

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.04.009

重力效应对 VARTM 工艺中树脂充模过程的影响

刘诚,徐硕,花军,范豪,许子涵

(东北林业大学,哈尔滨 150040)

摘要:采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺制备了环氧树脂/亚麻纤维复合材料层合板,记录了树脂在不同树脂流动倾角下的充模时间。通过对层合板进行拉伸、弯曲性能测试,研究了树脂流动倾角对复合材料层合板力学性能的影响。结果表明,在 VARTM 工艺过程中重力效应对树脂充模时间和层合板力学性能有显著影响;充模时间随着树脂流动倾角的增大(从 -90° 至 90°)而增加;复合材料层合板的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲弹性模量等均随树脂流动倾角的增大而增大,树脂流动倾角对弯曲强度的影响最大,且对强度的影响高于模量。由于树脂流动倾角影响了树脂与亚麻纤维的结合情况,导致树脂流动倾角为 -90° 和 90° 的复合材料层合板在拉伸与弯曲失效时拥有不同的失效形式。

关键词:真空辅助树脂传递模塑工艺;树脂流动倾角;充模时间;力学性能;失效形式

中图分类号: TU531.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)04-0043-05

Influence of Gravity Effect on Process of Resin Filling in VARTM Process

Liu Cheng, Xu Shuo, Hua Jun, Fan Hao, Xu Zihan

(Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract : Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process was adopted to prepare epoxy resin/linen fiber composite laminates, the filling times of the epoxy resin in different resin flowing tilt angle were recorded. Through testing the tensile and bending properties of the laminates, the effects of resin flowing tilt angle on mechanical properties of the laminates were studied. The results show that the gravity effect of VARTM process has significant influence on the filling time of resin and mechanical properties of the laminates. The filling time increases with the increase of resin flowing tilt angle (changing from -90° to 90°). The tensile strength, tensile modulus of elasticity, bending strength and bending modulus of elasticity of the laminates all increase with the increase of resin flowing tilt angle, the angle has the greatest effects on the bending strength and the effects on the strength is greater than those of modulus. The combination of the resin and linen fibers is affected by resin flowing tilt angle, so the laminates with resin flowing tilt angle of -90° and 90° have different failure forms under the tensile or bending failure process.

Keywords : VARTM process ; resin flowing tilt angle ; filling time ; mechanical property ; failure form

真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺是利用真空排除预置增强纤维中的气体并在真空作用下通过树脂的流动、渗透,实现其对纤维及织物的浸渍,然后在一定温度下进行固化,成型树脂/纤维复合材料制品的一种工艺方法^[1]。VARTM工艺由于具有降低材料成型成本、简化生产模具、减少挥发性有害气体的排放并允许使用较低的树脂注射压力等优势,受到了业界的广泛重视^[2]。目前,该工艺已成

为制备树脂/植物纤维复合材料结构制品的重要手段之一^[3]。但对于多孔的植物纤维,充模过程中树脂对纤维的浸润机制尚不明确^[4]。在VARTM工艺下树脂浸润的主要驱动力包括真空压力、重力、毛细力及粘滞力等^[5]。国内外学者较多关注于真空压力对充模过程影响的研究^[6],由于毛细力和粘滞力(10 N/m^2)与真空压力($1 \times 10^5\text{ N/m}^2$)数量级相差较多可以忽略不计,而重力($1 \times 10^4\text{ N/m}^2$)与真

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)课题项目(20130062110005),黑龙江省教育科学规划课题项目(GJB1214003)

通讯作者:花军,教授,博导,主要从事木工机械、生物质复合材料制备工艺的研究 E-mail: huajun81@163.com

收稿日期: 2018-01-03

引用格式:刘诚,徐硕,花军,等.重力效应对 VARTM 工艺中树脂充模过程的影响[J].工程塑料应用,2018,46(4):43-47.

Liu Cheng, Xu Shuo, Hua Jun, et al. Influence of gravity effect on process of resin filling in VARTM process[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4): 43-47.

