

# 斜截体头型弹丸低速垂直入水实验研究

唐楚淳<sup>1</sup>, 黄振贵<sup>1</sup>, 陈志华<sup>1</sup>, 罗驭川<sup>1,2</sup>, 郭则庆<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094; 2. 航天动力测控技术研究所, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 为分析非轴对称头型弹体的入水弹道特性开展了弹丸低速垂直入水实验研究。基于高速摄像方法进行不同斜截体头型弹丸低速垂直入水对比实验, 得到斜截体头型弹丸斜切角大小对入水空泡、运动速度、俯仰角的影响规律。结果表明: 斜切角较小的斜截体弹头可能无法在入水时产生裹体空泡, 也没有尾部撞击空泡壁面的现象; 尾部撞击空泡壁面的入水时间与入水速度无关; 斜切角越大, 弹体倾斜得越明显, 入水速度衰减得越快; 5°斜切角的弹体俯仰角变化程度最小, 也相对最为稳定。

**关键词:** 斜截体头型弹丸; 低速垂直入水; 斜切角; 空泡; 俯仰角

中图分类号: TJ012.3+6 文献标志码: A 文章编号: 1000-1093(2020)S1-0054-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.S1.008

## Experimental Study of the Low-speed Vertical Water Entry Process of Oblique Head Projectile

TANG Chuchun<sup>1</sup>, HUANG Zhengui<sup>1</sup>, CHEN Zhihua<sup>1</sup>, LUO Yuchuan<sup>1,2</sup>, GUO Zeqing<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China; 2. Aerospace Power Measurement and Control Technology Research Institute, Xi'an 710025, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the water entry ballistic characteristics of non-axisymmetric head-type projectiles, the effect of chamfered angle size on the cavitation and ballistic characteristics of water entry under the condition of low speed vertical water entry was investigated based on the high-speed photography and the different oblique contrast experiments of low-velocity head-type projectiles in the process of low-speed vertical water entry were made to obtain the influence of oblique angle on cavitation, velocity and pitch angle of projectile with the head of slope-intercept body. The experimental results show that the slant body warhead with small chamfered angle may not be able to produce the envelope-cavitation when entering water and there is no tail hitting on the cavitation wall either; the water-entry time of the tail hitting on the cavitation wall is independent of the inlet velocity; the greater the oblique angle is, the more the projectile body is inclined obviously. The variation of pitch angle of projectile body at 5° chamfered angle is the least and relatively the most stable; the larger the chamfered angle is, the faster the water-entry velocity decays.

**Keywords:** oblique head projectile; low speed vertical water entry; chamfered angle; cavitation; pitch angle

收稿日期: 2019-11-20

基金项目: 装备预先研究重点实验室基金项目(614260403041803); 中央高校基本科研业务费专项项目(309190112A2, 30917012101)

作者简介: 唐楚淳(1995—), 男, 硕士研究生。E-mail: 593186050@qq.com

通信作者: 黄振贵(1986—), 男, 副研究员, 博士。E-mail: hzgkeylab@njust.edu.cn

## 0 引言

弹体低速入水时会产生空泡,空泡的形成、发展和溃灭会对弹体入水空泡和入水后的弹道特性产生显著影响。弹体入水速度、角度、头部结构等都会改变空泡的形态和弹道特性,其中弹体头部结构的影响较为显著。

早期对于弹体垂直入水的研究主要集中于平头和圆头弹体的低速入水,何春涛等<sup>[1]</sup>在不同攻角和不同速度条件下,对平头圆柱形运动体的垂直入水空泡形态进行了实验研究。紧接着人们开始研究锥头弹丸和平头弹、圆头弹丸入水的不同。杨衡等<sup>[2]</sup>研究了 $90^\circ \sim 150^\circ$ 锥头弹体入水过程中自由液面的波动特性、空泡的演变过程及入水弹道的稳定性,通过对比试验得到弹体入水空泡、入水弹道与入水速度、入水角度之间的关系。王瑞琦等<sup>[3]</sup>用高速摄像机记录了平头弹丸、 $90^\circ$ 锥头弹丸、圆头弹丸、截锥体头弹丸入水过程中空泡的演变过程,比较分析了4种弹丸的入水空泡形态和空泡的闭合方式。黄振贵等<sup>[4]</sup>拍摄了 $90^\circ$ 锥头弹丸低速入水的空泡形态演变过程,讨论了不同入水冲击速度下空泡的闭合方式及其演变过程,分析了空泡闭合时间、闭合点水深和弹头空泡长度随入水速度的变化规律,以及不同水深位置空泡直径的变化规律。

