

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.11.009

混杂纤维填充环氧泡沫塑料吸波性能研究

宋宇华,王超杰,万晓霞,刘永峙,王雯,厉宁,于万增,郭宇,潘士兵

(中国兵器工业集团第五三研究所,济南 250031)

摘要:利用模压成型法制备混杂纤维填充环氧泡沫塑料,采用雷达吸波材料(RAM)弓形法测试了吸波泡沫塑料的反射率,研究了短切磁性纤维含量、短切导电纤维含量、样件厚度以及蒙皮对环氧吸波泡沫塑料吸波性能的影响。结果表明:在一定范围内,随着纤维含量的增加,短切磁性纤维和短切导电纤维都能提高环氧吸波泡沫塑料的吸波性能,纤维增加到一定含量反而降低吸波泡沫塑料的吸波性能;样件厚度增加,可以增强环氧吸波泡沫塑料的吸波性能,厚度增大到一定程度,泡沫塑料的吸波性能反而降低,样件厚度为10 mm时,8~18 GHz、26.5~40 GHz频段内,环氧吸波泡沫塑料满足-10 dB的有效带宽为16 GHz;增加蒙皮,能整体提高环氧吸波泡沫塑料在厘米波段和8 mm波段的吸波性能,吸收峰向低频移动,在8 mm波段,环氧吸波泡沫塑料的反射率值均在-11 dB以下。

关键词:环氧吸波泡沫塑料;混杂纤维;吸波性能;模压成型

中图分类号: TQ328.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)11-0042-05

Study on Absorbing Properties of Composite Foamed Epoxy with Hybrid Fibers

Song Yuhua, Wang Chaojie, Wan Xiaoxia, Liu Yongzhi, Wang Wen, Li Ning, Yu Wanzeng, Guo Yu, Pan Shibing

(Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China)

Abstract: Foamed epoxy with hybrid fibers were prepared by mould pressing, the reflectivity of absorbent foam was measured by radar absorbing materials (RAM) bow method. Effects of content of short magnetic fiber, short conductive fiber, sample thickness and sheet on radar absorbing properties of the foamed epoxy were investigated. The results indicate that in the range of content, as contents of short magnetic fiber and short conductive fiber increase, radar absorbing properties of the foamed epoxy increase. The increasing of the sample thickness could enhance the absorbing property of foamed epoxy, when the thickness increase to a certain extent, the absorbing property of foam plastics decrease when the thickness of the sample is 10 mm, the effective bandwidth of absorbing epoxy foam satisfying -10 dB is 16 GHz within the frequency bands of 8-18 GHz, 26.5-40 GHz. Sheet accession could increase radar absorbing properties of the absorbing epoxy foam in cm-band and 8 mm-band, absorbing peak moved to the lower frequency, in the 8 mm band, the reflectivity of absorbing epoxy foam is below -11 dB.

Keywords: absorbing epoxy foam; hybrid fiber; absorbing property; mould pressing

随着军用雷达技术的不断发展,雷达隐身材料的研究得到空前的发展。吸波泡沫塑料作为一种重要的结构/隐身功能一体化复合材料,不仅具有良好的宽频吸波特性和质轻、耐湿热、耐腐蚀、易加工成曲率复杂样件等优点^[1],成为新一代武器装备实现隐身化不可缺少的重要材料。

国外在吸波泡沫塑料技术方面的研究起步较早,已见许多报道^[2]。美国专利(US6231794)公开了一种可以改善泡沫吸波性能的制备方法,将导电

材料分散于网状结构泡沫中,采用真空工艺得到一种质轻宽频吸波泡沫材料^[3]。目前泡沫夹芯材料已在多种军用战机中获得应用,包括美国F-117A、B-2、F-22等战机型号^[4]。

国内对吸波泡沫塑料的研究较晚,且多以软质泡沫或非承载吸波泡沫研究报道为主,其应用形式以尖劈、角锥为主;而对硬质结构吸波泡沫塑料的研究较少,但在电磁吸收与屏蔽方面也取得一定进展^[5]。

通信作者: 宋宇华,高级工程师,主要从事结构隐身工作 E-mail: syuhua1999@163.com

收稿日期: 2020-09-03

引用格式: 宋宇华,王超杰,万晓霞,等. 混杂纤维填充环氧泡沫塑料吸波性能研究[J]. 工程塑料应用,2020,48(11):42-46.

