

Comparative Analysis of Deformation Resistance of Semi-Rigid Base Course Materials

Yuanming Wang^{1,2}, Lun Ji², Guanglei Wang³, Haiquan Liu², Jun Li², Wendong He^{2,4}

¹Heilongjiang Sanjiang Engineering Construction Administration Bureau, Harbin Heilongjiang

²School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

³CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing

⁴Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan Shanxi

Email: jilunhit@126.com

Received: Feb. 26th, 2018; accepted: Mar. 9th, 2018; published: Mar. 16th, 2018

Abstract

Three point bending test was used to research the anti deformation ability of semi-rigid base material. The test was under the condition of band cracks by loading the cement stabilized gravel specimens with semi-rigid precast base cracks. In order to analyze the influence of cement dosage and aggregate gradation on cracking resistance, fracture mechanics, fracture toughness and fracture energy were used as evaluation indexes of crack resistance. The influence rule of cement dosage and aggregate grade matching on crack resistance evaluation index was obtained. The results show that the concept of fracture toughness and fracture energy is reasonable to evaluate the deformation resistance of semi-rigid base materials. Semi-rigid base material has better crack resistance by using skeleton dense type gradation and lower cement dosage.

Keywords

Semi-Rigid Base Material, Three Point Bending Test, Fracture Toughness, Fracture Energy, Crack Resistance

半刚性基层材料抗变形能力的分析与比较

王远明^{1,2}, 纪 伦², 王广磊³, 刘海权², 李 俊², 贺文栋^{2,4}

¹黑龙江省三江工程建设管理局, 黑龙江 哈尔滨

²哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨

³中交公路规划设计院有限公司, 北京

⁴山西省交通科学研究院, 山西 太原

Email: jilunhit@126.com

文章引用: 王远明, 纪伦, 王广磊, 刘海权, 李俊, 贺文栋. 半刚性基层材料抗变形能力的分析与比较[J]. 交通技术, 2018, 7(2): 53-60. DOI: 10.12677/ojtt.2018.72007

摘要

为研究半刚性基层材料的抗变形能力，采用三点弯曲试验方法对底部预制裂缝的半刚性基层水泥稳定砂砾试件进行加载。通过三种典型级配半刚性基层材料配合比设计与性能测定，对比分析材料的抗变形性能。引入断裂力学中断裂韧度与断裂能作为抗裂性能的评价指标，分析水泥剂量与集料级配对抗裂性能的影响，得到水泥剂量与集料级配对抗裂性评价指标的影响规律。结果表明，以断裂韧度与断裂能的概念作为半刚性基层材料抗变形能力评价指标是合理的；骨架密实型级配，以及较低的水泥剂量的基层材料抗裂能力更好。

关键词

半刚性基层，三点弯曲试验，断裂韧度，断裂能，抗变形能力

Copyright © 2018 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

半刚性基层以板体性强、早期强度高优点在我国被普遍应用，但各种开裂问题[1] [2] [3] [4] [5]长期困扰着道路建设者。半刚性基层在温度、干缩、荷载作用，以及路基不均匀沉降下受到较大的层底拉应力，当应力超过其承受能力时，就会出现开裂。而抗开裂性能，是提高和保证半刚性基层路用性能和使用耐久性的关键。为探究半刚性基层材料的抗拉性能，以水泥稳定砂砾材料为例，探究影响半刚性基层材料抗拉性能的影响因素，对水稳砂砾的断裂韧性进行评价，分析水泥稳定砂砾材料在带裂缝状况下的工作性能。

2. 实验材料

根据《公路工程无机结合料试验规程》(JTG E51-2009)中规定的试件尺寸，圆柱体试件的径高比为1:1，直径为150 mm；梁式试件的尺寸是100 mm × 100 mm × 400 mm。根据吴倩[6]的硕士论文，采用振动成型的方法对试件进行成型。

2.1. 级配、最佳含水量及最大干密度

参照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006)中推荐的水泥稳定碎石的集料级配选取水泥稳定砂砾的集料级配。集料的级配如表1所示，在下文中用XM表示悬浮密实型，GM表示骨架密实型，GK表示骨架空隙型。