同时,弹丸入水时弹道的稳定性和超空泡形成溃灭过程也是研究的热点。Chen等<sup>[5]</sup>对高速入水弹丸的弹道稳定性进行了实验研究,分别确定了头部形状、撞击速度和入水姿态角对细长弹丸弹道稳定性的影响,并对其进行了量化。Shi等<sup>[6]</sup>利用高速摄像机研究了入水过程中的超空泡现象及其伴随的多相流动,揭示了水下高速射弹引起的超空腔形成、生长和溃灭过程,并研究了喷溅、表面变形、超空腔扭转、空腔内向下射流等非正常流体动力学过程。

后来的研究方向主要向不同入水条件下(如不同头型、不同入水速度和角度等)弹体的空泡形态、受力特性及稳定性方面转变。路丽睿等<sup>[7]</sup>基于高速摄像方法,开展不同头型射弹低速倾斜入水对比试验,得到了射弹头型对入水空泡、运动速度、俯仰角和阻力系数的影响规律。宋武超等<sup>[8]</sup>针对回转体低速倾斜入水过程空泡的生成机理和演化特性开展研究,通过不同入水速度和入水角度回转体倾斜入水对比实验,研究了入水速度和入水角度对入水空泡、回转体速度、俯仰角及阻力

系数的影响规律。Jiang等<sup>[9]</sup>对约束姿态弹丸在不同入射角和通风量下的入水进行了实验研究,并在不受弹丸姿态扰动影响的情况下研究了不同入射角和通风量下近水面空腔流动特性。王云等<sup>[10]</sup>通过模型高速入水实验,利用高速摄像机拍摄了弹体入水过程和空泡形态演变过程,得到了4种头部外形模型的弹道曲线,并分析了头型、入水角、入水速度对水下弹道的影响。肖春华等<sup>[11]</sup>针对高速运动体入水超空泡的形成问题,采用高速摄像测量方法,对尖头、圆头、平头3种典型头部外形的轴对称体入水超空泡形态、减阻特性和稳定性进行了研究。

综上所述,现阶段对于平头、圆头、锥头等轴对称弹体的入水研究已经比较丰富,而对非轴对称头型弹丸的入水实验研究还比较少。本文基于现有实验条件,在弹丸低速垂直入水条件下,研究 $5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $25^\circ$ 切角的斜截体弹丸入水情况,分析不同切角情况下弹丸入水的空泡形态以及斜切角对俯仰角和弹丸速度变化的影响,以期对斜截体弹丸入水设计提供参考。

## 1 实验装置和参数

实验装置示意图如图1所示,主要包括玻璃水缸、高速摄像机、计算机、照明灯、导管、支架、电磁铁、靶纸和底部防护层等。水缸由15 mm厚普通玻璃粘制,底部覆盖防护层。实验中用电磁铁吸住弹体并悬停在导管上方,导管由细线固定并与水缸水面垂直,前后各采用1 000 W的灯照明,用美国Vision Research公司生产的Phantom高速相机,以2 500帧/s的拍摄速率对入水空泡的演变过程进行拍摄,实验用水采用自来水。

弹丸模型如图2所示,模型主要由2部分组成,

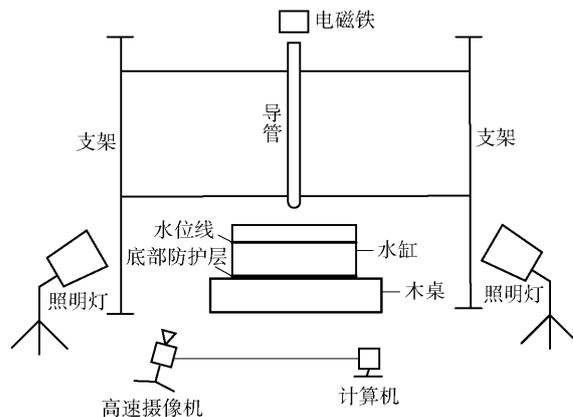


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

头部为斜截体,其余部分为圆柱体。模型总长度  $L$  为 35 mm,直径  $D$  为 7 mm;斜截体头部斜切角依次

为  $5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $25^\circ$ ,分别以模型 A、模型 B、模型 C 代称;弹丸材料选用 45 号钢。

