

文章编号: 0253-240X(2006)02-0200-05

## K 改性 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 催化剂 CO 加氢合成低碳混合醇的研究

向明林<sup>1,2</sup>, 李德宝<sup>1</sup>, 肖海成<sup>1,2</sup>, 齐会杰<sup>1</sup>, 李文怀<sup>1</sup>, 孙予罕<sup>1</sup>, 钟炳<sup>1</sup>

(1. 中国科学院山西煤炭化学研究所 煤转化国家重点实验室, 山西 太原 030001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 制备系列 K 改性的  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂并对其 CO 加氢合成低碳混合醇性能进行了考察。结果表明, K 改性使  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂的 CO 加氢选择性发生显著变化。 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂 CO 加氢的产物主要为  $\text{C}_1 \sim \text{C}_4$  烷烃, 经 K 改性后  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂上产物主要为  $\text{C}_1 \sim \text{C}_5$  低碳醇, 其中高级醇 ( $\text{C}_{2+}\text{OH}$ ) 选择性可达到 33.78%。通过对碱金属质量分数的考察发现, 当  $\text{K}/\text{Mo}$  (原子比) 为 0.2 时, 总醇选择性达到最大值, 低碳醇的时空收率达到  $0.12 \text{ g}/(\text{mL}\cdot\text{h}^{-1})$ 。 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂上醇烃产物均符合线性 Anderson-Schultz-Flory (A-S-F) 分布曲线, 而 K 改性  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂上醇产物为独特的甲醇负偏离 A-S-F 分布。可见, K 助剂的加入有效促进了低碳醇的形成, 尤其是促进了  $\text{C}_1\text{OH}$  到  $\text{C}_2\text{OH}$  的链增长步骤。

**关键词:**  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂; K 改性; CO 加氢; 低碳混合醇

中图分类号: O643 文献标识码: A

## Mixed alcohols synthesis from CO hydrogenation over potassium-promoted $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ catalysts

XIANG Ming-lin<sup>1,2</sup>, LI De-bao<sup>1</sup>, XIAO Hai-cheng<sup>1,2</sup>, QI Hui-jie<sup>1</sup>, LI Wen-huai<sup>1</sup>,  
SUN Yu-han<sup>1</sup>, ZHONG Bing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China;  
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The modification effects of  $\text{K}_2\text{CO}_3$  on  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  catalysts for mixed alcohols synthesis from CO hydrogenation were studied. Un-promoted  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  produced mainly hydrocarbons of  $\text{C}_1\text{-C}_4$  under the reaction conditions of 573 K, 8.0 MPa,  $\text{H}_2/\text{CO} = 1.0$ , GHSV =  $2000 \text{ h}^{-1}$ . Addition of  $\text{K}_2\text{CO}_3$  to  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  resulted in remarkable selectivity shift from hydrocarbons to alcohols. Moreover, the promoter of potassium enhanced the ability of chain propagation of  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  with the higher selectivity of  $\text{C}_{2+}$  alcohols. The investigations of the loadings of  $\text{K}_2\text{CO}_3$  in  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  revealed that the maximum of alcohol yield obtained at  $\text{K}/\text{Mo}$  (molar ratio) = 0.2. On  $\text{K}/\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  catalysts, the distribution of hydrocarbons obeyed the traditional linear Anderson-Schultz-Flory equation, while the distribution of alcohols gave a unique linear Anderson-Schultz-Flory with remarkable deviation of methanol. Thus, potassium promoter exerted a prominent function on the whole chain propagation to produce alcohols especially for the stage of methanol to ethanol.

