DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.016

生物质焦催化裂解萘和苯酚的实验^{*}

彭军霞^{1,2} 赵增立¹ 潘守聚³ 李海滨¹

(1. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院研究生院,北京 100049; 3. 广州市环境保护科学研究所,广州 510620)

【摘要】 通过生物质制焦条件(制焦温度、热解速率、原料种类)的改变制备了不同的生物质焦样品,并在热裂解仪——气相色谱/质谱联用装置(Py-GC/MS)上进行生物质焦对焦油模型化合物萘和苯酚的在线催化裂解实验,考察了反应温度、制焦条件、制焦原料对萘和苯酚催化裂解转化率的影响。结果表明,反应温度越高,生物质焦 条件下萘和苯酚的在线催化裂解转化率越高;相同反应条件下,制焦温度越高,热解速率越快,生物质焦的比表面积、孔容积越大,催化活性越高。850℃快速热解杉木焦对萘和苯酚的转化率分别为55.6%和76%;生物质焦的扫描电镜观测和金属氧化物含量测定结果表明不同原料制得生物质焦催化活性差异与其表面形貌和金属氧化物含量有关。

关键词: 生物质焦 萘 苯酚 催化裂解 中图分类号: TK6; TQ426.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)05-0076-06

Catalytic Decomposition of Naphthalene and Phenol over Biomass Char

Peng Junxia^{1,2} Zhao Zengli¹ Pan Shouju³ Li Haibin¹

Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2. Graduate Onwersary of Onmese Academy of Sciences, Defing 100049, China

3. Guangzhou Research Institute of Environment Protection, Guangzhou 510620, China)

Abstract

Biomass tar catalytic decomposition upon pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS) was studied by taking naphthalene and phenol as model compound. The effect of reaction temperature, charring conditions, such as the pyrolysis temperature, the heating rate and the precursors on model compound conversion was determined. The results showed that tar conversion increased with the increasing reaction temperature; higher charring temperature and higher heating rate could enlarge the surface area and pore volume of biomass chars and also enhance tar conversion. Conversion of naphthalene and phenol were 55.6% and 76% respectively on biomass char prepared at 850°C with quick heating rate. Scanning electron microscope (SEM) and test results of char mineral oxides contents showed that catalytic activity of biomass chars was related to their surface morphology and the mineral oxides contents.

Key words Biomass char, Naphthalene, Phenol, Catalytic decomposition

引言

生物质能源作为一种清洁的可再生能源已日渐

为世界各国所重视。生物质气化是开发生物质能的 一个重要方向,但气化过程产生的焦油对气化设备 及燃气利用设备有严重的危害^[1],减少气化气中焦

收稿日期:2009-11-17 修回日期:2009-12-11

^{*} 国家"973"重点基础研究发展计划资助项目(2007CB210202)

作者简介:彭军霞,博士生,主要从事生物质焦油的生成与脱除研究, E-mail: pengjx@ ms. giec. ac. cn

通讯作者:李海滨,研究员,博士生导师,主要从事生物质和固体废弃物能源利用研究, E-mail: lihb@ ms. giec. ac. cn

油含量的方法很多,其中催化裂解被认为是最具有 潜力的方式之一^[2-3]。

目前,催化裂解中用的最多的是以白云石和镍 基催化剂为代表的非金属和金属型^[3~4]。虽然它们 都有较高的焦油裂解率,但白云石极易磨损;镍基催 化剂昂贵且易失活和中毒^[5]。生物质热解焦由于 其多孔结构以及灰分中含碱金属而具有一定的催化 活性,且能在气化炉中原位再生,因此成为一种颇具 潜力的廉价催化剂。Chembukulam 等^[6]研究表明某 种锯末半焦和木炭在 950℃时几乎实现了焦油的完 全转化。

