

# Experimental Study on Pulverized Coal Explosion Characteristics of Coal-to-Oil

Min Yao, Bin Huang, Weilin Tang

Shenhua Ningxia Coal Industry Group Co., Ltd., Yinchuan Ningxia  
Email: yaomin@nxmy.com

Received: Jun. 8<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jun. 26<sup>th</sup>, 2017; published: Jun. 29<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In the new coal chemical industry, the prevention and control of coal dust explosion is particularly important. Based on the analysis of the conditions and influencing factors of coal dust explosion, the explosion characteristics such as explosion concentration, maximum explosion pressure, maximum pressure rise rate and limit oxygen content of pulverized coal were tested based on the 20 L dust explosion characteristic test system. The experimental results provide important theoretical basis for coal-to-oil enterprises to take effective safety and technical measures.

## Keywords

Coal Dust, Lower Explosive Limit, Maximum Explosion Pressure, Maximum Pressure Rise Rate, Limiting Oxygen Content

---

# 煤制油煤粉爆炸特性实验研究

姚敏, 黄斌, 汤卫林

神华宁夏煤业集团有限责任公司, 宁夏 银川  
Email: yaomin@nxmy.com

收稿日期: 2017年6月8日; 录用日期: 2017年6月26日; 发布日期: 2017年6月29日

---

## 摘要

在新型煤化工行业中, 煤粉爆炸的防治问题尤为重要。在对煤尘爆炸的条件及影响因素进行分析的基础上, 基于20 L粉尘爆炸特性测试系统, 测试了某煤制油企业使用煤粉的爆炸下限浓度、最大爆炸压力、最大压力上升速率、极限氧含量等爆炸特性参数。所得实验结果为煤制油企业采取有效的安全技术措施提供了重要的理论依据。

## 关键词

煤尘, 爆炸下限, 最大爆炸压力, 最大压力上升速率, 极限氧含量

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着经济的快速发展,我国能源、化工行业对化石燃料的需求量将不断增大。近年来,我国对石油的依赖越来越强。目前,我国已经跃居为世界第二大原油进口国[1] [2],2014年我国原油进口量占原油消费总量的60%左右。预计未来这一比重还会增加。石油安全关乎到我国经济的平稳发展以及国民的生产生活,所以建立多元化、多样化的石油供应体系势在必行。我国煤炭资源储量丰富,大力发展煤化工工业可以有效的解决石油供应单一这一问题。

煤制油是以煤为原料,经过化学加工,生产柴油、汽油、航空煤油等油品和石油化工产品的煤炭洁净利用技术[1]。在煤制油生产工艺过程中需要将原煤磨制成煤粉以便实现煤粉的高效利用。若煤粉在制备、储存过程中处理不当,易发生自燃和爆炸。煤粉爆炸一般规模大,极易发生二次爆炸,释放的能量相对可燃气体、液体及蒸气要大的多,人员伤亡和财产损失往往也更大[3]。笔者利用20 L粉尘爆炸特性测试系统研究了某煤制油企业所使用煤粉的爆炸特性,为企业安全管理工作以及采取有效的安全技术措施提供了基本的依据。

## 2. 煤尘爆炸机理及影响因素分析

### 2.1. 煤尘爆炸机理

煤主要由挥发分、固定碳、水分和灰分四部分组成。煤尘粒子表面通过热传导和热辐射,从点火源获得点火能量,表面温度快速升高,挥发分析出,挥发分气体和空气混合后引起气相点火。另外煤尘粒子本身从表面一直到内部,相继发生熔融和气化,迸发出微小的火花,成为周围未燃烧煤尘的点火源,使煤尘着火,从而扩大了爆炸范围。

### 2.2. 煤尘爆炸影响因素分析

国内外学者经过大量研究得出煤尘爆炸是由热爆炸机理和链式反应机理共同作用的一种非均质反应[4]。煤尘爆炸需要具备四个要素:(1)煤尘自身具有爆炸性;(2)适宜的氧浓度;(3)煤尘以一定的浓度在空气中悬浮;(4)有足够能量的点火源。与此同时,煤尘爆炸还受到诸多因素的影响如:浓度、粒径、氧浓度以及自身挥发分、水分和灰分等因素的影响。现分析如下:

#### 2.2.1. 煤尘浓度对爆炸的影响

煤尘爆炸存在一个最佳浓度,当煤尘处于最佳浓度时其与空气中的氧气反应最为彻底,造成的冲击波超压越大,其破坏性也就最高。当煤尘浓度小于或者大于这一浓度时,煤尘的爆炸压力都会减小,甚至不发生爆炸。

#### 2.2.2. 粒径对煤尘爆炸的影响

相同质量的煤尘,煤尘颗粒越小,其总表面积就越高。表面积增加使粉尘和空气的接触面积增大,促进了氧化反应,同时也使受热面积增加,使可燃气体释放量增加,最终导致爆炸威力增加。国内外学

者研究得出：随着煤尘粒径的减小，爆炸威力相应的增加，但是当煤尘的粒径小于 0.03 mm 时，爆炸增强的趋势就比较平缓。

### 2.2.3. 氧浓度对爆炸的影响

当爆炸环境中氧气含量减小时，可以升高煤尘云的爆炸下限，同时，增加了煤尘云最小着火能量[5]。起到抑制煤尘爆炸的作用。

### 2.2.4. 挥发分对煤尘爆炸的影响

国内外学者通过研究得出，煤尘可燃挥发分含量越高，煤尘越容易发生爆炸。中煤科工集团重庆研究院有限公司实验室测得煤尘挥发分含量越高，其爆炸下限也就越低。相同浓度下的煤尘，挥发分含量越高则爆炸威力越大。

### 2.2.5. 水分对煤尘爆炸的影响

煤中的水分可以减弱和抑制爆炸，煤尘中的水分蒸发时，可以吸收大量的热量，起到减弱和阻碍粉尘云着火的作用。水分可以使煤尘之间互相粘结，阻止粉尘云的形成。

### 2.2.6. 灰分对煤尘爆炸的影响

灰分是煤尘中的不参与燃烧的物质，它可以吸收煤尘燃烧时放出的热量，起到冷却和阻止热量传播的作用。灰分含量增加导致煤尘云着火能量增高，其爆炸性也会随之降低。实验表明，20%以下的灰分对煤尘的爆炸性没有很大的影响；当含量达到 30%~40%时，爆炸性才会下降；当灰分含量超过 45%后，煤尘云的着火将会变得极其困难。

从上述内容看出，煤尘爆炸受自身挥发分、水分和灰分等的影响，所以我们应当研究实验使用煤粉的各个组分的含量。

## 2.3. 煤尘成分分析

通过对该企业使用的煤尘进行工业分析，得出其水分、灰分、挥发分比例如下表 1 所示。

从表中我们可以得出煤样的灰分含量小于 20%，几乎对煤尘爆炸没有影响。所以十分有必要研究其爆炸特性。

## 3. 实验概述

### 3.1. 实验系统

本实验采用 20 L 爆炸实验装置，实验装置如图 1 所示，包括爆炸罐体、喷尘系统、点火系统、数据采集系统、真空配气以及除尘装置六大部分。可以用来测试气体、粉尘和气体粉尘混合物的爆炸特征参数如爆炸压力和爆炸压力上升速率等。

其中，爆炸罐体为 20 L 近球形容容器，结构强度按爆炸过程中可能出现的最大爆炸压力设计；粉尘喷尘装置由粉尘储存仓、0.6 L 喷粉高压气室、快速电磁阀和连接管路组成，整个系统完全密闭；点火装置主要由点火火花杆和点火药头组成，并且与数据采集系统相连，点火的同时可以实时采集数据；数据采集系统由压力传感器、数据采集软件以及数据采集装置组成，采集爆炸过程中爆炸场的压力参数的变化情况；真空配气装置主要由真空泵，配气罐体或高压气瓶及连接管路组成；除尘装置主要由除尘器和排风扇组成。20 L 粉尘爆炸特性测试系统主要技术指标如表 2 所示。

