松比，即

$$\nu_{ij} = -\frac{\epsilon_j}{\epsilon_i} \quad (9)$$

由于柔度矩阵的对称性，对正交各向异性材料，必须满足

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

在 SHPB 实验中，短试件被夹在两压杆之间。根据一维均匀性假定，认为试件在试验过程中其应变分布随轴向是均匀的，仅是时间 t 的函数。事实上，仅当应力波开始作用的最初几微秒内，试件内部应变不均匀，当应力波在试件内来回反射 1~2 次后，即趋向均匀分布，因此只要满足 (5) 式，就可忽略应力波在试件内部的传播。

对于横观各向同性材料，当试件对称轴 z 与材料主方向 3 不重合时，我们总可以这样来取坐标，旋转试件，使得 x 轴与 1 轴重合， y, z 轴与 2、3 轴共面，如图 1 所示，图中虚线为纤维方向。

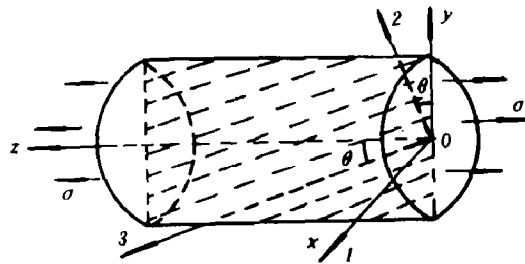


图 1

为求得 x, y, z 坐标内的应力—应变表达式，需把 (7) 式中的工程应变改写为张量应变 ϵ_{ij} ，方能进行张量变换。

$$\epsilon_{ij} = \frac{\epsilon_j}{2} \quad i \neq j \quad (11)$$

故 (7) 式可改写为：

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{S_{44}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S_{44}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{11} - S_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad (12-a)$$

或写为张量形式

$$\underline{\epsilon} = \underline{S} \underline{\sigma} \quad (12-b)$$

\underline{S} 为四阶柔度张量。由张量变换公式

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{Q}} \underline{\underline{\epsilon'}} \underline{\underline{Q'}} \quad (13)$$

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{Q}} \underline{\underline{\sigma'}} \underline{\underline{Q'}}^T$$

式中 $\underline{\underline{\sigma'}}$, $\underline{\underline{\epsilon'}}$ 分别为 x, y, z 坐标内的应力、应变张量, $\underline{\underline{Q}}$ 为 $1, 2, 3$ 坐标系对于 x, y, z 坐标系的正交变换矩阵。(13)式代入(12-b)有

$$\underline{\underline{\epsilon'}} = \underline{\underline{Q}}^{-1} [\underline{\underline{S}} (\underline{\underline{Q}} \underline{\underline{\sigma'}} \underline{\underline{Q'}}^T)] \underline{\underline{Q}} \quad (14)$$

本问题中

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\underline{\underline{Q}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (16)$$

(15)、(16)代入(14)经运算, 导得

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{xx} = -\frac{\sigma}{E_1} (v_{12} \sin^2 \theta + v_{13} \cos^2 \theta) \\ \epsilon_{yy} = \sigma \left[\frac{-v_{12}}{E_1} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} - \frac{1}{G_{13}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right] \\ \epsilon_{zz} = \sigma \left[\frac{\cos^4 \theta}{E_3} + \frac{\sin^4 \theta}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{13}} - \frac{2v_{13}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right] \\ \epsilon_{yz} = \sigma \left[\left(\frac{2}{E_1} - \frac{1}{2G_{13}} + \frac{v_{13}}{E_1} \right) \sin^3 \theta \cos \theta - \left(\frac{1}{E_3} - \frac{1}{2G_{13}} + \frac{v_{13}}{E_1} \right) \sin \theta \cos^3 \theta \right] \\ \epsilon_{xx} = \epsilon_{xy} = 0 \end{array} \right. \quad (17)$$

由(17)式可见, 对横观各向同性材料当仅受 Z 方向作用力时, 其变形具有以下特点(图2):

