

文章编号: 0258-7025(2004)01-0120-05

非载气式激光同轴送粉试验研究

杨洗陈, 王建军, 刘运武, 王云山, 李会山

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 研制了一种非载气式激光同轴送粉系统, 粉末流能汇聚输出, 其焦点尺寸为 $\phi 1.5$ mm, 焦距 f_p 15~35 mm 连续可调。在二维平面上熔敷消除了方向性影响, 多层激光熔敷组织、成分及硬度分布均匀。与载气式同轴送粉相比, 具有较高的粉末利用率(60%~80%)及较高的工业应用价值。

关键词 激光技术; 同轴送粉; 非载气; 熔敷

中图分类号 TN 249; TG 665 文献标识码 A

Research on New Coaxial Feed Laser Cladding without Carrying Gas

YANG Xi-chen, WANG Jian-jun,

LIU Yun-wu, WANG Yun-shan, LI Hui-shan

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnical University, Tianjin 300160, China)

Abstract A new coaxial feed laser cladding system without carrying gas is researched. Its technical characteristics are as follows: the diameter of focused powder stream about 1.5 mm, focusing length from 15 to 35 mm adjustable, omnidirection, open space and convenience for operating, uniform distribution of microstructure, chemical contents and microhardness, as well as high powder efficiency about 60%~80%.

Key words laser technique; coaxial feed powder; without carrying gas; cladding.

1 引 言

激光熔敷作为一种先进的材料表面强化技术, 在工业中已获得若干重要应用^[1,2]。目前激光熔敷多采用侧向送粉的方式, 由于它只进行单一方向熔敷, 应用上受到了一定的限制。近年来, 同轴送粉技术受到国内外广泛关注^[3], 它能实现二维平面熔敷。但多采用载气式送粉, 粉末利用率较低(30%~40%)^[4]。实际上, 对于二维平面熔敷, 只要求实现连续、稳定和无方向性影响的送粉, 输送粉末是否采用载流气体并不是必要条件。本文研制了一种新型的非载气式同轴送粉系统, 它具有较高的粉末利用率; 能进行全方向二维熔敷, 工作空间大; 送粉元件与粉末不存在摩擦、挤压现象, 不堵粉, 输送粉末连续稳定。

2 同轴送粉系统设计

非载气同轴送粉系统如图 1 所示, 主要有下列部分组成: 非载气式送粉器 1, 分粉器 2, 同轴送粉工作头 3。由送粉器输出粉末进入 4 路分粉器, 再进入同轴送粉工作头。激光束 5 发出的 CO₂ 激光经光学聚焦系统 4, 进入同轴送粉工作头 3, 激光束与粉末同轴地输出, 在工件 6 上会聚, 实现激光熔敷。

2.1 送粉器

采用转鼓作送粉计量元件, 转鼓外表面刻有均匀凹槽, 转鼓在电机带动下匀速转动, 凹槽从左侧储粉仓定量提取粉末, 储粉仓的粉末高度可调。通过调节转鼓转速和储粉仓的料面高度, 实现可定量送粉, 主要技术参数为: 送粉量 $M_p = 1 \sim 100$ g/min, 送粉精度 $\leq 2\%$, 粉末适用范围: Fe 基, Ni 基

