

聚丙烯激光透射焊接工艺及性能研究

王传洋 沈璇璇

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021

摘要 利用激光透射焊接技术对聚丙烯(PP)塑料进行焊接,研究了激光焊接热塑性塑料的可行性。通过正交试验法研究了激光功率、焊接速度、碳黑含量对焊接强度和焊接质量的影响。探讨了线能量对焊接强度的影响。结果表明:对PP材料来说,激光功率是首要影响因素,其次是焊接速度,最后是碳黑含量。最佳的焊接工艺参数为激光功率50 W,焊接速度15 mm/s,碳黑质量分数0.15%。线能量对焊接质量有较大影响,线能量在1.5~3 J/mm可得到较好强度的焊件。

关键词 激光光学;激光透射焊接;焊接参数;聚丙烯塑料;线能量

中图分类号 TG439.4; TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.021403

Techniques and Performance Research on Laser Transmission Welding of Polypropylene Plastics

Wang Chuanyang Shen Xuanxuan

School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract Polypropylene (PP) plastic is welded by using laser transmission welding technology. Feasibility of laser welding PP plastics is discussed. The orthogonal experiment is applied to study the influence of laser power, welding speed and mass fraction of carbon black on the welding strength and welding quality. Effect of line energy on welding strength is discussed. The results show that the laser power is the primary influence factor, followed by the welding speed, the last is the mass fraction of carbon black. The best welding parameters for PP are laser power of 50 W, welding speed of 15 mm/s and mass fraction of carbon black of 0.15%. Line energy has an impact influence on welding quality. When line energy is in the range of 1.5~3 J/mm, the higher welding quality can be attained.

Key words laser optics; laser transmission welding; technique parameters of welding; polypropylene plastics; line energy

OCIS code 140.3070; 140.3430; 140.3390

1 引言

激光透射焊接塑料技术是一种新兴的焊接技术,相比于传统的塑料焊接方式如热板焊接法、热气焊接法、电磁感应焊接法、电阻感应焊接法、摩擦焊接法、超声波焊接法以及射频焊接法等,该方法是一种无接触、节能环保绿色的焊接方法,而且焊速高、热影响区小、无残渣、键合强度高、焊缝变形小,已被逐步应用于汽车工业、生物医药装备制造以及微电机系统(MEMS)中微型机械的制造等行业,得到了国内外的广泛关注^[1-4],具有广阔的发展前景。

对激光透射焊接的研究始于20世纪90年代后期,为了评估塑料材料对激光透射焊接的适应性,需要考虑聚合物基体的光学特性及其成分组成,这对于研究热塑性塑料对激光能量的透射、散射以及焊接结合面上的激光强度是非常重要的。德国亚琛工业大学的Haberstroh等^[5]对激光透射焊接结晶态聚合物聚对苯二

收稿日期: 2014-09-03; 收到修改稿日期: 2014-09-12; 网络出版日期: 2015-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(51475315)、中国博士后基金项目(32317958)

作者简介: 王传洋(1972—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事先进制造技术理论及装备设计、高分子材料加工方法、关键技术及模具创新设计等方面的研究。E-mail: cywang@suda.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

甲酸丁二醇酯(PBT)进行了研究,阐述了结晶态聚合物的不同结晶状态对焊接质量的影响。通过对聚甲醛和聚碳酸酯的三维焊接研究,阐述了结晶态聚合物比无定形聚合物的透射率低,焊接需要功率大^[6]。袁晖等^[7]建立了半导体激光焊接系统,在此系统上进行了热塑性塑料的激光焊接试验,研究了不同颜料有机玻璃材料组合的激光焊接可行性,进行了有机玻璃的激光焊接试验,并对焊接样品的焊接强度进行了测试,焊接样品的测试强度达到 58 MPa。王健超等^[8]进行了 PMMA/ABS 的热塑性塑料激光透射焊接工艺研究及微观分析,并研究了夹具和能量密度对焊接的影响。王霄等^[9-10]阐述了基于全息技术的激光透射塑料焊接方法,并对其进行了理论研究,详细叙述了该方法的基本原理,并采用英国焊接学会发明的 Clearweld 吸收剂,进行了透明聚苯乙烯和聚氯乙烯异种塑料之间的激光透射焊接试验。总之,目前国内外研究主要集中在焊接工艺参数对焊接质量的影响方面,研究表明,激光的光强分布^[11-14]、焊接速度^[15-16]、透光焊接件的光学性能^[17]及吸光剂^[18]是影响键合质量的主要因素。