### 3.2. 实验方法与条件

#### 3.2.1. 实验判据

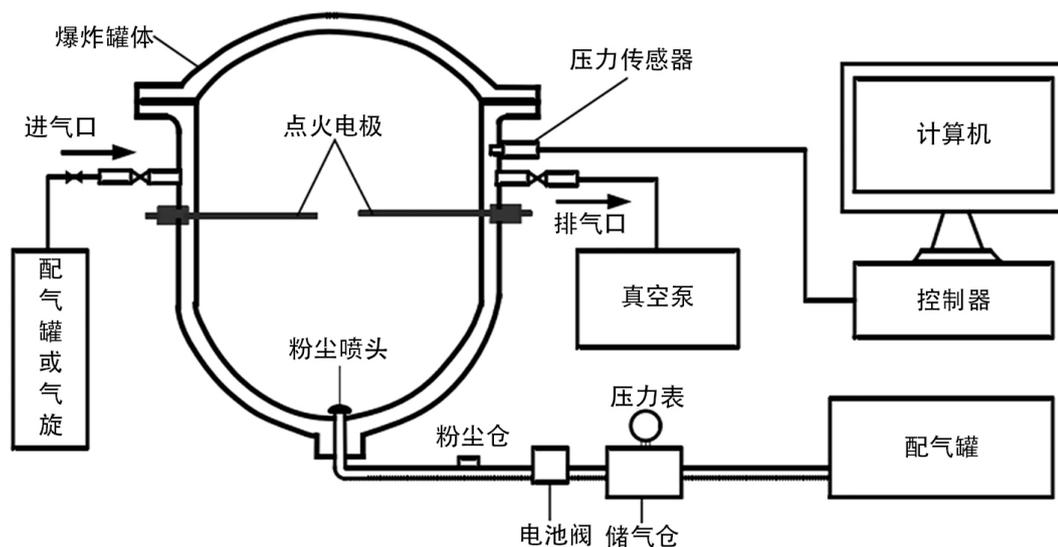
实验参照 GB/T16425-1996《粉尘云爆炸下限浓度测试方法》。按 10 g/m<sup>3</sup> 的整数倍确定试验粉尘浓

**Table 1.** The industrial analysis of coal samples**表 1.** 煤样的工业分析测试结果

项目	水分( $M_{ad}$ ) (%)	灰分( $A_d$ ) (%)	挥发分( $V_{ad}$ ) (%)
含量	10.49	19.28	24.84

**Table 2.** 20 L dust explosion characteristics test system technical indicators**表 2.** 20 L 粉尘爆炸特性测试系统技术指标

序号	系统工艺	技术指标
(1)	爆炸罐体	20 L/近球形
(2)	罐体设计承压	3.0 MPa
(3)	储尘罐容积	0.6 L
(4)	储气罐充气压力	2.0 MPa
(5)	压力测量范围	0~1.0 MPa

**Figure 1.** 20 Explosion characteristics test system diagram**图 1.** 20 爆炸特性测试系统示意图

度。所测粉尘试样爆炸下限浓度  $C_{min}$  则介于  $C_1$  (3 次连续试验压力均小于 0.15 MPa 表压的最高粉尘浓度) 和  $C_2$  (3 次连续试验压力均等于或大于 0.15 MPa 表压的最低粉尘浓度) 之间, 即:  $C_1 < C_{min} < C_2$  [6]。

参考 GB/T16426-1996《粉尘云最大爆炸压力和最大压力上升速率测定方法》测试不同浓度煤粉尘云的爆炸压力变化规律。

### 3.2.2. 实验步骤

- (1) 将点火头在爆炸罐中心部位安装并固定, 将爆炸罐上盖和所有阀门关闭;
- (2) 打开储尘仓, 把称好的粉尘装入储尘仓, 并拧紧储尘仓;
- (3) 打开排气阀, 开启真空泵, 将爆炸罐体抽至真空度为 60 kPa, 关闭真空泵和排气阀门;
- (4) 向储气仓充入 2.0 MPa 高压空气;
- (5) 启动计算机应用程序开始试验, 点火并采集、记录、保存、打印试验数据;
- (6) 打开爆炸罐清扫干净后继续下次实验。