Song Yuhua, Wang Chaojie, Wan Xiaoxia, et al. Study on absorbing properties of composite foamed epoxy with hybrid fibers[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11): 42-46.

环氧树脂泡沫塑料具有力学性能好、耐水性及耐化学腐蚀性能优异、热稳定性高等特点^[6-7];同时环氧树脂泡沫塑料价格低廉,常温固化且时间较短,使用比较方便,因此环氧树脂泡沫塑料在建筑、交通、工业及国防等领域中得到广泛应用^[8-9]。笔者以环氧树脂泡沫塑料为基体,添加短切磁性纤维、短切导电纤维、蒙皮制备环氧树脂吸波泡沫塑料,采用雷达吸波材料(RAM)弓形法测试了吸波泡沫塑料的反射率,研究短切磁性纤维和短切导电纤维含量对吸波泡沫复合材料吸波性能的影响;制备不同厚度的环氧树脂吸波泡沫塑料样件,研究厚度对吸波泡沫塑料吸波性能的影响;在吸波泡沫塑料上表面增加蒙皮,讨论蒙皮对吸波泡沫塑料吸波性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂预聚体:XD6638,东莞市立德环保科技有限公司;

短切磁性纤维:华中科技大学;

短切导电纤维:自制。

1.2 主要仪器及设备

高速变频分散机:JFS-1500型,常州耀凯电子科技有限公司;

电子天平:KD-2000NEC型,福州科迪电子科技有限公司;

模具:自制;

反射率测试系统:自制。

1.3 试样制备

试样的制备采用复合材料成型工艺压缩模塑,又称模压成型法。泡沫样板制备过程可分为以下几个步骤,见图1。

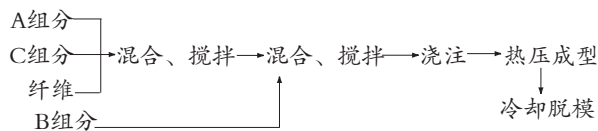


图1 泡沫样板制备过程

环氧树脂预聚体组分配比(A:B:C)为1:2:3,第一次搅拌时间为1 min,第二次搅拌时间为30 s。先将模具放入75℃烘箱中预热,将纤维加入A+C组分中,混合搅拌,再加入B组分混合搅拌均匀,注入预热好模具中,用腻子刀摊平,合模,放入75℃烘箱中,静置1 h,关闭烘箱,冷却后脱模。

