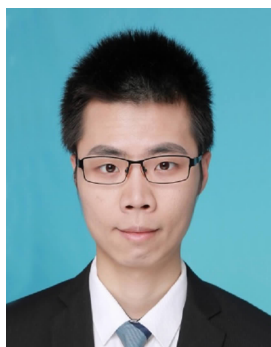


## 干式离合器摩擦片摩擦系数测试台架设计

林晓华, 赵亦农

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)



**摘要:**在自动干式离合器中,获得精确的摩擦转矩对提高离合器的控制效果有着重要影响。而摩擦转矩的精确度很大程度上依赖于摩擦系数的精确度。因此为了研究干式离合器摩擦片的摩擦系数与压力、转速和滑磨过程中摩擦片表面温度的关系,设计了干式离合器摩擦片摩擦系数测试台架。该台架由机械系统、伺服电动机控制系统和数据采集系统组成。机械系统由底座、减速机和弹簧等组成,主要实现压力的手动调节功能;伺服电动机控制系统由触摸屏、PLC控制器和伺服电动机驱动器等组成,主要实现电动机转速和转向的控制;数据采集系统由单片机和计算机等组成,实现所有数据的采集和显示功能。经实验验证,该台架可以实现压力和转速的控制并完成压力、转速、摩擦转矩、摩擦片表面温度和摩擦系数的同步采集,在干式离合器摩擦系数影响因素的研究中起到了重要作用。

**关键词:**干式离合器;摩擦片;摩擦系数

**中图分类号:**U 467.4<sup>+</sup>95

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7167(2017)05-0048-05

## Design of the Friction Coefficient Measurement Bench for Dry Clutch Plates

LIN Xiaohua, ZHAO Yinong

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** For automatic dry clutches, it is important to obtain the accurate friction torque to improve the control effect of the clutch. And the precision of the friction torque is largely dependent on the precision of the friction coefficient. So in order to analyze the relationship among friction coefficient, clamping force, rotate speed and surface temperature of dry clutch plates, a friction coefficient measurement bench is designed. The bench is made up of the mechanical system, the servo-motor control system and the data acquisition system. The mechanical system is composed of a base, a speed reducer, a spring and so on, it is mainly to achieve the manual pressure adjustment. The servo motor control system consists of a touch screen, a PLC controller, a servo motor drive and so on, it is mainly to achieve the control of the motor speed and direction. The data acquisition system consists of a single-chip, a computer and so on, it is to achieve the function of data acquisition and display. The experiments showed that the bench had the functions of controlling clamping force and rotate speed, and it could also collect signals of clamping force, rotate speed, friction torque, surface temperature and friction coefficient synchronously. The bench plays an important role in the friction coefficient research.

**Key words:** dry clutch; friction disk; friction coefficient

收稿日期:2016-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51275038)

作者简介:林晓华(1990-),男,福建建瓯人,硕士生,主要研究方向为干式离合器摩擦转矩模型。

Tel.:18811769528; E-mail:linxiaohua789@163.com

通信作者:赵亦农(1963-),男,内蒙古集宁人,学士,实验师,主要研究方向为汽车实验技术。

Tel.:13901101784; E-mail:yinong\_z@163.com

## 0 引言

在装配有 AMT 和干式 DCT 的车辆中,干式离合器的控制效果对汽车的动力性、经济性和平顺性都有很大的影响<sup>[1-3]</sup>。要实现干式离合器的良好控制,对离合器当前传递的摩擦转矩进行精确的计算是必不可少的。由离合器摩擦转矩的计算公式<sup>[4]</sup>可知,要获得精确的离合器摩擦转矩,离合器摩擦片与其对偶件的摩擦系数是无法忽略的因素。摩擦系数有很多影响因素:摩擦材料的种类、摩擦片表面粗糙度、表面温度、相对滑动速度和压力等都会对摩擦系数产生影响<sup>[5-6]</sup>。从离合器的实际使用工况、摩擦片厂的生产经验和相关文献<sup>[7-12]</sup>的分析中得出离合器摩擦片摩擦系数的3个主要影响因素:转速差、压力和摩擦片表面温度。为了分析上述3个参数对摩擦系数的影响,本文设计了干式离合器摩擦片摩擦系数测试台架。