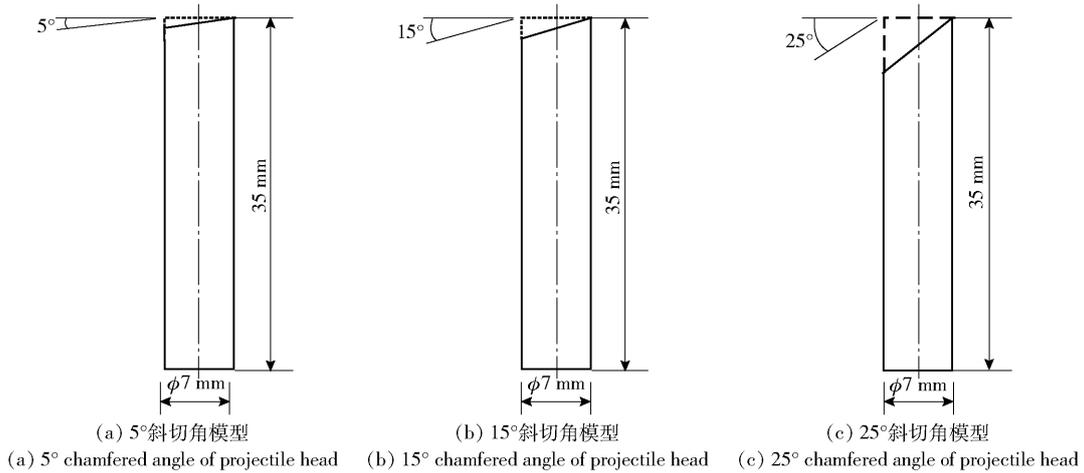


图 2 弹丸模型参数图

Fig. 2 Parameter diagram of projectile model

## 2 实验结果与分析

### 2.1 斜切角对空泡形态的影响

利用第 1 节的实验装置及参数进行实验研究,实验工况 1 为  $5^\circ$  斜切角模型 A 以 4.65 m/s 速度入水;工况 2 为  $15^\circ$  斜切角模型 B 以 4.26 m/s 速度入水;工况 3 为  $25^\circ$  斜切角模型 C 以 4.10 m/s 速度入水。三者皆为垂直入水,即入水角  $\theta = 90^\circ$ 。取弹丸头部接触水面时刻作为  $t = 0$  的时刻,3 种工况下入水过程中弹丸的航行姿态及空泡演变过程如图 3、图 4 和图 5 所示。

由图 3 可见: $5^\circ$  斜切角的弹体在弹身完全入水后(9.2 ms)所产生的空泡并未包裹住弹体全身,而是仅存在于弹体头部至弹身中间的一部分。然后弹体头部空泡开始溃灭,尾部空泡被拉伸成细长空泡,同时液面上方产生较为明显的喷溅现象以及冠状水幕(22 ms)。紧接着弹体尾部空泡也开始溃灭,弹体产生明显的偏转直至落入水缸底部防护层。图 4 中  $15^\circ$  斜切角的弹体在弹身完全入水后(10 ms)所产生的空泡完全包裹住了弹体;随后弹身开始倾斜,弹体尾部撞击了空泡的壁面(22 ms);随着倾斜角度的加深,空泡逐渐被撕裂成两部分并快速溃灭。图 5 中  $25^\circ$  斜切角的弹体在弹身完全入水后(10 ms)产生了能完全包裹住弹体的空泡,水面上方产生环状水幕并伴有飞溅现象(22 ms);随后弹体尾部撞击了空泡壁面并将空泡撕裂为不规则的形状;随着空泡的溃灭,弹身逐渐偏转至水平。

