

Research and Analysis on Variable-Diameter Centralizing and Anchoring Tool for Solid Expandable Tubing

Bo Zhou¹, Mingjie Lv², Qiang Li¹, Peng Kang¹, HuijuanGuo^{2,3}, Youfeng Zhang^{3*}

¹PetroChina Tarim Oilfield Company, Korle Xinjiang

²Drilling Research Institute of CNPC, Beijing

³Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas, USA

Email: *owenzhang86@tamu.edu

Received: Jun. 10th, 2017; accepted: Jun. 25th, 2017; published: Jun. 30th, 2017

Abstract

Plugging openhole using the solid expandable tubing (SET) technique is the main trend of expandable technology. For the plugging openhole system with expandable tubular requiring cementing, the conventional casing centralizer cannot meet the requirement. Therefore, a novel variable-diameter centralizer was designed for expandable tubular in openhole. Present work introduces the mechanical design, theoretical computation of the centralizer and utilizes Finite Element Analysis (FEA) to validate design parameters. Through mechanical testing, it is proved that the design meets requirements of field operations. This new centralizer is able to provide sufficient force to make the tubing centered, which could improve the quality of well cementation. This tool has good value of popularization and application for its reliability and convenience.

Keywords

Expandable Tubular, Variable-Diameter, Centralizer, Openhole, Finite Element Analysis

膨胀管可变径扶正锚定工具的研究与分析

周波¹, 吕明杰², 黎强¹, 康鹏¹, 郭慧娟^{2,3}, 张友峰^{3*}

¹中国石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒

²中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京

³Texas A&M大学机械工程学院, 美国 德克萨斯州 大学城

Email: *owenzhang86@tamu.edu

*通讯作者。

文章引用: 周波, 吕明杰, 黎强, 康鹏, 郭慧娟, 张友峰. 膨胀管可变径扶正锚定工具的研究与分析[J]. 机械工程与技术, 2017, 6(2): 209-216. <https://doi.org/10.12677/met.2017.62027>

收稿日期：2017年6月10日；录用日期：2017年6月25日；发布日期：2017年6月30日

摘要

膨胀管裸眼封堵技术是膨胀管技术目前主要的发展方向。对于需要注水泥固井的膨胀管裸眼封堵系统，常规的套管扶正器不能满足使用要求。为此，钻井院研制一种新型裸眼用膨胀管可变径扶正锚定工具。本文详细介绍了该扶正器的机械设计，理论计算，并利用有限元方法对理论计算进行了校核。最后通过室内性能测试，表明该工具的设计达到了预期的效果。采用这种新型裸眼用膨胀管可变径扶正锚定工具，可以为膨胀管管串提供足够的扶正力，使膨胀管在裸眼井段较好地居中，从而提高固井质量。该工具现场操作简单可靠，具有较好的推广应用价值。

关键词

膨胀管，可变径，扶正器，裸眼，有限元

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

膨胀管技术是用膨胀锥以液力或机械力的方法使管材发生永久性变形，从而达到增大管材内径的目的[1] [2] [3]，是近年来国内外石油工业钻完井领域中发展及应用较快的一项新兴技术。膨胀管裸眼封堵技术作为该技术体系的一个分支是目前主要的发展方向，在钻井时可使膨胀管作为临时技术套管以解决井漏、井壁坍塌、异常压力地层等复杂井段井壁稳定问题，封堵复杂地层后原钻具组合可继续下入，保证后续安全钻进[4]。

一般地，对于需要注水泥固井的膨胀管裸眼封堵系统，膨胀管的膨胀作业是在注水泥后的水泥候凝阶段进行的。为了提高固井质量，可以在膨胀管管串间设置若干扶正器。常规的套管扶正器分为弹性扶正器和刚性扶正器。然而常规弹性扶正器的环箍、刚性扶正器的本体都不具有良好的塑性，无法产生像膨胀管那样的塑性变形；并且，常规的套管扶正器外形尺寸是固定的，在大斜度或水平井段有可能增加膨胀管下放的阻力，造成膨胀管下放困难、甚至无法下入至需要封堵的预设深度，因此并不能应用在注水泥固井的膨胀管裸眼封堵系统中。因此，有必要研制一种既能实现使膨胀管在井眼居中的基本功能，又能减小本身下入摩阻的膨胀管扶正器，本文的一种裸眼用膨胀管可变径扶正锚定工具就是基于此而提出的。