## 1 方案设计

如图1所示,该台架主要由伺服电动机、摩擦盘、压盘、带 ADC 和串口的单片机、PLC 控制器等组成。台架以伺服电动机为动力源,带动摩擦盘转动;压盘固定在滑动导轨的滑块上,并由减速机等传动件驱动;压力信号由压块与右压盘之间的力传感器采集;温度信号由热电偶采集;电动机转速与转矩信号则从伺服电动机驱动器中采集。由此即可根据电动机转矩、压力以及摩擦片的等效摩擦半径计算出摩擦系数<sup>[4]</sup>:

$$\mu = \frac{T_e}{FR_e Z} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{2}{3} \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \quad (2)$$

式中: $T_e$ 为电动机扭矩; $F$ 为压力; $R_e$ 为摩擦片等效摩擦半径; $Z$ 为摩擦面的数量; $R$ 为摩擦片大端半径; $r$ 为摩擦片小端半径。

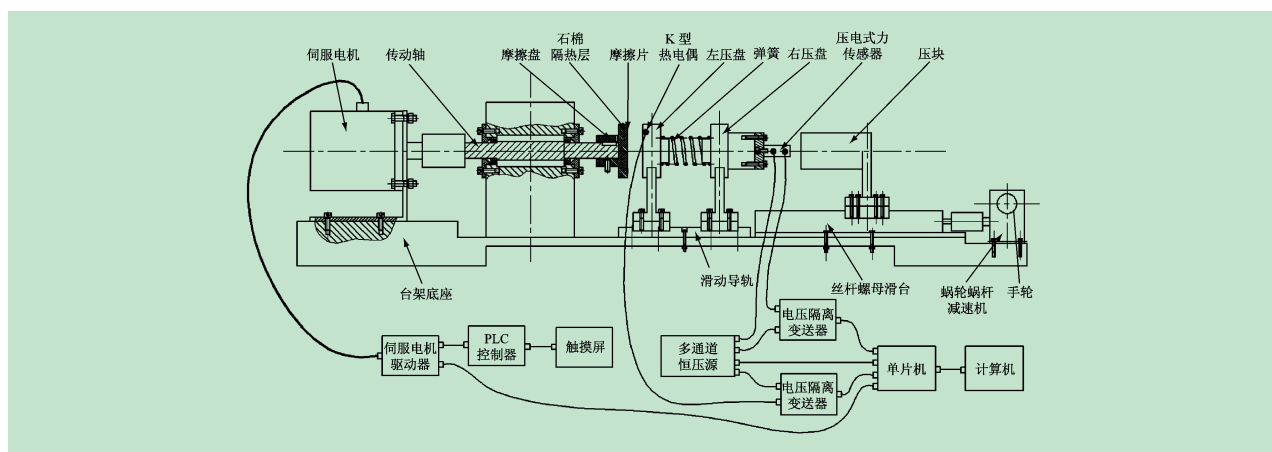


图1 台架示意图

通过所测数据,可以进一步得到摩擦系数随转速、压力和摩擦片表面温度的变化情况。按照功能的不同可以将台架细分为机械系统、电动机驱动系统和数据采集系统。

### 1.1 机械系统设计

台架的机械系统主要由图1中的传动轴、摩擦盘、石棉隔热层、摩擦片、左压盘、弹簧、右压盘、压块、手轮、蜗轮蜗杆减速机、丝杆螺母滑台、滑动导轨和台架底座组成。传动轴左端通过联轴器与伺服电动机输出轴相连,右端通过平键与摩擦盘相连以保证周向定位,并通过顶丝保证轴向定位。摩擦片(见图2)通过高温结构胶黏贴在摩擦盘上,在摩擦片与摩擦盘之间黏贴一层石棉隔热层(见图3),使得摩擦片与摩擦盘之间近似保持绝热条件。滑动导轨固定在台架底座上,左压盘和右压盘固连在导轨的两个滑块上。两压盘用弹簧连接,保证压力传递过程存在弹性环节,使得压力可以逐步增加。K型热电偶埋在左压盘上,位置位于压

盘与摩擦片接触区附近。力传感器固定在右压盘上,丝杆螺母滑台固定在台架底座上,压块与滑台的螺母固连,蜗轮蜗杆减速机的输出轴通过联轴器与滑台的丝杆相连,输入轴则与手轮相连。滑台一方面可以将丝杆的转动转化为螺母的移动;另一方面又起到反向锁止的作用,保证手轮释放后压力可以继续保持。减速机在省力的同时还可以进一步加强反向锁止作用。



