下降管生物质热裂解液化反应器设计*

李志合　柏雪源　李永军　易维明
(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

【摘要】 以固体热载体加热工艺原理设计开发了一种新型下降管生物质快速热裂解液化反应器。详细阐述了反应器中的陶瓷球热载体换热器、颗粒喂料器、反应管、颗粒分离及热裂解气冷却系统等主要组成部件的结构,并对各部件的性能进行了试验测试。试验结果表明,热载体的温度与喂料速率控制精确,热载体与炭粉颗粒分离完全;空心锥喷嘴非常适合生物质热裂解气体产物的喷淋冷却,当喷嘴孔径为 4.0 mm、液体压力为 0.2 MPa 时雾化效果最佳,利用该喷淋冷却方式时秸秆类生物质热裂解生物油的收集率达到 43%。

关键词: 生物质　热裂解　下降管反应器　固体热载体
中图分类号: TK6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2011)09-0116-04

Development of Down Flow Tube Reactor for Bio-oil Production from Biomass Flash Pyrolysis

Li Zhihe　Bai Xueyuan　Li Yongjun　Yi Weiming
(*School of Agricultural and Food Engineering*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*)

Abstract

Based on the technology of biomass powder heated by hot solid heat carrier (ceramic balls), an original down flow tube reactor (DFTR) for bio-oil production from biomass flash pyrolysis was developed. The structural design process of the critical parts was introduced in detail and the experiments were conducted to test the performance of each part of the DFTR, including the solid heat exchanger, the particle feeder, the down flow tube, the particle separator and the quencher. The results indicated that the temperature of the solid heat carrier fluctuated little and its feeding rate could be controlled precisely. The solid heat carrier and biomass char can be separated completely. The hollow-cone type nozzle is very suitable for quenching the pyrolyzed gaseous products which can atomize well as the nozzle diameter is 4.0 mm and the fluid flow pressure is 0.2 MPa. The pyrolyzed bio-oil yield recovering from agricultural residues reached to 43% as this type nozzle is used to quench the condensable vapor.

Key words　Biomass, Pyrolysis, Down flow tube reactor, Solid heat carrier

引言

利用生物质快速热裂解液化技术将农业废弃物等固态生物质转化为液体燃料,可以提高燃料的品质和远距离输送利用的便利性。资料显示,荷兰 BTG 的旋转锥生物质热裂解液化反应器的生物质处理能力达到了 2 000 kg/h,加拿大 Ensyn 公司的输送床反应器达到了 4 000 kg/h,Dynamotive 公司的流化床反应器甚至达到了 8 000 kg/h 的规模[1]。国内最早用于生物质快速热裂解液化研究的反应器是沈阳农业大学于 1995 年从荷兰引进的规模为 10 kg/h 的旋转锥[2]。从目前来看,国内的反应器规模一般

收稿日期: 2011-01-06　修回日期: 2011-01-12
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA05Z401)、国家自然科学基金资助项目(51006065)和山东省自然科学青年基金资助项目(ZQ2010EQ038)
作者简介: 李志合,副教授,主要从事生物质热裂解液化技术研究,E-mail: lizhihe@sdut.edu.cn
通讯作者: 易维明,教授,博士生导师,主要从事生物质能综合利用技术研究,E-mail: yiwenming@sdut.edu.cn

较小，达到商业化规模和具有自主知识产权的更为少见。山东理工大学利用固体热载体与生物质颗粒之间的温差实现生物质的快速升温热裂解工艺，开发了具有自主知识产权的下降管反应器、双螺旋滚筒反应器等。相对于利用气体热载体加热工艺而言（比如流化床反应器），消除了贫氧混合气体（或 N_2、Ar 等惰性气体）的消耗，降低了经济成本。同时避免了气体热载体的混入，液体燃料的收集率、纯度和燃料品质均有显著提高。

本文利用固体热载体加热生物质的工艺原理设计开发下降管生物质快速热裂解液化反应器，对反应器的热载体换热器、颗粒喂料器、反应管、颗粒分离及热裂解气体冷却系统等主要组成部件的结构进行阐述，并对主要部件的性能进行试验测试。