收稿日期: 2003-04-14; 收到修改稿日期: 2003-06-06

基金项目: 天津市科委(津发财字[2000]第 140 号)资助项目。

作者简介: 杨洗陈(1941—), 男, 天津工业大学激光技术研究所教授, 博士生导师。主要研究方向为激光材料相互作用和

激光加工 E-mail: yangxich@eyou.com

和 Co 基等自溶性合金粉末, 粒度范围为 -140 目 ~ +320 目。有关送粉器的详细报道见文献[5]。

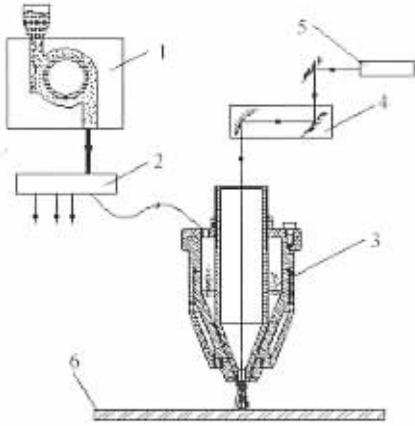


图 1 同轴送粉系统示意图

Fig. 1 Schedule of the coaxial feed laser cladding system

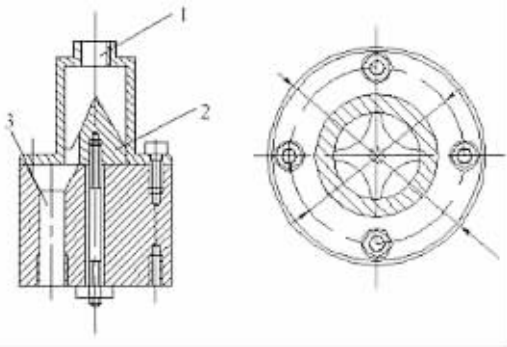


图 2 4 路分粉器结构

Fig. 2 Scheme of four-path powder divider

2.2 分粉器

实现激光同轴送粉的一个关键问题在于获得与激光束同轴输出的圆对称均匀分布的粉末流, 为此采用多路送粉合成方案。即令 n 路粉末流按 $360^\circ/n$ 均等地围绕中心轴线输入送粉工作头的粉管区, 分散后每路粉流展成一个弧形粉帘, 多路粉帘相接合成一个环形粉帘从中心粉嘴输出。曾尝试用多个送粉器同步输入送粉工作头, 因不够经济和体积过大而采用一个送粉器输出, 然后用分粉器将此粉末流分成 n 路均等的粉流方案。分粉器结构如图 2 所示。它由进粉口 1, 分粉圆锥 2 和 n 路出粉孔 3 组成。分粉圆锥 n 个锥面上具有特殊的弧面结构, 圆锥与进粉口位于同一轴线上。输入粉末流应均匀分布, 经分粉圆锥后, 则分成 n 路流出。曾取 $n = 3, 4, 6, 8$ 路进行试验, 结果发现, 采用 $n = 4$ 路即可实现输出均匀环

形粉帘, 每路分粉量偏差测试结果如下: 送粉量为 20 g/min 时, 4 路分粉平均偏差 $< 12\%$, 送粉量为 30 g/min 时, 4 路分粉平均偏差 $< 10\%$ 。

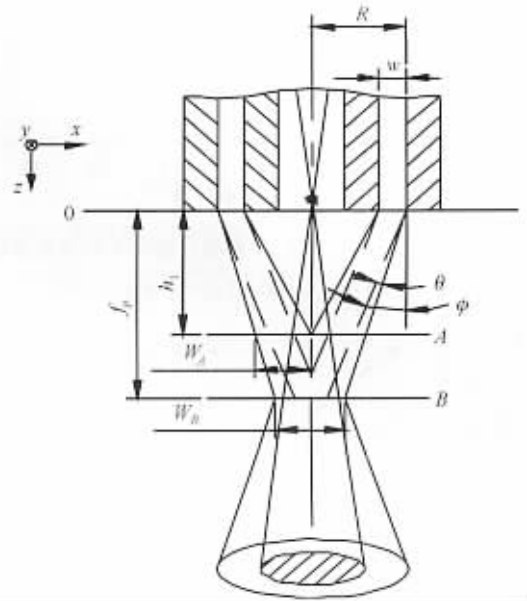


图 3 光束与粉末流的相互作用关系示意图

Fig. 3 Relationship between laser and powder stream

2.3 同轴送粉工作头

其设计的基本要求为: 输入的 4 路粉末经工作头后形成以光轴为对称的均匀分布的粉末流; 粉末流要具有一定的聚焦性能, 其焦距和焦点能可调; 为便于操作, 粉嘴下方要有适当的空间。同轴送粉工作头中光束与粉末流的相互作用关系如图 3 所示。图中, R 为粉嘴外半径, w 为粉嘴宽度, ϕ 为粉嘴口倾角, θ 为粉末流发散角。定义 W_A 为粉末流上焦点半径, W_B 为粉末流下焦点直径, 用 D_f 表示, AB 为粉末流会聚长度, 用 L_f (焦距) 表示, f_p 为粉末流的焦距。可以看到, 粉末流刚从粉嘴流出后是环形的并呈会聚趋势。在 B 处聚焦后, 又以一定角发散, 形成圆锥状粉末流。通过调节 ϕ 可以改变焦点位置和焦距