1. x 方向与 y 方向的横向应变不一样, 垂直于 z 轴的圆截面将变为椭圆。
2. yz 平面内有剪应变, 因此垂直于 x 轴的矩形截面将变为平行四边形。
3. xy, xz 平面内无剪应变, 垂直于 x 轴的平面, 变形后仍保持平面, 无翘曲。因此在此平面内可视为平面应力问题。

由(17)式并注意到(11)式, 可以得到在 x, y, z 坐标系的表观材料常数为

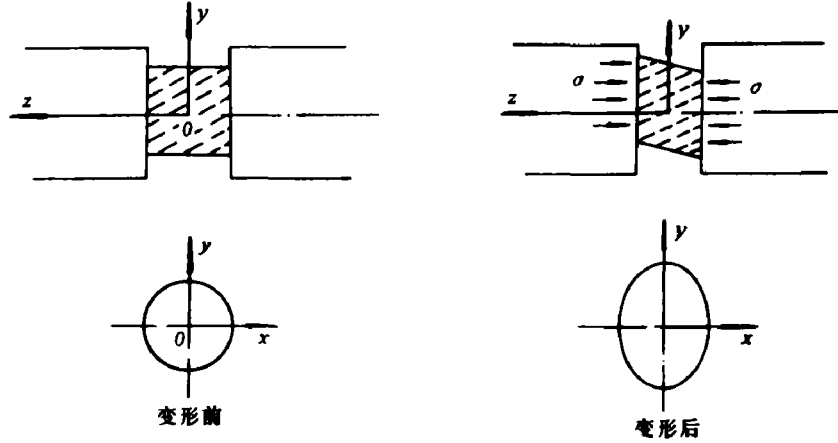


图2 横观各向同性试件的变形

$$E_{zz} = \frac{\sigma}{\epsilon_{zz}} = \left(\frac{\cos^4 \theta}{E_3} + \left(\frac{1}{G_{13}} - \frac{2\nu_{13}}{E_1} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{E_1} \right)^{-1}$$

$$\nu_{zx} = -\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{zz}} = E_{zz} \cdot \frac{\nu_{12} \sin^2 \theta + \nu_{13} \cos^2 \theta}{E_1}$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{zz}} = E_{zz} \left[\left(\frac{\nu_{13}}{E_1} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \right) - \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{13}} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right]$$

$$\eta_{z,y,z} = \frac{\tau_{zy}}{\epsilon_{zz}} = E_{zz} \cdot \left[\left(\frac{2}{E_1} + \frac{2\nu_{13}}{E_1} - \frac{1}{G_{13}} \right) \sin^3 \theta \cos \theta - \left(\frac{2\nu_{13}}{E_1} + \frac{2}{E_3} - \frac{1}{G_{13}} \right) \sin \theta \cos^3 \theta \right] \quad (18)$$

式中 $\eta_{z,y,z}$ 称为第二类相互影响系数，即 z 方向的正应力引起 zy 平面内的剪应变。

三、运动分析

令 K 表示试件动能, W 表示变形能, F_i, q_i 分别表示外力及其作用距离, 则根据能量原理

$$\dot{K} + \dot{W} = \sum_i F_i \dot{q}_i \quad (19)$$

式中应变能 W 为

$$W = \int_{\Omega} \int_{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} \cdot d\epsilon_{ij} \cdot d\Omega \quad (20)$$

