

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.02.010

玻纤增强聚丙烯缠绕管的层间性能及表面质量研究

郭兵兵,方立,周晓东

(华东理工大学化学工程联合国家重点实验室,上海 200237)

摘要:采用缠绕成型工艺制备了玻璃纤维增强聚丙烯管材,考察了预热通道温度和芯模温度对管材内外壁表面质量的影响;同时分别单独研究了芯模温度、热风枪加热角度、预浸带张力、缠绕速度和压力辊径向压力对管材层间剪切强度(ILSS)的影响,对成型工艺条件进行了优化,并利用扫描电子显微镜(SEM)对层间破坏试样进行了微观表征。结果表明,适当提高预热通道温度可使管材获得较好的外壁表面质量,提高芯模温度可使管材获得较好的内壁表面质量;管材的ILSS随着热风枪加热角度及缠绕速度的增加而提高,达到一定值时又出现下降,随芯模温度、预浸带张力和压力辊径向压力升高而在总体上呈增加趋势;在预热通道温度为220℃、芯模温度为160℃、热风枪加热角度为6°、预浸带张力为24 N、缠绕速度为4.71 m/min、压力辊径向压力为0.15 MPa的最优工艺条件下制备的缠绕管材的内外壁表面光滑,ILSS达到了29.60 MPa;SEM分析表明,管材中树脂和纤维结合紧密,层间粘结良好。

关键词:连续纤维;缠绕成型;工艺优化;层间剪切强度

中图分类号: TQ320.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)02-0042-05

Surface Quality and ILSS of Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composite Pipe Prepared by Filament Winding

Guo Bingbing, Fang Li, Zhou Xiaodong

(State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract : The glass fiber reinforced polypropylene composite pipe was prepared by using filament winding, the effects of preheat channel temperature and mandrel temperature on the surface qualities of inner and outer walls of the pipe were examined severally, in addition, the effects of mandrel temperature, hot air gun angle, prepreg tape tension, winding speed and pressure roller radial pressure on the interlaminar shear strength (ILSS) of the pipe were studied and the filament winding process conditions were optimized, then SEM was used to obtain the interlaminar fracture microscopic picture of the pipe. The results reveal that a wonderful surface quality of the outer wall can be obtained by improving the preheat channel temperature properly and a fabulous surface quality of the inner wall can be obtained by improving the mandrel temperature. With the mandrel temperature, prepreg tape tension and pressure roller radial pressure increasing, the ILSS becomes larger in general, and with the hot air gun angle and winding speed increasing, the ILSS increases firstly and decreases lastly. Under the optimal process conditions of that the preheat channel temperature is 220℃, the mandrel temperature is 160℃, the hot air gun angle is 6°, the prepreg tape tension is 24 N, the winding speed and pressure roller radial pressure is 4.71 m/min and 0.15 MPa respectively, the inner and outer walls of the prepared pipe are smooth and the ILSS reaches 29.60 MPa. SEM analysis shows that the combination of the fiber and matrix resin in the pipe is tight and the interlaminar bonding is good.

Keywords : continuous fiber ; filament winding ; process optimization ; interlaminar shear strength

目前,纤维增强热固性树脂基复合材料的应用技术已较为成熟,但是传统的纤维增强热固性树脂基复合材料的韧性较差,预浸带的存储期较短,加工成型周期长。而纤维增强热塑性树脂基复合材料可以克服这些缺点,具有韧性高、加工成型周期短、预浸带存储期长、材料可回收二次利用等特点^[1-3]。自20世纪70年代,纤维增强热塑性树脂基复合材料的成型技术越来越受到重视,研究十分活跃,在航空航天、汽车、家电、化工等领域得到广泛应用。

连续纤维的缠绕成型技术是复合材料成型加工的一种重要工艺,广泛应用于缠绕成型各种回转体制品,诸如各种储罐、塔器、火箭发动机壳体、飞机机身等^[4-7]。传统研究主要集中在缠绕线型、缠绕角度等对制品力学性能的影响上,而对缠绕工艺的报