对比分析图 3、图 4、图 5 可以得出结论:斜切角

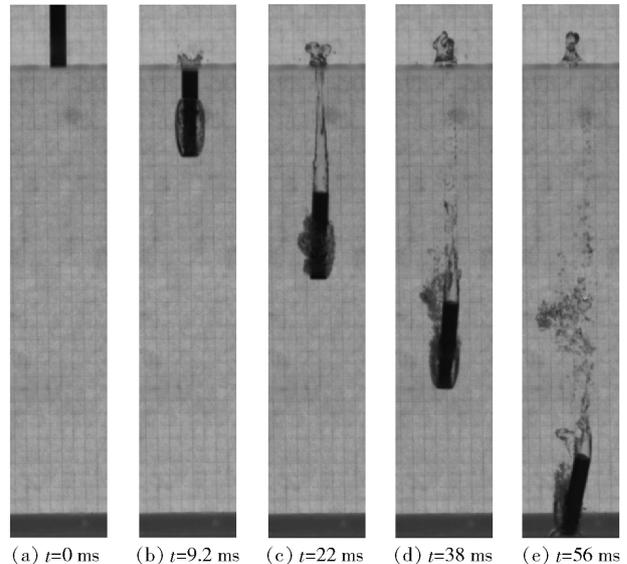


图 3 工况 1 条件下各时刻弹丸入水姿态及空泡形态

Fig. 3 Water-entry attitudes and cavitation shapes of projectile at various moments under Condition 1

较小的斜截体弹头可能无法在入水时产生裹体空泡,同时也没有尾部撞击空泡壁面的现象;尾部撞击空泡壁面的入水时间与入水速度无关;斜切角角度越大,弹体倾斜得越明显,甚至会呈水平姿态。

### 2.2 斜切角对俯仰角的影响

俯仰角为弹体相对于水平面的角度,其变化量可以作为弹体倾斜度或者稳定性的指标之一。图 6 给出了 3 种工况下弹体俯仰角的变化曲线。

由图 6 可知: $5^\circ$  斜切角弹体俯仰角变化程度最小也相对最为稳定,俯仰角变化在  $10^\circ$  以内; $15^\circ$  斜

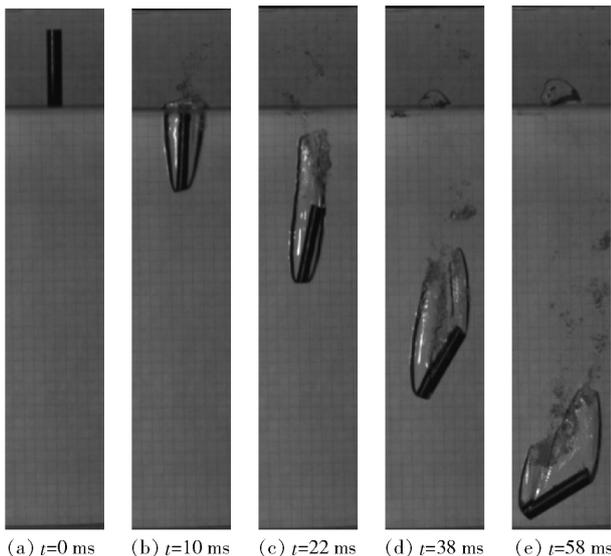


图 4 工况 2 条件下各时刻弹丸入水姿态及空泡形态

Fig. 4 Water-entry attitudes and cavitation shapes of projectile at various moments under Condition 2

