

多向铺层拉挤 FRP 薄壁梁成型工艺及弯曲性能研究^{*}

江克斌 陈立 赵启林

(解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

摘要 采用适当的铺层设计和在模具口加装自主设计的导向装置, 并改进拉挤工艺的进丝方法, 然后通过拉挤工艺完全采用 $\pm 45^\circ$ 纤维缝编毡作为型材腹板的预浸料生产纤维增强复合材料 (FRP) 薄壁梁, 从而使 FRP 薄壁梁腹板为全 $\pm 45^\circ$ 铺层结构。随后进行了 4 种不同铺层结构的 FRP 梁的对比弯曲试验。结果表明, 与全 0° 铺层的 FRP 薄壁梁相比, 腹板采用 $\pm 45^\circ$ 铺层的梁的极限承载力提高明显; 随着 $\pm 45^\circ$ 铺层的增加和 0° 铺层的减少, 梁的弯曲弹性模量则有所下降; 腹板剪切强度提高之后, 腹板剪切破坏不再是 FRP 薄壁梁的主要破坏形式, 局部强度破坏将成为制约梁整体承载力的瓶颈。

关键词 多向铺层 拉挤 薄壁梁 剪切强度 弯曲试验

采用拉挤工艺生产纤维增强复合材料 (FRP) 型材具有生产效率高、产品性能稳定、单向强度高的特点, 可以连续生产任意长度的型材, 适合土木工程领域对质量稳定、成本低、高强度的构件的需要^[1-4], 但拉挤成型制品的不足在于其性能具有明显的方向性。当拉挤 FRP 薄壁型材作为梁承受横向弯曲荷载作用时, 腹板剪切强度过低往往会成为制约其承载力的瓶颈, 在纵向弯曲应力远未达到其极限值之前腹板就已发生剪切破坏, 制约了其单向强度优势^[5-6]。

理论和实验研究表明, 采用 $\pm 45^\circ$ 铺层角可以提高 FRP 材料的剪切强度^[7-8]。这是因为 FRP 的面内剪切破坏往往首先从树脂开始, 由 FRP 的剪切强度 $[\tau]$ 与其剪切模量 G_{xy} 之间的关系如式 (1) 所示。

$$[\tau] = G_{xy} [\gamma] \quad (1)$$

式 (1) 表明在 $[\gamma]$ 不变的情况下, $[\tau]$ 与 G_{xy} 成正比。而 FRP 单层板剪切模量是单层板铺层角的函数, 如式 (2) 所示。

$$\frac{1}{G_{xy}} = \bar{S}_{66} = 2 \left(\frac{2}{E_L} + \frac{2}{E_T} + \frac{4\nu_{TL}}{E_L} - \frac{1}{G_{LT}} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{G_{LT}} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \quad (2)$$

式中: E_L 、 E_T ——分别为单层板的纵向和横向的弹性模量;

ν_{TL} ——泊松比;

G_{LT} ——单层板纵横向剪切模量;

θ ——纤维铺层角。

对于常见的复合材料力学参数有 $(G_{xy})_{\max} =$

$G_{\pm 45^\circ} = \frac{E_L E_T}{E_L + E_T + 2E_T \nu_{TL}}$ 。故当 θ 为 $\pm 45^\circ$ 方向时, FRP 的剪切强度最大。

目前生产纤维铺层角多向化的 FRP 型材的方法主要有手糊成型、模压成型、拉挤-缠绕成型和三维编织成型等。手糊成型和模压成型的生产效率大大低于拉挤成型, 不能满足土木工程的应用需要; 拉挤-缠绕成型方法受截面形式和产品用途限制较多, 如工字形等开口式截面型材就无法采用此种工艺生产; 三维编织成型成本太高, 目前仅用于航天等特殊领域。国外已有人采用少量几层多向纤维毡作为拉挤生产时的预浸料, 以此提高型材的横向力学性能^[5], 但要使型材的腹板抗剪性能显著提高, 腹板上 $\pm 45^\circ$ 纤维必须达到相当高的含量, 相应的纤维毡层数必须较多, 这在很大程度上增加了工艺上实现的难度, 相关研究成果国内尚未见诸报道。由于纤维缝编毡具有诸多优点^[9], 因此笔者改进拉挤生产工艺, 采用多层 $\pm 45^\circ$ 缝编毡作为腹板增强材料生产小型 FRP 薄壁梁, 并对其进行弯曲实验, 研究 $\pm 45^\circ$ 铺层对 FRP 梁力学性能的影响。