空压力只相差一个数量级,随着研究的深入,研究人员发现树脂自身重力对充模过程也有较大影响,因此不能忽略重力项。卜建辉^[7]在数学建模中首先将重力因子项添加到模型中;刘金良等^[8]对树脂充模过程中重力效应进行理论分析;Zhao Chenhui等^[9]研究了树脂重力效应对充模时间的影响;李卓^[10]在数值仿真中也将树脂重力效应影响考虑进去。据所查资料显示,重力效应对树脂充模过程影响的研究还很少。之前的学者们大都只是进行简单的理论探讨,实验研究也仅限于对充模时间的影响研究,在重力效应对复合材料层合板力学性能的影响研究方面不是很充分,因此笔者系统深入地研究了重力效应对 VARTM 工艺中树脂充模过程的影响。

为研究 VARTM 工艺条件下树脂重力效应对树脂/植物纤维复合材料充模过程的影响,笔者选择亚麻纤维作为增强体,环氧树脂为基体材料,利用 VARTM 工艺制备了环氧树脂/亚麻纤维复合材料层合板。保持其它成型工艺参数一定,记录了不同树脂流动倾角的充模时间,对复合材料层合板进行拉伸和弯曲试验,论证不同树脂流动倾角对复合材料层合板力学性能的影响,利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察树脂与亚麻纤维的结合情况,并分析了 4 组典型复合材料层合板失效形式。

1 实验部分

1.1 主要原材料

亚麻纤维布:临沂天维苕麻纺织有限公司;

环氧树脂 (EPOLAM5015)、固化剂 (EPOLAM 5014)、导流介质 (GREEN FLOW75)、脱模剂 (19SAM)、脱模布 (Econostitch G)、密封胶带 (AT199)、真空袋膜 (SECURLON L-500Y) 等:北京科斯拉科技有限公司沈阳分公司;

其它辅材 (如真空软管等):市售。

1.2 主要仪器与设备

真空泵:XD-40 型,北京科斯拉科技有限公司;

树脂回收罐:RB451 型,北京科斯拉科技有限公司;

干燥箱:DHG-9620 型,北京科斯拉科技有限公司;

恒温水浴锅:SY-1210 型,上海巴玖实业有限公司;

微控电子万能试验机:WDW-100 型,长春科新试验仪器有限公司;

SEM:JSM-7500F 型,日本电子株式会社。

1.3 实验方案

本次实验采用 5 层亚麻纤维布铺层,每层纤维布尺寸为 350 mm×350 mm,铺层前先将亚麻纤维布进行碱处理 (亚麻纤维布经过碱液处理之后其性能有一定提高),铺层后将配置好的树脂胶液按不同流动倾角注入模具中,实验的真空度为 0.09 MPa,环境温度为 25℃,相对湿度为 65%,环氧树脂/固化剂质量比为 100/34。树脂充模后保持模具密封,将模具放入 60℃ 的干燥箱中加热 2 h。树脂的流动倾角是指树脂流动方向与水平方向之间的夹角 (即模具倾角),树脂的流动方向向上为正角流动,相反为负角流动,树脂流动倾角增大表示树脂流动倾角从负角变为正角 (由 -90° 至 90°),树脂流动倾角减小与此相反,树脂流动倾角如图 1 所示。由于树脂流动倾角关于垂直方向对称的角度效果相同,故此实验只研究 -90°~90° 的树脂流动倾角,共设计了 7 组,为避免偶然误差对结果的影响,每组实验在相同条件下进行 5 次,取 5 次实验数据的平均值,实验组别与对应流动倾角角度关系如表 1 所示。

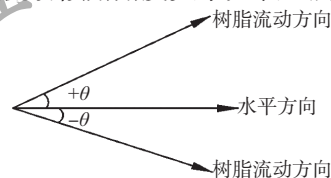


图1 树脂流动倾角示意图

表1 实验组别及对应流动倾角角度 (°)

项目	组 别						
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
角度	-90	-60	-30	0	30	60	90

1.4 性能测试

拉伸性能按 GB/T 1447-2005 测试,试样为 I 型,尺寸为 180 mm×20 mm×4 mm,拉伸速率为 2 mm/min,夹持距离为 115 mm。

弯曲性能按 GB/T 1449-2005 测试,试样尺寸为 80 mm×15 mm×4 mm,测试速率为 2 mm/min,夹持距离为 60 mm。

采用 SEM 观察试样拉伸和弯曲断面的微观形貌并拍照。

2 结果与讨论

2.1 树脂流动倾角对充模时间的影响

表 2 为不同流动倾角下的树脂充模时间。从表 2 可以明显看出不同流动倾角下树脂充模时间呈现出较大的区别,其随流动倾角增大而依次增加。树脂自身重力对树脂流动有两个方面的作用效果,即促进流动作用效果和阻碍流动作用效果。影响树脂

充模流动过程的主要作用力是树脂自身的重力在树脂流动方向上的分力,其大小与树脂流动倾角有关:当树脂流动倾角与水平方向成负角时,树脂重力沿流动方向的分力与流动方向同向,此时树脂重力起促进流动作用效果,且随着角度绝对值的增大促进效果越来越明显。当树脂流动倾角与水平方向成正角时,树脂重力沿流动方向的分力与流动方向相反,此时树脂重力起阻碍流动作用效果,且随着角度绝对值的增大阻碍效果越来越明显。