试验采用振动击实[7]的方法，每个试件的振动时间统一为3 min。由振动击实的方法确定最大干密度和最佳含水量，结果见表2。

2.2. 无侧限抗压强度

采用《公路工程无机结合料试验规程》(JTG E51-2009)中无机结合料稳定材料无侧限抗压强度的测量

Table 1. Cement stabilized gravel aggregate gradation table**表 1.** 水泥稳定砂砾集料级配表

筛孔孔径(mm)	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
悬浮密实型 XM	100.0	93.5	67.0	39.0	26.0	15.0	3.5
骨架密实型 GM	100.0	73.6	46.0	26.8	25.8	9.1	0.5
骨架空隙型 GK	100.0	62.8	26.3	11.2	5.0	2.0	0.0

Table 2. Vibratory compaction results of cement stabilized gravel**表 2.** 水泥稳定砂砾振动击实结果

水泥剂量(%)	3			4			5		
级配类型	GM	XM	GK	GM	XM	GK	GM	XM	GK
最佳含水量(%)	5.25	5.28	5.23	5.32	5.34	5.29	5.38	5.41	5.33
最大干密度(g/cm ³)	2.294	2.231	2.173	2.313	2.235	2.201	2.325	2.239	2.225

方法测量试件的无侧限抗压强度。制备试件时选择了三种类型的级配与三个水泥用量，共计 9 种，得到的无侧限抗压强度结果如图 1。

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006)，一般一级以上公路基层的无侧限抗压强度要求为 3~4 MPa，试验采用的级配与水泥用量制得的试件均满足规范要求。相同级配类型的水泥稳定砂砾材料，无侧限抗压强度随着水泥剂量的增加显著增大，相同水泥剂量下骨架密实型级配的无侧限抗压强度最大，悬浮密实型级配的无侧限抗压强度居中，骨架空隙型级配的无侧限抗压强度最小。

3. 半刚性基层材料的断裂韧度与断裂能

水泥稳定砂砾材料与水泥混凝土材料的组成相似，由颗粒状的材料与水泥浆基体形成复合材料。在材料形成的过程中，不可避免地出现微小的裂纹、孔隙与损伤，材料的破坏过程实际上就是原有的缺陷与损伤贯通的过程。因为水泥稳定砂砾与水泥混凝土在材料组成上比较相似，所以在研究水泥稳定砂砾裂纹扩展时，可参照水泥混凝土的研究方法，引入断裂韧度与断裂能的概念[8] [9] [10] [11] [12]。

按照传统的强度理论，裂缝尖端的应力总是无限大的，也就是说无论多小的荷载作用在裂缝上，结构都会发生破坏，这显然是不合理的。因此采用应力的大小来判断结构是否发生破坏就不适用。为此，可以借用断裂力学中应力强度因子的概念，应力强度因子用 K_I 表示。裂缝尖端附近的应力场与 K_I 成正比。当 K_I 增加到某一数值时即使荷载不再增加裂缝也会继续扩张下去，直至结构发生脆性破坏。这个极限值称为材料的断裂韧度，用 K_{Ic} 来表示。另一个用来评价材料抗裂能力的指标是断裂能，用 G_f 表示，该参数体现的是材料抵抗裂纹扩展的能力，其物理意义是材料扩展单位面积所需要的能量，其数值越大代表裂缝越难扩展。

试验方法

制备试件时依然采用上一节中所采用的级配与水泥用量，试件采用梁式试件，尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm。在标准养生条件下养生 28 天试验采用三点弯曲法，为保证试件破坏时按照固定位置断裂，试验之前在梁式试件的跨中部分预切缝，本次试验中切缝的高度与试件高度之比为 0.2。试验是梁的两端处于简支状态，在跨中处加载。试验仪器采用 UTM-250，记录记载过程中荷载的大小以及跨中挠度曲线。试验的示意图如图 2。

