

# Application of Materials Qualification Technology to the Materials Used in Thermal Power Generation Equipments

Guofeng Chen<sup>1\*</sup>, Changpeng Li<sup>2</sup>, Xu Hua<sup>1</sup>, Zhongjiao Zhou<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Corporate Technology, Siemens Ltd., China, Shanghai

<sup>2</sup>Corporate Technology, Siemens Ltd., China, Beijing

<sup>3</sup>Division of Micro/Nano Manufacturing, State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing

Email: [guofeng.chen@siemens.com](mailto:guofeng.chen@siemens.com)

Received: Mar. 15<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 27<sup>th</sup>, 2017; published: Mar. 30<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

During the manufacturing and application of thermal power generation equipments, evaluation of the materials' properties is required to meet the design and operating needs, namely the process of Materials Qualification (MQ). The Materials Qualification (MQ) is defined as "The process of establishing that a given material is of sufficient quality. This generally involves testing, analysis, and establishment or confirmation of standards or requirements". In practice, understanding the process and methods of MQ can be greatly helpful to enhance the material design, choice, manufacturing and application. In this paper, the applications of MQ are specifically exemplified for the materials used in the advanced thermal power generation equipments (such as F/H/L-class gas turbines and 700°C steam turbines), and some methodologies have been described to further improve the understanding of MQ technology execution and application in the field of materials science and engineering.

## Keywords

Materials Qualification, Application, Gas Turbine, Steam Turbine

---

# 材料认证技术在发电设备用材料中的应用与实践

陈国锋<sup>1\*</sup>, 李长鹏<sup>2</sup>, 华旭<sup>1</sup>, 周忠娇<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西门子中国研究院, 上海

---

\*通讯作者。

文章引用: 陈国锋, 李长鹏, 华旭, 周忠娇. 材料认证技术在发电设备用材料中的应用与实践[J]. 材料科学, 2017, 7(2): 196-203. <http://dx.doi.org/10.12677/ms.2017.72025>

<sup>2</sup>西门子中国研究院, 北京

<sup>3</sup>清华大学摩擦学国家重点实验室微纳制造分室, 北京

Email: guofeng.chen@siemens.com

收稿日期: 2017年3月15日; 录用日期: 2017年3月27日; 发布日期: 2017年3月30日

## 摘要

在发电设备的制造及应用中, 需要对采用的材料性能进行评价以确定这些材料是否满足设计和应用要求, 这样就产生一个材料认证的过程与技术应用。材料认证被定义为: “通过测试、分析等手段来确定一种材料具备足够的性能来满足某种、某些设计要求, 符合某项标准的全过程或部分过程” 在实践中, 需要对材料认证中的过程、方法、手段等技术进行具体应用, 这样可以科学地了解和认识材料认证的意义, 从而有助于促进这些材料从设计、选择、制造到应用的实施。本文通过先进的热力发电设备, 如F/H/J级燃气轮机和700℃汽轮机用材料在研发、检测和应用中的认证实践, 对材料认证进行重新与全面的理解。

## 关键词

材料认证, 应用, 燃气轮机, 汽轮机

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

人类社会的发展历程以材料为主要标志: 材料发展的每一小步, 世界进步就体现出一大步。所以从材料产生之初, 材料就与应用密切相关, 而材料科学与工程技术也密不可分[1]。为了实现材料的应用, 根据设计要求需要对材料进行选择和对选择的材料进行性能评价, 以确定其满足应用的所有要求。那么对材料进行选择、评价的过程, 以及评价时所进行的某一项、某些具体工作, 或者全部所涉及工作, 就是材料的认证。因此材料认证被定义为: “通过测试、分析等手段来确定一种材料具备足够的性能来满足某种、某些设计要求, 符合某项标准的全过程或部分过程”。这些要求或标准一般由设计者来制定。

通常对材料认证技术的理解是: 基于已经建立起来并相对成熟的工作流程, 从材料来源、获取、实验检测、结果分析等方面进行全面考核, 最终实现材料的确定, 生产制造和产品应用。下面以先进的F/H/J级燃气轮机以及700℃汽轮机的材料研发和应用, 从材料认证不同过程, 不同层次以及材料数据库建设来对其进行综合介绍。