图2 摩擦圆环



图3 石棉隔热层

实验过程中,手动旋转蜗轮蜗杆减速机上的手轮,减速机输出轴带动滑台的丝杆转动,从而带动压块移

动,压块进一步推动右压盘、弹簧和左压盘移动,使得左压盘与摩擦盘上的摩擦片接触。经上述步骤,完成压力的施加过程。

台架针对的测量对象是离合器摩擦片,因此以长春一东离合器厂生产的 DS430N1 离合器摩擦片为摩擦材料。由于一般的离合器摩擦片沿径向上各点的线速度不同,导致了各点的滑磨功和热流密度并不相同,由有限元和传热学相关计算公式<sup>[13-16]</sup>可知,摩擦片各点的温度不相同。为了得到离合器摩擦片表面温度与摩擦系数的关系,将 DS430N1 摩擦片加工为内外径之比为 0.8 的摩擦圆环。由于摩擦圆环内外径之比较大,摩擦片各点的滑磨线速度较为接近,各点的温度基本相同。

对离合器从动盘进行热分析(见图 4)可知,离合器摩擦盘在滑磨过程中,近似为轴对称传热,摩擦片与从动盘本体的接触面的热边界条件可以等效为绝热条件。为了模拟该情况,在台架上将摩擦片与摩擦盘之间增加一层石棉隔热层。

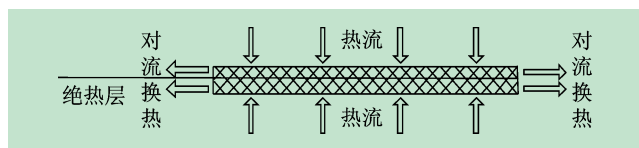


图 4 离合器摩擦盘传热分析示意图

经理论分析和有限元计算(见图 5)可知,温度场的分布是连续的,所以摩擦片与压盘接触面的温度理论上是相同的。因此台架通过 K 型热电偶直接测量压盘上的温度,并将其作为摩擦片的表面温度。

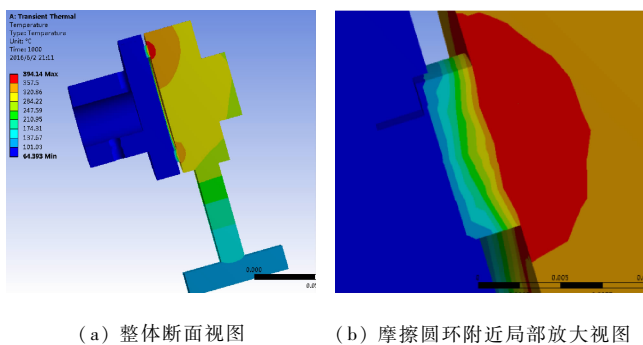


图 5 摩擦片温度有限元分析

## 1.2 电动机驱动系统设计

电动机驱动系统的主要功能是对电动机转速进行设置。硬件(见图 1)包括伺服电动机、伺服电动机驱动器、PLC 控制器和触摸屏。其中触摸屏的作用是充当电动机控制界面(见图 6),该控制界面使用触摸屏配套的组态软件进行编写。

PLC 控制器完成对伺服电动机转速和转向的控制。根据台架的设计目标,电动机控制程序需要完成如下功能:电动机启停设置、电动机转向设置、电动机

转速设置和电动机匀加减速设置。具体的电动机控制流程如图 7 所示。从触摸屏中输入控制电动机所需的信号并传递给 PLC 控制器,PLC 控制器根据电动机控制程序将脉冲信号发送给伺服电动机驱动器,伺服电动机驱动器再根据编码器信号对电动机转速进行闭环控制。