表 2 不同实验组别的充模时间

项 目	组别						
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
充模时间	75.13	83.27	88.17	95.78	100.62	106.38	114.23

2.2 树脂流动倾角对复合材料层合板力学性能的影响

(1) 树脂流动倾角对拉伸性能的影响。

图 2 为不同树脂流动倾角下环氧树脂/亚麻纤维复合材料层合板的拉伸性能。

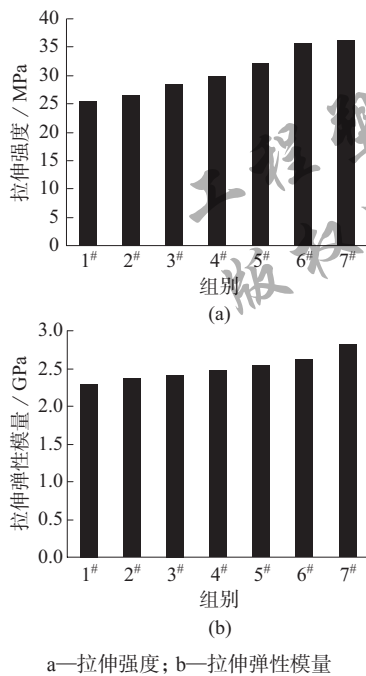


图 2 不同组别复合材料层合板的拉伸性能

由图 2 可知,在 7 组实验中,复合材料层合板的拉伸强度、拉伸弹性模量均随树脂流动倾角的增大呈现逐渐增大的趋势。7 组实验中,复合材料层合板的最大拉伸强度出现在树脂流动倾角为 90° 时,其值为 36.35 MPa,最小拉伸强度出现在树脂流动倾角为 -90° 时,其值为 25.46 MPa,最大拉伸强度比最小拉伸强度高约 42.77%,这说明树脂流动倾角对复合材料层合板拉伸强度有很大影响。复合材料

层合板的最大拉伸弹性模量出现在树脂流动倾角为 90° 时,其值为 2.82 GPa,最小拉伸弹性模量出现在树脂流动倾角为 -90° 时,其值为 2.29 GPa,最大拉伸弹性模量比最小拉伸弹性模量高约 23.14%,说明树脂流动倾角对复合材料层合板拉伸弹性模量也有较大影响,但其增大幅度不如拉伸强度的增大幅度,表明树脂流动倾角对层合板拉伸弹性模量的影响较拉伸强度低。

在拉伸的破坏形式中,主要有亚麻纤维拔出和亚麻纤维拉断两种形式。在拉伸的过程中,拉伸应力通过环氧树脂与亚麻纤维的界面层传递到亚麻纤维上,裂纹先在环氧树脂上产生,然后才是亚麻纤维的断裂。亚麻纤维是典型的多孔介质,在不同的树脂流动倾角下树脂的流动速度不同,当树脂流动倾角越小,树脂流动越快,这更加促进了不饱和流动的形成,导致部分纤维束与树脂结合情况差,存在树脂空隙,因而层合板力学性能变差。

(2) 树脂流动倾角对弯曲性能的影响。

图 3 为不同树脂流动倾角下环氧树脂/亚麻纤维复合材料层合板的弯曲性能。

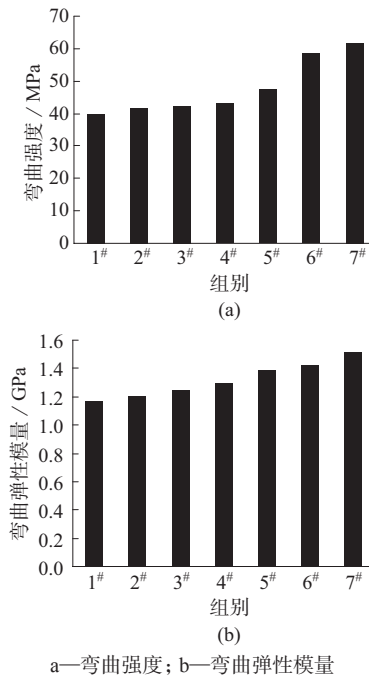


图 3 不同组别复合材料层合板的弯曲性能

由图 3 可知,在 7 组实验中,复合材料层合板的弯曲强度、弯曲弹性模量随树脂流动倾角的变化趋势与拉伸强度相同。7 组实验中,复合材料层合板的最大弯曲强度出现在树脂流动倾角为 90° 时,其值为 61.71 MPa,最小弯曲强度出现在树脂流动倾