## 2. 材料认证的过程

材料认证的实施和应用需要一个完整的流程, 图1给出了一个典型的完整材料认证具体流程图。这一流程图体现在一个能够按照产品设计要求从选择材料、检测材料、确定材料到最终实现材料供应和应用的实施步骤。无论材料的简单、复杂程度, 基本上以应用为目的的材料选择、确定、研发和供应等都遵循这一过程, 主要不同在于具体实施步骤的或多或少, 或简或繁。

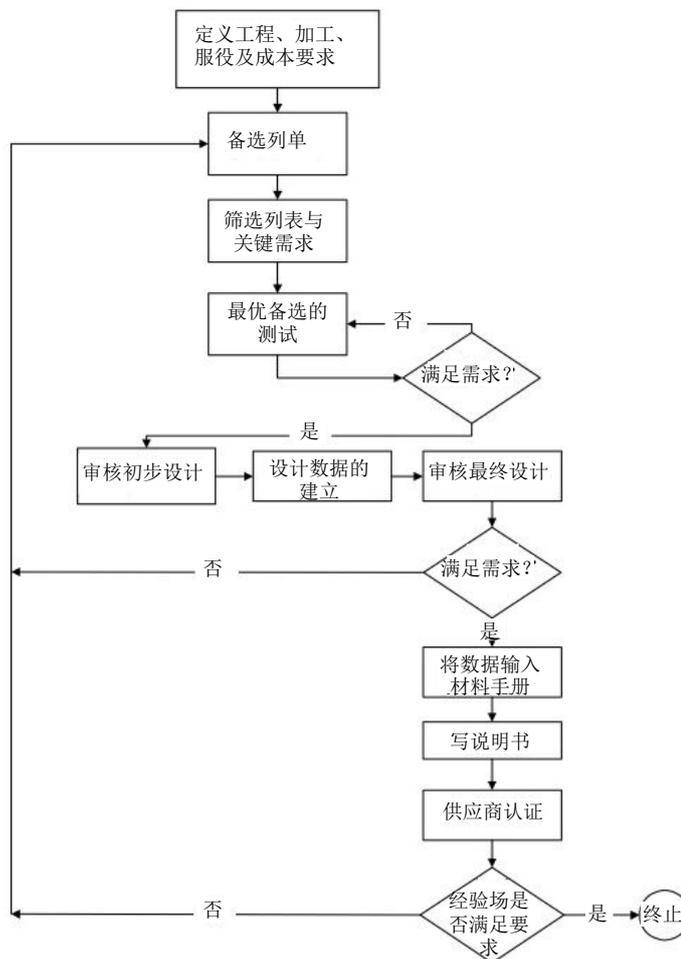


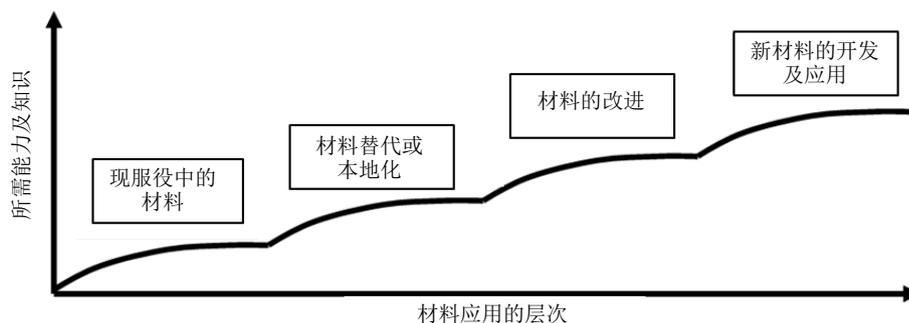
Figure 1. A flow chart of materials qualification [2]  
图 1. 一个具体的材料认证流程图[2]