本文对聚丙烯(PP)塑料激光透射焊接的机理和过程进行了深入研究。通过试验和分析,优化工艺参数,达到提高焊接强度和焊接质量的目的,为塑料激光焊接的广泛应用提供一定的理论和试验依据。

2 激光透射焊接原理

激光透射焊接方法是让激光(波长一般为 800~1050 nm)透过透明试件,在上层试件与下层试件(添加一定量的吸光剂)的结合面,激光被下层试件吸收并产生热量,在热集中区域,塑料被熔化,通过热量在两种试件之间的传递,使塑料融化,热熔融状态下的塑料大分子在键合压力和热膨胀的作用下,相互扩散和缠结,产生范德华力并形成强的键合,如图 1 所示。

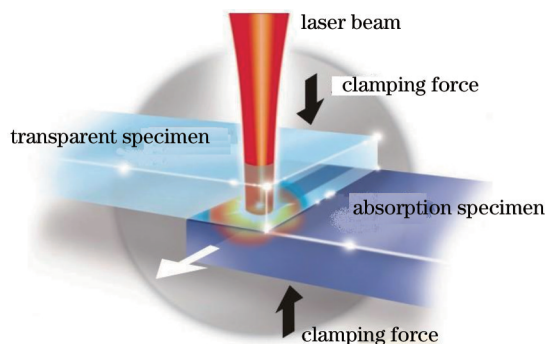


图 1 激光透射焊接原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser transmission welding of plastics

3 试验设备材料及方案

3.1 试验设备

1) 注塑机:SZ-1300A 型注塑机;2) 透射式激光焊接器:WFD120 型半导体激光器焊接机;3) 拉伸试验机:电子万能试验机 YU-802A;4) 光学显微镜:LEICA DM IRM 显微镜。

3.2 试验正交试验设计

PP 材料试件的焊接功率范围为 30~70 W,焊接速度变化范围为 15~55 mm/s,上层透过试件为透明 PP 试件,下层吸收试件分 3 种,含碳量分别为 0.05%、0.1%、0.15%(质量分数)。

试验主要考虑 3 个影响因素,分别为因素 A(激光功率)、因素 B(焊接速度)和因素 C(吸收件的含碳量);其中含碳量为三水平,其他均为五水平。试验设计采用正交试验法和拟水平法。碳黑质量分数的水平 1 为 0.05%,水平 2 为 0.1%,水平 3 为 0.15%。运用拟水平法,取水平 4 为 0.1%,即水平 2;取水平 5 为 0.15%,即水平 3。问题即转化为三因素五水平的问题,正交试验表即可参考采用 L25(5⁶)正交表进行设计。各因素和水平如表 1 所示。

3.3 试件的制备及测试

试验用 PP 型号为上海石化公司生产的 M450E,具体参数如表 2 所示。

表1 试验参数配置表

Table 1 Configuration of experimental parameters

| Level | A | B | C |
|-------|----------------|--------------------|----------------------------------|
| | Laser power /W | Weld speed /(mm/s) | Mass fraction of black carbon /% |
| 1 | 30 | 15 | 0.05 |
| 2 | 40 | 25 | 0.10 |
| 3 | 50 | 35 | 0.15 |
| 4 | 60 | 45 | 0.10 |
| 5 | 70 | 55 | 0.15 |

表2 PPM450E 主要参数

Table 2 Parameters of PPM450E

| Capability | Value |
|--------------------------------|----------|
| Density /(g·cm ⁻³) | 0.9~0.92 |
| Strength /MPa | 29.4 |
| Bending strength /MPa | 49~58.8 |