**Key words:**  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ ; potassium; CO hydrogenation; mixed alcohols synthesis

CO 加氢合成低碳混合醇是煤炭资源洁净利用的重要途径之一。近年来低碳混合醇在燃料和化工领域的应用价值逐步凸现, 相关研究日益活跃<sup>[1]</sup>。低碳醇催化剂主要可分为两类: 一是改性的 F-T 合成催化剂; 二是改性的甲醇合成催化剂<sup>[2]</sup>。在这两类催化剂中, 通常认为碱金属是低碳醇合成催化剂的必要组元。

目前开发的多种低碳醇催化剂体系中, 钼基催化剂, 以其优异的抗硫性和良好的合成低碳混合醇的性能, 被认为是一类颇有前景的催化剂体系并对其进行了大量的研究。作为一类新型的催化材料,

碳化钼以其类贵金属的特点受到广泛的关注。CO 加氢领域的初步探索研究表明<sup>[3]</sup>, 碳化钼主要生成轻质烃、 $\text{CO}_2$  和少量醇。当 Co、Ru 改性后, 其 CO 加氢活性明显增强, Ru 改性碳化钼降低了醇类产物而 Co 改性碳化钼则增强了重质烃的形成。Lee 等对碱金属改性碳化钼在 CO 加氢反应中的研究表明, 无钾助剂时主要产生  $\text{C}_1 \sim \text{C}_5$  烷烃, 其中甲烷是主要产物, 钾改性后低碳混合醇, 特别是  $\text{C}_2 \sim \text{C}_7$  高级醇的选择性明显提高<sup>[4~6]</sup>。

本文制备了系列 K 改性的  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  模型催化剂, 通过对其 CO 加氢反应性能进行考察, 获得了碱

金属助剂对 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 催化剂上CO加氢反应行为影响的基本规律,并通过催化剂构效的研究对K助剂的作用特征进行了初步探讨。

## 1 实验部分

**1.1 催化剂的制备和表征**  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 催化剂的制备采用程序升温反应法(TPRE)<sup>[7,8]</sup>。将一定量的 $\text{MoO}_3$ 装入石英反应管,置于管式炉中,以 $\text{CH}_4/4\text{H}_2$ 为炭化介质通入反应管,采用两段程序升温控制,室温到673 K的升温速率为5 K/min,673 K到最终炭化温度973 K的升温速率为1 K/min。炭化完成后,在Ar中快速冷却至室温,然后采用含微量氧的 $\text{O}_2/\text{N}_2$ 混合气钝化即得样品。K/ $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 模型催化剂制备中 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 的引入采用炭化前(nascent-doping)和炭化后(post-doping)两种方式完成,具体为(1)炭化前(nascent-doping)掺杂:先将 $\text{MoO}_3$ 与 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 机械混合,于马沸炉中773 K煅烧2 h,再经历炭化步骤;(2)炭化后(post-doping)掺杂:将 $\text{MoO}_3$ 炭化后的样品与 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 机械混合,于氩气(Ar)气氛中773 K煅烧2 h即得到催化剂。

样品XRD测试采用RigakuD/Max2500型衍射仪测定, $\text{CuK}\alpha$ ,Ni滤波,40 kV,电流100 mA;BET采用ASAP2000型自动物理吸附仪测试(77 K  $\text{N}_2$ 吸附)根据脱附曲线用BET方程计算得到。

**1.2 CO加氢性能评价** 催化剂性能评价在内径为5 mm的不锈钢固定床反应器中进行,催化剂填装量为2 mL,反应条件573 K、8.0 MPa、 $\text{H}_2/\text{CO}=1.0$ ,GHSV=2000  $\text{h}^{-1}$ 。甲醇裂解获得的合成气脱水、脱

氧净化后,经预热器进入反应器,反应稳定后间隔24 h取样分析。产物分析采用1790气相色谱。 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 等产物分析采用TDX01色谱柱,TCD检测器,载气Ar。 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{OH}$ 分析采用GDX401色谱柱,TCD检测器,载气Ar。 $\text{C}_1\sim\text{C}_4$ 烃及 $\text{C}_1\sim\text{C}_5$ 醇等产物分析采用Porapak-Q色谱柱,FID检测器,载气Ar。以 $\text{CH}_4$ 关联气相产物,以 $\text{CH}_3\text{OH}$ 关联液相产物进行归一计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 催化剂的表征