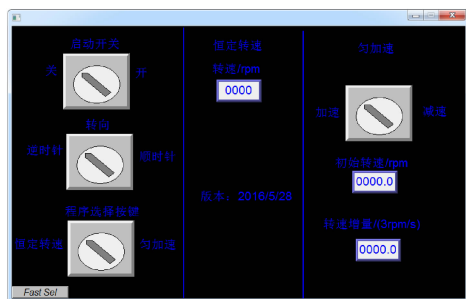


图 6 伺服电动机控制界面

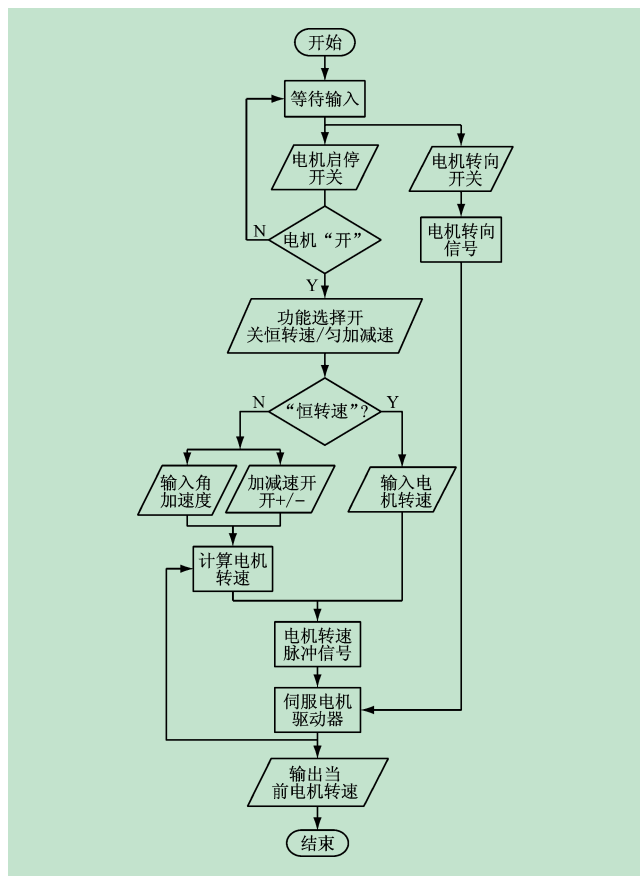


图 7 电动机驱动系统控制流程图

## 1.3 数据采集系统设计

数据采集系统需要完成压力信号、温度信号、转速信号和转矩信号的实时采集和显示工作。其中硬件系统(见图 8)主要由多通道恒压源、压电式力传感器、电压隔离变送器、K 型热电偶、伺服电动机驱动器、单片机和计算机组成。恒压源给压电式力传感器和电压隔离变送器供电,并在单片机的 AD 转换过程中作为参考电压保证转换精度。力传感器输出的微弱电压信号

经电压隔离变送器放大并传给带单片机,单片机通过ADC采集模拟信号并转换为数字信号,最后通过串口通信传给计算机。K型热电偶、电压隔离变送器和单片机组成温度测量系统。摩擦片表面的温度信号由K型热电偶采集,经电压隔离变送器和单片机传给计算机。该测温系统使用前需要先经过恒温箱的标定。在热电偶冷端温度为25℃的条件下,将热电偶热端放入恒温箱中进行标定,所得数据经拟合得到温度 $T$ 与温度测量系统输出值 $X$ 的关系:

$$T = 0.261\ 6X + 25.86 \quad (3)$$

由此可得图9,并且由式(3)所得的温度值 $T$ 与恒温箱的温度值 $T_m$ 之间的均方根误差 $RMSE = 2.43\ ^\circ C$ ,可以满足台架对温度的精度要求。伺服电动机驱动器可以实时输出电动机转矩信号和电动机转速信号,该信号依旧经单片机传递给计算机。