(20) 式也适用于非线性及有耗散的情况。由应变均匀性假定及本构关系 (17), 注意到应力张量中只有 $\sigma_{zz} = -\sigma_z$ 不为零, σ_z 是对应于试件变形的实际应力。

$$W = \frac{l}{2E_{zz}} \sigma_z^2 \Omega \quad (21)$$

所以变形功率

$$\dot{W} = \sigma_z \dot{\epsilon} \Omega \quad (22)$$

式中 $\epsilon = \epsilon_{zz}$ 为轴向变形。

根据 (17) 式, 试件内存在三种运动: 轴向运动、径向运动以及 yz 平面内由于剪切引起的绕 x 轴的转动 (见图 3), 图中动坐标原点设于试件质心 C 。由于试件内部应变均匀, 在时刻 t , 位于坐标 z 处质点的轴向运动速度为

$$v_z = -\left(u + \frac{v}{l}z\right) = -(u + \dot{\epsilon}z) \quad (23)$$

这里 u 为质心速度, v 为端面 I 相对于端面 II 的速度。

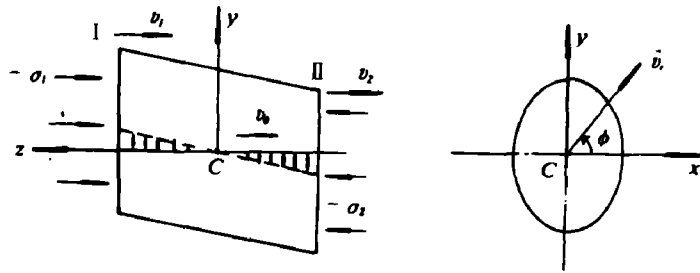


图3 实验中试件质点的运动

径向位移和剪切位移在同一平面内, 由剪切引起的位移为 $u'_y = z \cdot r_{z,y}$, 由此产生的 y 方向的速度为

$$v'_y = z \cdot \dot{r}_{z,y} = \eta_{z,y,z} \dot{z} \quad (24)$$

由泊松比产生的横向位移为

$$u'_x = v_{z,x} \cdot \epsilon_{z,z} \cdot x \quad (25)$$

$$u'_y = v_{z,y} \cdot \epsilon_{z,z} \cdot y$$

忽略一阶小量, 得到由泊松比引起的质点速度为

$$v'_x = v_{z,x} x \dot{\epsilon} \quad (26)$$

$$v'_y = v_{z,y} y \dot{\epsilon}$$

归纳 (23)、(24)、(26) 式, 得试件内质点速度分布为

$$\begin{cases} v_x = v_{z,x} x \dot{\epsilon} \\ v_y = (v_{z,y} y + \eta_{z,y,z} z) \dot{\epsilon} \\ v_z = -(v_c + \dot{\epsilon} z) \end{cases} \quad (27)$$

所以, 动能

$$K = \frac{1}{2} \rho \int_{\Omega} \{ v_z^2 x^2 \dot{\epsilon}^2 + (v_z y + \eta_{z,y,z})^2 \dot{\epsilon}^2 + (v_z + \dot{\epsilon} z)^2 \} d\Omega$$

式中 ρ 为试材密度。由均匀性假定, $v_z, \dot{\epsilon}$ 仅与 t 有关, 与微团位置无关, 利用柱坐标可积出动能表达式为

$$K = \frac{1}{2} M_s \left\{ \dot{u}^2 + \left[\frac{R^2 (v_{z,x}^2 + v_{z,y}^2)}{4} + \frac{l^2}{12} (1 + \eta_{z,y,z}^2) \right] \dot{\epsilon}^2 \right\} \quad (28)$$

$$\dot{K} = M_s u \dot{u} + \frac{M_s}{4} [3 R^2 (v_{z,x}^2 + v_{z,y}^2) + l^2 (1 + \eta_{z,y,z}^2)] \dot{\epsilon} \ddot{\epsilon} \quad (29)$$

式中 $M_s = \rho \Omega$ 为试件质量。

外力做功 (忽略摩擦影响)

$$\sum_i F_i q_i = A \sigma_1 (u_c + \frac{v}{2}) - A \sigma_2 (v_c - \frac{v}{2}) = A \{ v_c (\sigma_1 - \sigma_2) + \frac{l \dot{\epsilon}}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \} \quad (30)$$

σ_1, σ_2 分别是试件与输入压杆和输出压杆接触面 I、II 处的应力, A 是试件截面积。

将 (22)、(29)、(30) 式代入 (19) 式, 注意到牛顿定律 $A(\sigma_1 - \sigma_2) = M_s (du/dt)$, 并同除以 $\Omega \dot{\epsilon}$ 得