**2.1.1 催化剂结构** 图1(a)为结晶良好的 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 晶相,34.4°、38.0°、39.4°、52.1°、61.5°、69.6°和74.6°处的特征衍射峰分别归属于 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 的[100]、[002]、[101]、[102]、[110]、[103]和[200]晶面,样品中未检测到Mo、 $\text{MoO}_2$ 等晶相衍射峰。因此,TPRe可获得 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 纯相。当K在炭化后掺杂(post-doping)时,由图1(a)可见,随着K担载量的增加 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 衍射峰明显增强。 $\text{K}/\text{Mo}=0.2$ 时 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 衍射峰较弱,而 $\text{K}/\text{Mo}=0.5$ 时 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 衍射峰强度显著增加,同时 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 的衍射峰强度变弱。 $\text{K}/\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 催化剂上66.7°处出现一新衍射峰,这可能与 $\text{K}/\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 催化剂上“K-Mo-C”微晶相的生成有关。当K在炭化前掺杂(nascent-doping)时,图1(b)表明,无 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 的特征衍射峰出现,而有明显的Mo和 $\text{MoO}_2$ 的特征衍射峰,故K在炭化前加入抑制了 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 的形成。因此,K的有效添加应在炭化后(post-doping)进行<sup>[9]</sup>。

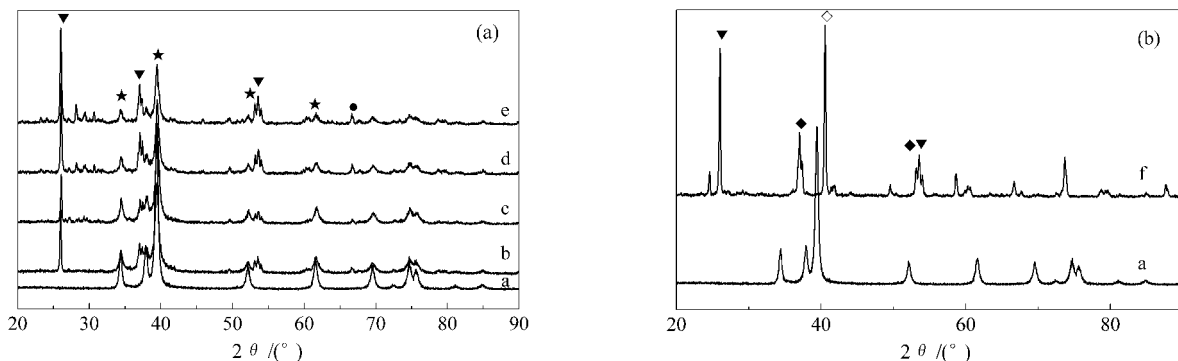


图1 催化剂的XRD谱图

Figure 1 XRD patterns of samples

(a) post-doping;(b) nascent-doping

a  $\text{K}/\text{Mo}=0$ ; b  $\text{K}/\text{Mo}=0.1$ ; c  $\text{K}/\text{Mo}=0.2$ ; d  $\text{K}/\text{Mo}=0.3$ ; e  $\text{K}/\text{Mo}=0.5$ ; f  $\text{K}/\text{Mo}=0.2$

▼  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ; ★  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ ; ● K-Mo-C; ◇ Mo; ◆  $\text{MoO}_2$

**2.1.2 催化剂的比表面积** 表1给出 $\text{K}/\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 催化剂的比表面积。由表1可见,纯 $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ 具有

较高的比表面积(23.8  $\text{m}^2/\text{g}$ ),K改性后比表面积明显降低,当 $\text{K}/\text{Mo}=0.5$ 时,比表面积只有1.8  $\text{m}^2/\text{g}$ 。

表 1 催化剂的比表面积

Table 1 BET surface area of K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C catalysts (K post-doping)

	K/Mo				
	0	0.1	0.2	0.3	0.5
$A_{\text{BET}}/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	23.8	5.6	3.5	2.0	1.8