1.4 反射率测量

采用RAM弓形测试法,测试系统工作方式

为扫频,样品尺寸为180 mm×180 mm×10 mm,衬板为光滑铝板,入射角为2.5°,测试装置如图2所示。

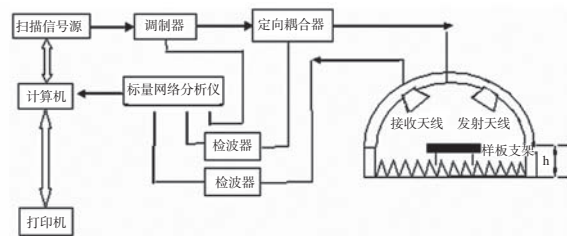


图2 反射率测试装置结构

2 结果与讨论

2.1 短切磁性纤维对环氧吸波泡沫塑料吸波性能影响

保持短切导电纤维的含量不变,改变短切磁性纤维含量,制备一系列环氧吸波泡沫塑料,其反射率与频率关系曲线对比如图3所示。

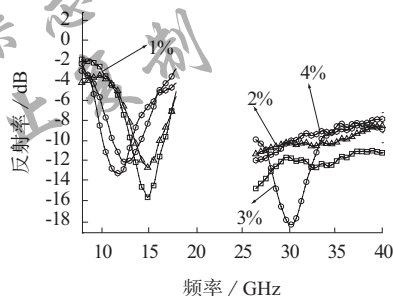


图3 不同短切磁性纤维含量时环氧吸波泡沫复合材料吸波性能

由图3可以看出,短切磁性纤维含量改变,环氧吸波泡沫塑料的吸波性能有较大改变。当短切磁性纤维含量为1%时,环氧吸波泡沫塑料在13.2~16.56 GHz、26.5~40 GHz内,反射率值在-10 dB以下,最小反射率在14.96 GHz达到-15.46 dB。当短切磁性纤维含量增加到2%时,在厘米波段环氧吸波泡沫塑料的反射率峰值位置不变,但峰值变小;在8 mm波段反射率曲线趋势不变,但反射率值整体变大,环氧吸波泡沫塑料吸波性能变差。继续加大短切磁性纤维的含量,在厘米波段,反射率峰值位置逐渐向低频移动,峰值大小稍有改变;在8 mm波段,短切磁性纤维含量为3%的环氧吸波泡沫塑料出现一强吸收峰,但相对于满足-10 dB的有效带宽较窄。因此,随着短切磁性纤维含量增大,环氧吸波泡沫塑料的吸波性能减弱,根据Gurland理论^[10],复合材料形成导电网络的几率取决于每个导电粒子与周围粒子接触的统计平均数 n 和每个颗粒的空间最大接触数 Z 。当 $n > 1$ 时,开始形成断续的导电

网络; $1.3 \leq n \leq 1.5$ 时,形成连续导电网络; $n > 2$ 时,导电网络完全形成,电阻率不再随导电粒子的增多而降低。当短切磁性纤维含量较低时,还没有形成导电网络,纤维含量增加,由磁性纤维引起的涡流损耗、磁滞损耗等损耗增多,环氧吸波泡沫塑料的吸波性能增强;纤维含量继续增多,纤维吸收剂的分布发生改变,在吸波材料内部纤维相互搭接,形成了导电网络,从而影响了其电导率与电磁参数,降低了样品对入射雷达波的损耗,使样品的吸波性能变差。据资料所知^[11],如果吸波材料的电阻率过小,就会对电磁波形成反射而不是吸收,因此,短切磁性纤维的填充量不能太高,这样才能保证纤维在吸波基体中相互分散,以得到较高的电阻率,保证吸波材料的吸波性能。

2.2 短切导电纤维对环氧吸波泡沫塑料吸波性能影响

保持短切磁性纤维的含量不变,改变短切导电纤维含量,制备一系列环氧吸波泡沫塑料,其反射率与频率关系曲线对比如图4所示。

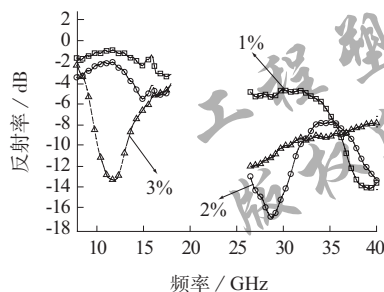


图4 不同短切导电纤维含量时环氧吸波泡沫复合材料吸波性能

由图4可以看出,随着短切导电纤维含量的增加,环氧吸波泡沫塑料的吸波性能增强,短切导电纤维含量为3%的环氧吸波泡沫塑料在厘米波出现吸收峰,峰值为-13 dB。由此可见,短切导电纤维的含量在一定范围内增加时,泡沫塑料的吸波能力增强。短切导电纤维对电磁波的吸收,是由于电磁波入射到复合材料时,短切导电纤维作为电偶极子与入射电磁波谐振而产生的谐振感应电流,滞后的极化电流对电磁波产生吸收作用及材料对电磁波的干涉作用而形成的^[12-13]。当短切导电纤维含量较低时,短切导电纤维作为相对独立的电偶极子存在,对电磁波的吸收是各电偶极子相互叠加的结果;然而随着短切导电纤维含量的增加,独立的电偶极子数量增加,对电磁波的吸收能力增强;当短切导电纤维的含量增加到一定程度时,电偶极子之间的距