联系人:周晓东,教授,主要从事聚合物基复合材料制备及成型技术,聚合物材料的界面和嵌段共聚物的组装行为及相关功能材料的研究

收稿日期:2013-12-18

道较少。笔者主要研究连续纤维增强聚丙烯 (PP) 管材的缠绕成型工艺,分别单独考察了预热通道温度、芯模温度、热风枪加热角度、预浸带张力、缠绕速度和压力辊径向压力等工艺参数对管材表面质量和层间剪切强度 (ILSS) 的影响,并对缠绕成型工艺条件进行了优化。

1 实验部分

1.1 主要原材料

玻璃纤维 (GF): 352, 连续无捻粗纱, 巨石集团有限公司;

聚丙烯 (PP): Y1600, 中国石化上海石油化工股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

缠绕成型设备: 自制;

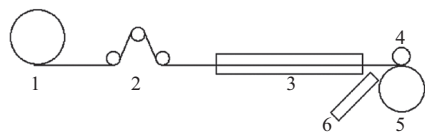
模具控温机: MCO-9H 型, 上海通盛冷冻设备有限公司;

万能电子试验机: CMT4204 型, 深圳市新三思材料检测有限公司;

场发射扫描电子显微镜 (SEM): S-4800, 日本日立公司。

1.3 管材的缠绕成型

首先利用熔融浸渍法制备了连续 GF 增强 PP 预浸带, GF 质量分数控制在 30%。然后, 采用自制的缠绕成型设备制备了 GF 增强 PP 缠绕管材。工艺流程如图 1 所示。



1—放带卷; 2—张力控制系统; 3—红外预热通道;
4—压力辊; 5—芯模; 6—热风枪

图1 缠绕成型工艺流程图

具体工艺流程为: 在芯模 5 的牵引作用下, 预浸带从放带卷 1 上放卷, 然后经过张力控制系统 2, 对缠绕过程中预浸带的张力进行调节, 接着预浸带进入红外预热通道 3; 红外预热通道 3 将预浸带加热至树脂熔点附近, 从红外通道输出后, 在压力辊 4 和热风枪 6 的作用下, 预浸带缠绕到芯模 5 上; 缠绕结束后, 冷却固结, 脱模, 得到缠绕管材, 如图 2 所示。

1.4 性能测试

管材的 ILSS 按 ASTM D2344 / D2344M-2000 测试, 首先从管材上截取弧长为厚度 6 倍、宽度为厚度 2 倍的弧形试样, 测试跨距为厚度的 4 倍, 每组取

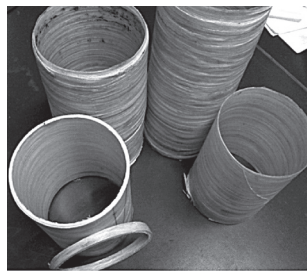


图2 GF增强PP缠绕管材实物图

5 个试样, 采用直径 6 mm 的压头测试, ILSS 按照式 (1) 计算。

$$ILSS = 0.75 \times P_m / (b \times h) \quad (1)$$

式中: P_m ——压头最大压力, N;

b ——试样宽度, mm;

h ——试样厚度, mm。

SEM 测试: 将管材层间破坏面和环向截面朝上放置, 用导电胶布从侧面将其固定在断面观测台上, 然后喷金进行 SEM 观察并拍照。

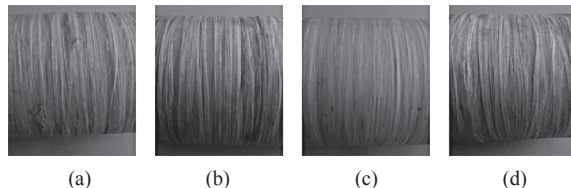
2 结果与讨论

2.1 加工温度对管材表面质量的影响

缠绕成型管材的表面是通过将预浸带逐步缠绕到芯模上形成的, 与模压成型、拉挤成型相比, 其表面质量很难做到完全平整, 而且其表面质量也受到多方面因素的影响。笔者从预热通道温度和芯模温度两方面来讨论其对管材表面质量如表面平整度、缠绕均匀性的影响。