## 2.2 催化剂的 CO 加氢反应性能

### 2.2.1 $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 和 K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂的反应性能 $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 及 K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 模型催化剂的 CO 加氢反

表 2  $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂和 K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂 CO 加氢反应性能Table 2 Performance of CO hydrogenation over  $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C and K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C catalysts

Catalyst	CO	STY	Selectivity $s/\%$ <sup>b</sup>		Alcohols distribution $\%$				
	con. $x/\%$	$\text{g}/(\text{mL} \cdot \text{h}^{-1})$	ROH	HC	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5+</sub>
$\beta$ -Mo <sub>2</sub> C	58.60	0.01	3.73	96.27	2.63	0.66	0.33	0.10	0.01
K/ $\beta$ -Mo <sub>2</sub> C <sup>a</sup>	23.20	0.12	52.60	47.40	18.82	22.03	8.22	3.09	0.44

a—K/Mo=0.2 (post-doping); b—free of CO<sub>2</sub>

K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 模型催化剂 CO 加氢反应产物中低碳混合醇的分布见图 2。由图 2 可见,催化反应存在诱导期,反应进行约 72 h 后到达稳态。稳态下总醇选择性达到 52.60%, 甲醇选择性为 18.82%, C<sub>2+</sub>OH 为 33.78%。由此可见,K 的加入极大的提高了低碳混合醇特别是高级醇(C<sub>2+</sub>OH)的选择性。

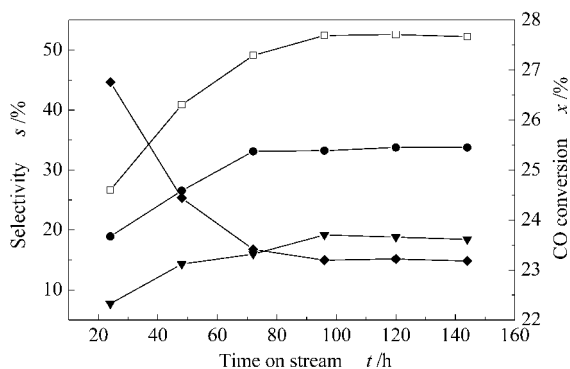


图 2 K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂的选择性和 CO 转化率随反应时间的变化

Figure 2 Relationship between CO conversion and selectivity and time on stream over K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C

□ total alcohols; ▼ C<sub>1</sub>OH;  
● C<sub>2+</sub>OH; ◆ CO conversion

2.2.2 K 担载量对 K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂 CO 加氢性能的影响 K 担载量对 K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂合成低碳醇性能的影响见图 3。由图 3 可见,随着 K 质量分数的增加 CO 转化率单调下降,当达到 23.20% 后基本保持稳定,而总醇时空收率先增加后降低,在 K/Mo=0.2 时达到极大值 0.12 g/(mL·h<sup>-1</sup>)。同时

应性能见表 2。由表 2 可见, $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂具有很高的活性,CO 转化率高达 58.60%,但产物主要为 C<sub>1</sub>~C<sub>4</sub> 烷烃,同时检测到微量醇产物,但仅占 3.73 mol%。K 改性后  $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂上产物选择性发生显著变化,烷烃选择性由 96.27 mol% 降低到 47.40 mol%,而总醇选择性由 3.73 mol% 显著提高到 52.60 mol%。总醇时空收率显著增大,达到 0.12 g/(mL·h<sup>-1</sup>),醇选择性特别是高级醇(C<sub>2+</sub>OH)显著提高。

可看到,随着 K 质量分数的增加产物的选择性也有明显变化见图 3(b),烷烃选择性与 CO 转化率有类似趋势,即先下降后基本不变,而总醇选择性则呈先增加后降低趋势,且在 K/Mo=0.2 时达到极大值。随着 K 质量分数的增加,产物中各种醇和烃的变化趋势见图 3(c)和图 3(d)。由图 3(c)可见,低碳醇特别是高级醇(C<sub>2+</sub>OH)的选择性显著增强,在醇产物分布中, $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂上 C<sub>2+</sub>醇选择性小于甲醇选择性;K 改性后  $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂上 C<sub>2+</sub>选择性明显大于甲醇选择性。而烷烃产物分布中,则出现相反的规律,结果见图 3(d)。K 助剂的加入,极大的促进了低碳醇特别是高级醇(C<sub>2+</sub>OH)的生成<sup>[10]</sup>。