在材料认证的具体实施中，我们更多了解或参与到的是这一过程中的部分具体工作，如：对某一材料的生产制备工艺(常规工艺、先进工艺等)；材料样件的测试分析(标准件、非标准件等，以及采用的不同等级的标准，如国标、欧标、美标等)；材料组织结构不同的影响(不同相、未知相、不同结构等的存在、多少及分布等)；不同测试方法的建立与评测(常规手段、新手段等)；以及对实验数据的建模与数据分析(计算材料软件、工具等)；再到应用时的制造工艺、方法和检测的评定(铸造、焊接、锻造、机加工、无损检测等)，最后完成到产品或部件的真正应用。如果形成了一个成熟的材料具体要求，最终能够产生一个相应标准的制定，从而把材料认证的具体工作提升到作为指导性的准则。

### 3. 材料认证的层次

根据材料的应用分析，可产生如图 2 所描述的材料应用的不同层次。一般而言，在高等学校或科研机构，对于材料方面的研究主要集中于新材料的研发、测试和表征等一系列的具体的实践。而工厂企业中的材料应用更多在于常规材料在不同应用场合下进行的选择和考核。然而，企业界对新产品的开发和应用也需要新材料的开发和应用。

因此，所有材料的研究和应用基本上都可以归为图 2 中的基本关系[2]。材料的研发和应用基本上都基于目前已经了解或使用的材料知识上；然后是材料的替代以扩大应用和了解范围；再之是对材料的改



**Figure 2.** The relationship between materials application level and the required effort and knowledge [2]

**图 2.** 材料应用的层次和相关知识、能力的关系[2]

进和提高以满足新的要求；最后是为了未来产品设计进行的众多新材料研发和应用。每一具体的层次对应相应的所需的知识水平或者要付出的时间和精力。

## 4. 材料数据库

前面提到，材料的研发和应用基本上都基于目前已经了解或使用的材料知识，所以非常有必要建立这些已经了解或应用的材料数据库[3] [4]。该数据库应该包含各类材料的已知基本信息，如材料类别、化学组分、基本性能(物理、化学、热力学、机械力学等)、对应参考标准和供应商信息等，甚至还应包括正在研发的新材料以及未来材料应用的发展趋势，以及可能的新方法在材料研究和应用上的适用性等信息。由于材料的不断发展和性能的不断改善，材料数据库也处于一个不断发展更新的过程中。当然，从商业角度来看，不是所有的数据都会公开，特别是一些牵涉到核心材料和巨大商业价值的材料数据往往是数据来源方的机密。

## 5. 材料认证应用举例

### 5.1. 材料(工艺)的替代

以燃气轮机为例，燃气轮机具有热效率高、污染少、耗水少等优点，参与联合循环的燃气轮机组能达到更高的热效率，因而燃气轮机在电力上的应用越来越广泛。进入二十一世纪后，我国采取了“设备换技术”的方针，打捆招标引进并开展了国外先进的 F 级燃气轮机在国内的制造，使我国燃气轮机的生产制造实现了跨越式进步[5]。为了实现真正的国产化，材料的替代是必然之路。在最初的阶段，可以实现非核心部件的常规材料的依据原来设计标准的本地化供应，然后进行按照本地标准的本地化供应[6]。随着生产和制造技术的成熟，将会有更多的先进材料实现国内的本地化生产和供应，特别是完全按照本地标准来生产。图 3 给出了上海电气引进的西门子 SGT-4000F 燃气轮机的本地化步骤。以第一阶段中的末端缸体材料 16Mo3 来说，首先采用原标准规范中规定的 16Mo3 材料进行生产[7]，紧接着要进行依靠本地标准的对应钢材的认证，最终完成完全意义上的材料本地化和替代。因此，材料替代是一个长期而艰巨的巨大工程。同样，其他引进的设备都要经历这样一个材料替代的过程。

在产品研发中，在原型机上，为了保证其可靠性，材料应用上往往会采用高端并超出设计要求的或者安全冗余度最大的材料，此时材料的成本因素并不是主要的。然而当原型机实现或达到设计要求，在下一步推向市场时，为了使产品具有更大竞争力，材料的成本因素(原材料成本，制造成本等)会被考虑进来，这个时候会采取降低原型机采用的材料标准和规格，在满足设计和应用要求的前提下对所用材料进行可能的替代。这一替代工作将一直贯穿产品的整个生命服役周期。