本试验所用的吸收剂为碳黑,在注塑PP材料吸收件时,分别以碳黑质量分数0.05%、0.1%和0.15%直接混合添加进注塑材料中,注塑成形,即可得到6组不同材料或碳黑含量的吸收件。试验中夹具的设计分为上下夹具,下夹具固定在工作台上,上夹具有不同大小的焊接区域可以选择。激光透射焊接时,夹具可提供足够的的夹紧力以保证焊接顺利完成。

拉伸测试主要是测试焊接件所能承受的最大拉力,是在微机控制电子万能试验机上完成的。焊缝显微观测试验是通过体式显微镜对焊缝进行观察并拍照,分析焊缝焊接情况,观察焊缝精度,并根据放大比例计算焊缝宽度。

4 试验结果及分析

4.1 极差分析

通过正交试验法列表计算得到样品的拉伸测试数据,选定最优参数,如表3所示。

表中 k_1 为因素A、B、C的第1水平所在的试验中考察指标之和, k_2 为因素A、B、C的第2水平所在的试验中考察指标之和, k_3 为因素A、B、C的第3水平所在的试验中考察指标之和, k_4 为因素A、B的第4水平所在的试验中考察指标之和, k_5 为因素A、B的第5水平所在的试验中考察指标之和,对于因素A和B, $k_1=(K_1)/5$, $k_2=(K_2)/5$, $k_3=(K_3)/5$, $k_4=(K_4)/5$, $k_5=(K_5)/5$ 。对于因素C, $k_1=(K_1)/5$, $k_2=(K_2)/5$,而 $k_3=(K_3)/10$, $k_4=(K_4)/10$, $k_5=(K_5)/10$ 。从表3可知,A因素最优的是第5水平,B因素最优的是第1水平,C因素最优的是第3水平,即焊接功率为70W,焊接速度为15mm/s,碳黑质量分数为0.15%,对比试验表可知,最优试验即为试验21。

因素A的极差最大,说明激光功率的水平改变对试验指标的影响最大,其次是焊接速度,极差最小的是吸收件的碳黑含量,说明因素C的水平改变对试验指标的影响最小。

表3 PP焊接工艺参数极差分析

Table 3 Analysis of PP welding range parameters

| Number | A | B | C | Examine indicator |
|--------|-------------|---------------|-------------------------------|---------------------------|
| | Laser power | Welding speed | Mass fraction of carbon black | Tensile strength <i>N</i> |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 164 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 130 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 140 |
| 4 | 1 | 4 | 2 | 61 |
| 5 | 1 | 5 | 3 | 92 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 242 |
| 7 | 2 | 2 | 3 | 183 |
| 8 | 2 | 3 | 2 | 158 |

续表3

| Number | A | B | C | Examine indicators |
|--------|-------------|---------------|-------------------------------|----------------------|
| | Laser power | Welding speed | Mass fraction of carbon black | Tensile strength N |
| 9 | 2 | 4 | 3 | 120 |
| 10 | 2 | 5 | 1 | 127 |
| 11 | 3 | 1 | 3 | 333 |
| 12 | 3 | 2 | 2 | 235 |
| 13 | 3 | 3 | 3 | 240 |
| 14 | 3 | 4 | 1 | 221 |
| 15 | 3 | 5 | 2 | 147 |
| 16 | 4 | 1 | 2 | 267 |
| 17 | 4 | 2 | 3 | 283 |
| 18 | 4 | 3 | 1 | 251 |
| 19 | 4 | 4 | 2 | 197 |
| 20 | 4 | 5 | 3 | 175 |
| 21 | 5 | 1 | 3 | 331 |
| 22 | 5 | 2 | 1 | 278 |
| 23 | 5 | 3 | 2 | 226 |
| 24 | 5 | 4 | 3 | 225 |
| 25 | 5 | 5 | 2 | 180 |
| K_1 | 587 | 1337 | 1041 | |
| K_2 | 830 | 1109 | 1843 | |
| K_3 | 1176 | 1015 | 2122 | |
| K_4 | 1173 | 824 | | |
| K_5 | 1240 | 721 | | |
| k_1 | 117.4 | 267.4 | 208.2 | |
| k_2 | 166 | 221.8 | 184.3 | |
| k_3 | 235.2 | 203 | 212.2 | |
| k_4 | 234.6 | 164.8 | | |
| k_5 | 248 | 144.2 | | |
| Best | 5 | 1 | 3 | |
| Range | 130.6 | 123.2 | 27.9 | |