1　试验材料

下降管生物质热裂解液化反应器采用直径 2 ~ 3 mm、热容量大的陶瓷球并掺杂白云石催化剂作为固体热载体。陶瓷球由山东省淄博市华光陶瓷厂生产，主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3，堆密度约为 2 200 kg/m^3，吸水率小于 0.5%，耐酸度大于 99%，耐碱度大于 95%。反应器可以实现粒径 20 目以上的秸秆类、锯木屑类、壳类等生物质的热裂解液化。

2　反应器的工艺原理

下降管反应器的工艺原理如图 1 所示。主要由热载体换热器、反应管、颗粒喂料器、热载体/炭粉分离系统、热裂解气体冷凝系统、热载体循环系统等部分组成。其工艺原理为：利用烟气发生炉产生的 800℃以上高温烟气加热换热器中陶瓷球热载体到设定温度（500℃以上）。热载体通过流量控制阀流入下降管后与喂入的生物质粉混合，在重力作用下沿反应管向下运动，期间生物质颗粒受热发生热裂解反应。热裂解固体产物进入热载体/炭粉分离装置，其中热载体落在倾斜放置的筛板上并流入热载体循环装置。炭粉则通过筛板与下降管出口之间的缝隙落入炭粉收集器。热裂解气被罗茨风机引入旋风除尘器进一步除尘，洁净的热裂解气在冷凝系统中急剧冷却得到液体生物油；不可冷凝气体被送入烟气发生炉进一步燃烧利用。流出换热器的热烟气进入反应管与保温套管之间的腔体，以充分利用余热对反应管进行保温。

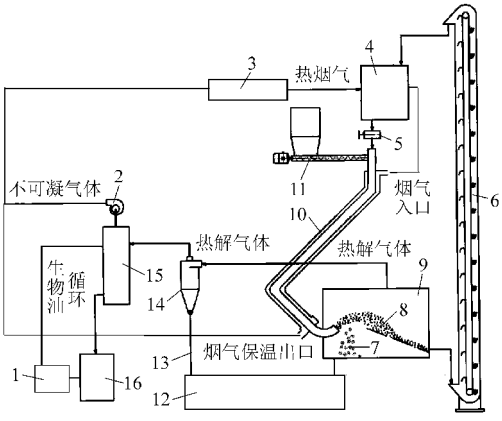

图 1　下降管生物质热裂解液化反应器工艺原理

Fig. 1　Schematic process of the DFTR

1. 油泵　2. 罗茨风机　3. 烟气发生炉　4. 热载体换热器　5. 热载体流量控制阀　6. 热载体循环系统　7、13. 炭粉　8. 热载体　9. 热载体/炭粉分离箱　10. 反应管　11. 生物质喂料器　12. 炭粉收集箱　14. 旋风分离器　15. 气体冷凝系统　16. 储油灌

3　主要部件的设计

3.1　热载体换热器

热载体换热器的作用是把陶瓷球热载体加热到设定的温度。换热器的结构如图 2 所示。换热管为外径 35 mm、壁厚 3 mm、长 760 mm 的耐热钢管，共计 126 根，分 3 个区，每区 42 根。烟气发生炉产生的高温烟气从入口 7 按箭头方向通过Ⅰ区换热管进入中部的Ⅱ区，再流经上部的Ⅲ区换热管，在出口 2 处流出换热器，进入反应管套管。硅炭棒及其保护套管 6[3] 与换热管垂直布置，作为加热热载体的辅助热源。硅炭棒共计 9 根，3 根串联为 1 相，加热方式为 380 V 三相星型接地，温度采用温控仪表可控硅三相半控调压方式控制。热载体出口与热载体流量控制阀相联接。