1 拉挤生产工艺改进

从力学角度出发对型材铺层结构进行优化, 决定型材上下翼缘采用 0° 纤维铺层, 腹板尽量采用 $\pm 45^\circ$ 纤维铺层^[10-11]。

1.1 主要原材料

不饱和间苯树脂: P4070, 南京帝飞化学有限公司;

无捻粗纱、缝编毡: 原丝均为 E 型玻璃纤维 (GF), 其单丝直径 $11 \sim 13 \mu\text{m}$, 无捻粗纱规格为 4800 tex, 缝编毡规格分别为 E-DBL600-10 和 E-DB450-5, 常州圣戈班宏发技术材料有限公司。

^{*} 国家自然科学基金项目 (50608069)

收稿日期: 2011-02-14

缝编毡的部分物理力学性能参数见表 1,缝编毡组成见表 2。

表 1 缝编毡的部分物理力学性能参数

项 目	拉伸弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa	泊松比	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
不饱和间苯树脂	3.1	76		1.2
E 型 GF	72.3	3400	0.22	2.58

表 2 缝编毡组成 g/m^2

缝编毡规格	0°纤维	+45°纤维	-45°纤维	总计
E - DBL600 - 10		225	225	450
E - DB450 - 5	300	150	150	600

1.2 主要设备和仪器

复合材料拉挤生产线及模具: BLG180X110 型履带式,模具型腔尺寸为 $18\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}$ 的工字形,采用三段式加热法加热固化,山东章丘大众设备厂;

万能试验机: WEW - 300KN 型,量程 30 t,济南恒思盛大仪器试验机有限公司。

1.3 设备改进与型材铺层设计

在生产实践中发现,在拉挤过程中采用全缝编毡作为腹板增强材料存在以下技术困难。

(1) 增强材料在模具截面上难以精确定位。传统的拉挤工艺采用单向纤维无捻粗纱作为增强材料,纤维以松散纱束的形式存在,在模腔压力的作用下会自动分散,在截面上进行较均匀的分布。而缝编毡中纤维被缝编在一起而不会分散,缝编毡在型材内的位置易受模腔内树脂运动的影响而发生偏移,致使型材质地不均匀,力学性能不稳定。

(2) 缝编毡与模具内壁之间的摩擦力过大。由于缝编毡中存在非 0°纤维和缝编线,在拉挤生产过程中,缝编毡与模具模腔之间存在较大的摩擦力^[12],特别是在所加缝编毡层数较多的情况下,摩擦力更大。这将导致模腔内壁严重磨损,同时还会使缝编毡上承受拉力过大引起毡中纤维的排布方向发生改变,构件的力学性能不符合要求。摩擦力过大还可能导致生产时发生堵模。

为解决以上问题,经实践研究决定采取以下措施。首先是在模具口加装自主设计的导向滑口和嵌板,如图 1 所示。其与模具口之间的距离可以通过螺栓调整,其作用在于:

(1) 实现增强材料在型材结构上的定位,使不同类型的增强材料(纤维和缝编毡)分离,避免其进入模具时交缠在一起,影响型材成型和力学性能。

(2) 减小增强材料进入模具时与模具口的角

度,减少模具口对增强材料的剪力和两者相互之间的磨损。

(3) 通过压力增强各层缝编毡之间的接触和粘聚,减少分层的可能性。

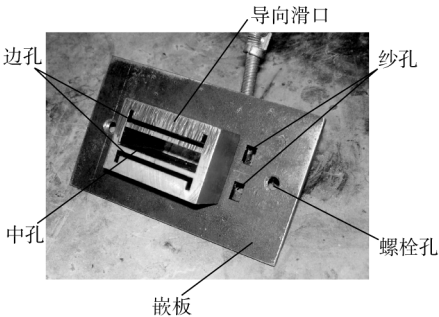


图 1 导向装置

其次,综合考虑型材的力学性能和生产工艺,设计如图 2 所示的型材铺层结构。

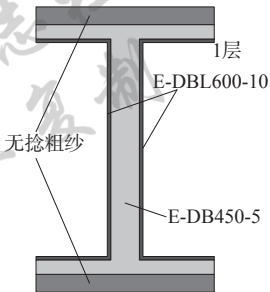


图 2 FRP 薄壁梁型材的铺层结构

工字梁翼缘主要承担拉压应力,增强材料采用 0°GF 无捻粗纱。腹板主要承担剪切应力,增强材料采用 2 层 E - DBL600 - 10 缝编毡和 10 层 E - DB450 - 5 缝编毡。将 2 层 E - DBL600 - 10 缝编毡分别置于腹板两侧最外层,使其 0°铺层在外,E - DB450 - 5 缝编毡置于内层,这是为了使成型得以顺利实现,其优势如下。

(1) 由于 E - DBL600 - 10 铺层为 0°/ +45°/ -45°,其中的单向纤维可以承担牵引装置所提供的牵引力的作用。拉挤时 2 层 E - DBL600 - 10 将 +45°/ -45°铺层的 E - DB450 - 5 缝编毡夹在中间带入模具,避免 E - DB450 - 5 缝编毡在受拉时纤维排布方向发生改变,影响型材力学性能。

(2) E - DBL600 - 10 缝编毡的 0°层与模具内壁相接触,在拉挤时比非 0°层与模具壁之间的摩擦力更小,型材力学性能增加的同时也减小了牵引机的负荷,减小对模腔的磨损,保证生产的连续进行。

1.4 生产过程

拉挤生产工艺按穿丝、浸胶、加热固化的流程进行。在穿丝之前应将组合好的导向滑口和嵌板(图

1) 安装在模具入口前方, 距离可以根据需要调整, 用螺栓将嵌板固定在模具架上, 如图 3a 所示。导向滑口的中心与模具轴线位于同一轴线上。穿丝时, 两层 E - DBL600 - 10 缝编毡分别从导向滑口的两个边孔中穿过, 10 层 E - DB450 - 5 缝编毡从导向滑口的中孔中穿过。增强上下翼缘的无捻粗纱从嵌板的纱孔中穿过。预浸料在穿过导向滑口和嵌板的孔后再穿过模具的相应部位, 之后在牵引车的牵引下浸胶、加热固化成型后从模具出口被牵引出来, 如图 3b 所示。



(a) (b)
a—导向滑口和嵌板的安装; b—牵引
图 3 生产现场

2 弯曲实验

2.1 试样编组

除上述腹板全用 $\pm 45^\circ$ 铺层的型材外, 还以相同的原料和工艺生产了几种腹板上 $\pm 45^\circ$ 铺层含量不同的型材。将型材截成长度为 35 cm 的试样, 按纤维铺层的不同对试样进行编组, 具体情况如下。

0 系列: 上下翼缘各 20 束无捻粗纱, 腹板 44 束无捻粗纱。

2 系列: 上下翼缘各 20 束无捻粗纱, 腹板 44 束无捻粗纱和 2 层 E - DB450 - 5 缝编毡。

4 系列: 上下翼缘各 20 束无捻粗纱, 腹板 34 束无捻粗纱和 4 层 E - DB450 - 5 缝编毡。

12 系列: 上下翼缘各 20 束无捻粗纱, 腹板加 10 层 E - DB450 - 5 缝编毡、2 层 E - DBL600 - 10 缝编毡。

各系列试样不同铺层纤维的含量见表 3。

表 3 各系列试样不同铺层纤维的体积分数 %					
系列	翼 缘		腹 板		全梁所有纤维
	0° 纤维	45° 纤维	0° 纤维	45° 纤维	
0	41	0	45.5	0	43.5
2	41	0	45.5	8	47.2
4	41	0	35.1	16	46
12	41	0	5.2	44.3	45.6

2.2 试样预处理

为防止试样在压头作用下的局部破坏, 对试样作局部加强。方法是先在试样加载点和支承点设置竖向加劲肋, 再用浸透树脂的缠绕带对设置加劲肋

的部位进行缠绕, 常温固化。

2.3 加载

在万能试验机上进行四分点加载的弯曲实验^[13], 用分载梁进行分载。梁长 0.35 m, 加载跨径为 0.3 m, 分载梁二压头之间的间距为 0.2 m。采用静态应变采集系统和粘贴在梁上的应变片测量梁的变形。荷载数据从万能试验机的液晶显示器上直接读取。图 4 为对试样进行加载时的照片。