离缩短,电力线相互排斥,环氧吸波泡沫塑料的介电常数发生变化,导致对入射电磁波表现为反射特征。

对于有金属衬底的吸波层板的反射率 R 可表示为^[14]:

$$R = 20 \lg \frac{\left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \tanh \gamma d - 1}{\left(\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \tanh \gamma d + 1} \quad (1)$$

式中: $\gamma = i2\pi f(\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r \mu_r)^{1/2}$ 为传播常数; ϵ_r 、 μ_r 分别为介质的相对复介电常数和相对复磁导率; d 为样品厚度。

因此,反射率 R 为频率 f 、电磁参数 ϵ_r 、 μ_r 和厚度 d 的函数。在厚度 d 相同的情况下,对某频段有一最佳短切导电纤维填充量,使该频段内的吸波性能最好。

2.3 厚度对环氧吸波泡沫塑料吸波性能影响

保持环氧吸波泡沫中纤维吸收剂的含量不变,改变泡沫塑料的厚度,制备一系列的环氧吸波泡沫塑料,其反射率与频率关系曲线对比如图5所示。

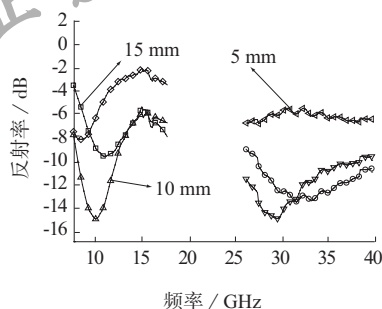


图5 不同厚度时环氧吸波泡沫复合材料吸波性能

由图5可以看出,环氧吸波泡沫塑料厚度为5 mm时,吸波性能最差;厚度增大,吸波泡沫塑料的吸波性能增强,当厚度达到15 mm时,在8~18 GHz,吸波泡沫塑料的吸波性能反而降低。在8~18 GHz、26.5~40 GHz频段内,厚度为10 mm的环氧吸波泡沫塑料满足-10 dB的有效带宽为16 GHz (8.4~12.4 GHz、26.5~38.4 GHz)。

随着环氧吸波泡沫塑料厚度的增加,样件中纤维吸收剂数目增多,材料的吸波性能有一个增强的过程,但吸波性能并非随厚度增加而单调的增强。材料的介电常数和磁导率随着材料中纤维含量的不同和频率的变化而发生改变,使得在每个频率点其厚度都为该频率下的电磁波在材料中波长的四分之一的奇数倍时,可以得到最小的反射^[15]。电磁波在介质中的波长为:

$$\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r} \quad (2)$$

式中: λ_0 为真空中的波长; ϵ_r 、 μ_r 分别为介质的相对复介电常数和相对复磁导率。令:

$$d = \frac{(2n+1)\lambda}{4} \quad (3)$$

其中, $n=0,1,2,3, \dots$, 此时材料的厚度 d 是介质波长四分之一的奇数倍。

把式(2)代入式(3)中,得出:

$$d = \frac{(2n+1)\lambda_0}{4\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (4)$$

所以,对于不同的介质,具有不同的介电常数和磁导率,得到最小反射率的厚度也是不同的。因而,对于短切纤维吸收剂填充量不同的发泡材料,在不同的频率下,所对应的具有最好吸波性能的材料厚度不同。