生物质焦油的成分非常复杂,其中包含轻质芳香烃(LAH),轻聚芳香烃(LPAH),重聚芳香烃 (HPAH)以及杂环化合物等^[7]。焦油的成分和含量 还与许多参数有关,如气化器的类型、生物质原料的 种类以及气化条件等^[8],因此使有关焦油裂解的研 究比较困难,于是很多研究者选择有代表意义的单 一组分作为模型对象进行研究,如甲苯、苯酚和萘 等^[9~13]。尽管上述研究涉及不同的研究角度,但并 未深入分析影响生物质焦催化活性的具体因素,如 制焦条件、制焦原料等。为此,本文在惰性气氛中以 生物质焦为催化剂,采用热裂解仪一气相色谱/质谱 联用装置(Py-GC/MS)考察制焦条件及生物质焦原 料对焦油模型化合物(toluene model compounds,简 称TMC)萘和苯酚在线催化裂解的影响,对不同制 焦条件、制焦原料的生物质焦催化活性进行分析。

1 实验部分

1.1 生物质焦的制备

为探讨温度及升温速率对生物质焦催化裂解焦 油的影响,按以下2种加热方式获得焦样:

(1) 生物质快速裂解(升温速率约15 K/s):以 杉木粉(WD)、蔗渣(BS)、稻秆(RS)、玉米秆(CS) 为原料(20~40 目),氮气气氛下管式炉升温到裂解 温度,待温度稳定(550℃、850℃)后将载样品的小 舟推入到石英管中部高温区,停留30 min后,推至 石英管端部冷却,管式炉停止加热,待焦样冷却至室 温停止通入氮气,取出焦样。

(2) 生物质慢速裂解(升温速率约 0.4 K/s): 以杉木粉为原料,载样品的小舟置入石英管中部高 温区,氮气气氛下管式炉以 25~30℃/min 的速率升 温到裂解温度,待温度稳定(550℃、850℃)后停留 30 min,管式炉停止加热,待焦样冷却至室温停止通 氮气,取出焦样。

1.2 实验仪器与方法

实验所采用的 Py-GC/MS 装置由美国 CDS 公

司的 CDS5000 型裂解仪和日本岛津的 GCMS-QP2010 Plus 型气质联用仪组成。实验时,首先在裂 解仪的石英管内依次装入 0.5 mg 的 TMC(萘或苯 酚)、一定量的石英棉、0.5 mg 的催化剂(生物质焦 或石英砂)以及一定量的石英棉。TMC 和催化剂之 间用石英棉隔开,TMC 蒸汽能通过催化剂层。

热裂解仪以高纯氦气(纯度 99.999%)为载气, 总流量为 73.9 mL/min,升温速率 20℃/ms、裂解温 度 700~950℃、裂解时间 10 s。裂解气由 GCMS 进 行在线分析。裂解气传输管路及进样阀的温度都设 为 300℃。色谱柱为 RXI-1MS 毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.251 μ m),采用分流模式,分流比为 1:70。GC 程序升温为:初始柱温 40℃,保持 5 min 后 以10℃/min升到 300℃,保持 3 min。离子源温度为 280℃,质量数扫描范围为 30~700 amu。根据 NIST 谱 库并参考文献[12, 14],确定裂解产物的化学组成。

1.3 生物质焦特性分析方法

本实验利用 N_2 吸脱附方法测得生物质焦的表面积、孔容积列于表 1,仪器型号为 TriStar II 3020。 采用全谱直读电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)法分析金属氧化物含量,样品用体积比为 2:1 的 HNO₃ 与 HF 混合酸溶解,静置过夜,消煮 2 h 后, 用 ICP-AES 测定元素含量,仪器型号为 J-AIRIS 1000DUO HR。元素分析采用 Elementar 元素分析 仪(型号 Vario ELCHNOS)进行测定,工业分析按 ASTM 有关行业标准测定。各生物质焦的工业分析 及元素分析列于表 2。利用拉曼光谱测定生物质焦 的物理结构特性,仪器型号为 HORIBA Jobin Yvon-LabRAM Aramis,入射光波长选择 532 nm。采用扫 描电镜观察生物质焦的表面形貌,仪器型号为 Fillips XL30。

焦代号	热解 条件	BET 比表面积 ∕m ² ·g ⁻¹	总孔容积 /cm ³ ·g ⁻¹
WD – LQ	550℃-快速	356.3	0. 179 9
WD – HQ	850℃-快速	385.1	0. 185 0
WD – LS	550℃-慢速	253.2	0. 123 0
WD – HS	850℃-慢速	379.3	0. 190 4
BS	550℃-快速	507.7	0. 262 1
RS	550℃-快速	146.9	0.0912
CS	550℃-快速	214.7	0. 112 4