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{\rho_s}{4} \{ 3 R^2 (v_{z,x}^2 + v_{z,y}^2) + l^2 (1 + \eta_{z,y,z}^2) \} \ddot{\epsilon} \quad (31)$$

(31) 式可做为 SHPB 实验中对实验结果进行惯性修正的依据。由于 SHPB 装置中, 压杆半径是一定的, 从表面看似乎 l 愈小愈好。因此从 (31) 式得不到消除惯性效应的最佳长径比公式, 除非假定试件体积 Ω 为常数, 但这又与压杆半径是一定的相悖。其原因在于 $l/2 (\sigma_1 + \sigma_2)$ 项中仍包含有惯性分量。为此我们将动坐标从质心平移至接触面 II 处, 只要作变换 $u_c = v_c + v/2 = v_c + l \dot{\epsilon}/2$, v_c 为 II 接触面中心的速度, 由 (19) 式可得到

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \frac{\rho_s}{12} \{ l^2 (2 - \eta_{z,y,z}^2) - 3 R^2 (v_{z,x}^2 + v_{z,y}^2) \} \ddot{\epsilon} \quad (32)$$

显然当

$$l^2 (2 - \eta_{z,y,z}^2) - 3 R^2 (v_{z,x}^2 + v_{z,y}^2) = 0$$

即

$$\frac{l}{R} = \sqrt{\frac{3 (v_{z,x}^2 + v_{z,y}^2)}{2 - \eta_{z,y,z}^2}} \quad (33)$$

时, $\sigma_1 = \sigma_2$, 可完全消除惯性效应。对各向同性材料, $v_{z,x} = v_{z,y} = v$, $\eta_{z,y,z} = 0$, 故 (33) 式即退化为熟知的 Davies-Hunter 公式 (4)。

(33) 式和 (5)、(6) 式即为 SHPB 实验中, 横观各向同性试件尺寸的选择准则。当按 (33) 式计算值落在 (5)、(6) 式区间内, 则可选取 (33) 式的最佳长径比尺寸。当试件尺寸不符 (33) 式时, 可按 (32) 式对其惯性影响进行修正。比较 (31) 式和 (32) 式可以看出, 用输出波形 (即 $\sigma_2(t)$) 来表示试件应力比采用试件两端面应力平均值更合理, 尤其是当选取最佳长径比时, 输出应力即等于试件实际应力。

特别注意的是, 对有些复合材料, 当第二类影响系数

$$\eta_{z, \nu, z}^2, \nu_{z, z} \geq 2 \quad (34)$$

时, (33) 式不能被满足。由 (32) 式可知, 这时不论 l 取何值, 惯性影响项不能被完全消除。从物理上看, 由于 $\eta_{z, \nu, z}$ 引起的横向运动, 与轴向变形有关, 因此当 $\eta_{z, \nu, z}^2 \geq 2$ 时, 轴向惯性力已不足以抵消由横向运动所需的惯性力。这与各向同性材料有本质区别。对应的 θ 角范围可由 (18) 式定出, $\eta_{z, \nu, z}$ 随 θ 角的变化见图 4。另外, 各向异性材料的泊松比有可能大于 0.5,