4.2 线能量对剪切强度的影响

本研究采用线能量来表征焊接能量,其定义如下

$$J = \frac{P}{v}, \quad (1)$$

式中 J 为线能量, P 为激光功率, v 为焊接速度。

在对 PP 焊件进行测试焊接时发现, PP 材料的激光透射焊接较容易实现,且能进行焊接的线能量较宽。当线能量小于 1.0 J/mm 时,焊接不牢固,焊缝不明显;当线能量在 1~1.5 J/mm 之间,可以焊接上,但是焊接强度不高,两焊件接触面材料熔融较少,焊缝较浅;当线能量在 1.5~3 J/mm 时,焊接强度较大,焊缝清晰且熔深较大,溢料少,焊接精度高;当线能量在 3~4.67 J/mm 时,也能得到清晰的焊缝和高的焊接强度,但是有溢料产生。不同碳黑含量情况下,线能量对剪切强度的影响规律如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出,碳黑质量分数为 0.05% 时,剪切强度与线能量大致呈线性增长关系,随着线能量的增大剪切强度也相应增加。由图 2(b)可知,碳黑质量分数为 0.1% 时,线能量在 0.67~2.0 J/mm,剪切强度随线能量的增大而增加,最大为 32.3 MPa。当线能量大于 2.0 J/mm 时,剪切强度随线能量的增大逐渐降低,总体变化并不明显。因为随着线能量的增加,焊接焊缝的宽度会逐步增大,在剪切力变化不明显的情况下,剪切强度会呈现降低的趋势。由图 2(c)可知,碳黑质量分数为 0.15% 时,线能量在 0.55~3.33 J/mm 内,剪切强

度随线能量的增大而增加,最大为 51.5 MPa。当线能量大于 3.33 J/mm 时,剪切强度随线能量的增大明显降低。原因可能为当线能量过大时,焊接焊缝处会出现气泡和材料的热分解现象产生,容许剪切力会相应降低,因此,剪切强度也会降低。