$$D_f = w + (2R - w) \frac{\sin\phi \sin\theta}{\cos(\phi - \theta)} \quad (1)$$

$$f_p = (R - w/2) \cot\phi \quad (2)$$

$$L_f = (R - w/2) \cot\phi - (R - w) \cot(\phi + \theta) \quad (3)$$

从(1) ~ (3) 式可见, 粉末流焦点直径 D_f , 焦距 f_p 和粉末流会聚长度 L_f (焦距) 是粉嘴几何参数(半径 R , 粉嘴宽度 w 和倾角 ϕ) 和粉末发散特性 θ 的函数。图 4 ~ 6 分别是粉嘴口倾角 ϕ 与下焦点直径 D_f , 焦距 f_p 和粉末流焦距 L_f 的关系曲线图。

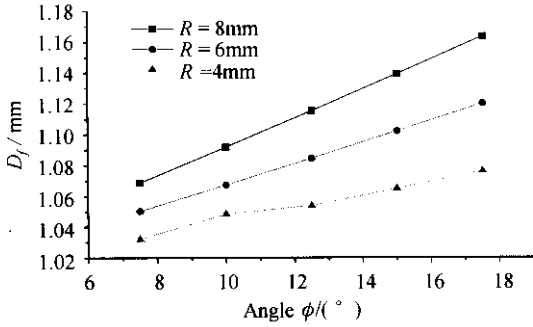


图4 粉末流焦点直径 D_f 与粉嘴口倾角 ϕ 的关系曲线

Fig. 4 Curve of D_f and ϕ ($w=1$ mm, $\theta=2^\circ$)

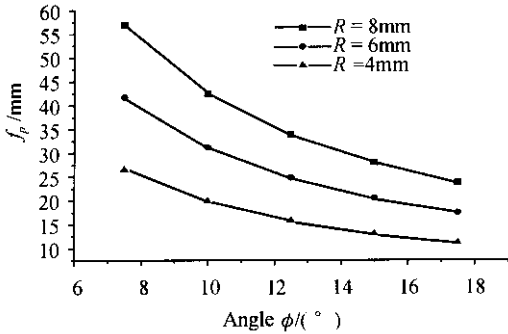


图5 粉末流焦距 f_p 与粉嘴口倾角 ϕ 的关系曲线

Fig. 5 Curve of f_p and ϕ ($w=1$ mm, $\theta=2^\circ$)

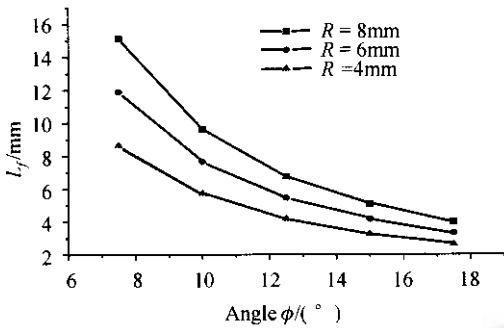


图6 粉末流焦距 L_f 与粉嘴口倾角 ϕ 的关系曲线

Fig. 6 Curve of L_f and ϕ ($w=1$ mm, $\theta=2^\circ$)

3 同轴送粉性能试验

试验所用设备为 HL-5000 型 5 kW-CO₂ 横流激光器, 5 轴 4 联动数控加工机床。试验用激光熔敷材料分别为 NiO₂ 和 Ni45 合金粉末, 粒度均为 -140 目 ~ +320 目。NiO₂ 化学成分为: 0.84% C, 4.2% Si, 3.8% B, 16% Cr, 5% Fe, 其余为 Ni; Ni45 化学成分为: 0.4% C, 4.0% Si, 3.0% B, 16% Cr, 14% Fe, 其余为 Ni。基体材料为 45# 钢。