2. 基本结构及使用方法

2.1. 基本结构

如图 1 所示，裸眼用膨胀管可变径扶正锚定工具由壳体、扶正片组成。壳体采用与膨胀管相同的材料加工制造，壳体的两端设计有可膨胀连接螺纹，与入井的膨胀管串相连接配合。扶正片呈长条薄板形，扶正片的长边与壳体的轴线平行，扶正片设计有均布在壳体外壁上的若干片，其紧贴且均布在壳体的外表面，扶正片的两端焊接在壳体的外表面。

2.2. 工作原理及使用方法

该工具在使用时通过壳体两端的螺纹安装在膨胀管管串中间随膨胀管一同被下入至需要封堵的裸眼井段。在注水泥后的水泥候凝阶段，对膨胀管进行膨胀作业，膨胀锥的运动使膨胀管沿径向产生塑性变形。当膨胀锥通过该工具的壳体时，壳体与膨胀管产生相同的塑性变形[5]。径向的塑性膨胀必然使壳体沿轴向产生塑性缩短，由于扶正片的两端焊接在壳体的外表面，所以扶正片的两端距离缩短，从而使扶正片产生屈曲变形，扶正片的中间会向外撑开，扶正片与壳体外表面的母线近似呈三角形。

通过合理地设计壳体的缩短率、扶正片的长度、宽度和厚度等参数，可以设计使向外撑开的扶正片的外径与裸眼井径基本相同。由于扶正片沿壳体外表面均布，因此扶正片可以在井壁上将膨胀管支撑起来，并且使膨胀管居中。图2是该工具变径后的示意图。

3. 结构和技术参数

3.1. 结构参数

该扶正锚定工具的主要结构参数包括变径前壳体的外径 D_0 、内径 D_1 ，变径后壳体的外径 D'_0 、内径 D'_1 ，

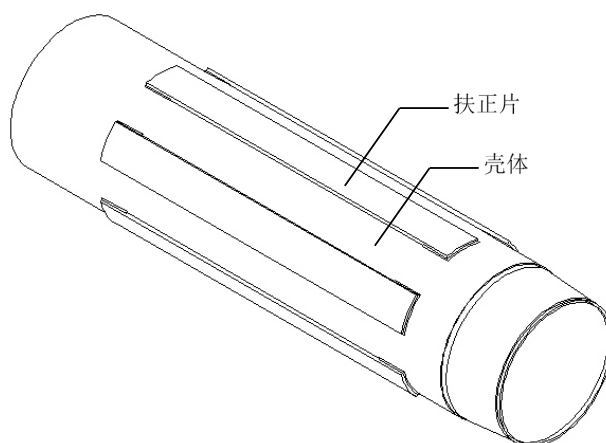


Figure 1. Structural diagram of variable-diameter centralizer
图1. 膨胀管可变径扶正锚定工具结构示意图

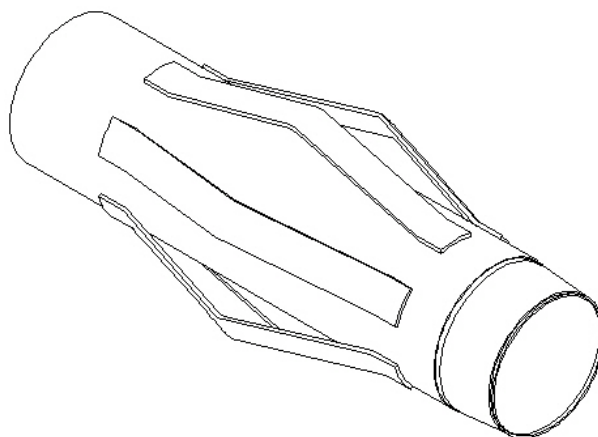


Figure 2. Schematic diagram of variable-diameter centralizer after expanded
图2. 膨胀管可变径扶正锚定工具变径后示意图