表1 生物质焦的比表面积与孔容积

Tab.1 BET surface and pore volume of the biomass chars

1.4 转化率的定义

萘裂解气主要产物为 H_2 、 CH_4 、乙烯等,苯酚裂 解气主要产物为H,、 CH_4 、CO、CO、^[12],由于本实验 中质谱扫描范围为 30~700 amu,以上主要产物分子 量都低于 30(除 CO₂ 外),所以不能被检出。因此本 实验主要对可检出的萘和苯酚作分析,利用催化前 后的 TMC 峰面积值,计算萘和苯酚转化率,从 TMC 转化率对各种生物质焦的催化活性进行研究和对 比。因为表示催化活性最常用的指标就是转化 率^[15]。在实验过程中,每次裂解所用的 TMC 和生物质焦的量都相等。萘或苯酚转化率的计算式为

$$\eta = \frac{A_{\rm in} - A_{\rm out}}{A_{\rm in}}$$

式中 A_{in}——实验时萘或苯酚的进样量 A_{out}——催化裂解后萘或苯酚的剩余量

表 2 生物质焦的工业分析及元素分析(质量分数) Tab. 2 Proximate dry analysis and ultimate analysis of the biomass chars

0%

焦代号 -	元素分析			工业分析				
	С	Н	Ν	S	0	灰分	挥发份	固定碳
WD – LQ	81.5	2.7	0.04	0.08	13.38	2.3	10.5	87.2
WD – HQ	88.5	1.9	0.06	0.06	6.08	3.4	4.9	91.7
WD – LS	87.9	2.5	0.04	0.07	7.04	2.4	9.4	88.2
WD – HS	89.0	2.1	0.05	0.08	5.66	3.1	3.8	93.1
BS	80.6	3.2	0. 245	0.27	12.28	3.4	14.2	82.4
RS	52.6	1.9	0.874	0.33	11.40	32.9	11.4	55.7
CS	68.9	2.0	1.868	2.47	11.66	13.1	10.8	76.1

2 结果和讨论

2.1 反应温度对 WD 在线催化萘和苯酚转化率的 影响

由于萘和苯酚均为生物质焦油中最主要的组成 成分^[16],且前者可代表轻聚芳香烃,后者可代表焦 油中的杂环化合物,因此本文通过以WD-LQ为催 化剂在线裂解萘和苯酚来考察木粉焦反应温度对焦 油转化率的影响,实验结果如图1所示。从图1可 以看出,600℃萘和苯酚的转化率较低,分别只有 42.6%和58.5%,900℃时两者转化率分别达到 83%和84.9%,随着温度升高,两者转化率均呈上 升趋势,相同反应温度下,苯酚转化率高于萘转化 率。这是因为萘的分子结构是一个封闭的共轭体 系,因而比较稳定不易分解,而苯酚分子中由于存在 具有给电子效应的羟基而使得苯酚中的氢较容易电 离出来,因而热稳定性较低,因此在同等催化条件下 萘裂解的转化率低于苯酚。







2.2 制焦条件对 WD 在线催化萘和苯酚转化率的 影响

生物质热解时,挥发份析出促使生物质内生成 气泡与气孔,这些气泡由生长到破裂,形成了生物质 焦的孔隙结构。而挥发份的析出特性取决于热解过 程^[17],焦的孔隙结构特点影响催化活性,因此生物 质焦催化活性与焦的裂解温度以及升温速率密切相 关。

本文考察了快速、慢速两种加热速率以及 550、 850℃两种温度下制得的木粉焦条件下,萘和苯酚的 裂解转化率,结果如图 2 所示。



2.2.1 制焦温度的影响

由图 2 可以看出, 萘和苯酚转化率大小顺序 WD-HQ、WD-LQ 和 WD-HS、WD-LS。即同种 加热速率下, 生物质焦的催化活性受制备温度影响, 制备温度较高的生物质焦催化活性较强。 吕学珍等^[18]的研究发现低于 900℃ 制得的煤 焦反应活性随制备温度升高而上升,原因是挥发份 的大量析出使煤焦出现大量孔隙。本实验中,制焦 温度高,更多的挥发份从生物质骨架中逸出(表 2 WD-HQ 比 WD-LQ 挥发份少 5.6%,WD-HS 比 WD-LS 挥发份也少 5.6%),出现更多孔隙,产生 了附加的表面积及孔容积(表 1 中所示 WD-HQ 比 WD-LQ 比表面积高 28.8 m²/g,WD-HS 比 WD-LS 比表面积高 126.1 m²/g),有利于生物质焦吸附 更多的焦油分子发生反应,因此制焦温度高则挥发 份析出多是生物质焦活性较强的原因之一。