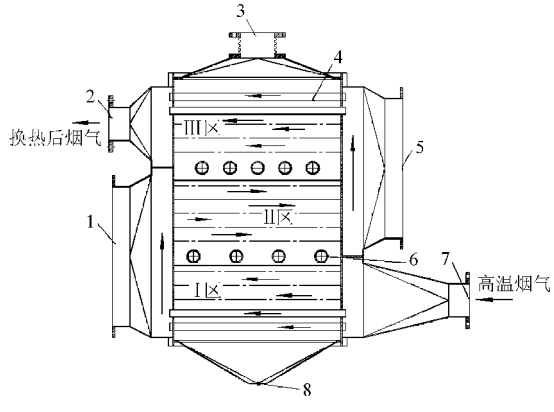

图 2　热载体换热器的结构

Fig. 2　Structure of the heat exchange

1、5. 检修口　2. 烟气出口　3. 热载体入口　4. 换热管　6. 烟气保护套管　7. 烟气入口　8. 热载体出口

换热器中陶瓷球热载体的温度随时间变化的规律如图 3 所示。图 3 表明，当热载体达到设定温度后，通过硅炭棒保温措施，热载体温度脉动幅度很小，基本保持恒定，证明设计的热载体换热器的换热效果与温度保持能力较好，满足研究要求。

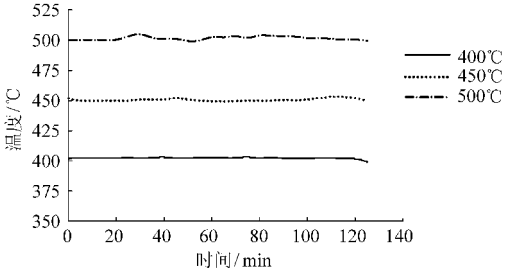

图 3 换热器中热载体的温度变化规律

Fig. 3 Temperature variation of the ceramic balls in heat exchanger

3.2 反应管

传统反应管的结构为“Z”形[4~7],由于其形状相对复杂,期间热载体与炭粉在反应管出口处的速度较小,因此热载体与炭粉的分离采用了动力离心分离方式。其缺点是消耗动力,并且动力旋转装置在高温环境条件下的连续运转能力较差;还由于反应管未采取烟气保温措施,导致运行中热损失较大,反应管温度较低,影响热裂解效率。新型下降管的结构如图 4 所示,反应管近似“V”形,外径89 mm,壁厚6 mm。外部保温套管直径300 mm,壁厚3 mm。两段反应管夹角 90°,总长 2.4 m。其中反应管上端采用波纹管联接法兰,其目的是消除膨胀热应力的影响,以保护系统。

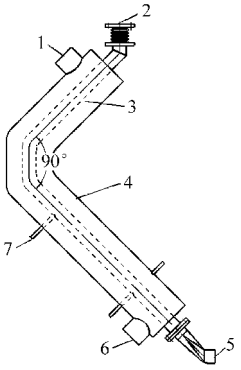

图 4 烟气保温反应管

Fig. 4 Down flow tube heated by hot smoking

1. 烟气入口 2. 波纹管法兰 3. 反应管 4. 烟气保温套管 5. 热载体颗粒出口 6. 烟气出口 7. 温度测量管

在下降管验证试验台上的玉米秸秆热裂解试验表明,在陶瓷球 500℃,当生物质颗粒流经反应管 1.5 m 的距离时,其挥发分可以析出 60% 以上,生物质热裂解挥发程度与温度和下降管长度之间的关系如图 5 所示。而“V”形反应管的设计长度为 2.4 m,可以保证生物质颗粒完全热解。

3.3 颗粒喂料器

根据热载体与生物质物料物性和运动特性的不同,分别采用了惯性和螺旋推进形式的喂料器。生物质粉喂料器为二级螺旋结构,其结构原理参见文献[8]。陶瓷球热载体由于温度较高、而且容易由于挤压而产生破碎,从而影响循环利用,因此不宜采用机械喂料方式。但陶瓷球流动性好,利用其自身重力作用下的惯性运动可以实现给料,利用该特性,设计开发的热载体喂料器的结构如图 6 所示。而原热