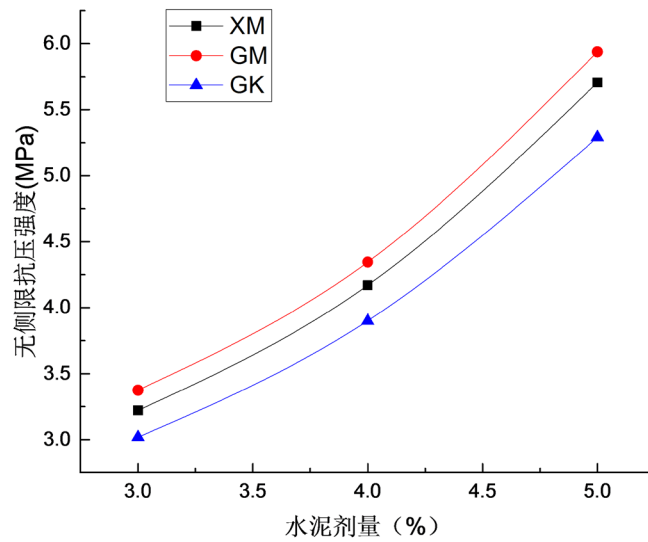


Figure 1. Unconfined compressive strength of cement stabilized gravel specimens

图 1. 水泥稳定砂砾试件的无侧限抗压强度

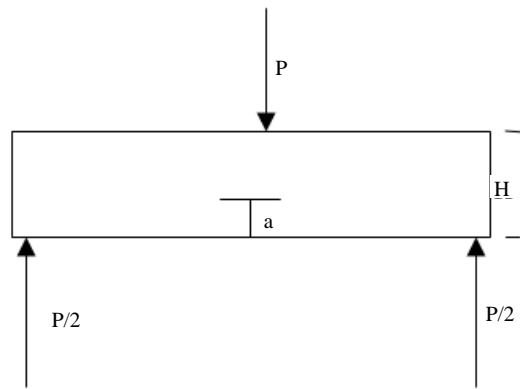


Figure 2. Schematic diagram of bending fracture at three points

图 2. 三点弯曲断裂示意图

断裂韧度的计算公式如公式(1)。

$$K_{IC} = \frac{(P_{V_{max}} + G)L}{4BH^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{H}\right) \quad (1)$$

式中 $P_{V_{max}}$ —— 极限竖向荷载(kN);

G —— 加载附件的重量(kN);

H —— 试件的高度(m);

B —— 试件的宽度(m);

L —— 试件的长度(m);

a —— 预切裂缝的深度(m)。

$f\left(\frac{a}{H}\right)$ 是与 $\frac{a}{H}$ 有关的函数, 其表达式见公式(2)。

$$\begin{aligned}
 f\left(\frac{a}{H}\right) &= 2.9 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{1}{2}} - 4.6 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{3}{2}} + 21.8 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{5}{2}} \\
 &= -37.6 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{7}{2}} + 38.7 \times \left(\frac{a}{H}\right)^{\frac{9}{2}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

试验时需要记录水泥稳定砂砾试件跨中处的最大挠度 W_{\max} 以及荷载随试件挠度变化的曲线。断裂能由公式(3)计算。

$$G_F = \frac{1}{A_{lig}} [W_0 + (m_1 + m_2) g W_{\max}] \tag{3}$$

式中 A_{lig} ——试件断裂带面积(m^2);

W_0 —— $P_V \sim W$ 曲线下的面积($\text{N} \cdot \text{m}$);

W_{\max} ——试件的最大跨中挠度(m);

g ——重力加速度(m/s^2);

m_1 ——试件支点之间的梁质量(kg);

m_2 ——加载附件的质量(kg);

a ——预切裂缝的深度(m)。

4. 半刚性基层材料的荷载 - 挠度关系

试验直接得到的是荷载 - 挠度变化曲线, 在计算断裂能与断裂韧度时也需要利用该曲线进行计算。曲线清晰地反映了试件跨中位置的挠度与所受荷载之间的关系, 曲线最高点对应的荷载以及曲线与横轴所围成的面积直接影响断裂韧度与断裂能的计算结果。因此, 分析了水泥剂量与级配类型对荷载 - 挠度曲线的影响。