变径前扶正片的长度 l_0 、厚度 h 、宽度 b ，变径后扶正片向外撑开的高度 ΔR 、扶正片跨度 l_1 ，变径后扶正片的最大外径 R 。

壳体的外径 D_0 、内径 D_1 变径前后与膨胀管外径、内径相同，因此壳体具有与膨胀管相同的膨胀率和缩短率 ψ 。

$$\psi = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100\% \quad (1)$$

根据前述的工具工作原理，当工具变径后，扶正片的位置可简化如图 3 所示。其中，AB 表示变径前扶正片的初始状态(C 表示扶正片的中点)，A'C'B' 表示变径后扶正片的工作状态。

由图 3 的几何关系可知：

$$\Delta R = \frac{\sqrt{l_0^2 - l_1^2}}{2} \quad (2)$$

因此，变径后扶正器的最大外径

$$R = D'_0 + 2\Delta R + 2h \quad (3)$$

3.2. 技术参数

该扶正锚定工具的主要技术参数包括膨胀压力、扶正力、长细比。一般地，膨胀率越大膨胀压力也越大；膨胀压力应与膨胀管管串的膨胀压力相差不大[6]。扶正力，又称复位力，是指扶正片作用在井壁并使膨胀管离开井壁的力。在斜井段或定向井内，扶正锚定工具必须产生足够的扶正力，以防止膨胀管靠向井壁下侧。参考国标 GB/T 19831.1~2005 中的相关规定，扶正力应大于偏离间隙比为 67% 时所要求的最小扶正力。对于 4½"~9½" 的套管，当膨胀管管串处于比较垂直的井段时，其最小扶正力不应小于：

$$RF = 2G \sin 30^\circ = G \quad (4)$$

式中， G 为 12.19 m 长的膨胀管的重力。

长细比可用来衡量扶正片在变径时发生屈曲变形的容易程度，长细比越大，扶正片在变径时也容易被向外撑开。长细比具体是指扶正片的计算长度与扶正片截面的回转半径之比，可用式(5)表示。

$$\lambda = \mu l_0 / i \quad (5)$$

式中， l_0 为杆件的长度，即扶正片的计算长度； i 为扶正片截面的回转半径， μ 为长度因数(其值由杆端约束情况决定，对于两端固定的细长压杆， $\mu = 0.5$)。

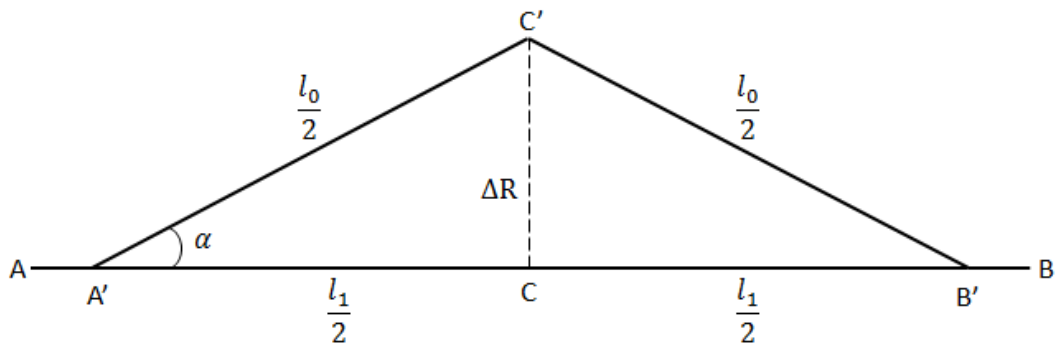


Figure 3. Schematic diagram of bow's position

图 3. 扶正片位置简化示意图

4. 力学分析

4.1. 材料力学分析

根据前述的该工具工作原理，扶正片在工作时处于受压状态，并且扶正片材料应处于弹性变形范围内。通过分析扶正片的受力情况可以找到扶正力与变形量的关系。

4.1.1. 扶正片应力与外力的关系

当膨胀管靠向井壁的一侧时，一般只有一个扶正片起主要的扶正作用，因此首先分析单个扶正片的受力。为了简化计算，不妨将扶正片受到的很小范围连续变化的分布力简化成一集中力 F 。简化后，扶正片受力模型如图 4 所示。由于对称性，故可取 $A'C'$ 进行分析。在 $A'C'$ 上任意取截面 $m-m$ ，截面处的受力如图 5 所示。可知，任意截面处的应力

$$|\sigma_{x\max}| = \frac{|R_{ax}|}{A} + \frac{|M_x|}{W} \quad \left(0 < x \leq \frac{l_0}{2}\right) \quad (6)$$