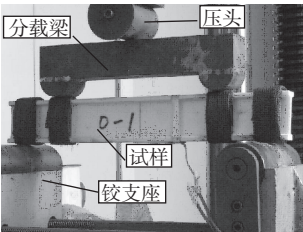
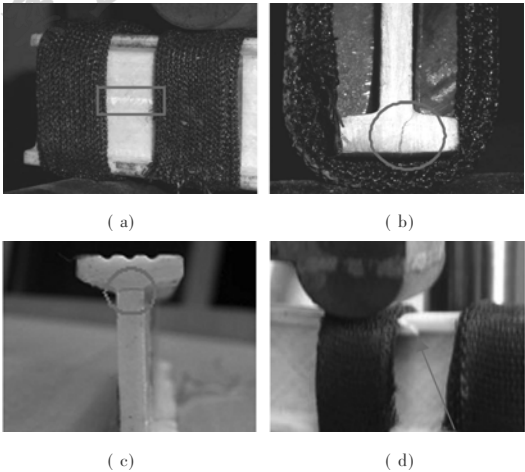


图 4 试样加载照片

3 结果分析

3.1 破坏形式

各系列梁的破坏形式可以归纳为 4 种, 如图 5 所示。



a—腹板水平剪切破坏; b—翼缘局部悬臂受压破坏;
c—腹板与翼缘接合处断裂; d—翼缘局部垂直剪切破坏

图 5 试样的 4 种不同破坏形式

(1) 腹板水平剪切破坏。加载点与铰支点之间腹板中性轴位置出现贯穿腹板的白色裂缝, 如图 5a 所示。出现这种破坏形式的原因是在梁的长度方向上, 加载点与铰支点之间横截面上剪力最大; 在梁的高度方向上, 腹板中性轴处剪应力最大, 故梁腹板的最大剪应力出现在上述位置, 当腹板抗剪性能较弱时, 就会出现剪切破坏。

(2) 翼缘局部悬臂受压破坏。翼缘根部出现裂缝, 如图 5b 所示。这是因为从横向截面来看, 上翼缘伸出腹板部分可以看作是二个悬臂梁, 悬臂梁根

部由于横向弯矩和剪力的共同作用局部应力较大。而另一方面,由于纤维在梁翼缘上均沿纵向布置,横向没有得到增强,翼缘的横向受力性能较弱。

(3) 腹板与翼缘接合处断裂。腹板与翼缘结合部出现裂缝,如图 5c 所示。这是因为铰支点腹板与翼缘结合部亦存在较大剪应力。同时,由于铰支点位置的上翼缘在对梁加载时受到加劲肋向上的顶推力,腹板将沿竖直方向受拉。另外,腹板与翼缘接合处存在应力集中。

(4) 翼缘局部垂直剪切破坏。加载点处加劲肋旁边上翼缘出现剪切裂缝,如图 5d 所示。这是因为上翼缘在加载点处直接承受压头压力,将造成加载点旁边翼缘上局部垂直剪应力过大。另一方面,单向纤维增强复合材料抗剪性能较弱。

各系列有效试样的破坏形式列于表 4 中。对于 0 系列和 2 系列试样,腹板中性轴水平剪切破坏是一种主要的控制破坏形式,而 4 系列和 12 系列试样则没有出现此种破坏形式,而是以局部破坏为主。这是因为 4 系列和 12 系列梁腹板中的 $\pm 45^\circ$ 纤维含量较高,使得梁腹板剪切极限承载力提高到了局部破坏极限承载力之上。于是以上几种局部破坏形式取代腹板水平剪切破坏成为控制破坏形式。