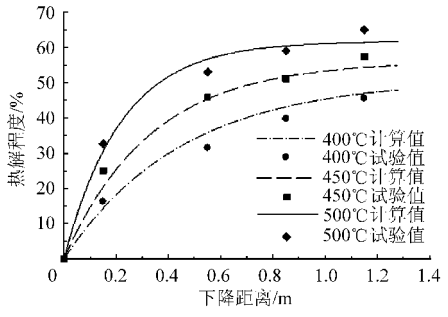

图 5 生物质热裂解程度与下降距离的关系

Fig. 5 Comparison of volatile fraction *vs* drop distance

载体喂料器依靠阀 2 与筒壁之间的间隙控制热载体流量[3~4],其缺点是流量控制不够精确,间隙太小,热载体不易下落,而间隙过大,流量不易精确控制。通过在原结构上增设流量控制阀的方式可以解决这个问题。试验证明,通过在喂料器下端出口增设一锥形控制阀 1,依靠流量控制口的大小可以精确控制流量。流量控制阀直径与热载体流量之间的关系如图 7 所示,根据需要更换不同直径的控制阀可以精确控制热载体的流量。

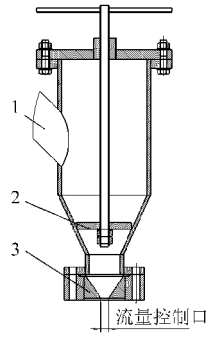

图 6 热载体流量控制阀

Fig. 6 Controllable value of the ceramic balls

1. 锥形控制阀 2. 流量控制阀 3. 热载体入口

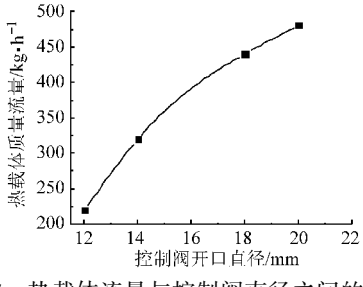

图 7 热载体流量与控制阀直径之间的关系

Fig. 7 Variation of ceramic mass flow rate *vs* the value diameter

3.4 热载体/炭粉分离系统

参与热裂解反应后的热载体物性不变,可以循环利用,而生物质粉则在析出挥发分后变为炭粉。为了循环利用热载体以及避免炭粉进入换热器产生燃烧,须把炭粉与热载体彻底分离。如图 8 所示,具有一定速度和惯性的热载体与炭粉混合颗粒从反应管 2 流出后,热载体沿水平方向的位移远远大于炭粉颗粒,因此落在筛板 6 上,并沿筛板通过热载体出口 7 流入热载体循环提升机,而大部分炭粉通过反应管 2 的端口与筛板 6 之间的间隙 L 落入炭粉收集箱。少量被热载体携带并落在筛板上的炭粉在向热载体出口 7 流动过程中通过筛孔进入炭粉收集箱,

从而实现炭粉的分离。利用粒子图像测速仪对颗粒流场的冷态试验研究表明，L 应在 70 ~ 120 mm 之间，L 过大，热载体无法到达筛板；L 过小，较多的炭粉会落到筛板上，影响分离效果。热载体颗粒能够把炭粉完全携带出反应管，并且热载体与炭粉可以利用自身惯性进行分离，少量被热载体携带未被分离的炭粉经过筛板后均通过筛孔落入炭粉收集箱。该方法既减少了颗粒分离所消耗的动力，同时又增强了装置的连续运行能力。

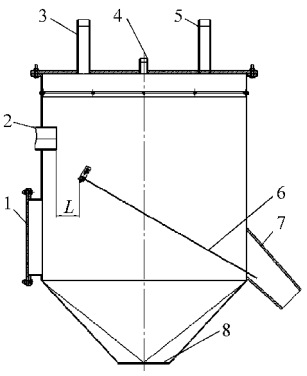

图 8　颗粒分离器

Fig. 8　Structure of particle separator

1. 检修口　2. 反应管　3、5. 热解气引出口　4. 观察口　6. 筛板　7. 热载体出口　8. 炭粉出口

3.5　热裂解气冷凝装置

对热裂解产生的气态产物急剧冷却可以使其中的大分子可冷凝成分液化，得到生物油。所设计的喷淋冷却装置的结构如图 9 所示，热裂解气体从下端入口进入喷淋塔，与从喷嘴喷出的雾状生物油接触，期间发生相间热交换，气体得到冷却，而生成的生物油通过齿轮泵并经过换热器降温后循环使用，不可冷凝气体被引风机引出，同时经过一个小型旋风分离器，旋风分离器可以把其中的可液化成分进一步冷凝，并沿液体回流管回流。