3.1 聚焦性能

图 7(a) 为冷粉流 (不通激光) 的空间分布形貌

照片, (b) 为热粉流 (通激光) 空间分布形貌照片。可以看到粉末流具有良好的轴对称空间分布均匀性; 粉末流形成聚焦, 经测试, 其焦点直径 ϕ 1.5 mm, 焦距 f_p 从 15~35 mm 可调。

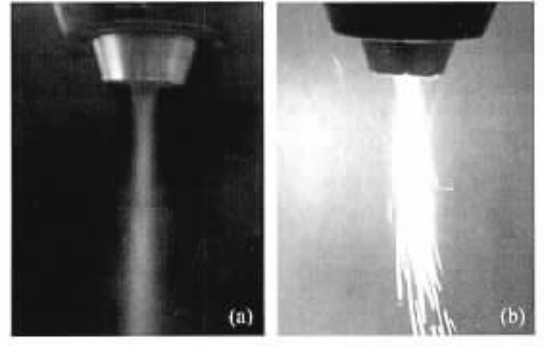


图7 激光同轴送粉下粉末流图像

(a) 冷粉流 (未通激光); (b) 热粉流 (通激光)

Fig. 7 Powder stream picture for coaxial feed laser cladding

(a) cooling powder stream (without laser);

(b) heating powder stream (with laser)

3.2 送粉熔敷方向性能

为了考察同轴送粉工作头激光熔敷的方向性影响, 采用沿 8 个方向上进行激光熔敷试验; 让同轴送粉工作头分别沿与 x 轴正向夹角 θ 为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ 和 315° 进行单道熔敷。然后将每个熔敷单道切成三段, 用游标卡尺分别测量每个熔敷道的高度和宽度, 并取平均值。激光熔敷工艺参数为: 激光功率 $P=1.2$ kW, 扫描速度 $V=3$ mm/s, 焦距 $f_p=300$ mm, 送粉量 6.5 g/min。激光熔敷方向对熔敷层高度和宽度影响的测试结果分别如图 8(a), (b) 所示。

由图 8 可见, 沿 8 个熔敷方向上高度波动平均为 0.025 mm, 宽度波动平均为 0.064 mm, 表明同轴送粉工作头的各向熔敷性能良好, 具备全方向熔敷均匀特性。

3.3 粉末利用率

影响粉末利用率主要因素有激光功率 P , 扫描速度 V , 光斑直径 D 和送粉率 M_p , 以及工作距离 H 。令基材重量为 W_s , 在 Δt 时间内所送粉末重量为 $W_p = M_p \Delta t$, 熔敷后基材与熔敷层的总重量为 W_c , 则粉末利用率

$$\eta = \frac{W_c - W_s}{W_p} = \frac{W_c - W_s}{M_p \Delta t} = \frac{W_c - W_s}{M_p D / V} = \frac{(W_c - W_s) V}{M_p D}$$

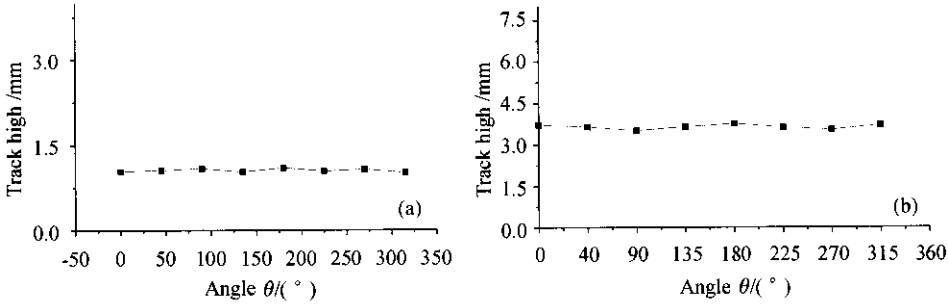


图 8 激光同轴送粉方向性对熔敷高度(a)和宽度(b)的影响

Fig. 8 Effect of cladding direction on the track high (a) and track width (b)