2.4 蒙皮对环氧吸波泡沫塑料吸波性能研究

首先制备环氧吸波泡沫塑料,然后用同样的模压成型法在复合材料的表面制备厚度为 2 mm 的蒙皮。反射率与频率关系曲线对比如图 6 所示。

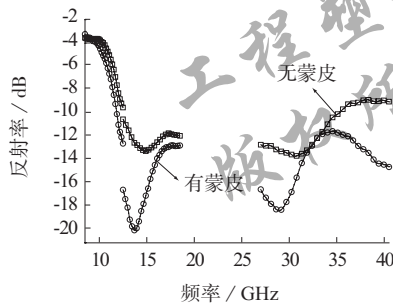


图 6 蒙皮对环氧吸波泡沫复合材料吸波性能影响

由图 6 可以看出,与无蒙皮的环氧吸波泡沫塑料相比,在整个厘米波段和 8 mm 波段,蒙皮的加入提高了环氧吸波泡沫塑料的吸波性能,吸收峰位置向低频移动。含有蒙皮的环氧吸波泡沫塑料,在厘米波段,反射率值小于 -10 dB 的带宽为 6.64 GHz,反射率峰值在 13.2 GHz 为 -19.93 dB;在整个 8 mm 波段,反射率值均在 -11 dB 以下,反射率峰值在 28.39 GHz 为 -18.247 dB。表面增加不含吸收剂的蒙皮^[16],蒙皮的电磁参数相对接近于空气的电磁参数,使入射电磁波最大限度的进入到吸波材料中,减少了表面电磁波的反射;同时蒙皮的增加导致了整体样板厚度的增加,能够匹配较大波长的电磁波,相应的吸收峰频率就越低,有助于低频材料的研发。

3 结论

(1) 在一定范围内,随着含量的增加,短切磁性纤维和短切介电纤维都能提高环氧吸波泡沫塑料的吸波性能,但当含量高于一定值后,对电磁波形成反射,从而降低环氧吸波泡沫塑料的吸波性能;同时填充量较高时,在基体中易分散不均。

(2) 在一定范围内,随着样件厚度的增加,环氧吸波泡沫塑料的吸波性能增强,厚度增加到一定程度后,吸波性能反而降低;样件厚度为 10 mm 时,8 ~ 18 GHz、26.5 ~ 40 GHz 频段内,环氧吸波泡沫塑料满足 -10 dB 的有效带宽为 16 GHz。

(3) 在环氧吸波泡沫塑料表面增加蒙皮,能整体提高厘米波段和 8 mm 波段的吸波性能,吸收峰向低频移动,整个 8 mm 波段,反射率值均在 -11 dB 以下。

参考文献

- [1] 李娟. 泡沫夹芯结构复合材料的吸波性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
Li Juan. Study on the absorbing properties of foam sandwich composites [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [2] 胡爱军, 王志媛, 金铮, 等. 泡沫夹芯型吸波隐身结构复合材料的发展趋势 [J]. 宇航材料工艺, 2009(1): 1-4.
Hu Aijun, Wang Zhiyuan, Jin Zheng, et al. Advances in foamed core sandwich structure composites with absorbing stealth materials [J]. Aerospace Materials Technology, 2009(1): 1-4.
- [3] Woldanski G L. Process for making a low density foam filled reticulated absorber by means of vacuum: US 6321794 [P]. 2001-11-27.
- [4] 王伟力. 隐身技术发展动态 [J]. 飞航导弹, 2001(1): 26-29.
Wang Weili. The dynamic development of stealth technology [J]. Winged Missiles Journal, 2001(1): 26-29.
- [5] 鹿海军, 刘晓丽, 刘义, 等. 结构吸波泡沫及其夹层结构隐身材料的研究现状 [J]. 材料工程, 2011(S): 9-14.
Lu Haijun, Liu Xiaoli, Liu Yi, et al. Development and progress in structural foam absorber and foamed stealth sandwich composites [J]. Materials Engineering, 2011(S): 9-14.
- [6] 陈平, 刘胜平. 环氧树脂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 235-243.
Chen Ping, Liu Shengping. Epoxy resin [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999: 235-243.
- [7] 王宝春, 郑威, 袁秀梅, 等. 新型环氧树脂泡沫塑料制备及其性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2010, 38(4): 30-32.