角为 -90° 时,其值为40.02 MPa。从图3可以看出,1[#]~4[#]组的弯曲强度增大较为平缓,4[#]~7[#]组的弯曲强度变化趋势较陡峭,且最大弯曲强度比最小弯曲强度高约54.20%,说明树脂流动倾角对复合材料层合板弯曲强度有很大的影响,且高于对拉伸强度的影响。复合材料层合板的最大弯曲弹性模量出现在树脂流动倾角为 90° 时,其值为1.51 GPa,复合材料层合板的最小弯曲弹性模量出现在树脂流动倾角为 90° 时,其值为1.17 GPa,可以发现弯曲弹性模量是平缓增大的,且最大弯曲弹性模量比最小弯曲弹性模量高约29.06%,说明树脂流动倾角对复合材料层合板弯曲弹性模量的影响较大,但低于对弯曲强度的影响。

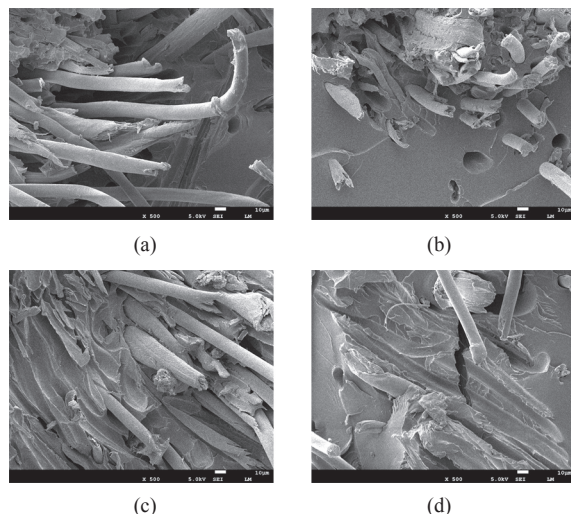
在弯曲的破坏形式中,主要有纤维分层断裂和基体开裂两种形式。随着弯曲载荷的不断增大,首先会出现纤维间失效(平行纤维方向贯穿整个单层厚度的裂纹),纤维失效包括基体裂纹和基体/纤维界面裂纹。首次出现纤维间失效后载荷继续增加,其它层会迅速出现进一步的纤维间失效裂纹,与裂纹相距一定距离处载荷仍能通过层间剪切应力传递至受损层,最终形成整体失效。因为植物纤维是典型的多孔介质,不同的树脂流动倾角下树脂的流动速度不同,随着流动倾角减小,树脂流动会越来越快,这会导致纤维接触角变大,部分纤维脱粘,脱粘的纤维比粘结良好的纤维更容易屈曲,从而使基体和周围纤维对纤维提供阻碍微屈曲的支持力减小,导致层合板弯曲性能降低。

2.3 复合材料层合板的断裂形貌

根据上述实验结果,选取树脂流动倾角为 -90° 和 90° 的复合材料层合板,利用SEM观察这两种层合板的拉伸和弯曲断面,结合树脂与纤维界面粘结情况综合分析树脂自身重力效应对复合材料层合板失效形式的影响,其断面形貌如图4所示。

由图4a可以看出,树脂流动倾角为 -90° 的层合板拉伸断面中,裂纹尖端短纤维平行排列且具有相同的长度和直径,纤维束上树脂颗粒极少,说明纤维与树脂结合情况较差,属于典型的纤维拔出破坏模式。

由图4b可以看出,树脂流动倾角为 90° 的层合板拉伸断面中,裂纹尖端纤维在裂纹扩展过程中被拉长,并相对于没有屈服的基体产生位移,而后因纤维受力过大自身发生断裂,断裂后纤维又缩回基体,位移消失,释放出弹性变形能,属于典型的纤维断裂



a—树脂流动倾角为 -90° 的层合板拉伸断面;
b—树脂流动倾角为 90° 的层合板拉伸断面;
c—树脂流动倾角为 -90° 的层合板弯曲断面;
d—树脂流动倾角为 90° 的层合板弯曲断面

图4 树脂流动倾角为 -90° 和 90° 的层合板拉伸与弯曲断面破坏模式。

由图4c可以看出,树脂流动倾角为 -90° 的层合板弯曲断面中,裂纹在垂直于层合板的方向扩展时会受到抑制,这是因为裂纹要在层与层的界面扩展,需要消耗大量能量,当层合板受弯曲时,界面结合差的部分易导致脱粘或易产生分层断裂,属于典型的纤维脱粘和分层断裂破坏模式。