生物质焦的物理结构特性也影响其催化性能。 本文利用拉曼光谱测定生物质焦的物理结构特性, 如图3所示。生物质焦的拉曼光谱主要两个峰(取 名 D 峰和 G 峰), 位置分别在 1 300~1 400 cm⁻¹、 1550~1600 cm⁻¹处, D 峰的强度随无定形碳结构 的增加而增加, G 峰则是石墨 C == C 键的伸缩振动 峰,随石墨化程度增加而增加。两峰之间的谷底取 名为 V 谷, 位置约在 1 500 cm⁻¹ 处, 通常用 V 谷与 G 峰强度比值 I_v/I_c 来表征碳结构的无序度。也就是 说, I_{ν}/I_{c} 值越大,碳结构的无序度越大^[19],活性位 越多。表3列出的 I_{ν}/I_{c} 值表明WD-HQ无序度高 于 WD-LO,说明无序度增加是 WD-HO 活性高于 WD-LQ的另一个原因。而WD-LS与WD-HS 的*I_v/I_c*值相同,说明慢速热解焦无序度基本不受 温度影响,WD-HS活性高于WD-LS的原因可能 在于挥发份逸出的增多导致的孔结构增多。



图 3 不同制备条件木粉焦的拉曼光谱



表 3 不同制备条件木粉焦的 I_v/I_c 值

Tab.3 I_V/I_G of the wood char prepared

in	different	conditions

焦代号	WD – LQ	WD – HQ	WD – LS	WD – HS
I_V/I_G	0.48	0. 504	0. 52	0.52

2.2.2 制焦热解速率的影响

同温度下,生物质焦的催化活性受制焦热解速 率影响,热解速率较高的生物质焦催化活性较强。 林晓芬等^[20]的研究指出,快速制焦条件下,焦样含 有较丰富的孔,有利于焦的气化反应性能。本实验 中 WD - LQ、WD - HQ 比表面积与孔容均分别大于 WD - LS、WD - HS(表 1),则说明快速制焦孔含量 丰富,因而可能给焦油分子创造更多接近活性中心 的机会,提高生物质焦的催化性能。从表 1 及图 2 还可以看出,WD - LQ 比 WD - LS 比表面积大 $103 \text{ m}^2/\text{g}$,而 WD - HQ 比 WD - HS 比表面积只大 $5.8 \text{ m}^2/\text{g}$,相应的 WD - HQ 比 WD - HS 比表面积只大 $5.8 \text{ m}^2/\text{g}$,相应的 WD - LQ 比 WD - LS 催化活性提 高程度大于 WD - HQ 比 WD - HS 提高的程度。如 WD - LQ 比 WD - LS 蒸和苯酚的转化率分别提高了 8%和7.1%,而 WD - HQ 比 WD - HS 蒸和苯酚的 转化率只提高了 4.5%和 2.7%。说明本实验条件 下比表面积与催化剂的活性具有一定的相关性,比 表面积增加越多,则催化活性提高得越多。

另外,参照图 3 及表 3 可以看出,快速制备生物 质焦的无序度低于慢速制备的生物质焦,可能导致 快速焦活性低于慢速焦。然而转化率结果显示,快 速焦条件下 TMC 转化率仍然高于慢速焦,说明在本 实验条件下,无序度对生物质焦活性的影响低于比 表面积对它的影响。

2.3 制焦原料对在线催化萘和苯酚转化率的影响

本实验选取 WD、BS、RS、CS 4 种生物质原料以 550℃快速热解制焦来研究制焦原料对 TMC 催化效 果的影响。另外,由于石英砂(SS)对焦油裂解催化 作用很小,属惰性材料^[21],因而本实验还选取石英 砂为对比材料,这 5 种床料条件下萘和苯酚的转化 率结果如图 4 所示。