### 3.2.3. 实验条件

煤制油工程所用煤粉的粒径基本在  $90\ \mu\text{m}$  以下, 粒径小于  $75\ \mu\text{m}$  的煤粉大于 80% [7]。所以本次实验的煤粉经过 200 目标筛筛分, 以确保粒径处于  $75\ \mu\text{m}$  以下; 点火头为 10 KJ 化学点火药头, 由 40% 的铝粉、30% 的硝酸钡和 30% 的过氧化钡组成; 实验环境温度  $15\sim 25^\circ\text{C}$ , 环境相对湿度  $70\%\sim 90\%\ \text{rh}$ 。

## 4. 实验结果分析

常用的衡量粉尘云爆炸特性的实验参数有爆炸下限、最低着火温度、最小着火能量、最大爆炸压力、最大压力上升速度以及极限氧浓度等, 但这都不是物质的基本性质, 而是与环境条件、测试方法和实验设计确定的判据有关[8]。为了有效的了解该企业所使用煤尘的爆炸危险性, 笔者采用 20 L 粉尘爆炸特性测试系统研究了煤尘的爆炸下限、最大爆炸压力、最大压力上升速率以及煤尘爆炸的极限氧含量。

### 4.1. 煤尘爆炸下限

所得煤尘云的爆炸下限如图 2 所示。由图可知, 煤尘浓度在  $30\sim 40\ \text{g}/\text{m}^3$  之间的爆炸压力变化速率远大于  $10\sim 30\ \text{g}/\text{m}^3$  之间的变化速率。当煤尘浓度为  $10\ \text{g}/\text{m}^3$  时最大爆炸压力小于  $0.15\ \text{MPa}$ , 当煤尘浓度为  $20\ \text{g}/\text{m}^3$  时最大爆炸压力大于  $0.15\ \text{MPa}$ 。本次所采用的煤尘的爆炸下限为:  $10\ \text{g}/\text{m}^3 < C < 20\ \text{g}/\text{m}^3$ 。

### 4.2. 最大爆炸压力和最大压力上升速率测试

通过实验测试了不同浓度煤尘的最大爆炸压力及最大压力上升速率随时间变化的关系图, 如图 3 和图 4 所示。

从图 3 中可以看出, 初始时煤尘量少, 容器内的气体可以为煤尘爆炸提供充足的氧气, 此时煤尘的最大爆炸压力随着煤尘浓度的增加也相应增加; 当煤尘达到最佳爆炸浓度后, 煤尘量增加, 爆炸所需要的氧气也相应的增加, 但是容器内的氧气有限, 导致煤尘的最大爆炸压力逐渐减小。从图中 3 可得, 当煤尘浓度达到  $300\ \text{g}/\text{m}^3$  时, 最大爆炸压力达到最大值为  $0.686\ \text{MPa}$ 。

从图 4 可得, 煤尘云爆炸的最大压力上升速率随着煤尘浓度的增加也呈现先增加后减小的趋势。煤尘浓度为  $200\ \text{g}/\text{m}^3$  时, 最大压力上升速率达到最大值  $51.562\ \text{MPa}/\text{s}$ 。当煤尘浓度小于  $200\ \text{g}/\text{m}^3$ , 最大压力上升