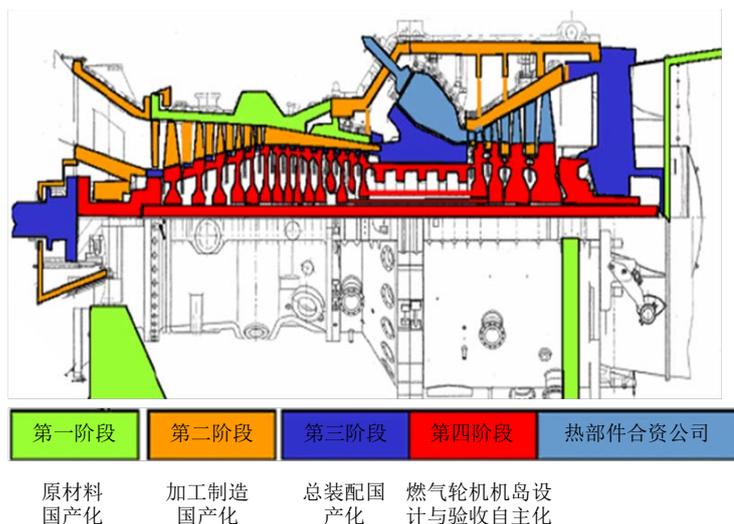


Figure 3. The localization process of SGT-4000F gas turbine [7]

图 3. SGT-4000F 燃气轮机的本地化阶段性步骤[7]

## 5.2. 材料(制备)的改进

众所周知,研制一种新的产品往往需要很大的投入和产品开发时间。更多情况下,设备制造企业为了满足市场需求和面对竞争者的挑战,需要不断地对已有产品进行升级换代。在这一过程中,产品中某一部件或部分部件将不得不面对根据新的要求而进行材料更换或改进,同时也考虑到新技术的应用。这样,对现有材料新形势下的性能进行评价以确定是否只是性能改进或者新材料替换。例如,随着燃气轮机大型化、高功率化和更高效率的发展趋势,现在最新型的H级(西门子,通用电器)[8],甚至于J级燃气轮机(三菱)已经或很快进入商业运行[9]。这类新型燃气轮机的一、二级高温合金单晶叶片的尺寸也随之变大,使得使用这类材料的叶片的加工难度和成本随之增加。这种情况下,采用制造同样尺寸但成本较低的定向凝固合金就显得比较重要,因此性能和一代单晶高温合金相差不多的二代定向凝固高温合金的使用就显得尤为重要。这时在一代基础上对二代定向凝固高温合金的开发就是一种材料的改进。

随着科学的不断进步,更多的先进制造设备被推出和应用。在材料替代或改进过程中,往往不是简单的材料更替,而是通过一种新的加工技术手段来满足新的要求。这时对新技术的应用要采取一个重新认证的过程,以确定其可靠性和市场适应性。

## 5.3. 新材料(工艺)的研发

无论是在学术领域,或者企业研发,新材料的发展是最为看重的。当然企业在看重新材料前景的同时也必须对其市场价值、商业需求等方面进行评估。新材料的发现和推出此起彼伏,从中发现其商业应用价值,完成材料的终极应用是个必然的过程。一方面,在新材料的萌芽之初,有效进行市场和商业指导,避免其走很多弯路并具有真正商业用途;另一方面,对已经初步开发出的新材料进行初步认证,以便尽快缩短其完成应用的时间。

例如,在燃气轮机用热障涂层方面,自从八十年代 $ZrO_2(7YSZ)$ 材料被用作陶瓷层后,一直是应用的核心材料。随着对热障涂层材料性能认识和了解的逐步完善,人们对这一陶瓷层提出了新的要求,因此开发具有低热导率,高稳定性的陶瓷材料具有重大的现实意义[10]。然而,从目前应用角度,目前已经开发出的新型陶瓷材料虽然具有某些突出的性能,但是在实现其真正应用方面,还没有完全满足现有的设计要求,因此需要对其进行全面考核和新的认证工作。图4列出了一系列的可能替代 $ZrO_2$ 材料的新型低