(1) 预热通道温度对管材外壁表面质量的影响。

PP 树脂的加工温度一般在 200 ~ 230 °C, 因此在芯模温度为 160 °C、热风枪加热角度为 6°、预浸带张力为 24 N、缠绕速度为 3.14 m/min、压力辊径向压力为 0.15 MPa 的条件下, 将预热通道温度分别设置为 200, 210, 220, 230 °C, 然后制备了缠绕管材, 其外壁表面质量如图 3 所示, 判定结果如表 1 所示。



a—200 °C; b—210 °C; c—220 °C; d—230 °C

图3 不同预热通道温度下缠绕管材的外壁表面质量

表1 不同预热通道温度下缠绕管材的外壁表面质量判定结果

项 目	预热通道温度 / °C			
	200	210	220	230
判定结果	较差	一般	较好	较差

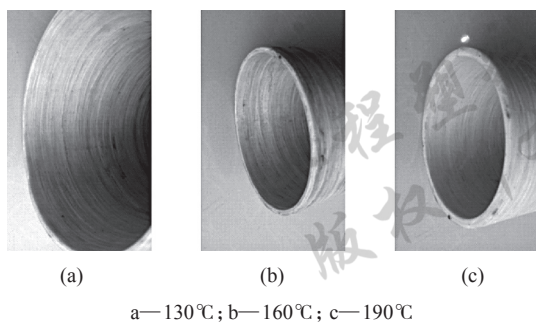
由图 3 和表 1 可知, 随着预热通道温度的升高,

管材外壁表观质量逐渐变好。其原因是,一方面,随着预热通道温度升高,树脂的流动性变好;另一方面,在压力的作用下,树脂更容易流平。但是随着预热通道温度提高到 220℃ 以上,树脂的黏度下降很多,在压力的作用下,被挤到压力辊的外侧,遇到冷空气后,会迅速冷却,造成管材外表面出现螺旋凸起,表观质量变差。

(2) 芯模温度对管材内壁表观质量的影响。

GF 增强 PP 缠绕管材内壁的表观质量主要与芯模的温度相关,芯模的温度较低时,树脂黏度大,预浸带无法铺展,会导致内壁出现铺展不完整、存在沟槽的现象,影响管材内壁的完整性。

由于模具控温机最高使用温度在 200℃,因此在预热通道温度为 220℃、热风枪加热角度为 6°、预浸带张力为 24 N、缠绕速度为 3.14 m/min、压力辊径向压力为 0.15 MPa 的条件下,将芯模温度分别设置为 130、160、190℃,然后制备了缠绕管材,其内壁表观质量如图 4 所示,判定结果如表 2 所示。



a—130℃; b—160℃; c—190℃

图 4 不同芯模温度下缠绕管材的内壁表观质量

表 2 不同芯模温度下缠绕管材的外壁表观质量判定结果

项 目	芯模温度 / ℃		
	130	160	190
判定结果	较好	好	好

从图 4 和表 2 可知,当芯模温度达到 160℃ 以上时,在压力辊的作用下,管材内层已经能够铺展熔合到一起,另外由于芯模表面是经过打磨且镀铬处理的,因此管材内壁的表观质量比外壁要好。

2.2 缠绕成型工艺因素对管材 ILSS 的影响

(1) 芯模温度的影响。

在预热通道温度为 220℃、热风枪加热角度为 6°、预浸带张力为 5 N、缠绕速度为 3.14 m/min、压力辊径向压力为 0.10 MPa 的条件下,研究了芯模温度对缠绕管材 ILSS 的影响,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,在较低的芯模温度下,管材的 ILSS 较差,主要是由于经过加热的预浸带遇到低温的芯模时,温度出现下降,导致层间粘结不良,导致

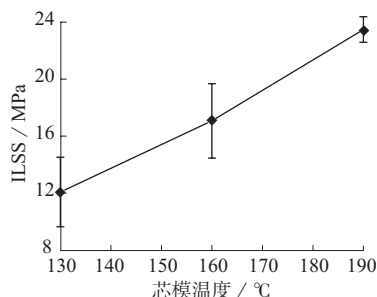


图 5 芯模温度对缠绕管材 ILSS 的影响

ILSS 不高。随着芯模温度的增加,已缠绕在芯模上的预浸带得到了大量的热量,树脂黏度相对较低,流动性好,层间粘结变好,ILSS 得到了提高。但是芯模温度为 190℃ 时会造成树脂熔体强度过低,管材的厚度会有较大下降,因此芯模温度不宜过高,以 160℃ 为宜。