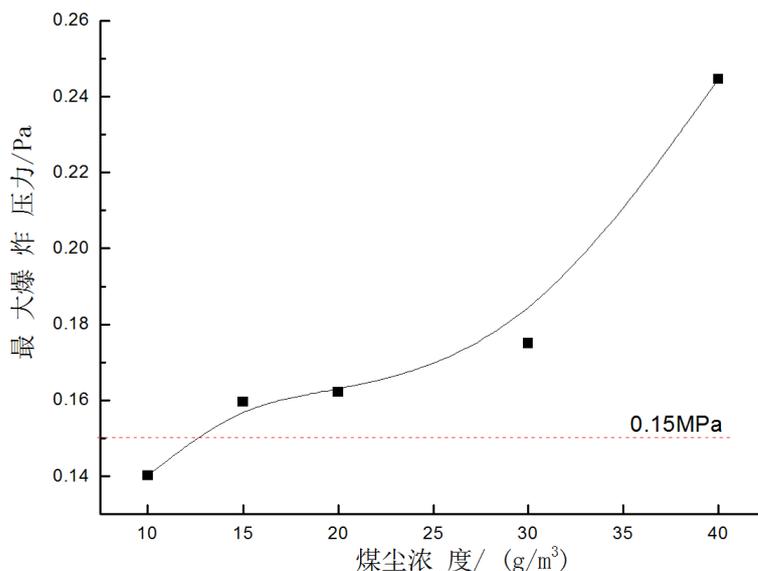
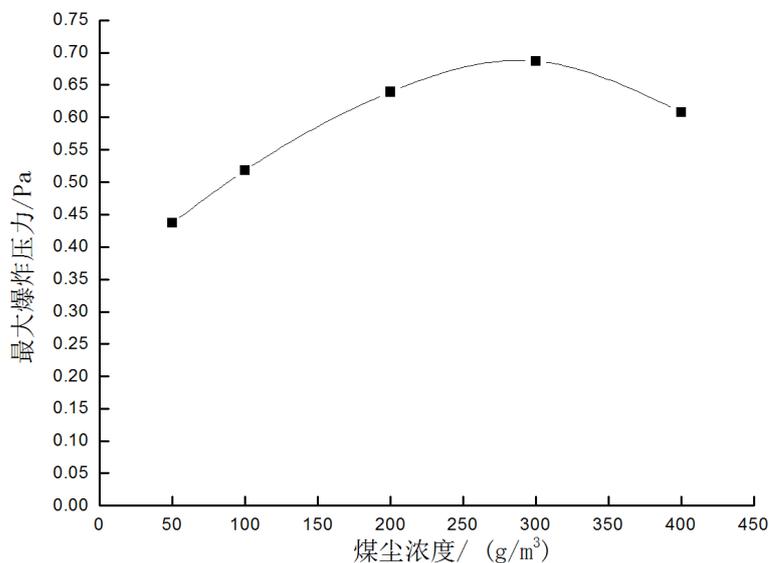


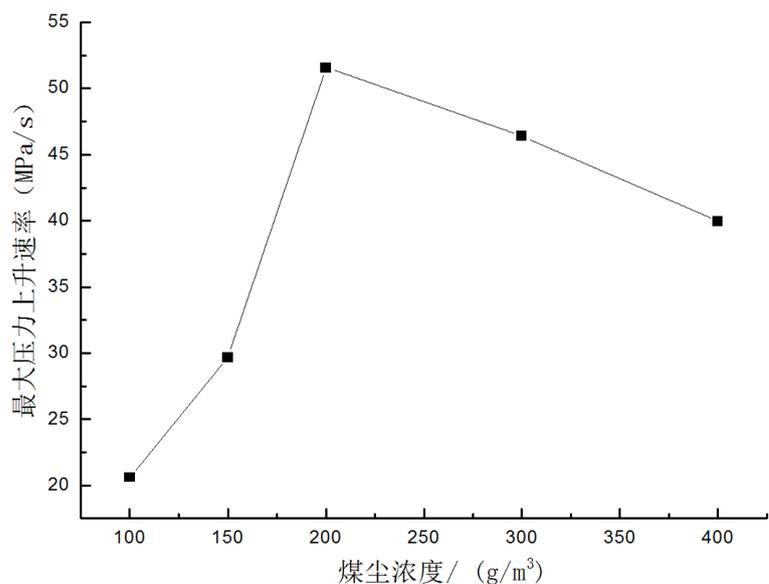
Figure 2. Test results of coal dust explosion lower limit