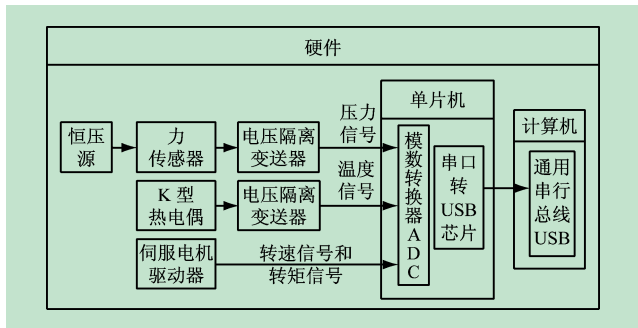


图8 数据采集系统硬件示意图

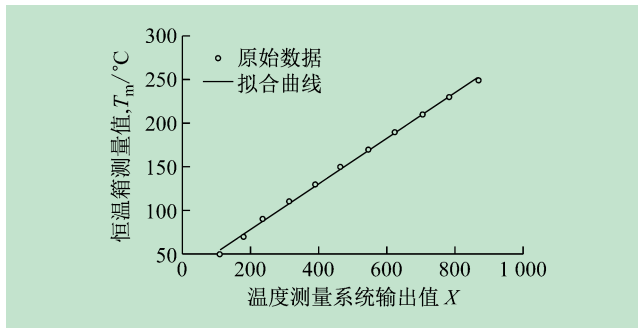


图9 温度测量系统标定

数据采集系统的软件系统(见图10)包含两部分内容。一部分是单片机上的AD采集程序和串口通信

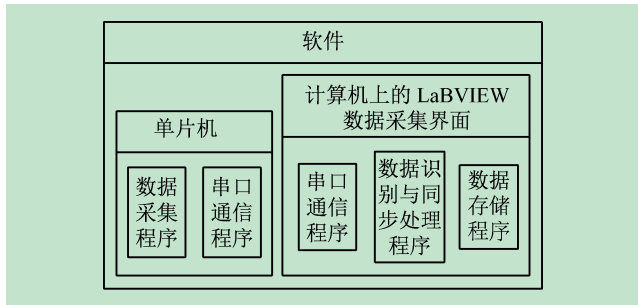


图10 数据采集系统软件示意图

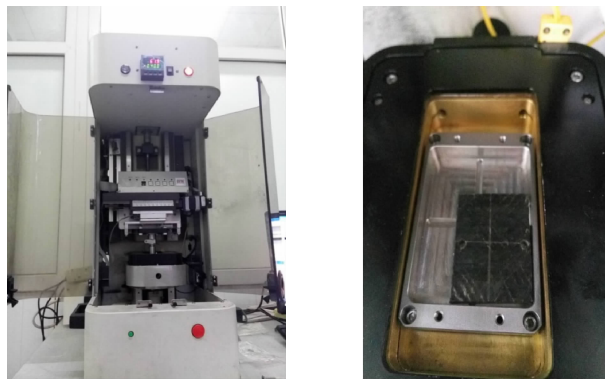
程序;另一部分是计算机上使用LabVIEW进行编写的数据采集程序,主要包括:串口通信程序、各传感器的数据识别程序以及数据存储程序。

## 2 台架应用

经上述设计过程,得到干式离合器摩擦片摩擦系数测试台架(见图11),使用该台架在压力为50 N,转速为100 r/min条件下测量摩擦系数。在同样的速度和压力条件下,使用UMT摩擦磨损仪测量该摩擦片的摩擦系数,对照实验所用设备和材料见图12。将两个测量结果进行对比,结果(见图13)显示两者较为接近,并且两者的均方根误差 $RMSE = 0.033\ 4$ ,误差较小。该台架可以满足摩擦系数的测量要求。



图11 干式离合器摩擦片摩擦系数测试台架



(a) UMT摩擦磨损仪 (b) 摩擦片

图12 主要设备与材料

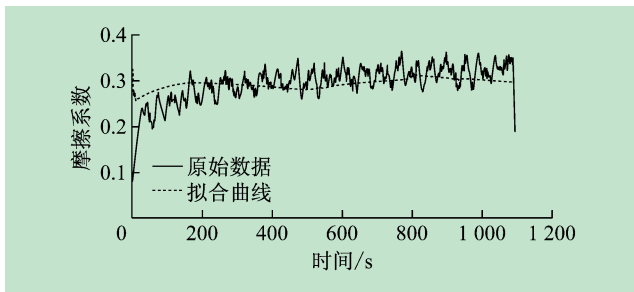


图13 摩擦系数对照图

## 3 结 语

干式离合器摩擦片摩擦系数测试台架主要分为机械系统、电动机控制系统和数据采集系统。该台架可以模拟离合器摩擦片的实际使用情况,实现压力和转速的调节功能,还可以采集并实时显示转速、压力、扭