(2) 热风枪加热角度的影响。

热风枪的作用是保证管材表面的温度,并进一步对预浸带进行加热。在预热通道温度为 220℃、芯模温度为 160℃、预浸带张力为 10 N、缠绕速度为 3.14 m/min、压力辊径向压力为 0.10 MPa 的条件下,研究了热风枪加热角度对管材 ILSS 的影响,结果如图 6 所示。

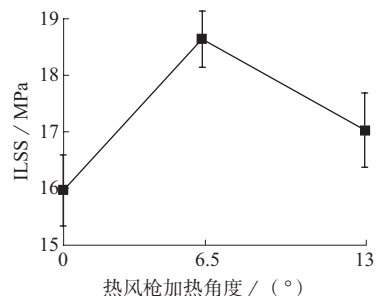


图 6 热风枪加热角度对缠绕管材 ILSS 的影响

由图 6 可见,随着热风枪加热角度的增加,ILSS 出现先增大后减小的现象。其原因可能为:热风枪加热角度为 0° 的时候,热空气加热点离压力辊施压点较远,已经过加热的表面在加热后出现冷却,热空气未充分发挥作用;加热角度为 13° 的时候,热空气直接对压力辊的加压点加热,由于树脂加热需要一定的时间,而直接对压力点的加热不能提供足够的时间使树脂熔融,导致层间粘结不好;加热角度为 6° 时,热空气提前了一定距离对即将粘结的管材表面进行加热,使树脂的温度进一步提高,黏度减小,对浸渍粘结有利,同时,热风枪喷嘴距离压力点并不远,还可以起到保温的作用,避免树脂在到达压力点之前降温。

(3) 预浸带张力的影响。

预浸带张力是一个重要的工艺参数,它对管材的性能影响很大,通常施加适当的张力可以增加预浸带之间的粘结程度,提高预浸带的缠绕精度,改善管材表面质量,还可以使预浸带在加热通道中保持一定的姿态,不易碰到下方的红外加热板。张力可以引起部分已经加热的预浸带的收缩,使纤维排列更加紧密。在预热通道温度为 220°C 、芯模温度为 160°C 、热风枪加热角度为 6° 、缠绕速度为 3.14 m/min 、压力辊径向压力 0.10 MPa 的条件下,研究了预浸带张力对管材 ILSS 的影响,结果如图 7 所示。

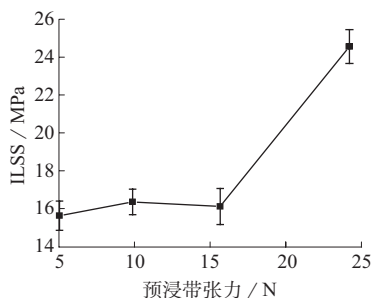


图7 预浸带张力对缠绕管材 ILSS 的影响

由图 7 可知,预浸带张力为 5、10 和 16 N 时管材的 ILSS 比较接近。这是因为,一方面,通道本身会在设备启动时产生一定的摩擦阻力,但并不是一个恒定值,而且在正常工作之后,摩擦阻力可以忽略;另一方面,压力辊本身提供的径向压力的作用与预浸带张力的作用相同,因此在 0.10 MPa 的压力辊径向压力下预浸带张力为 5、10、16 N 时的测定值区别不大。当预浸带张力达到 24 N 时,张力的作用超过了压力辊径向压力的作用,在两者综合作用下,ILSS 有较大的提高。但在实验过程中将预浸带张力提高到 30 N 左右时,预浸带中的纤维已被严重破坏。

(4) 缠绕速度的影响。

缠绕速度一方面决定了生产效率,另一方面也会对管材的性能产生影响。在预热通道温度为 220°C 、芯模温度为 160°C 、热风枪加热角度为 6° 、预浸带张力为 10 N、压力辊径向压力为 0.15 MPa 的条件下,研究了缠绕速度对管材 ILSS 的影响,结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,在排除通道阻力的条件下,管材的 ILSS 随缠绕速度的增加先增大后减小。由此可知,缠绕速度为 4.71 m/min 比较合适。