表 4 各系列试样实验结果

0 系列	试样编号	0-1	0-2	0-3	0-4	0-5	0-6	
	破坏形式	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)	(3)	
	极限载荷 / kN	20.4	21.4	19.9	22.3	16.8	18.2	
2 系列	试样编号	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	
	破坏形式	(1)	(1)	(3)	(1)	(2)	(3)	
	极限载荷 / kN	20.7	24.6	22.2	21.6	18.6	21.8	
4 系列	试样编号	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	
	破坏形式	(2)	(3)	(3)	(2)	(3)	(2)	
	极限载荷 / kN	28.7	26.6	27.5	28.5	23.5	28.2	
12 系列	试样编号	12-1	12-2	12-6	12-7	12-8	12-9	12-10
	破坏形式	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
	极限载荷 / kN	27.9	25.5	28.7	29.4	29.4	25.7	29.0

3.2 腹板剪切破坏承载力

由表 4 可得,0 系列试样的腹板水平剪切破坏平均极限承载力为 21.4 kN。2 系列的腹板水平剪切破坏平均极限承载力为 22.3 kN。4 系列未出现腹板水平剪切破坏的破坏形式,但其极限承载力的平均值为 27.2 kN,故 4 系列的腹板剪切破坏平均承载力应大于 27.2 kN。同理,12 系列的腹板剪切破坏平均承载力应大于 27.9 kN。可以看出,2 系列试样腹板剪切强度比 0 系列提高不大,4 系列及 12

系列腹板剪切强度比 0 系列提高 27% 以上,但由于此 2 个系列未出现腹板剪切破坏形式,故具体提高量根据实验结果无法确定。可见, $\pm 45^\circ$ 铺层的存在可以有效提高 FRP 薄壁梁的腹板剪切强度,使其弯曲强度得到更大提高。但随着腹板剪切强度的提高,FRP 薄壁梁在承载时局部受力性能较弱的特点又显现出来。

3.3 弯曲弹性模量

各系列试样的弯曲弹性模量见图 6。0 系列、2 系列、4 系列弯曲弹性模量相差不大。其中 2 系列略高于 0 系列,4 系列介于 0 系列和 2 系列之间。相对于 0 系列,2 系列试样中 0° 纤维的含量和布置没有变化,而腹板中 $\pm 45^\circ$ 纤维的含量增加了,故其总体弯曲弹性模量略有提高。4 系列将 2 系列腹板上的部分 0° 纤维替换为 $\pm 45^\circ$ 纤维,故其弯曲弹性模量有所降低。12 系列弯曲弹性模量相对于前 3 个系列有较大下降。

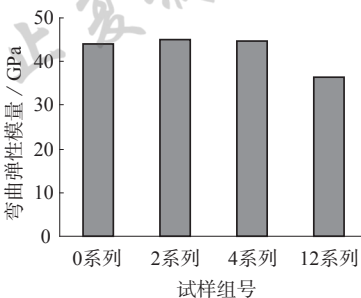


图 6 各系列试样的弯曲弹性模量

单层板弯曲弹性模量 E_x 是铺层角 θ 的函数。如式 (3) 所示。

$$\frac{1}{E_x} = \bar{S}_{11} = \frac{1}{E_L} \cos^4 \theta + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{TL}}{E_L} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_T} \sin^4 \theta \tag{3}$$

铺层角为 0° 时 E_x 最大,铺层角为 $\pm 45^\circ$ 时 E_x 最小。故随着 $\pm 45^\circ$ 纤维含量增加和 0° 纤维含量减少,腹板的弯曲弹性模量不断降低,梁的弯曲弹性模量也相应降低。实验结果与理论相符合。

4 结论

(1) 改进 FRP 拉挤生产工艺,在 FRP 工字梁型材腹板上使用全 $\pm 45^\circ$ 铺层,实现了拉挤生产过程中 FRP 型材内纤维铺层角的平面有序多向化。

(2) 对型材的弯曲实验结果表明,使用 $\pm 45^\circ$ 纤维作为腹板增强材料,可以有效提高拉挤成型复合材料工字梁的腹板剪切强度。当复合材料工字梁的腹板剪切强度提高之后,局部强度的问题显现出来,

成为制约梁整体承载力提高的主要因素。

(3) $\pm 45^\circ$ 纤维铺层纵向弹性模量较小, 因此梁的弯曲弹性模量比单纯使用 0° 纤维增强的梁低。

(4) 复合材料构件在设计时应根据实际需要进行综合考虑, 以各方面的力学性能均能满足使用要求为宜, 避免出现性能上的“短板”。

参考文献

[1] Martin J. Pultruded composites compete with traditional construction materials[J]. Reinforced Plastics, 2006(5): 21 - 27.