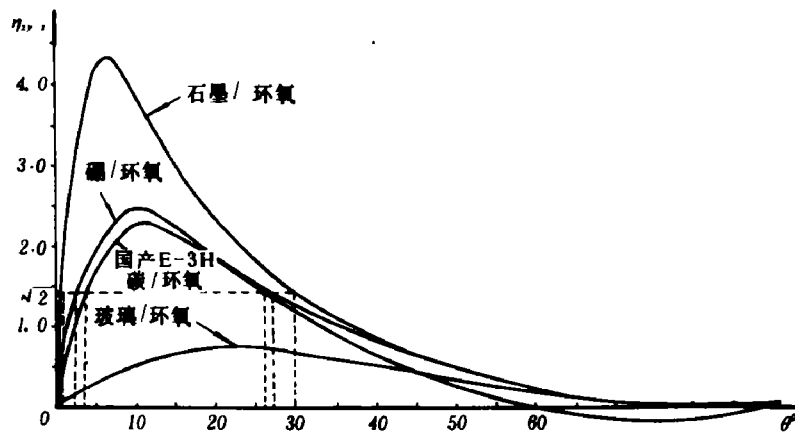


图 4 四种复材的相互影响系数 $\eta_{z, \nu, z}, \nu_{z, z} = 0.40^*$
(有 * 号的为作者所设, 下同)

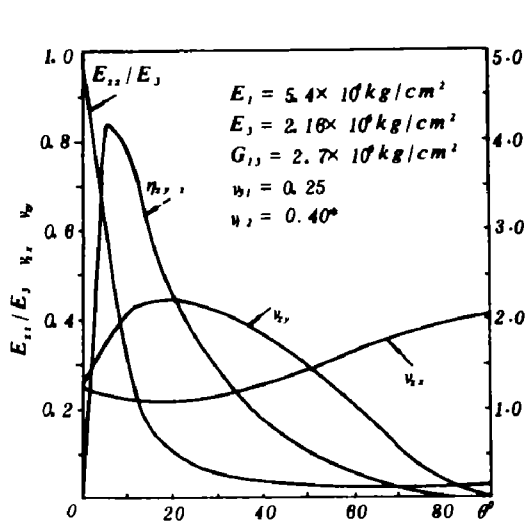


图 5 石墨/环氧复材的表现弹性常数随 θ 的变化曲线 (数据取自表 1)

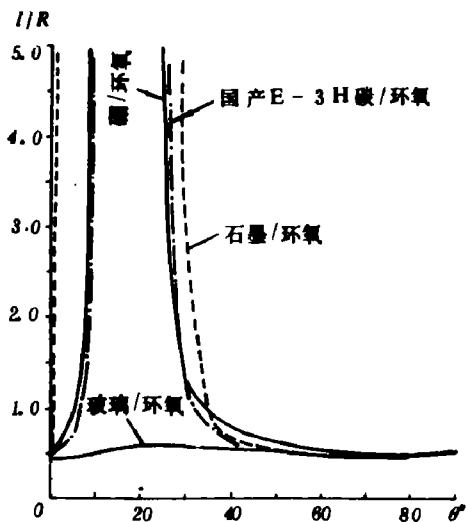


图 6 四种典型复材试件的最佳长径比随 θ 的变化曲线 ($\nu_{1,2}$ 均为 0.40, 其他参数见表 1)

但仍满足弹性常数间的限制条件, 因此是合理的。图 5 给出了石墨/环氧复合材料的表观弹性常数随 θ 角的变化曲线。图 6 给出了玻璃/环氧、硼/环氧、石墨/环氧和国产 E-3H 型碳/环氧四种复材试件的最佳长径比随 θ 的变化。

表 1 几种复材的典型力学性能

性能	玻璃/环氧	硼/环氧	石墨/环氧	国产 E-3H 碳/环氧
E_1 (kg/cm ²)	1.87×10^5	2.16×10^5	5.4×10^6	1.01×10^5
E_3 (kg/cm ²)	5.62×10^5	2.16×10^6	2.16×10^6	1.30×10^6
G_{12} (kg/cm ²)	9.36×10^4	7.2×10^4	2.7×10^4	5.27×10^4
ν_{31}	0.25	0.30	0.25	0.31