图 2. 煤尘爆炸下限测试结果



**Figure 3.** Test results of maximum explosion pressure of coal dust in different concentrations

**图 3.** 不同浓度煤尘云最大爆炸压力测试结果



**Figure 4.** The results of the maximum pressure rise rate of different concentrations of coal dust cloud explosion

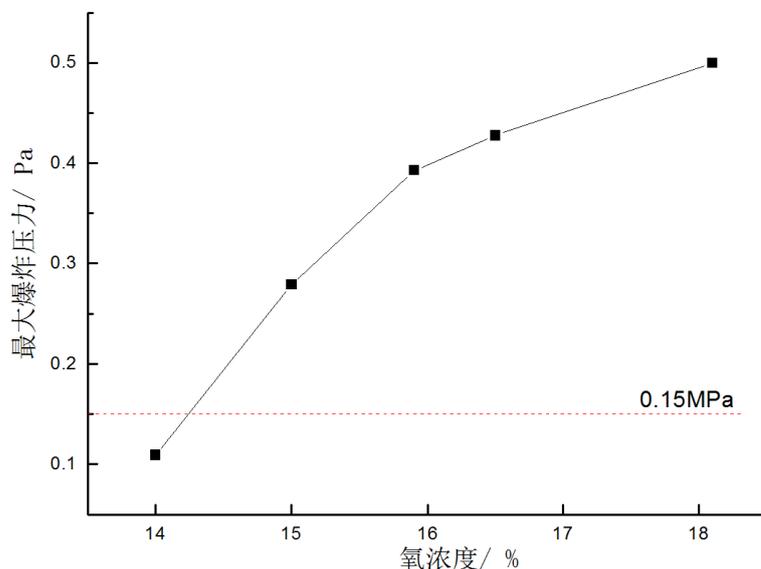
**图 4.** 不同浓度煤尘云爆炸最大压力上升速率测试结果

速率随着煤尘浓度的增加而显著增加，当煤尘浓度大于  $200 \text{ g/m}^3$ ，最大压力上升速率以较小的速度减小。

### 4.3. 煤尘爆炸极限氧含量测定

适宜的氧浓度是煤尘爆炸的四要素之一，在实际生产过程中，企业往往采用降低氧含量的方法来杜绝煤自燃或爆炸。所以研究煤尘云爆炸的极限氧含量对企业采取有效的措施预防煤尘爆炸具有重要的指义。

本次实验测试了  $300 \text{ g/m}^3$  煤尘云在不同氧浓度条件下的爆炸情况，选取最大爆炸压力超过  $0.15 \text{ MPa}$  作为煤尘云发生爆炸的实验判据。测试结果如图 5 所示。



**Figure 5.** The maximum explosion pressure of coal dust under different oxygen concentration

**图 5.** 不同氧浓度下煤尘最大爆炸压力

由图 5 可得, 当氧浓度在 16%~18% 内变化时, 最大爆炸压力随着浓度的减小而缓慢减少; 当氧浓度小于 16% 时, 最大爆炸压力随着氧浓度的减少快速减低。可得煤尘云爆炸的极限氧含量为 15%。当氧浓度低于 14% 时, 可以有效的抑制煤尘发生爆炸。

## 5. 结论

(1) 基于 20 L 粉尘爆炸特性测试系统, 测试出某煤制油企业使用煤粉的爆炸下限为  $10 \text{ g/m}^3 < C < 20 \text{ g/m}^3$ ; 当煤尘浓度为  $300 \text{ g/m}^3$  时, 最大爆炸压力达到最大值为 0.686 MPa; 当煤尘云浓度为  $250 \text{ g/m}^3$  时, 煤尘云最大压力上升速率达到最大值为 51.562 MPa/s。在常温常压条件下, 煤尘云爆炸的极限氧浓度为 15%。

(2) 所得结论为煤制油企业有效预防煤粉爆炸事故提供了重要的理论依据。

## 基金项目

神华集团公司科技创新项目(SHJT-14-13)。

## 参考文献 (References)

- [1] 周丽, 任相坤, 张希良. 我国煤制油产业政策综述[J]. 化工进展, 2012, 31(10): 2207-2212.
- [2] 郝剑虹, 高海洋, 张富兴. 煤制油技术在我国的发展现状[J]. 北京汽车, 2010, 15(2): 43-46.
- [3] 苏丹, 李化, 高聪, 黄卫星. 运用本质安全原理预防煤粉爆炸[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(11): 114-118.
- [4] 李润之. 瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 煤炭科学研究总院, 2007.
- [5] 靳鑫. 氧浓度对粉尘点燃特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [6] GB/T 16425-1996 《粉尘云爆炸下限浓度测试方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [7] 黄鑫, 秘义行, 陈彦菲, 杜霞. 煤制油工程中煤粉制备系统的火灾危险性分析[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(3): 179-183.
- [8] 钟英鹏. 镁粉爆炸特性实验研究及其危险性评价[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2008.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[me@hanspub.org](mailto:me@hanspub.org)