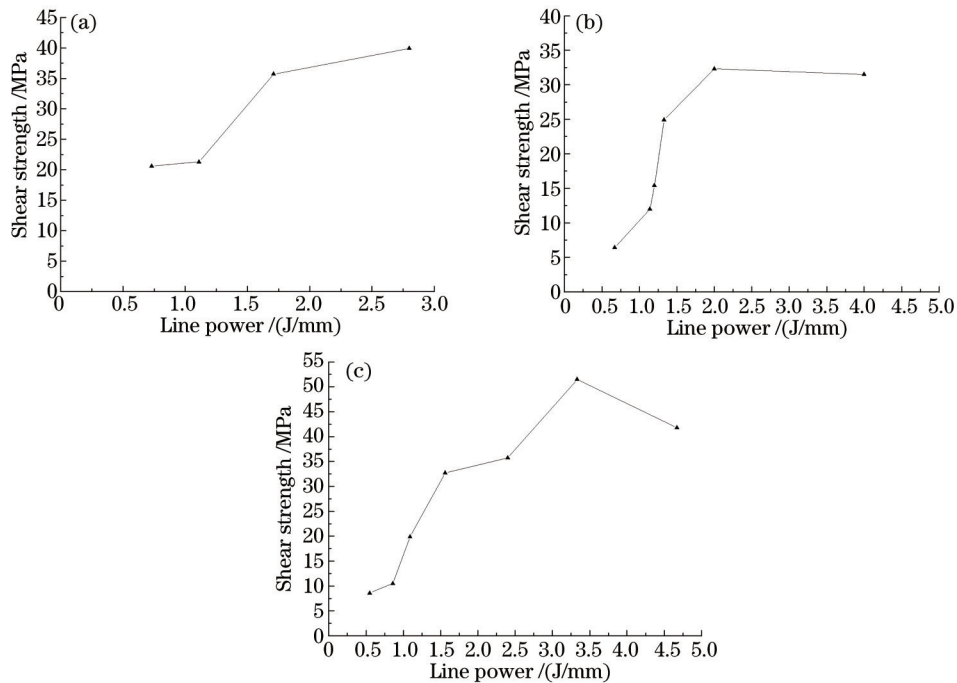


图2 碳黑质量分数为(a) 0.05%, (b) 0.1%, (c) 0.15%情况下线能量对剪切强度的影响

Fig.2 Effect of line power on shear strength with mass fractions of carbon black of (a) 0.05%, (b) 0.1% and (c) 0.15%

4.3 碳黑的质量分数对焊缝表观形貌的影响

激光功率为 70 W,焊接速度为 45 mm/s,不同碳黑含量对焊缝表观形貌的影响如图 3 所示,局部放大倍数为 100。不同碳黑含量焊接后对应的焊缝宽度分别为 1.77, 1.87 和 2.25 mm。对比图 3(a)~(c)可以看出,随着含碳量的增加,焊缝宽度逐渐增加,但是焊缝深度先增加后减小,这是因为含碳量低时吸收能量过小,熔融材料少,但含碳量过高时,温度集中在焊缝表面,导致焊缝较宽但熔深较小。

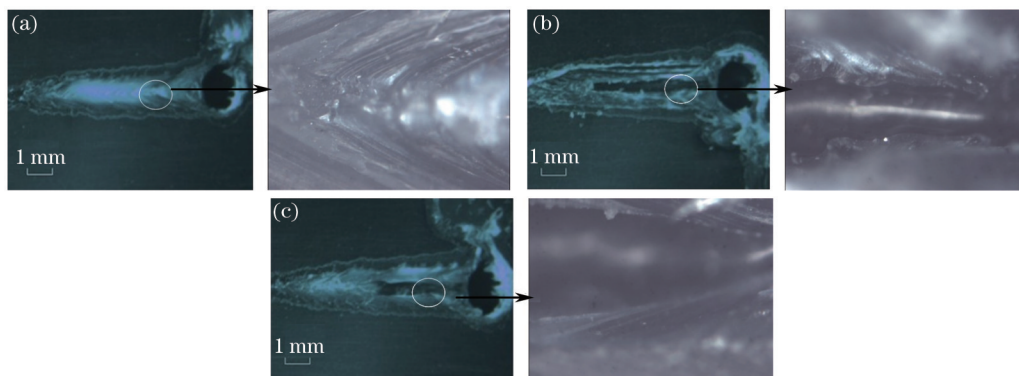


图3 碳黑质量分数为(a) 0.05%, (b) 0.1%, (c) 0.15%的焊缝形貌

Fig.3 Morphology of weld seams with different mass fractions of carbon black of (a) 0.05%, (b) 0.1% and (c) 0.15%

5 结 论

1) 在激光塑料透射焊接理论的基础上,采用半导体激光器焊接 PP 塑料,研究了激光焊接热塑性塑料的可行性,通过试验结果分析,证实了激光焊接是一种可行的、效果理想的塑料焊接方法。

2) 对试验焊接试件进行了拉伸试验,由正交试验分析得到,对 PP 材料来说,激光功率是影响焊接强度的首要因素,其次是焊接速度,最后是碳黑含量。

3) PP 材料的激光透射焊接较容易实现,且能进行焊接的线能量较宽。当线能量在 1.5~3 J/mm 时,焊接

强度较大,焊缝清晰且熔深较大,溢料少,焊接精度高。

4) 通过不同含碳量对焊缝表面形貌影响分析可知,随着含碳量的增加,焊缝宽度会逐渐增加,但是焊缝深度先增加后减小。表明适当控制碳黑的含量对形成焊接强度高,焊缝表面质量好的激光透射焊接制品有积极的作用。