喷淋装置中喷嘴的选择最为关键，它对于生物油液化率影响较大。利用粒子图像测速仪对不同类型喷嘴的试验研究表明，DBX 空心锥喷嘴的雾化效果较好，其特点是能产生空心锥形喷雾形状，喷射区域成环形，喷雾角度为 40° ~ 90°。该喷嘴能在低压下产生良好的雾化效果，尤其适合应用在要求快速热交换的工况中。同时，喷嘴的通道大而通畅，能减少或消除阻塞现象。

喷嘴孔径和压力变化对喷雾雾滴的速度、平均直径和雾化锥角等参数均有影响。利用粒子图像测速仪对喷嘴颗粒场的试验表明，喷嘴孔径 4.0 mm、压力 0.2 MPa 时的雾滴粒径、雾化均匀度、雾化锥角较为适合生物质热解气的喷淋冷却、所产生的雾滴可以完全覆盖喷淋塔。在生物质处理能力为 5 kg/h 的流化床上对喷淋装置的试验表明，对于秸秆类热裂解液化的液体产物的收集率达到 43%，证明喷淋装置的冷却效果较好。

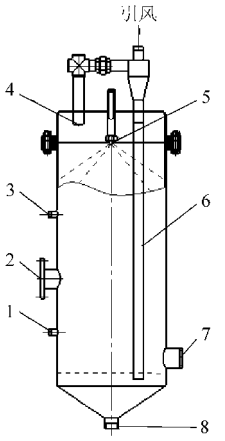

图 9　喷淋冷却系统

Fig. 9　Bio-oil quenching system

1. 测温口　2. 防暴口　3. 测压口　4. 不冷凝气体出口　5. 喷嘴　6. 回流管　7. 热解气入口　8. 生物油出口

4　结束语

设计开发了固体热载体加热工艺的生物质热裂解液化下降管反应器。对反应器的主要组成部件的结构设计及性能进行了阐述。各部件测试研究表明，热载体温度与喂料量控制较为精确，热载体与炭粉颗粒分离效果较好；流体压力为 0.2 MPa，孔径为 4.0 mm 的 DBX 喷嘴的喷雾特性非常适合作为生物油喷淋冷却，利用喷淋冷却方法对秸秆类生物质热裂解液化的生物油收集率达到 43%。

参　考　文　献

1　Doug Elliott. IEA bioenergy implementing agreements[R]. Task 34. Newsletter: Pyrolysis of Biomass, 2010.

2　赵军, 王述洋, 乔国朝, 等. 转锥式生物质热解机械系统的研制[J]. 农业工程学报,2007, 23(5):198 ~ 200.
Zhao Jun, Wang Shuyang, Qiao Guochao, et al. Development of rotating cone biomass pyrolysis mechanical system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(5):198 ~ 200. (in Chinese)

3　崔喜彬, 李志合, 易维明, 等. 下降管式生物质快速热解反应器温度场控制与检测[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):133 ~ 136.
Cui Xibin, Li Zhihe, Yi Weiming, et al. Control and measurement of temperature field in a down-flow tube reactor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):133 ~ 136. (in Chinese)

4　李永军. 下降管式生物质热裂解液化试验装置的研究[D]. 北京:中国农业大学,2003.
Li Yongjun. Experimental study on down flow tube reactor of biomass pyrolysis of bio-oil [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)

5　李志合. 下降管反应器内生物质热裂解规律的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2010.
Li Zhihe. Principles of biomass pyrolysis in down flow tube reactor [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010. (in Chinese)

(下转第 115 页)