由图 4 可知,石英砂的萘和苯酚转化率都很低, 分别只有 8% 和 29.8%,而 4 种生物质焦的萘转化 率均达到 49% 以上,苯酚转化率均达到 60% 以上, 说明生物质焦对萘和苯酚的裂解具有明显的催化作 用。由图还可以看出,玉米秆焦样催化活性最高,该 条件下 萘转化率达到 62.9%,苯酚转化率达 69.1%。稻秆次之,再次是蔗渣,催化活性最小的是 木粉焦,木粉焦的萘和苯酚转化率分别为 49% 和 61.2%。这可能是以下两种原因所致:

(1)不同原料生物质焦显微结构不同,4种生物质焦放大400倍的SEM形貌如图5所示。由图可见,玉米秆与稻秆显微结构最显著的特点是既有孔径大于20μm的宽通道,又有1~3μm直径的小孔,大孔洞有利于TMC分子从催化剂外部向内部间隙处扩散最终到达反应中心,大量小孔道则为催化剂提供大的比表面积。而蔗渣焦与杉木焦孔道直径分布范围较窄,前者均为约30μm的孔道,后者均为约20μm的孔道。因此玉米秆焦与稻秆焦催化活性较高。甄开吉等^[15]也认为双峰型孔分布有利于催化剂的活性。

(2) Seshardi KS 等[22] 的研究指出, 灰分中金



图 5 不同原料生物质焦的 SEM 图 Fig. 5 SEM images of the biomass chars from the different precursors (a) CC (b) RS (c) BS (d) WD 属、碱金属的氧化物,能有效促进焦油的裂解。本实 验测得不同原料制得的焦的金属氧化物含量如图 6 所示。由图 6 中可知,玉米秆焦和稻秆焦 K₂O、 CaO、MgO 含量都高于其他两种焦,这可能有助于玉 米秆焦和稻秆焦的催化活性。



Fig. 6 Metal oxide contents of the different biomass chars

3 结论

(1)反应温度对萘和苯酚的催化裂解有很大影响,温度越高,萘和苯酚的转化率越高,同等反应温度下,苯酚比萘的转化率高。600℃萘和苯酚的转化率分别为42.6%和58.5%,900℃时两者转化率分别达到83%和84.9%。

(2)热解终温越高,升温速率越快,杉木焦的催 化活性越高,对萘和苯酚的催化裂解转化率越高。 这归结于生物质焦比表面积、孔容积和无序度的变 化。

(3)不同生物质原料制得的焦催化活性由大到小顺序为:玉米秆、稻秆、蔗渣、杉木。这是由于不同 原料生物质焦显微结构特性和金属氧化物含量的变化。

```
参考文献
```

- 1 吴创之,马隆龙. 生物质能现代化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 2 Simell P A, Leppalahti J K, Bredenberg J B. Catalytic purification of tarry fuel gas with carbonate rocks and ferrous materials [J]. Fuel, 1992,71(2):211 ~ 218.
- 3 Scott D. The role of temperature in the fast pyrolysis of cellulose and wood[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1988, 27(1):8~15.
- 4 Narvaez I, Orio A, Corello J. Thermochemical biomass conversion [C] // Proceedings of Conference on Developments on Thermochemical Biomass Conversion, Banff, UK, 1996.
- 5 Dayton D. A review of the literature on catalytic biomass tar destruction [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- 6 Chembukulam S K, Dandge A S, Kovllur N L. Smokeless fuel from carbonized sawdust [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1981,20(4):714~719.
- 7 El-Rub Ziad Abu. Biomass char as an in-situ catalyst for tar removal in gasification systems [D]. Enschede: University of Twente, 2008.
- 8 Maria Petra Houben. Analysis of tar removal in a partial oxidation burner [D]. Eindhovern: Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
- 9 彭军霞,赵增立,李海滨,等. 生物质焦对甲苯的催化裂解实验研究[J]. 煤炭转化,2009,32(4):92~96. Peng Junxia, Zhao Zengli, Li Haibin, et al. Catalytic decomposition of toluene over biomass char[J]. Coal Conversion,