1) 水泥剂量对荷载 - 挠度曲线的影响

选择骨架密实型级配的试件, 水泥剂量分别为 3%、4%、5%。水泥剂量对荷载 - 挠度曲线如图 3。

可见, 该类材料的荷载作用下的破坏, 属脆性破坏, 没有明显屈曲, 无法获得开裂荷载。可以理解成开裂荷载即为极限荷载。

从图 3 可以看出, 基于本试验水泥剂量的变化, 随着水泥剂量的提高, 试件的极限荷载迅速增加, 水泥剂量每提升 1%, 极限荷载的极限荷载大约提高 1 kN, 极限荷载提高的幅度很大。达到极限荷载时跨中的挠度大致相同, 但是随着极限荷载的增大, 试件完全破坏时的跨中最大挠度却在减小, 而低水泥剂量的试件在完全破坏之前能够承受更大的变形, 因此并不能简单的认为水泥剂量越高抗裂性能越好。

2) 级配类型对荷载 - 挠度曲线的影响

固定水泥剂量为 3%, 级配类型分别为骨架密实型、骨架空隙型与悬浮密实型。级配类型对荷载 - 挠度曲线的影响如图 4。

相同水泥剂量下, 骨架密实型级配的极限荷载最大, 骨架空隙型级配的极限荷载次之, 悬浮密实型级配的极限荷载最小。达到极限荷载之后骨架密实型级配在完全破坏之前仍然可以承受较大的变形。骨架空隙型级配与悬浮密实型级配试件的最大挠度相差不大。

由荷载 - 挠度曲线图可以看出, 无论是以极限荷载还是以最大跨中挠度作为评价水泥稳定砂砾抗裂性能的指标都不够准确, 因此有必要寻找其他评价水泥稳定砂砾抗裂性的指标。

5. 半刚性基层材料的断裂韧度

根据得到的试验数据, 计算水泥稳定砂砾的断裂韧度。将计算结果列于表 3。

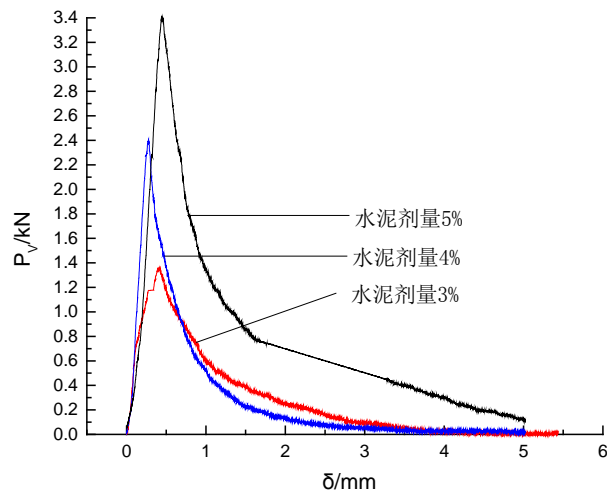


Figure 3. Effect of cement dose on load deflection curve
图 3. 水泥剂量对荷载 - 挠度曲线的影响

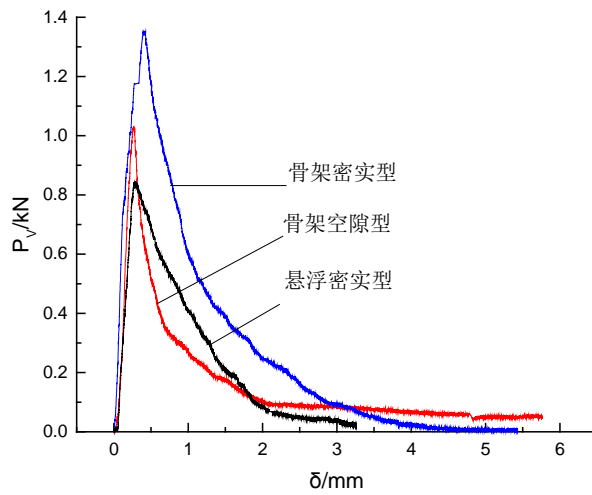


Figure 4. Influence of gradation type on load deflection curve
图 4. 级配类型对荷载 - 挠度曲线的影响