本文取 $\eta=0.28$，$\lambda=0.05$。由此可得平衡腔内液体泄漏量与扬程的关系曲线，如图 3 所示。

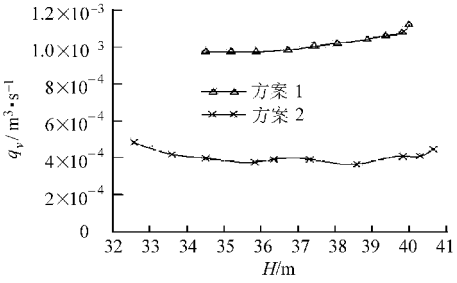

图 3　平衡腔内液体泄漏量与扬程的关系曲线

Fig. 3　Curves of fluid leakage and pump head of the balance cavity

从图 3 可以看出，在不开平衡孔的情况下，即浮动叶轮平衡孔全闭状态，平衡腔内液体泄漏量随扬程的变化很小，几乎为常数。这是因为由于叶轮的高速旋转，平衡腔内的液体受到离心力的作用，液体会成为一个整体随叶轮一起旋转，处于相对平衡状态。开平衡孔后，即浮动叶轮平衡孔全开状态，平衡腔内液体泄漏量随着泵扬程的增大而增大。平衡腔内液体的流动是由叶轮的旋转和平衡孔泄漏共同引起的，且液体通过平衡孔泄漏引起的流动为主流，所以平衡腔内的压力与不开平衡孔时比较有很大的下降。

3　结束语

用专用设备模拟浮动叶轮的运行工况，试验得到了叶轮后密封环前、后压力与扬程的试验曲线，计算得到了平衡腔内液体泄漏量的特性曲线。试验解决了浮动叶轮平衡腔内液体泄漏量和压力的计算问题，可根据这些曲线确定相似泵叶轮后密封环的几何尺寸和叶轮平衡孔的总面积以及水泵轴向力。

参　考　文　献

1　关醒凡. 泵的理论与设计[M]. 北京：机械工业出版社，1987.

2　张翼飞，仝晓龙. 离心泵轴向力的自动平衡法[J]. 水泵技术，2005(4)：27～28.
Zhang Yifei, Tong Xiaolong. The axial automatic balance method of centrifugal pump[J]. Pump Technology, 2005(4):27～28. (in Chinese)

3　阮志坤，周叔萍. 浮动叶轮自动平衡离心泵轴向力的原理与实践[J]. 水泵技术，2002(5)：29～32.
Ruan Zhikun, Zhou Shuping. The principle and practice of the floating impeller automatic balance of the centrifugal pump axial [J]. Pump Technology, 2002(5):29～32. (in Chinese)

4　马威，邹立莉. 屏蔽泵轴向力自动平衡装置的研究[J]. 流体机械，2002，30(5)：35～37.
Ma Wei, Zou Lili. The research of automatic balance device of the shield pump axial[J]. Fluid Machinery, 2002, 30(5): 35～37. (in Chinese)

5　顾永泉. 流体动密封[M]. 北京：石油大学版社，1990.

6　刘在伦，魏烈江，齐学义，等. 新型轴向力平衡装置间隙泄漏量的计算[J]. 农业机械学报，2005，36(12)：74～76.
Liu Zailun, Wei Liejiang, Qi Xueyi, et al. Calculation of gap leakage flow rate in new axial trust device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(12): 74～76. (in Chinese)

7　刘在伦，王保明，梁森. 浮动叶轮平衡腔内压力的试验分析[J]. 排灌机械，2007，25(5)：6～8.
Liu Zailun, Wang Baoming, Liang Sen. Experimental study on the pressure in the balance of floating impeller[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007,25(5):6～8. (in Chinese)

(上接第 119 页)

6　何芳. 生物质热解液化过程分析和试验[D]. 上海：上海理工大学，2004.
He Fang. Process analysis on biomass flash pyrolysis for liquids and experiments [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2004. (in Chinese)

7　李永军，易维明，柏雪源，等. 下降管式生物质热解液化技术中的除尘设备[J]. 农机化研究，2009(4)：187～190.
Li Yongjun, Yi Weiming, Bai Xueyuan, et al. Selection and experimental analysis of dust filter in the down flow tube reactor for biomass fast pyrolysis liquefaction [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(4): 187～190. (in Chinese)

8　李志合，易维明，李永军. 等离子体加热流化床反应器的设计与试验[J]. 农业机械学报，2007，38(4)：66～69.
Li Zhihe, Yi Weiming, Li Yongjun. Design and experimental study of fluidized bed heated by plasma flow jet [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):66～69. (in Chinese)