2.2.3 产物 Anderson-Schultz-Flory 分布及 K 助剂的作用特征 图 4 给出了  $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 和 K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂上醇和烃产物的 A-S-F 分布曲线。由图 4 可以看到, $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂上低碳醇和烷烃产物均符合线性 A-S-F 分布见图 4(a),其链增长几率  $P$  分别为 0.26 和 0.62,而醇产物中甲醇选择性明显高于高级醇(C<sub>2+</sub>OH)选择性(表 2)。与  $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂相比,K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂 CO 加氢反应产物中的烷烃也符合线性 A-S-F 分布见图 4(b),但链增长几率  $P$  为 0.48。烃类产物在不同催化剂上类似的线性 A-S-F 分布表明,K 助剂对烃类形成的链增长方式的影响不大,但链增长几率的下降表明,K 助剂使  $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂上烃类产物形成的链增长能力受到明显抑制。由图 4(b)同时可看到,K 助剂对醇产物的分布有显著影响,在 K/ $\beta$ -Mo<sub>2</sub>C 催化剂上醇产物不符合线性 A-S-F 分布曲线,而出现甲醇负偏离。由

此可见, K 的加入使醇类产物的形成和链增长方式发生了变化, 其明显特征在于有效的促进了  $\text{C}_1\text{OH}$  到  $\text{C}_2\text{OH}$  链增长步骤。结合 XRD 谱图和不同 K 的质量分数催化剂的反应性能, 认为单独的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  并

不是低碳醇形成的活性相, 只有当  $\text{K}_2\text{CO}_3$  和  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  作用形成“K-Mo-C”表面结构才能有效的促进低碳醇的形成, 因此, 新的表面相“K-Mo-C”可能与高级醇生成活性相有关。