式中， R_{ax} 为轴力， $R_{ax} = F \sin \alpha$ ， $\sin \alpha = 2\Delta R/l_0$ ； M_x 为弯矩， $M = R_{ay} \cdot x$ ， $R_{ay} = F \cos \alpha/2$ ， $\cos \alpha = l_1/l_0$ ； A 为截面面积， $A = bh$ ； W 为抗弯截面系数，对于矩形截面， $W = bh^2/6$ 。

当 $x = l_0/2$ 时，扶正片的最大应力

$$\sigma_{\max} = \frac{\sqrt{l_0^2 - l_1^2}}{l_0 bh} F + \frac{3l_1}{2bh^2} F \quad (7)$$

4.1.2. 扶正片的压缩变形量与外力的关系

由扶正片的受力模型可知，扶正片沿长度方向受压变形，沿膨胀管的径向方向(即图 3 中的 CC' 方向)

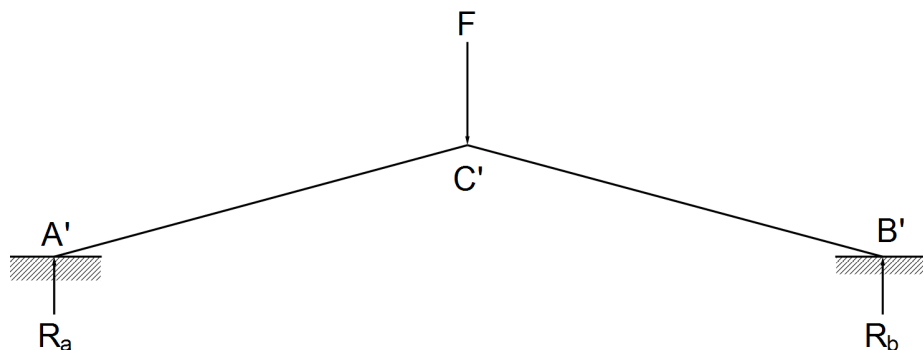


Figure 4. Force model of bow

图 4. 扶正片受力模型

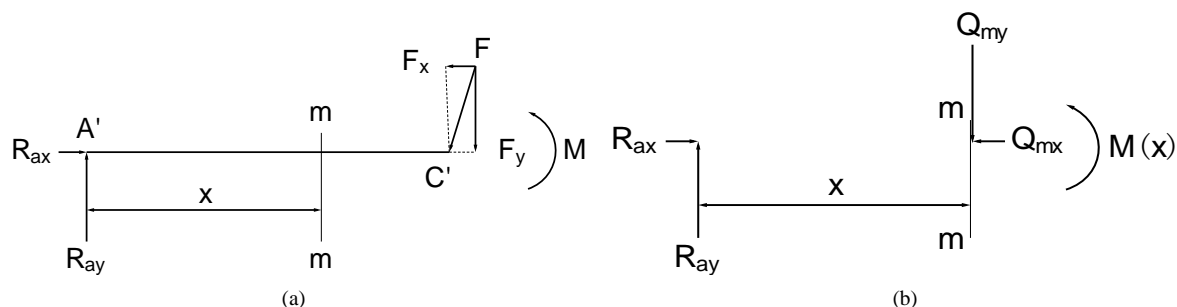


Figure 5. The force of the $m-m$ cross section of bow

图 5. 扶正片上截面 $m-m$ 的受力

也受压变形。由于扶正片工作时，主要发生的是沿径向的压缩变形，因此不妨只考虑径向压缩变形量与外力的关系，从而得到径向压缩变形量与扶正力的关系。

假设扶正片在外力 F 作用下，径向压缩变形量为 D ，根据卡氏定理可知

$$D = 2 \int_0^{\frac{l_0}{2}} \frac{M(x)}{EI} \cdot \frac{\partial M(x)}{\partial F} dx = 2 \int_0^{\frac{l_0}{2}} \frac{F \cos \alpha \cdot x}{4EI} dx = \frac{F \cos^2 \alpha}{2EI} \int_0^{\frac{l_0}{2}} x^2 dx = \frac{Fl_0^2 l_1}{48EI} \quad (8)$$