热导率陶瓷。

## 6. 材料认证实践与指导

通过上面对材料认证的分析，有必要形成一个实施材料认证的有指导意义的方法，即在了解和认识材料认证的不同体现的基础上如何实现材料的具体认证。在产品应用设计中，从材料应用中的初始阶段，针对某项具体材料应用的问题，建立全面理解这一应用在材料认证体系、流程中的定位，以及和上、下游具体认证组分的关联，以实现其目的明确性。下面我们通过一些具体应用例子如 700℃ 汽轮机材料等来解释说明材料认证工作的具体体现。

### 6.1. 材料选择

材料的选择以已经确定的具体应用条件与要求为参考。那么只有满足这些条件与要求才能作为材料认证的最终结果。这样通过综合比较以及特定检测来实现这样的过程。然而对于新的设计要求来说，作为材料认证的具体体现，往往把其中最核心的要求作为认证的主要工作来开展。对于 700℃ 应用的汽轮机，锅炉材料，作为众多设计要求的最重要一项是要满足在设计使用温度下使用  $10^5$  小时达到 100 MPa 的蠕变断裂强度。基本上大致满足设计要求所选择的材料都已存在，而不需要特定研发。只不过由于经济上的考虑以及新的使用条件的改变，需要对材料进行重新认证以确定其满足新的设计要求。这样根据确定的使用温度，特别是针对 700℃ 情况下，一些镍基高温合金将是不二的选择，如 In740, In617 等[11]。但是，由于采用这类材料所导致的成本的成倍增加，也需要针对已开发材料的潜力发掘，从而实现在成本增加有限的情况下，获得性能的满足要求。

### 6.2. 材料替代

前面已经提到，材料替代是材料认证中一个重要应用部分。发电设备领域需要材料替代的任务很多，且材料品种众多，在一般应用中看似简单，但实际上需要考虑的因素非常之多。

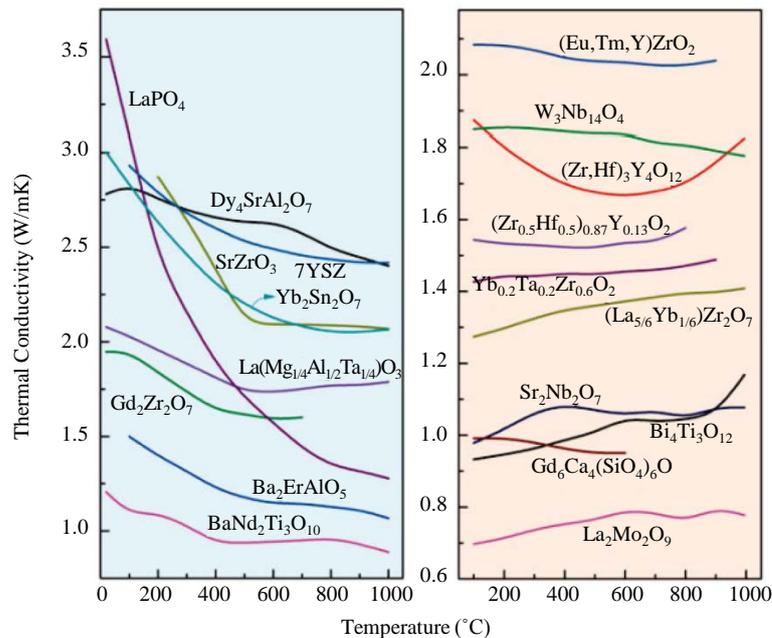


Figure 4. The thermal conductivity of advanced ceramic materials [10]

图 4. 新型低热导率陶瓷材料[10]

以低碳钢、低合金钢的国产替代为例，国际上这类钢生产工艺成熟，标准完善，供应商众多。多数情况下，发生材料替代的工作被简单的材料数据对比所取代，只是简单地比较一下原来使用材料所根据的标准要求，如果数据没有出入和差错，就认为替代工作完成。然而，在这项看似简单的实际操作中，众多因素有可能被遗忘或忽视。首先，我们应该知道需要材料替代的部件的应用条件和要求，比如常温条件和高温条件的不同将对替代材料的性能评估要求也不同。以前面提到的 16Mo3 材料为例，因为这种材料可用在燃气轮机的末端缸体，认证测试中要增加低周疲劳测试。其次，确定实验测试评估的项目后，对于测试者的资质、设备条件将有很高的要求，如是否具备 ISO 资质，并非任何一家测试机构所做的结果都可以用来评价。最后，对检测材料的追踪性、供应商资质和产品一致性的考察也包含在内，当然这个在具体实施中应和供应商质量管理一起来操作完成。