Table 3. Fracture toughness of cement stabilized gravel ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
表 3. 水泥稳定砂砾的断裂韧度 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)

基层类型	K_{Ic} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	P_{Vmax} (kN)	G (kN)	$f\left(\frac{a}{H}\right)$
3%水泥骨架空隙	38.50	1.03	0.01	1.17
3%水泥骨架密实	50.36	1.35	0.01	1.17
3%水泥悬浮密实	31.66	0.85	0.01	1.17
4%水泥骨架空隙	78.19	2.11	0.01	1.17
4%水泥骨架密实	89.14	2.40	0.01	1.17
4%水泥悬浮密实	66.55	1.79	0.01	1.17
5%水泥骨架空隙	112.59	3.04	0.01	1.17
5%水泥骨架密实	126.34	3.41	0.01	1.17
5%水泥悬浮密实	85.54	2.30	0.01	1.17

断裂韧度与水泥剂量关系如图 5。

随着水泥剂量的增加，各个级配类型的试件的断裂韧度也在不断增加。当荷载在裂缝处产生引起的应力强度因子小于材料的断裂韧度时，材料仍然具备一定的抵抗能力，裂缝不会继续扩展。水泥剂量的增加相当于提高了材料破坏的“门槛”。相同水泥剂量下骨架密实型级配的断裂韧度最大，表明这种级配的材料抵抗裂缝破坏的能力更强。

6. 半刚性基层材料的断裂能

在计算断裂能时需要用到荷载挠度曲线所围成的面积，为此利用 MATLAB 提取荷载与挠度的数据，计算二者围成面积的大小。计算得到的各个类型基层的断裂能结果见表 4 和图 6。

断裂能反映材料阻碍裂缝扩展的能力，随着水泥剂量的增加，试件的断裂能不断下降，表明试件阻碍裂缝扩展的能力在不断下降，这与断裂韧度的变化趋势正好相反。断裂韧度代表抵抗裂缝是否继续扩展的“门槛”，而断裂能则反映裂缝扩张单位面积所需要的能量，二者并不矛盾。

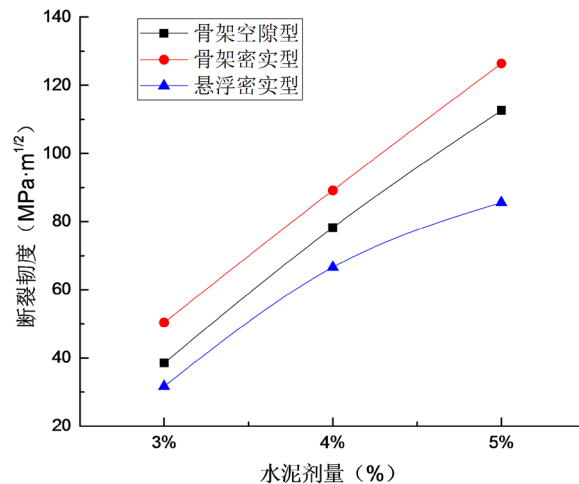


Figure 5. Fracture toughness of cement stabilized gravel specimens
图 5. 水泥稳定砂砾试件的断裂韧度