(5) 压力辊径向压力的影响。

压力辊径向压力是缠绕成型管材中层间粘结的主要因素。压力能促进树脂在纤维束中的渗透流

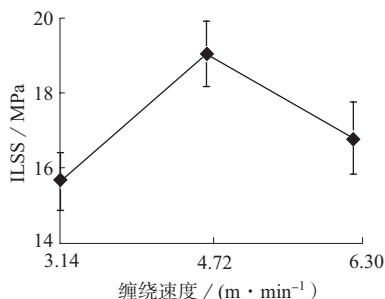


图8 缠绕速度对缠绕管材 ILSS 的影响

动,另一方面,也能使熔融的预浸带更为铺展。在预热通道温度为 220°C 、芯模温度为 160°C 、热风枪加热角度为 6° 、预浸带张力为 5 N、缠绕速度为 3.14 m/min 的条件下,研究了压力辊径向压力对管材 ILSS 的影响,结果如图 9 所示。

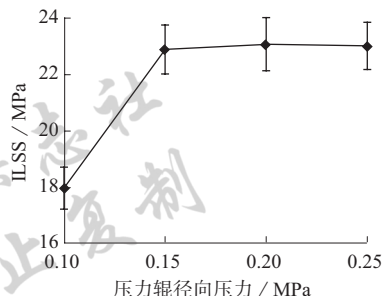


图9 压力辊径向压力对缠绕管材 ILSS 的影响

由图 9 可知,ILSS 随压力辊径向压力的增加而变大,但是,当径向压力超过 0.15 MPa 时,ILSS 提高并不多,趋于稳定。而且,过大的径向压力会导致芯模弯曲变形,对设备造成影响。因此,选择 0.15 MPa 的径向压力是合适的。

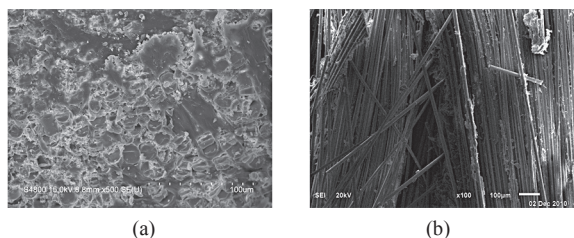
2.3 最优工艺条件下的管材 ILSS

从上面每个单因素的单独考察中发现,不同的工艺因素对缠绕管材的 ILSS 的影响程度是不同的。其中芯模温度、预浸带张力、压力辊径向压力的影响较大,而热风枪加热角度、缠绕速度的影响较小。综上所述,最优缠绕成型工艺条件为预热通道温度 220°C 、芯模温度 160°C 、热风枪加热角度 6° 、预浸带张力 24 N、缠绕速度 4.71 m/min 、压力辊径向压力 0.15 MPa ,由此制备的 GF 增强 PP 缠绕管材内外壁表面光滑、纤维束分散均匀,且其 ILSS 达到了 29.60 MPa 。

2.4 SEM 分析

图 10 为最优工艺条件下制备的管材环向截面和层间剪切破坏面的 SEM 照片。由图 10a 可以看出,制备的管材中纤维浸没在基体树脂中,树脂紧密包围着纤维,没有空隙,说明纤维和基体树脂结合紧密。由图 10b 可以看出,破坏部分的纤维表面残留

有部分树脂,进一步说明了纤维与基体树脂之间的界面结合较好,其剪切破坏形式可能包括了树脂的内部破坏和纤维与树脂基体界面的破坏。



a—环向截面; b—层间剪切破坏面

图10 最优工艺条件下制备的管材 SEM 照片

3 结论

(1) 在 GF 增强 PP 缠绕管材的缠绕成型中,适当提高预热通道温度可使管材获得较好的外壁观质量,提高芯模温度可使管材获得较好的内壁观质量。

(2) 缠绕管材的 ILSS 随热风枪加热角度和缠绕速度的增加呈先增大后减小的趋势,随芯模温度、预浸带张力及压力辊径向压力的增加总体上呈增大趋势。

(3) 在预热通道温度为 220℃、芯模温度为 160℃、热风枪加热角度为 6°、预浸带张力为 24 N、缠绕速度为 4.71 m/min、压力辊压力为 0.15 MPa 的最优工艺条件下制备的缠绕管材,其内外壁表面光滑,ILSS 达到了 29.60 MPa。