由图4d可以看出,树脂流动倾角为 90° 的层合板弯曲断面中,当裂纹仅沿一个方向扩展时,产生的新表面较小,因而所需断裂能也较小;而当基体裂纹接触到垂直于裂纹扩展方向(或与之成较大角度)的纤维时,裂纹开始分叉,平行于纤维扩展,断裂过程中所消耗的能量增加,属于典型的基体变形和开裂破坏模式。

3 结论

(1) 重力效应在VARTM工艺过程中对树脂充模时间有显著影响,且充模时间随树脂流动倾角的增大逐渐增加。当树脂流动倾角与水平方向成负角时,树脂重力起促进流动作用的效果,当树脂流动倾角与水平方向成正角时,树脂重力起阻碍流动作用的效果。

(2) 重力效应在VARTM工艺过程中对复合材料层合板的力学性能也有较大影响,复合材料层合板的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲弹性模量等均随树脂流动倾角的增大呈现逐渐增加的趋势。其中,树脂流动倾角对弯曲强度的影响最大,且

对强度的影响要高于模量的影响

(3) 重力效应在 VARTM 工艺过程中影响了复合材料层板的失效形式,由于树脂流动倾角影响了环氧树脂与亚麻纤维的结合情况,导致不同树脂流动倾角下的复合材料层板在拉伸与弯曲失效时拥有不同的失效形式。

参考文献

- [1] 杨波,王时龙,毕凤阳. 基于混合网格方法的 VARTM 工艺充模仿真与实验验证 [J]. 复合材料学报,2017,34(8):1736-1744.
Yang Bo, Wang Shilong, Bi Fengyang. Simulation and experimental validation for the mold-filling process of VARTM based on mixed grid approach[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2017,34(8):1736-1744.
- [2] 张晓强. 真空辅助树脂浸润成型工艺研究及设备开发 [D]. 北京:北京化工大学,2016.
Zhang Xiaoqiang. Research on vacuum assisted resin infusion molding and device development[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2016.
- [3] Xia C, Shi S Q, Cai L, et al. Property enhancement of kenaf fiber composites by means of vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM)[J]. Holzforschung,2015,69(3):307-312.
- [4] Schenke M, Ehlers W. Numerical investigation of vacuum-assisted resin transfer moulding (VARTM) within deformable fibre fabrics[J]. PAMM,2016,16(1):479-480.
- [5] 吴昊. 真空模压下亚麻纤维结构件拉伸强度及浸润特性研究 [D]. 哈尔滨:东北林业大学,2016.
Wu Hao. Research on strength and infiltration of the flax fiber structure through the vacuum assisted resin transfer molding technology[D]. Harbin:Northeast Forestry University,2016.
- [6] 于然,白龙斌,张彦飞,等. 环氧树脂/玻纤复合材料 VIPR 成型工艺研究 [J]. 工程塑料应用,2015,43(6):58-61.
Yu Ran, Bai Longbin, Zhang Yanfei, et al. Research of vacuum induced preform relaxation process epoxy resin/GF composites[J]. Engineering Plastics Application,2015,43(6):58-61.
- [7] 卜建辉. RTM 成型过程数值模拟 [D]. 郑州:郑州大学,2006.
Bu Jianhui. Numerical simulation of the process of resin transfer molding technology[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2006.
- [8] 刘金良,吴晓青. VARI 成型工艺中重力效应分析 [J]. 武汉理工大学学报,2009,31(4):59-62.
Liu Jinliang, Wu Xiaoqing. Analysis of effects of gravity for VARI process[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2009,31(4):59-62.
- [9] Zhao Chenhui, Zhang Guangcheng. Effect of gravity on resin flow behavior by VARI process[J]. Advanced Materials Research,2012,557-559:1471-1474.
- [10] 李卓. VARI 工艺成型大型方舱的计算机模拟关键技术研究 [D]. 济南:山东大学,2016.
Li Zhuo. Study on key techniques of computer simulation for large shelter with VARI[D]. Jinan:Shandong University,2016.

欢迎订阅 2018 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,荣获首届、第二届、第三届全国期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2018 年定价 15 元/期,全年 180 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获多项省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2018 年定价 15 元/期,全年 90 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号 (1973 年) 至 2017 年底共 45 卷 338 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号 (1992 年) 至 2017 年底

共 26 卷 121 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 250 元。

邮局汇款:

收款地址:济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮编:250031

电话:(0531)85878223 85878057 85878278

传真:(0531)85947355

银行汇款:

户名:山东非金属材料研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

账号:1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>