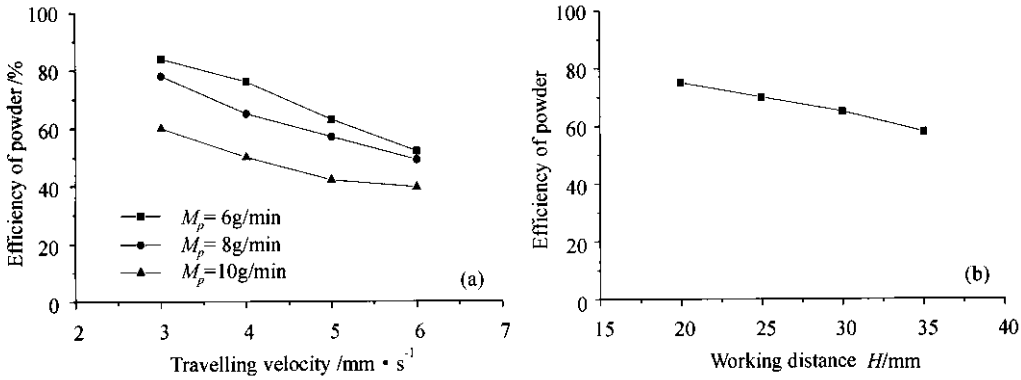


图 9 同轴送粉粉末利用率关系曲线

Fig. 9 Efficiency of powder for coaxial feed laser cladding

(a) $P = 1.3\text{ kW}$, $f_p = 20\text{ mm}$; (b) $P = 1.3\text{ kW}$, $M_p = 10\text{ g/min}$, $V = 3\text{ mm/s}$

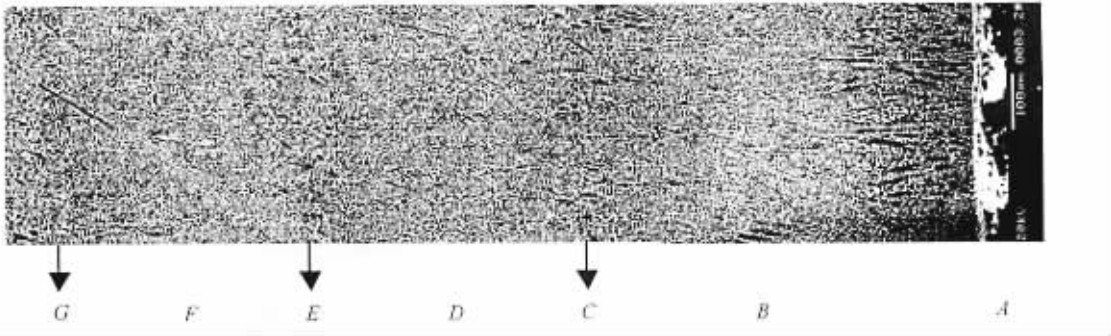


图 10 多层熔敷试样横剖面组织形貌扫描电镜照片

A: 基材; B: 第 1 层; C: 第 1, 2 层分界; D: 第 2 层; E: 第 2, 3 层分界; F: 第 3 层; G: 第 3, 4 层分界

Fig. 10 SEM picture of microstructure of cross section for multilayers cladding sample

A: base materials; B: No. 1 cladded layer; C: interface between No. 1 and No. 2 cladded layers; D: No. 2 cladded layer;

E: interface between No. 2 and No. 3 cladded layers; F: No. 3 cladded layer; G: interface between No. 3 and No. 4 cladded layers

图 9(a)为激光功率、工作高度一定时,在不同送粉率下测得的粉末利用率与扫描速度的关系曲线,表明粉末利用率随扫描速度增加而减少。这是因为速度增加后,激光比能 (P/V) 减少,致使部分粉末束未能熔化,降低了粉末利用率,图 9(b)为激光功率、送粉量和扫描速度一定时,粉末利用率随工作距离的变化曲线。试件位于粉末流焦点 f_p 时,激

光束与粉末流获得最佳匹配,粉末利用率最高达 80%。随着工作距离加大,粉末流发散,激光束捕获粉末减少,利用率也相应减少。总之,在适当的工艺参数下,同轴送粉的粉末利用率可达 80%。