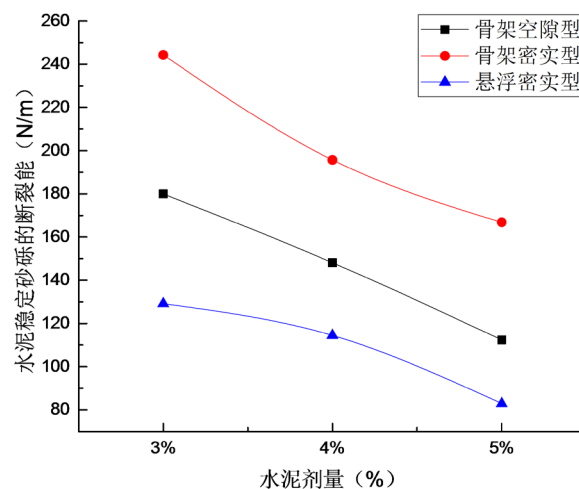


Figure 6. Fracture energy of cement stabilized gravel specimens
图 6. 水泥稳定砂砾试件的断裂能

Table 4. Fracture energy of cement stabilized gravel (N/m)
表 4. 水泥稳定砂砾的断裂能(N/m)

基层类型	A_{cr} (m ²)	W_{max} (m)	W_0 (N·m)	G_f (N/m)
3%水泥骨架空隙	0.01	0.01	0.90	179.97
3%水泥骨架密实	0.01	0.01	1.52	244.32
3%水泥悬浮密实	0.01	0.00	0.83	129.12
4%水泥骨架空隙	0.01	0.00	0.81	148.14
4%水泥骨架密实	0.01	0.01	1.54	195.7
4%水泥悬浮密实	0.01	0.00	1.60	129.12
5%水泥骨架空隙	0.01	0.00	0.91	112.35
5%水泥骨架密实	0.01	0.01	3.44	166.83
5%水泥悬浮密实	0.01	0.00	2.38	82.9

7. 结论

基于以上试验及分析, 得出以下结论:

- 1) 提高水泥剂量或采用嵌挤良好的级配类型均可以提高试件的强度, 但水泥剂量对强度的提高效果更为明显。随着水泥剂量的增加, 各级配试件的断裂能不断下降, 试件阻碍裂缝扩展的能力随之降低。
- 2) 水泥剂量每提升 1%, 试件破坏时的极限荷载大约提高 1 kN, 但最大跨中挠度却逐渐减小。
- 3) 相同水泥剂量下骨架密实型级配的试件极限荷载更大, 而且最大跨中挠度也更大; 断裂韧度最大, 抵抗裂缝破坏的能力更强。
- 4) 应用断裂韧度与断裂能作为半刚性基层材料抗裂性能的评价指标更加准确, 断裂韧度类似于强度的概念反映了材料的一种固有属性, 断裂能则反映裂缝出现后继续扩展的难易程度。

参考文献

- [1] 田林. 骨架 - 密实型水泥稳定级配碎石抗裂特性的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [2] 张鹏. 高等级公路半刚性基层材料的抗裂性能研究[J]. 大连理工大学, 2007, 32(9): 83-84.
- [3] 张红春. 半刚性基层沥青路面综合抗裂技术研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2008.
- [4] 张宏君, 王选仓, 李振霞. 水泥稳定碎石断裂性能研究[J]. 公路, 2008(10): 85-90.
- [5] 王宏畅, 黄晓明, 傅智. 半刚性基层材料路用性能的试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 45-49.
- [6] 吴倩. 控制横向开裂率的沥青路面结构组合研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] 陈亮亮. 水泥稳定砂砾材料标准击实方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] 张晓东, 任旭春. 混凝土开裂过程扩展有限元数值模拟[J]. 公路交通技术, 2010(3): 81-85.
- [9] 张雷, 王金昌. 纤维混凝土开裂扩展有限元数值模拟[J]. 低温建筑技术, 2012(4): 31-33.
- [10] Elguedj, T., Gravouil, A. and Combescure, A. (2006) Appropriate Extended Functions for X-FEM Simulation of Plastic Fracture Mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **195**, 501-515.
<https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.02.007>
- [11] 江建鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] Belytschko, T., Gracie, R. and Ventura, G. (2009) A Review of Extended/Generalized Finite Element Methods for Material Modeling. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, **17**, Article ID: 043001.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3431，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

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

期刊邮箱：ojtt@hanspub.org