参考文献

- 1 F Becker, H Potente. A step towards understanding the heating phase of laser transmission welding in polymers[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42(2): 365-374.
- 2 P A Hilton, I A Jones, Y K Ennish. Transmission laser welding of plastics[C]. SPIE, 2003, 4831: 44-52.
- 3 Chen Jie-wei, Zybko Jerry, Clements James. Diode laser bonding of planar MEMS, MOEMS, and microfluidic devices [C]. *Proceedings of Materials Research Society Symposium*, 2005. 309-316.
- 4 Grewell David. Modeling of Molecular Healing for Micro-Laser Welding of Plastics with Diffractive Optical Elements as Spatial Modulators[D]. Columbus: Ohio State University, 2005. 2-4.
- 5 Haberstroh E, Luetzeler R. Transmission welding of semi-crystallin plastics[C]. 64th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers, Plastics Encounter at ANTEC, 2006. 2268-2273.
- 6 Haberstroh E, Hoffmann W M, Poprawe R, *et al.*. Laser transmission joining in micro-technology[J]. *Microsyst Technol*, 2006, 12(7): 632-639.
- 7 Yuan Hui, Lai Jianjun, He Yungui. Experimental study on laser welding of thermoplastics[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(1): 8-21.
袁 晖, 赖建军, 何云贵. 热塑性塑料的激光焊接实验研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(1): 18-21.
- 8 Wang Jianchao, Qin Liming, Li Jiao. Technics and microcosmic analysis research of PMMA/ABS thermoplastic laser transmission welding[J]. *Applied Laser*, 2008, 28(4): 287-291.
王健超, 秦丽明, 李 娇. PMMA/ABS热塑性塑料激光透射焊接工艺研究及微观分析[J]. *应用激光*, 2008, 28(4): 287-291.
- 9 Wang Xiao, Ji Jinqing, Zhang Huizhong, *et al.*. Study of laser transmission welding of plastics based on holographic technology[J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (5): 510-512.
王 霄, 季进清, 张惠中, 等. 基于全息技术的激光透射塑料焊接研究[J]. *激光技术*, 2008, 32(5): 510-512.
- 10 Wang Xiao, Yang Kun, Zhang Huizhong, *et al.*. Experiment research on laser transmission welding of two different thermoplastics[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(5): 97-100.
王 霄, 杨 昆, 张惠中, 等. 两种不同热塑性塑料之间的激光透射焊接试验[J]. *焊接学报*, 2009, 30(5): 97-100.
- 11 Wei Hong, Wang Chuanyang. Technics and performance research of laser transmission welding polycarbonate plastics [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1103003.
韦 宏, 王传洋. 聚碳酸酯激光透射焊接工艺及性能研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1103003.
- 12 Zhang Wei, Zhang Qingmao, Guo Liang, *et al.*. Research on the properties of through-transmission laser welding of polycarbonate[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0703001.
张 卫, 张庆茂, 郭 亮, 等. 激光透射焊接聚碳酸酯接头性能研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0703001.
- 13 Wang Xiao, Zhang Huizhong, Ding Guoming, *et al.*. Laser transmission welding polypropylene plastics[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(3): 466-471.
王 霄, 张惠中, 丁国民, 等. 聚丙烯塑料激光透射焊接工艺[J]. *中国激光*, 2008, 35(3): 466-471.
- 14 Kritskiy A, Zak G, Bates P J. Laser welding of nylon tubes to plates using conical mirrors[C]. ANTEC, 2009. 1289-1294.
- 15 Ussing T, Petersen L V, Nielsen C B. Micro laser welding of polymer microstructure using low power laser diodes[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2007, 33(1-2): 198-205.
- 16 Wang X, Zhang C, Wang K, *et al.*. Multi-objective optimization of laser transmission joining of thermoplastics[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(8): 2393-2402.
- 17 Van De V, Erdman A G. Optical properties of plastics and their role for the modelling of the laser transmission welding process[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2006, 12(4): 166-173.
- 18 Anon J. Additives aid laser welding[J]. *Plastics, Additives, Compounding*, 2005, 7(1): 34-35.

栏目编辑: 张 雁