4 多层熔敷组织和性能

在激光表面强化、修复及激光直接制造中需获

得厚度较大的试件,采用多层熔敷方法,制备了多层熔敷的薄壁试样,其工艺参数为: $P=1.1\text{ kW}$, $V=3\text{ mm/s}$, $M_p=4.5\text{ g/min}$ 。单层熔敷厚度 0.54 mm ,层数 30 ,总高度 15 mm 。熔敷材料为 Ni45 合金粉末,基体为 $45\#$ 钢。图10为多层熔敷试样横剖面组织形貌扫描电镜照片。在底部其显微组织由互相平行且与基材垂直的枝晶组成,这是由于液态金属在激光熔池内冷却凝固过程中,热量主要沿垂直于基材的方向散失,沿热流方向温度梯度大,枝晶组织沿热流方向生长,形成凝固过程的方向性。

在每道熔敷层内部,组织均匀分布。在两道熔敷层过渡区,组织较为粗大些,这是由于此处热量积累较多造成的。但总的看来,多层熔敷内部组织还是基本均匀的。

采用能谱技术(EDX)沿上述试样组织从底部向上进行线扫描,测得 Ni , Cr , Si 等主要元素分布也是基本均匀的。

硬度分布:使用显微硬度计对上述试样进行硬

度分布测试,从底部第2道熔敷层开始,一直测到顶部第28层,其硬度平均值为 $\text{Hv}_{0.5}436$,硬度起伏不超过 $\text{Hv}_{0.5}85$ 。

综上所述,采用同轴送粉进行多层激光熔敷可以获得组织、硬度均匀的试件。

参 考 文 献

- 1 Guan Zhenzhong. Handbook of Laser Materials Processing Technology [M]. Beijing: Chinese Measurement Publishing, 1998. 236~336 (in Chinese)
关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京:中国计量出版社, 1998. 236~336
- 2 R. Vilar. Laser cladding [J]. *Journal of Laser Applications*, 1999, **11**(2):64~79
- 3 C. L. Sexton, G. Byrne, K. G. Watkins. Alloy development by laser cladding: An overview [J]. *Journal of Laser Application*, 2001, **13**(1):2~11
- 4 J. Lin, W. M. Steen. Design characteristics and development of a nozzle for coaxial laser cladding [J]. *Journal of Laser Application*, 1998, **10**(2):55~63
- 5 Yang Xichen, Wang Yunshan, Zhao Xin. Development of laser repairing parts in metallurgical industries in China [C]. ICALCO'1999 Proceedings, Section A 67, 1999, San Diego, USA

(上接封四)

中没有出现的,但作为主要研究对象的事或物质的名称,如有需要,还可以列出作者认为有利于检索和文献利用的第五、第六个等关键词。

7. 图表 图要设计美观,大小适中,尺寸一般为 $8\text{cm}\times 10\text{cm}$ 以内,线条均匀,主辅线分明,粗线一般为 $0.25\sim 0.5\text{mm}$,细线一般为粗线的 $1/2$,图中主线用粗线,如函数曲线等,辅线用细线,如坐标轴线、指示线等;照片要求对比度高,层次清晰。推荐使用三线表。图表文字:图题、表题须中英文对照,图面、表面一律用英文。

8. 参考文献 应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献请用英文表示,如原文献为其他文种,请在该文献最后用括号注明(中文文献请在英文后同时标注相应的中文内容),并给出该文献所属的专著或刊物中文名称。每条文献的顺序和标点如下:

专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名),文献题名,版本(专著用),出版地:出版者,出版年,起止页码;

期刊[J]——作者(三名),论文题目[J],刊名,出版年,卷(期):起止页码;

专利[P]——专利申请者,专利题目[P],专利国别,专利文献种类,专利号,出版日期;

文集[C]——作者(三名),论文题目[C],编者,论文集名,出版地:出版者,年,起止页码。

详细的论文排版格式请参见近期的《中国激光》。

9. 基金资助 论文如获省、部级以上的基金资助,须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。

10. 版面费 遵照中国科协和中国科学院有关文件精神,向录用稿作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

11. 版权 录用稿件一经刊出,论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊2册,抽印本10份。

12. 本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》和万方数据库,著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者,请事先声明,本刊将作适当处理。

特别声明:凡在国内外正式出版的刊物上登载过的稿件,本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者,本刊三年内不接受其稿件,并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者,均视作接受上述各项规定,本刊不再特别声明。