式中， I 为惯性矩，对于矩形截面， $I = bh_3/12$ ； E 为扶正片材料的弹性模量。因此单个扶正片的扶正力

$$F = \frac{4Ebh^3}{l_0^2 l_1} D \quad (9)$$

在井下，当膨胀管靠向井壁的一侧时，实际是若干个扶正片同时不同程度的起扶正作用，这时整个工具的扶正力

$$F_n = \sum_{j=1}^n F_j \quad (10)$$

式中， F_n 为矢量和， F_j 为单个扶正片的扶正力， n 为起扶正作用的扶正片的数量。

由理论分析可知，影响该工具最重要的技术参数扶正力的主要有扶正片跨度 l_1 、厚度 h 、宽度 b 和扶正片径向压缩变形量，而扶正片径向压缩变形量又与裸眼井径和变径后扶正片的最大外径 R 相关。因此，设计该工具时应合理设计结构参数，使该工具能够提供足够的扶正力。

4.2. 有限元数值分析

以适用于 9% 上层套管的 $\varphi 203 \times 10$ mm 膨胀管裸眼封堵系统为设计案例。根据理论分析设计了一种适用于 $\varphi 203 \times 10$ mm 规格的膨胀管可变径扶正锚定工具，其参数如表 1 所示。设计的该工具所提供的扶正力应大于最小扶正力 $RF = 5686$ N。根据式(8)计算可得 $F = 9941$ N $> RF$ ，因此设计的工具能够提供足够的扶正力。

采用有限元分析软件 Abaqus 对整体工具进行了数值模拟分析[7] [8] [9] [10]。建立的几何模型如图 6 所示，建立的有限元模型如图 7 所示，膨胀压力曲线如图 8 所示。

在胀后的有限元模型中，可算出当偏离间隙比为 67% 时，该工具单个扶正片可提供的扶正力 $F = 13050$ N $> RF$ 。亦可知，设计的该工具能够提供足够的扶正力。

5. 性能测试

根据前述的理论分析和有限元数值模拟分析，对弹性扶正器的设计图纸进行了加工制造，并设计了详细的试验方案。扶正器弹片等间距焊接于膨胀管外壁，圆周方向布置 6 片，扶正片材料与膨胀管母体

Table 1. Parameters of tool

表 1. 工具参数

	变径前		变径后
D_0	203 mm	D'_0	240 mm
D_1	183 mm	D'_1	220 mm
l_0	86 mm	l_1	81.7 mm
h	3 mm	ΔR	13.4 mm
b	30 mm	R	273 mm
	E		206×10^3 MPa
	D		9 mm