2009,32(4):92~96. (in Chinese)

- 10 吕俊复,岳光溪. 一种循环床循环灰条件下焦油组分的催化裂解[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998, 38(7):66~69. Lü Junfu, Yue Guangxi. Catalytic cracking reactions of tar components over circulating ash of CFBB[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998,38(7):66~69. (in Chinese)
- 11 徐鑫,陈雷,张晓东,等. 生物质焦油模型化合物催化转化实验研究[J]. 燃料化学学报, 2009,37(2):248~251. Xu Xin, Chen Lei, Zhang Xiaodong, et al. Catalytic conversion of model compounds of biomass tar[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009,37(2):248~251. (in Chinese)
- 12 El-Rub Abu Z, Bramer E A, Brem G. Experimental comparison of biomass chars with other catalysts for tar reduction [J]. Fuel, 2008,87(10~11):2243~2252.
- 王磊,吴创之,赵增立. 热解焦对生物质焦油催化裂解的影响[J]. 太阳能学报,2006,27(5):514~518.
 Wang Lei, Wu Chuangzhi, Zhao Zengli. Effect of char on catalytic cracking of tar from biomass gasification gas with toluene as a model compound[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006,27(5):514~518. (in Chinese)
- 14 Lopamudra Devi, Ptasinski K J, Janssen FJJG. Pretreated olivine as tar removal catalyst for biomass gasifiers: investigation using naphthalene as model biomass tar [J]. Fuel Processing Technology, 2005,86(6):707 ~730.
- 15 甄开吉,王国甲,毕颖丽,等. 催化作用基础[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- 16 Milne T A, Abatzoglou N, Evan R J. Biomass gasifier "tars": their nature, formation, and conversion [R]. National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- 17 Espenas B G. Reactivity of biomass and peat chars formed and gasified at different conditions [C] // Proc. Int. Conf. on Advances in Thermochemical Biomass Conversion, Blackie A&P, 1994: 142 ~ 159.
- 18 吕学珍,黄瀛华,颜涌捷,等.煤的快速热解焦燃烧气化特性[J].华东理工大学学报,1996,22(2):136~141. Lü Xuezhen, Huang Yinghua, Yan Yongjie, et al. Technological properties of flash pyrolyzed chars[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 1996,22(2):136~141. (in Chinese)
- 19 Okumura Y, Hanaoka T, Sakanishi K. Effect of pyrolysis conditions on gasification reactivity of woody biomass-derived char [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009,32(2):2013 ~ 2020.
- 20 林晓芬, 尹艳山, 李振全,等. 压汞法分析生物质焦孔隙结构[J]. 工程热物理学报, 2006,27(增刊2):187~190. Lin Xiaofen, Yin Yanshan, Li Zhenquan, et al. Determination of porocity of biomass chars using mercury porosimetry[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006,27(Supp.2):187~190. (in Chinese)
- 21 Cheng Cliff. Thermal reactions fo freshly generated coal tar over calcium oxide [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- 22 Seshardi K S, Shamsi A. Effects of temperature, pressure, and carrier gas on the cracking of coal tar over a char-dolomite mixture and calcined dolomite in a fixed-bed reactor [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998, 37(10): 3 830 ~ 3 837.

(上接第35页)

- 11 陈立周. 稳健设计[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- 12 Kennedy J, Ebernart R C. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of 1995 IEEE Int. Conf. on Neural Networks, 1995, 4: 1942 ~ 1948.
- 13 刘仁云,张义民,于繁华. 基于灰色粒子群算法的可靠性稳健优化设计[J]. 吉林大学学报: 工学版,2006,36(6): 893~897.

Liu Renyun, Zhang Yimin, Yu Fanhua. Robust optimization design of reliability based on grey particle swarm algorithm [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(6): 893 ~ 897. (in Chinese)

- 14 靳晓雄,张立军,江浩.汽车振动分析[M].上海:同济大学出版社,2002.
- 15 张武,陈剑,夏海.基于灵敏度分析的发动机悬置系统稳健优化设计[J]. 汽车工程,2009,31(8):728~732. Zhang Wu, Chen Jian, Xia Hai. Robust optimal design of an engine mounting system based on sensitivity analysis[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(8):728~732. (in Chinese)