[2] 谭家茂, 张淑萍. 我国复合材料工艺研究及应用开发[J]. 玻璃钢/复合材料, 2004(5): 53 - 55.

[3] Bannister M. Challenges for composites into the next millennium - a reinforcement perspective[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(7): 901 - 910.

[4] 孔庆保, 丁传荣, 乔学东. 树脂基复合材料拉挤技术研究新进展及我国拉挤工业未来发展探讨(II) [J]. 纤维复合材料, 2000(1): 50 - 53.

[5] 郭林敏, 董国华, 费云鹏. 改善拉挤成型复合材料横向强度的

途径[J]. 玻璃钢/复合材料, 1998(1): 17 - 19.

[6] 江克斌, 陈立, 赵启林, 等. 混杂纤维树脂基复合材料梁试验研究[J]. 解放军理工大学学报, 2008, 9(1): 72 - 76.

[7] 王善元, 张汝光, 周建, 等. 纤维增强复合材料[M]. 上海: 中国纺织大学出版社, 2000: 168 - 169.

[8] 陈浩森. 混杂纤维树脂基复合材料拉挤型材薄壁梁研究[D]. 南京: 中国人民解放军理工大学, 2005: 198 - 210.

[9] 沃丁柱, 李顺林, 王兴业, 等. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 486 - 490.

[10] Davalos J F, Qiao P, Barbero E J. Multiobjective material architecture optimization of pultruded FRP I - beams[J]. Composite Material, 1996, 35(3): 271 - 281.

[11] Qiao P, Davalos J F, Barbero E J. Design optimization of fiber reinforced composite shapes[J]. Composite Material, 1998, 32(2): 177 - 196.

[12] 陈楠. 玻璃钢拉挤设备系统技术概要[J]. 玻璃钢/复合材料, 1999(5): 13 - 15.

[13] Hodgkinson J M. 先进纤维增强复合材料性能测试[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 103 - 110.

STUDY ON THE MOULDING PROCESS AND BENDING PROPERTIES OF MULTI-DIRECTIONAL LAMINATED PULTRUDED THIN-WALLED FRP BEAM

Jiang Kebin, Chen Li, Zhao Qilin

(Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

ABSTRACT By using proper ply design and fixing a self-designed guide device to the inlet of the mould, and improving the fiber inletting method of the pultrusion technique, the FRP thin-walled beam was realized through pultrusion by completely using $\pm 45^\circ$ fiber fabric as the prepreg of the web plate, so that there were completely $\pm 45^\circ$ ply structure in the web plate of the pultruded thin-walled beam. Comparative bending experiments on 4 different ply structures of FRP beams were executed. The results showed that comparing to the thin-walled FRP beams with complete 0° ply, the ultimate bearing capacities of the beams of which the webs adopt $\pm 45^\circ$ ply increased obviously. With increasing $\pm 45^\circ$ plies and decreasing 0° plies, the bending modulus of the beams declined by some extent. Since the web shear strength was improved, the shear failure of web was no longer the main failure mode of the thin-walled FRP beams, and local failure would become the overall bearing capacity bottleneck of this kind of beams instead.

KEYWORDS multi-directional plies, pultrusion, thin-walled beam, shear strength, bending experiment

欢迎查询有关广告

对于在我刊刊登的所有广告, 如读者需要查询更详细的资料或了解情况, 请填好《读者查询广告资料服务卡》后寄回或来函。本杂志社将为您提供或转请有关单位提供资料, 以满足您的要求。如需购买任何广告单位的材料、设备、仪器及配件等产品, 我社将帮助您联系, 以保证产品质量, 争取优惠价格。欢迎各单位在我刊刊登广告。刊登办法函索即寄。

《工程塑料应用》读者查询广告资料服务卡

No _____

读者姓名 _____ 单位 _____ 邮政编码 _____

通讯地址 _____ 电话 _____ E-mail: _____

欲获得《工程塑料应用》 _____ 年第 _____ 期第 _____ 页 _____

广告中有关 _____ 的详细资料。

如空位不够, 请另附纸。填好后请寄回。

山东省济南市 108 信箱杂志社

邮政编码: 250031