(4) SEM 分析表明,制备的管材中树脂和纤维

结合紧密,层间粘结良好。

参考文献

- [1] Martins L A L, Bastian F L, Netto T A. The effect of stress ratio on the fracture morphology of filament wound composite tubes[J]. Materials & Design, 2013, 49:471-484.
- [2] Rafiee R. Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes[J]. Composites Part B:Engineering, 2013, 45(1):257-267.
- [3] Khalifa A B, Zidi M, Abdelwahed L. Mechanical characterization of glass / vinylester $\pm 55^\circ$ filament wound pipes by acoustic emission under axial monotonic loading[J]. Comptes Rendus Mécanique, 2012, 340(6):453-460.
- [4] Gennaro R, Montagna F, Maffezzoli A, et al. On-line consolidation of commingled polypropylene / glass roving during filament winding[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2011, 24(6):789-804.
- [5] Diniz Melo J D, Levy Neto F, de Araujo Barros G, et al. Mechanical behavior of GRP pressure pipes with addition of quartz sand filler[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(6):717.
- [6] 李伟,高维佳,陈平,等.连续纤维增强 PEK-C 复合材料缠绕成型工艺及性能研究[J].固体火箭技术,2011,34(2):261-264.
- Li Wei, Gao Weijia, Chen Ping. Study on winding process and properties of continuous fiber reinforced PEK-C composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(2):261-264.
- [7] Reis P, Ferreira J M, Richardson M. Effect of the surface preparation on PP reinforced glass fiber adhesive lap joints strength[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2012, 25(1):3-13.

我国模具业从制造向智造转变

随着信息技术和计算机网络技术的发展,模具制造业进入了全球化的新时代,竞争愈演愈烈。市场对产品品质、生产工艺和上市时间的要求也越来越高。在这种情形下,成本控制、生产效率与技术因素成为模具制造企业塑造差异化优势的关键所在。

国际模具协会秘书长罗百辉调研显示,模具企业在竞争力出路结果中排名前三的选择分别是:优化精简制造流程,提高生产效率;加速创新,从“模具制造”转向“模具智造”;优化供应链管理,统筹全局。对于模具制造业企业而言,如何有效地降低运营成本、提高模具工程效率、及时推出高质量产品、在改进销售流程的同时加强协作、可持续地投入创新,这几个方面是其保持在全球市场竞争力的重要砝码。

罗百辉表示,从目前模具制造产业的上下游行业应用来看,企业的实践印证了数字样机在产品生产工艺、生产制造等传统流程中的强大功能。与此同时,数字样机、3D 打印、4D 打印、5D 打印不断精进的工具体验、技术理念及应用体验也在不断地与行业应用相结合,促进模具制造企业转型升级和商业模式革新。不难看出,“效率”、“创新”、“可持续”

等正代表着模具制造业关于未来的思考和革新方向。

在技术驱动下的模具制造企业差异化竞争优势的塑造过程中,设计是实现创新目标的关键和核心所在。罗百辉说,设计无处不在,世间万物都离不开设计。大多数模具制成品、消费品对环境的影响在设计阶段被确定,工程师等设计人员在项目进程中不仅需要出色的设计工具,还要最大程度地减少对资源 and 环境所产生的负面影响,以“可持续的设计”驱动世界的革新,而这正是 3D 打印模具解决方案的重要产品理念。(模联网)

更好的生物芯片材料——TOPAS®COC 树脂

在以判定疯牛病和禽流感为目的的简易测量仪器中,有望被用作反应池的生物芯片应具有细微转录性、低荧光自发性和耐热性等。

宝理塑料开发的共聚环状烯烃(COC)树脂“TOPAS®”是一种基于独创的茂金属催化剂技术的高品质和高纯度非晶环状树脂,在标准要求很严的医疗器械装置和检查诊断器具等医疗领域,作为高品质和高成本的石英玻璃和聚二甲硅氧烷等的替代材料,可满足上述特性要求,被认为是面向这一用途的最佳塑料材料。(栾维涛,钟小燕)