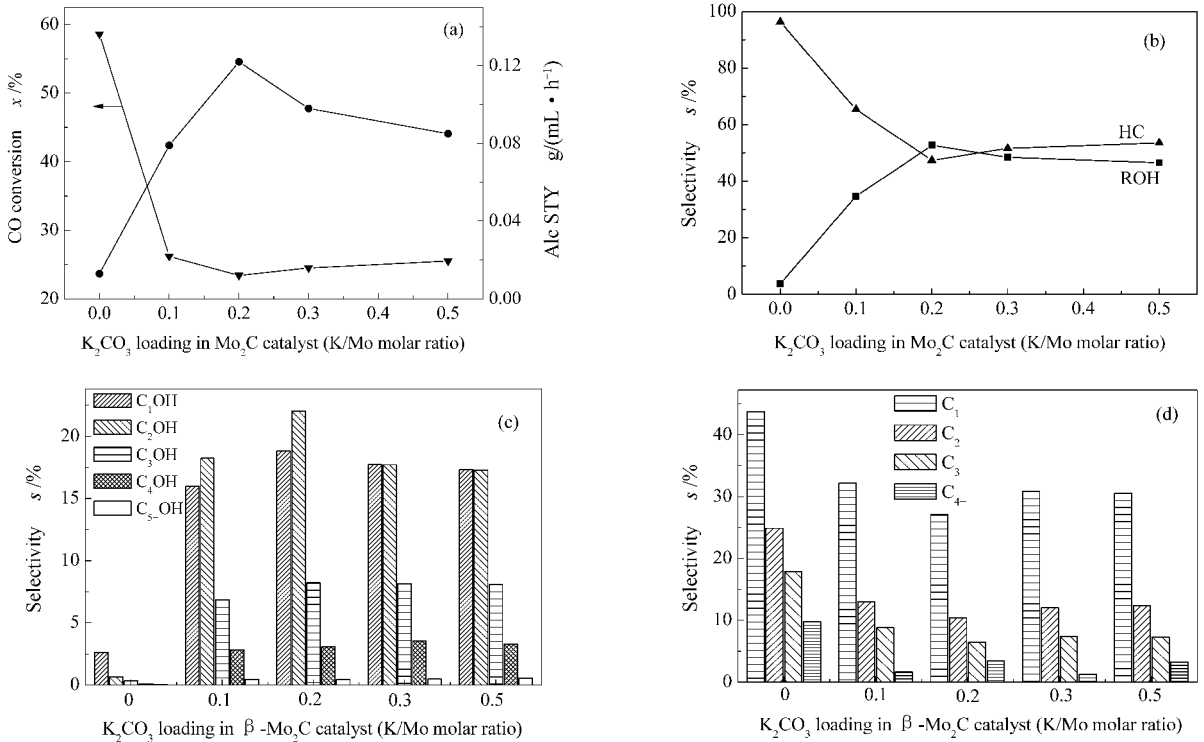


图 3  $\text{K}_2\text{CO}_3$  的质量分数对 K/ $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂 CO 加氢性能的影响

Figure 3 Influence of loading of  $\text{K}_2\text{CO}_3$  on the selectivities and CO conversion

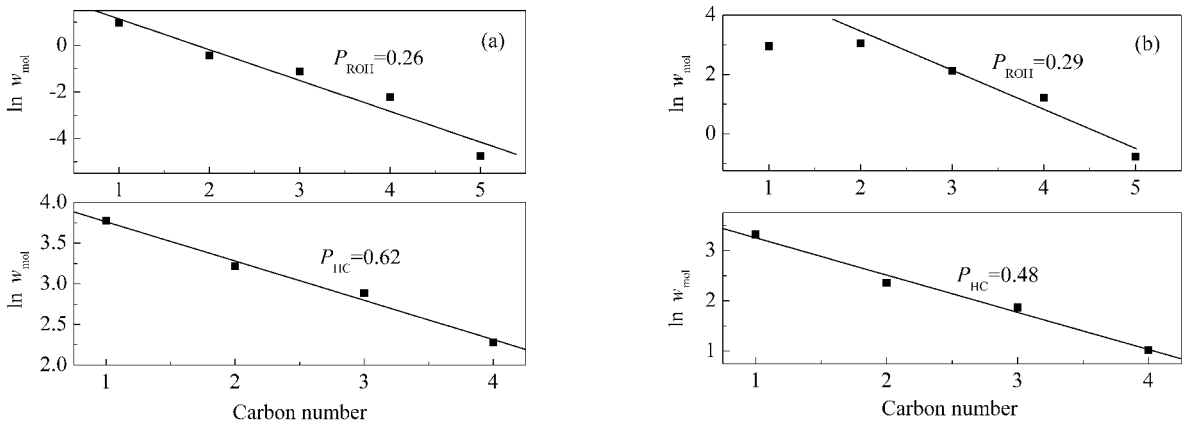


图 4  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  和 K/ $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  (K/Mo = 0.2) 催化剂上醇和烃产物的 A-S-F 分布曲线

Figure 4 A-S-F plots of alcohols and hydrocarbons over  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  and K/ $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  catalysts

( $P$  denotes the probability of chain growth)

(a)  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$ ; (b) K/ $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$

### 3 结 语

(1)  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  具有很高的 CO 加氢活性, 加氢产物主要为  $\text{C}_1$ - $\text{C}_4$  烷烃, K 改性后  $\beta$ - $\text{Mo}_2\text{C}$  催化剂上产物选择性发生显著变化, 主要为  $\text{C}_1$ - $\text{C}_5$  低碳醇, 同时

高级醇 ( $\text{C}_2+$  OH) 的选择性明显提高。

(2) K 助剂可有效促进  $\text{C}_1\text{OH}$  到  $\text{C}_2\text{OH}$  的链增长步骤, 催化剂中“K-Mo-C”相的形成可能与醇形成活性位有关。