Figure 6. Geometric model of centralizer in Abaqus
图 6. 在 Abaqus 软件中建立的工具的几何模型



Figure 7. The mesh model of Finite Element
图 7. 在 Abaqus 软件中建立的有限元网格模型

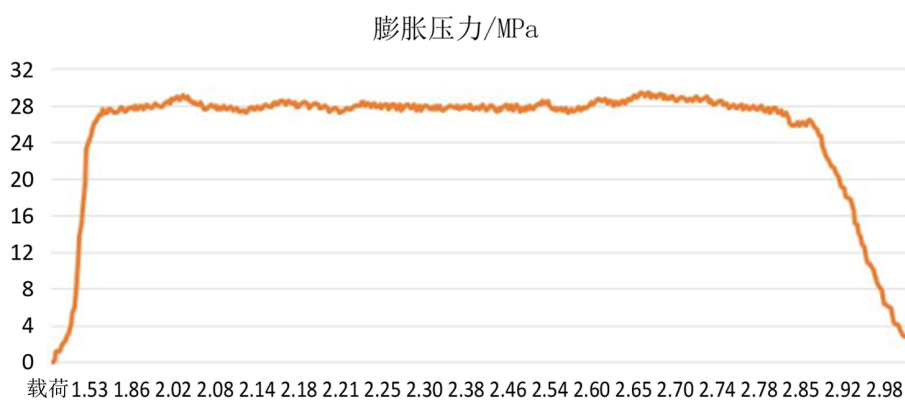


Figure 8. Pressure curve of expansion
图 8. 膨胀压力曲线

材料一致。焊接完成后，对膨胀管进行膨胀作业，随着膨胀管的膨胀，扶正片顺利张开，试验膨胀压力为 26~28 MPa，与有限元数值分析得到的膨胀压力比较吻合。通过测量扶正片的弹起高度，计算该工具的最小扶正力为 12,332 N，符合国标 GB/T 19831.1-2005 中的相关规定。试验结果表明该工具的结构参数设计符合使用性能的技术要求。工具变径后扶正片的状态如图 9 所示，有限元模拟扶正片张开结果如图 10 所示。

6. 结论与认识

- (1) 该工具设计巧妙，入井直径小，不影响膨胀管的下入，不会增加膨胀管管串的下放摩擦阻。
- (2) 通过有限元计算及性能试验，该新型扶正器可为膨胀管裸眼作业提供足够的扶正力，使膨胀管管串在裸眼井段居中较好，可以大大提高固井质量。
- (3) 该工具工作时扶正片被撑开后牢固地支撑在井壁上，除了提供足够的扶正力，还可以为膨胀管提



Figure 9. The state of the bow after expanded
图 9. 工具变径后扶正片的状态

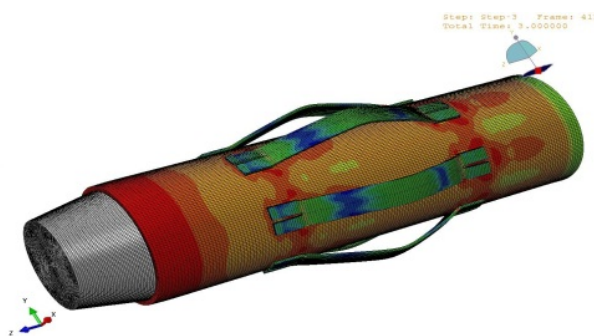


Figure 10. The stress cloud of the bows after expanded
图 10. 扶正片胀后的应力云图

供附加的锚定力，大大减小膨胀管螺纹受力，提高作业可靠性。

(4) 弹性扶正器现场操作简单，可靠性高，具有较好的商业推广应用价值。

基金项目

塔里木油田分公司“膨胀管在复杂地质条件下的应用研究(201015110027)”项目。

参考文献 (References)

- [1] 于桂杰, 王瑞和, 唐明. 实体膨胀管理论膨胀载荷的确定[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2): 1-5.
- [2] 李光胜, 杨文斌, 何雅丽, 等. 膨胀管技术在下 4-421 井的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(2): 17-19.
- [3] 李益良, 张立新, 孙冬梅, 等. 膨胀管系统受力及运动分析[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(3): 135-138.
- [4] 徐丙贵, 吕明杰, 黄翠英, 尹洪伟. 等井径钻井技术概述[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(2): 12-15.
- [5] 徐丙贵, 贾涛, 黄翠英, 吕明杰. 膨胀管技术在钻井过程中的研究与应用[J]. 石油机械, 2013, 41(4): 11-15.
- [6] 吴柳根. 塔里木油田小井眼侧钻井二开次钻完井优化方案[J]. 钻采工艺, 2015(3): 108-111.
- [7] 郭慧娟, 徐丙贵, 吕明杰, 尹洪伟. 膨胀锥斜面角对膨胀管裸眼系统的影响分析[J]. 石油机械, 2015(8): 32-36.
- [8] 张建兵, 王长宁, 袁孟嘉. API55 套管的膨胀性能分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(2): 88-91.
- [9] 陈功剑, 李春福, 王朋飞, 等. 可膨胀管技术及其在石油工业中的应用[J]. 石油仪器, 2009, 23(2): 65-67.
- [10] 高向前, 李益良, 李涛. 侧钻水平井膨胀套管完井新技术[J]. 石油机械, 2010, 38(1): 18-20.

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：met@hanspub.org