- Wang Baochun, Zheng Wei, Yuan Xiumei, et al. Study on the synthesis and properties of new epoxy foam plastic[J]. Application of Engineering Plastics, 2010, 38(4):30-32.
- [8] Stefani P M, Barchi A T, Sabugal J, et al. Characterization of epoxy foam[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90: 2992-2996.
- [9] 陈欢庆, 郑水蓉, 孙曼灵. 环氧泡沫塑料的研究与应用[J]. 粘接, 2009(2):71-75.
- Chen Huanqing, Zheng Shuirong, Sun Manling. Research and application of epoxy foam plastics[J]. Adhesion in China, 2009(2):71-75.
- [10] 解娜, 焦清介, 臧充光, 等. LDPE-Ni / 多晶铁纤维电磁屏蔽包装材料研究[J]. 包装工程, 2006, 27(1):10-12.
- Xie Na, Jiao Qingjie, Zang Chongguang, et al. Study on the properties of LDPE-nickel / crystal iron fiber electromagnetic shielding packaging materials[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1):10-12.
- [11] 周馨我. 功能材料[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002:234-267.
- Zhou Xinwo. Journal of functional materials[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002:234-267.
- [12] 黄远, 李家俊, 马铁军, 等. 利用碳纤维毡制备结构吸波材料的研究[J]. 复合材料学报, 2000, 17(1):28-31.
- Huang Yuan, Li Jiajun, Ma Tiejun, et al. Study on the structural microwave absorbing material made with carbon-felt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(1):28-31.
- [13] 赵乃勤, 曹婷, 师春生, 等. 碳纤维(碳毡)/树脂复合材料的研究[J]. 复合材料学报, 2003, 20(5):63-67.
- Zhao Naiqin, Cao Ting, Shi Chunsheng, et al. Microwave absorbing properties of carbon fiber(carbon fiber felt) / epoxy composites[J]. Acta Material Composite Sinica, 2003, 20(5):63-67.
- [14] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- Ruan Yingzheng. Radar cross section and stealth technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [15] 周永江, 程海峰, 曹义, 等. 单层雷达吸波材料研究[J]. 材料工程, 2006(4):8-11.
- Zhou Yongjiang, Cheng Haifeng, Cao Yi, et al. Study of single layer radar wave absorbing materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(4):8-11.
- [16] 马科峰, 张广成, 刘良威, 等. 夹层结构复合材料的吸波隐身技术研究进展[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(6):53-57.
- Ma Kefeng, Zhang Guangcheng, Liu Liangwei, et al. Research progress of technology for sandwich structural absorbing stealthy composite materials[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(6):53-57.

.....

(上接第32页)

- [8] 张海敏. 基于木塑复合材料的现代家居造型设计与工艺分析[J]. 塑料工业, 2017, 45(12):98-101.
- Zhang Haimin. Modern home furnishing design and process analysis based on wood-plastic composite materials[J]. Plastic Industry, 2017, 45(12):98-101.
- [9] Xiong Zhu, Li Chao, Ma Songqi, et al. The properties of poly(lactic acid) / starch blends with a functionalized plant oil: tung oil anhydride[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 95(1):77-84.
- [10] Jones N A, Atkins E D T, Hill M J J. Polym. Sci., Part B (Polym. Phys), 2000, 38: 1209-1221.
- [11] Jones N A, Atkins E D T, Hill M J. Macromolecules, 2000, 33: 2642-2650.
- [12] Zhang Yang, Xue Ping, Ding Yun, et al. Improvement of mechanical properties of wood-plastic composite floors based on the optimum structural design[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2016, 29(4):444-454.
- [13] Ray S S, Bousmina M. Effect of organic modification on the compatibilization efficiency of clay in an immiscible polymer blend[J]. Macromol Rapid Commun, 2005, 26: 1639-1646.
- [14] 于杰, 严伟, 秦舒浩, 等. SMA、OMMT 对 PA6 / ABS 合金聚集态结构及性能影响的研究[J]. 高分子学报, 2009(9):896-902.
- Yu Jie, Yan Wei, Qin Shuhao, et al. Study on the influence of SMA and OMMT on the aggregate structure and properties of PA6 / ABS alloy[J]. Acta Polymerica Sinica, 2009(9):896-902.
- [15] Sheshmani S, Ashori A, Fashapoyeh M A. Wood plastic composite using graphene nanoplatelets[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 58(7):1-6.

欢迎投稿、欢迎订阅、欢迎刊登广告