(注): 前三种复材引自文献(7), E-3H 碳/环氧为航空工业部 622 所研制的预浸料, 碳纤维采用上海合纤所生产的。

从图 6 中可见, 当 $\theta \sim 60^\circ$, 尽管四种复材的 E_3/E_1 比值相差很大, 但最佳长径比 l/R 都接近同一值 (~ 0.5)。这是因为这时基体起主要作用。当 $\theta < 45^\circ$, l/R 随 θ 有较大变化, 尤其对硼/环氧, 石墨/环氧和国产 E-3H 碳/环氧, 当 θ 分别为 $2.7 \sim 26.4^\circ$, $0.8^\circ \sim 29.8^\circ$ 和 $4^\circ \sim 27.5^\circ$ 时 (参见图 4), 不存在最佳的 l/R 值。需根据 (32) 式修正惯性影响。

表 2 ~ 5 列出了四种材料的最佳 l/R 值, 供实际应用时选取。

表 2 玻璃/环氧试件最佳长径比

ν_{12}	0	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.30°	0.43	0.51	0.53	0.46	0.40	0.38	0.38
0.35°	0.43	0.52	0.54	0.49	0.45	0.44	0.44
0.40°	0.43	0.53	0.56	0.52	0.49	0.49	0.50
0.45°	0.43	0.54	0.58	0.55	0.53	0.55	0.56

表 3 硼/环氧试件最佳长径比

ν_{12}	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.30°	0.52	/	1.28	0.66	0.48	0.37	0.37
0.35°	0.52	/	1.29	0.67	0.51	0.42	0.43
0.40°	0.52	/	1.30	0.68	0.53	0.47	0.49
0.45°	0.52	/	1.31	0.70	0.56	0.52	0.55

表 4 石墨/环氧试件的最佳长径比

ν_{12}	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0.30°	0.43	/	4.55	0.53	0.39	0.36	0.37
0.35°	0.43	/	4.67	0.56	0.43	0.41	0.43
0.40°	0.43	/	4.80	0.59	0.47	0.47	0.49
0.45°	0.43	/	4.94	0.62	0.51	0.52	0.55

表 5 国产 E-3H 碳/环氧 试件的最佳长径比

v_{12}	0	15	30	45	60	75	90
0.30°	0.54	/	1.12	0.51	0.39	0.36	0.37
0.35°	0.54	/	1.16	0.54	0.43	0.42	0.43
0.40°	0.54	/	1.20	0.57	0.48	0.48	0.49
0.45°	0.54	/	1.24	0.60	0.52	0.53	0.55

选取 SHPB 实验的试件尺寸时,应采用实验条件下的弹性常数,即动态参数。本文在计算中采用的是准静态参数,这一来是由于动态参数不易得到,二则文献〔1〕指出了这样做的可行性。与其他动态性能相比, v 的变化相对地不敏感。当然这一结论是否也适用于复材的 v_{12} , v_{13} 和 η_{12} ...有待实践的检验

朱兆祥教授在百忙中审阅此稿,作者深表感谢。作者也感谢与虞吉林同志的有启发性的讨论

参 考 文 献

- 〔1〕 Davies, E. D. H. and Hunter, S. C., *J. Mech. Phys. Solids*, **11** (1963), 155-179.
- 〔2〕 Siebel, E., *Stahl U. Eisen, Düsseldorf* **43** (1923), 1295.
- 〔3〕 Hill, R., *The Mathematical Theory of Plasticity*, Clarendon Press, Oxford, 1950.
- 〔4〕 Hawkyard, J. B. and Freeman, P., *B. I. S. R. A. Report MW/E/58/54* (1954).
- 〔5〕 Griffiths, L. J. and Martin, D. J., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **7** (1974), 2329-2341.
- 〔6〕 张建平, *应用数学和力学*, **4** (1983), 289-295.
- 〔7〕 Jones, R. M., (朱颐令等译), *复合材料力学* (第二章), 上海科学技术出版社 (1981)

OPTIMUM SIZE OF TRANSVERSAL ISOTROPIC SPECIMEN IN DYNAMIC TESTING USING THE SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR

Tang Zhiping

Abstract

According to tensor transformation and energy consideration, the formula for determination of optimum geometry of specimen of transversal isotropic material without inertial effects are obtained. Calculations and discussions are made for several important composites.