上面例子是完全对等材料(equivalent)的替代，即同种材料的替代。在很多应用场合下，则以不完全对等替换为主，如高合金钢被低合金钢替代。这项替代，除了上面的具体要求外，还需考虑替代材料的加工适应性、综合性能是否满足等。某些情况下，有一个或一些性能可能无法满足设计要求。这时在综合评价替代可行性和价值的前提下应该考虑到某些补救措施等，如，某类耐腐蚀的合金要被其他低级材料替代，除了耐腐蚀性外其他性能都能满足设计要求，那么这时应考虑对这个低级材料施加保护涂层的可行性以及施加涂层处理后的制造性能进行评估。

### 6.3. 检测手段

随着科学技术的进步，检测技术和手段方面也得到了突飞猛进地发展。开展新的或有针对性的检测手段或工具也是材料认证中一个重要的环节。检测手段的理论进步或更新更多体现在学术环境，当然，这些先进手段的利用直接或间接地对工业中材料的应用起到促进或补充作用。选择、确定和发展有针对性的检测技术也是材料认证实践中重要的组成部分。从大的方面来说，例如汽轮机/燃气轮机用转子等大型铸锻件内部缺陷的检测对目前所有的无损检测技术提出了新的挑战，在这方面开发、提出新的手段和工具将大大促进这类铸锻件材料从选择到应用的过程和效果。从小的方面来看，某些焊接处的高、低周疲劳测试手段，也将加快对其失效行为的研究和应用，从而提高焊接件在这些先进发电设备上的应用可靠性。

## 7. 结论

本文从材料认证的不同层次、不同阶段，以及全认证过程、部分认证内容等方面来指导相关发电设备用材料认证工作的具体实施。材料认证是个多学科、跨专业的系统工程。认知从实践中来，从众多的发电设备用材料认证具体工作中发掘，提炼，理解和体会其中包含的科学含义、方法等，反过来再对其他认证工作进行指导，将会有效地促进材料认证工作的展开。除了这些，从认知上高层次地理解材料认证学科或技术的存在，在实践上也会对具体的工作产生积极影响。

### 参考文献 (References)

- [1] 师昌绪, 李恒德, 周廉. 材料科学与工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 24.
- [2] 陈国锋. 材料认证的分类[Z]. 内部资料, 2013.
- [3] 羊海棠, 杨瑞成, 袁晓波, 彭采宇. 材料数据库在选材中的应用[J]. 材料开发与应用, 2004, 19(2): 40-43.
- [4] 李建康, 吉王斌, 张惠阳. 建立材料数据库的构想[C]//中国航天工业质量协会. 首届中国航天质量论坛质量与可靠性, 2006: 585-589.
- [5] 杨连海, 沈邱农. 大型燃气轮机的自主化制造[J]. 燃气轮机技术, 2006, 19(1): 11-14.
- [6] 车红云, 吕友清. 重型燃气轮机缸体的制造[J]. 材料工艺, 2007(2): 35-36.

- 
- [7] 张岳飞, 王伟莉. SGT5-2000E/4000F 燃气轮机国产化发展现状[J]. 热力透平, 2014, 43(3): 231-233.
- [8] 陈霞, 曹锋杰. 西门子 SGT5-8000H 型燃机介绍[J]. 上海电力, 2010(2): 170-172.
- [9] Haha, S., Tsukagoshi, K., Masada, J. and Ito, E. (2012) Test Results of the World's First 1600°C J-Series Gas Turbine. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, **49**, 18-23.
- [10] Pan, W., Phillpot, S.R., Wan, C., Chernatynskiy, A. and Qu, Z. (2012) Low Thermal Conductivity Oxides. *MRS Bulletin*, **37**, 917-922.
- [11] Edelman, H., Effert, M., Wiegardt, K. and Kirchner, H. (2007) The 700°C Steam Turbine Power Plant—Status of Development and Outlook. *International Journal of Energy Technology and Policy*, **5**, 366-382.  
<https://doi.org/10.1504/IJETP.2007.014742>

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: [ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)