(3)当 K/Mo 摩尔比为 0.2 时,醇时空收率达到 分布曲线,而低碳醇产物为甲醇负偏离的独特分布。最大值 0.12 g/(mL·h<sup>-1</sup>),产物中烷烃符合 A-S-F

### 参考文献:

- [1] 李德宝,马玉刚,齐会杰,李文怀,孙予罕,钟炳. CO 加氢合成低碳混合醇催化体系研究新进展[J]. 化学进展,2004,16(4):584-592.  
(LI De-bao, MA Yu-gang, QI Hui-jie, LI Wen-huai, SUN Yu-han, ZHONG Bing. Progress in synthesis of mixed alcohols from CO hydrogenation[J]. Progress in Chemistry, 2004, 16(4):584-592.)
- [2] UDRWOOD R P, BELL A T. Lanthana-promoted Rh/SiO<sub>2</sub>: II Studies of CO hydrogenation[J]. J Catal, 1988, 111(2):325-335.
- [3] GRIBOVAL-CONSTANT A, GIRAUDON J-M, LECLERCQ G, LECLERCQ L. Catalytic behaviour of cobalt or ruthenium supported molybdenum carbide catalysts for FT reaction[J]. Appl Catal A, 2004, 260(1):35-45.
- [4] WOO H C, PARK K Y, KIM Y G, NAMAU I-S, CHUNG J S, LEE J S. Mixed alcohol synthesis from carbon monoxide and dihydrogen over potassium-promoted molybdenum carbide catalysts[J]. Appl Catal, 1991, 75(1):267-280.
- [5] PARK K Y, SEO W K, LEE J S. Selective synthesis of light olefins from syngas over potassium-promoted molybdenum carbide catalysts[J]. Catal Lett, 1991, 11(3-6):349-356.
- [6] LEE J S, KIM S, KIM Y G. Electronic and geometric effects of alkali promoters in CO hydrogenation over K/Mo<sub>2</sub>C catalysts[J]. Top Catal, 1995, 2(1-4):127-140.
- [7] LEE J S, OYAMA S T, BOUDART M. Molybdenum carbide catalysts: I Synthesis of unsupported powders[J]. J Catal, 1987, 106(1):125-133.
- [8] LEE J S, VOLPE L, RIBEIRO F H, BOUDART M. Molybdenum carbide catalysts: II Topotactic synthesis of unsupported powders[J]. J Catal, 1988, 112(1):44-53.
- [9] KOJIMA R, AIKA K-I. Molybdenum nitride and carbide catalysts for ammonia synthesis[J]. Appl Catal A, 2001, 219:141-147.
- [10] FUJIMOTO K, OBA T. Synthesis of C<sub>1</sub>-C<sub>7</sub> alcohols from synthesis gas with supported cobalt catalysts[J]. Appl Catal, 1985, 13(2):289-293.

## 第十三届全国催化学术会议第一轮通知

第十三届全国催化学术会议定于 2006 年 9 月在兰州召开。会议将由中国化学会催化专业委员会主办,中国科学院兰州化学物理研究所和中国科学院成都有机化学有限公司承办。

### 征文范围

- |                      |                     |
|----------------------|---------------------|
| A. 催化剂制备科学与技术        | B. 催化剂表征、催化反应动力学与机理 |
| C. 生物催化、化学模拟、光催化、电催化 | D. 碳一化学与低碳烃化学       |
| E. 新型催化反应与技术工程       | F. 理论化学在催化中的应用      |
| G. 催化与能源             | H. 催化与环境            |
| I. 石油化工、石油炼制和精细化学品合成 |                     |

本次会议论文截止期为 2006 年 5 月 31 日,论文为网上提交。论文模版、排版细则、以及其他事宜,请参阅网址 <http://www.13ncc.ac.cn>。

中国化学会催化专业委员会  
中国科学院兰州化学物理研究所  
中国科学院成都有机化学有限公司  
第十三届全国催化学术会议组委会