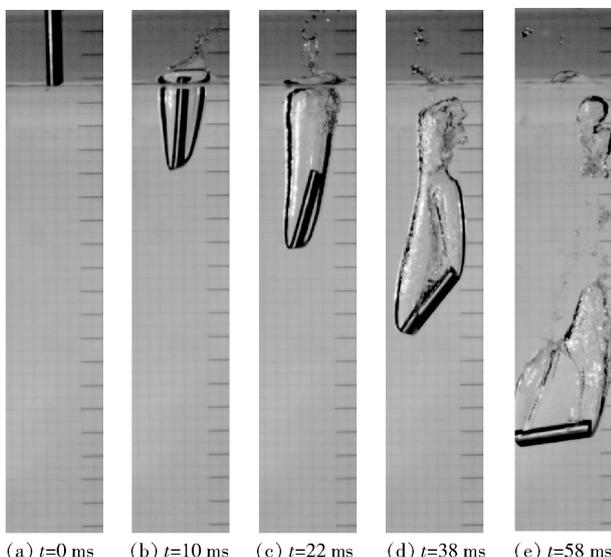


图 5 工况 3 条件下各时刻弹丸入水姿态及空泡形态

Fig. 5 Water-entry attitudes and cavitation shapes of projectile at various moments under Condition 3

切角弹体俯仰角变化程度较大,变化在 50°左右; 25°斜切角弹体俯仰角变化程度最大且最不稳定,到最后弹体甚至呈现接近水平的姿态。

### 2.3 斜切角对速度的影响

取弹体头部率先与水面接触的部位为像素获取点,对入水图像像素点进行数据采集,得到位移曲线;进一步对位移曲线求导,得到入水速度变化曲线如图 7 所示。

分析图 7 可知: 5°斜切角弹体入水初速度和末

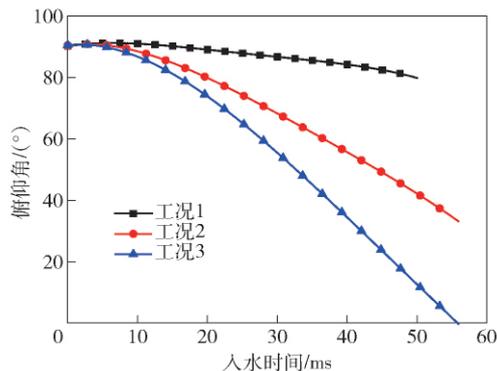


图 6 俯仰角变化曲线

Fig. 6 Change curves of pitch angle

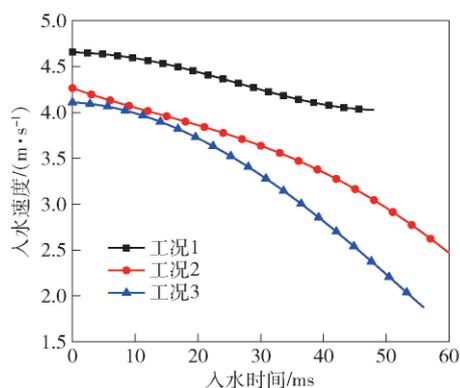


图 7 速度变化曲线

Fig. 7 Change curves of water-entry velocity

速度差距不大,速度衰减不剧烈。刚入水时由于弹体头部产生部分空泡,速度减小得较慢;随着尾部细长空泡被拉断,速度减小幅度加大,在 46 ms 时触及底部防护层。15°斜切角弹体初入水时速度曲线较为平缓,由于产生了裹体空泡而将速度保持得较好,但在 20~22 ms 时速度陡然下跌。这是因为弹体尾部撞击了空泡壁面而将空泡撕裂,空气涌入空泡并使其快速溃灭,末速度衰减至 2.47 m/s。25°斜切角情况与 15°基本类似,不同之处在于 25°斜切角弹体速度衰减得更快,最后阶段弹体甚至接近于水平姿态。

### 3 结论

本文利用高速摄影系统研究了不同斜切角头型斜载体弹丸在低速垂直入水条件下斜切角角度大小对入水空泡形态及弹道特性的影响,对比分析了不同模型在低速垂直入水中的现象,得到了斜切角大小对斜载体头部弹丸入水空泡、运动速度、俯仰角的影响规律。得出如下主要结论:

- 1) 斜切角较小的斜载体弹头可能无法在入水

时产生裹体空泡,同时也没有尾部撞击空泡壁面的现象;尾部撞击空泡壁面的入水时间与入水速度无关;斜切角角度越大,弹体倾斜得越明显,甚至会呈水平姿态。

2)  $5^\circ$ 斜切角弹体俯仰角变化程度最小也相对最为稳定,俯仰角变化在  $10^\circ$  以内;  $15^\circ$ 斜切角弹体俯仰角变化程度较大,变化在  $50^\circ$  左右;  $25^\circ$ 斜切角弹体俯仰角变化程度最大且最不稳定,到最后弹体甚至呈现接近水平的姿态。

3)  $5^\circ$ 斜切角弹体入水初速度和末速度差距不大,速度衰减不剧烈;斜切角角度越大,入水速度衰减得越快。

### 参考文献(References)

- [1] 何春涛,王聪,魏英杰,等.圆柱体垂直入水空泡形态试验[J].北京航空航天大学学报,2012,38(11):1542-1546.  
HE C T,WANG C,WEI Y J,et al. Vertical water entry cavity of cylinder body[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2012,38(11):1542-1546. (in Chinese)
- [2] 杨衡,张阿漫,龚小超,等.不同头型弹丸低速入水空泡试验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2014,35(9):1060-1067.  
YANG H,ZHANG A M,GONG X C,et al. Experimental study on low-speed inclined water-entry cavity of different head-shaped projectiles[J]. Journal of Harbin Engineering University,2014,35(9):1060-1067. (in Chinese)
- [3] 王瑞琦,黄振贵,郭则庆,等.不同头型弹丸低速垂直入水实验研究[J].兵器装备工程学报,2017,38(11):45-50.  
WANG R Q,HUANG Z G,GUO Z Q,et al. Experimental study of low speed vertical water entry with different head shape projectiles[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017,38(11):45-50. (in Chinese)
- [4] 黄振贵,王瑞琦,陈志华,等.  $90^\circ$ 锥头弹丸不同速度下垂直入水冲击引起的空泡特性[J].爆炸与冲击,2018,38(6):1189-1199.  
HUANG Z G,WANG R Q,CHEN Z H,et al. Experimental study of cavity characteristic induced by vertical water entry impact of a projectile with a  $90^\circ$  cone-shaped head at different velocities[J]. Explosion and Shock Waves,2018,38(6):1189-1199. (in Chinese)
- [5] CHEN T,HUANG W,ZHANG W,et al. Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles[J]. Ocean Engineering,2019,175:16-24.
- [6] SHI H H,TOH M. High-speed photography of supercavitation and multiphase flows in water entry[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation. Ann Arbor,MI,US: University of Michigan,2009:16-20.
- [7] 路丽睿,魏英杰,王聪,等.不同头型射弹低速倾斜入水空泡及弹道特性试验研究[J].兵工学报,2018,39(7):1364-1371.  
LU L R,WEI Y J,WANG C,et al. Experimental investigation into the cavity and ballistic characteristics of low-speed oblique water entry of revolution body[J]. Acta Armamentarii,2018,39(7):1364-1371. (in Chinese)
- [8] 宋武超,王聪,魏英杰,等.回转体倾斜入水空泡及弹道特性实验[J].北京航空航天大学学报,2016,42(11):2386-2394.  
SONG W C,WANG C,WEI Y J,et al. Experiment of cavity and trajectory characteristics of oblique water entry of revolution bodies[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2016,42(11):2386-2394. (in Chinese)
- [9] JIANG Y H,BAI T,GAO Y,et al. Water entry of a constraint posture body under different entry angles and ventilation rates[J]. Ocean Engineering,2018,91:53-59.
- [10] 王云,袁绪龙,吕策.弹体高速入水弯曲弹道实验研究[J].兵工学报,2014,35(12):1998-2002.  
WANG Y,YUAN X L,LÜ C. Experimental research on curved trajectory of high-speed water-entry missile[J]. Acta Armamentarii,2014,35(12):1998-2002. (in Chinese)
- [11] 肖春华,于昆龙,姜裕标,等.轴对称体入水超空泡形态的高速摄像测量研究[C]//第十届全国流体力学学术会议.杭州:浙江大学,中国计量大学,浙江省力学学会,2018:245-246.  
XIAO C H,YU K L,JIANG Y B,et al. Research on high-speed camera measurement of axisymmetric body into water[C]//Proceedings of the 10th National Conference on Fluid Mechanics. Hangzhou,China: Zhejiang University,China Jiliang University, and Zhejiang Society of Theoretical and Applied Mechanics,2018:245-246. (in Chinese)