矩、温度和摩擦系数的变化规律。台架的性能经过了测试验证,在干式离合器摩擦系数影响因素的研究中起到了重要作用。

### 参考文献 (References):

- [1] 王洪亮,刘海鸥. AMT车辆离合器自动控制策略优化[J]. 南京理工大学学报, 2013(5): 729-734.
- [2] 席军强,陈慧岩,丁华荣. 自动机械传动系统起步过程中离合器的自适应控制策略研究[J]. 兵工学报, 2004(6): 657-661.
- [3] 陈 赣,张欲保,刘 飞,等. 干式 DCT 换挡控制的研究[J]. 机床与液压, 2015(7): 92-95, 160.
- [4] 王望予. 汽车设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2013: 58-59.
- [5] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 299-300.
- [6] 吴明翔. 汽车干式双离合器接合过程动力学与控制的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
- [7] 宋 林. 高速干摩擦实验技术与材料摩擦特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] 袁智军,周然杰,吕俊成,等. 摩擦因数对微型汽车起步抖动影响的研究[J]. 机械制造, 2009(7): 80-82.
- [9] 王 斐. 摩擦系数对 AMT 起步的影响研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [10] 胡学永. 粉体材料动摩擦系数的实验研究[D]. 北京:北京化工大学, 2013.
- [11] 王国强,马若丁,刘巨元,等. 金属摩阻材料间摩擦系数与滑动速度关系的研究[J]. 农业工程学报, 1997(1): 41-44.
- [12] 张子川. DCT 换挡过程膜片弹簧离合器滑摩状况的研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2012.
- [13] 王成恩,崔东亮,曲蓉霞,等. 传热与结构分析有限元法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2012: 18-60.
- [14] Abdullaha O I, Schlattmann J. Computation of surface temperatures and energy dissipation in dry friction clutches for varying torque with time[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(5): 733-740.
- [15] Abdullah O I, Schlattmann J. The correction factor for rate of energy generated in the friction clutches under uniform pressure condition[J]. Advances in Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 5(6): 277-290.
- [16] Sun Shaohua, Lei Yulong, Fu Yao, *et al.* Analysis of thermal load for dry clutch under the frequent launching condition [C]//SAE 2013 World Congress & Exhibition. USA: SAE International, 2013.

(上接第 16 页)

### 3 结 语

荧光光谱分析是烃类包裹体成熟度判断最常用的技术,但是存在不确定性。结合显微红外光谱和拉曼光谱分析可以获得基于分子结构的信息,这有助于准确判断包裹体中油气成熟度。本文通过对霍-玛-吐构造带紫泥泉子组储层流体包裹体镜下观察、荧光、显微红外和拉曼光谱分析,判断本区存在两期不同成熟度的烃类包裹体,证实了两期油气成藏过程。第一期烃类包裹体发黄绿色荧光为主,CH<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub> 比值较低,主要含有饱和烃,油气成熟度较低;第二期烃类包裹体发蓝白色荧光,CH<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub> 比值较高,明显含有芳香烃,成熟度较高。通过实例研究证实,多光谱技术联合使用有助于排除单光谱技术的局限性,可以获得更多的有效信息,更加准确的判断油气成熟度,在以后的研究中应当重视。

### 参考文献 (References):

- [1] 刘德汉,卢焕章,肖贤明. 油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用[M]. 广州:广东科技出版社, 2007: 196-201.
- [2] 潘长春,周中毅,解启来. 油气和含油气包裹体及其在油气地质地球化学研究中的意义[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 15-23.
- [3] Liu Keyu, Xiao Xianming, Mills D, *et al.* Cautions in the interpretation of petroleum fluid inclusion data in petroleum system analysis: Insight from spectroscopic analyses of natural and synthetic inclusions [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 101: 62.
- [4] 赵艳军,陈红汉. 油包裹体荧光颜色及其成熟度关系[J]. 地球科学, 2008, 33(1): 91-96.
- [5] George S C, Ruble T E, Dutkiewicz A, *et al.* Assessing the maturity of oil trapped in fluid inclusions using molecular geochemistry data and visually-determined fluorescence colours [J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 451-473.
- [6] Goldstein R H, Reynolds T J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals [J]. SEPM Short Course, 1994, 31: 199.
- [7] Barres O, Burneau A, Dubessy J, *et al.* Application of Micro-FT-IR Spectroscopy to Individual Hydrocarbon Fluid Inclusion Analysis [J]. Applied Spectroscopy, 1987, 41(6): 1000-1008.
- [8] 李荣西,金奎励,廖永胜. 有机包裹体显微傅立叶红外光谱和荧光光谱测定及其意义[J]. 地球化学, 1998, 27(3): 244-250.
- [9] 邹育良,霍秋立,俞 萱. 油气包裹体的显微红外光谱测试技术及应用矿物岩石[J]. 地球化学通报, 2006, 25(1): 105-108.
- [10] 孙 青,翁诗甫,张 煦. 傅立叶变换红外光谱分析矿物有机包裹体的限制-基体吸收问题初探[J]. 地球科学, 1998, 23(3): 248-252.
- [11] Pironon J, Thierry R, Aytougoudal M, *et al.* FT-IR measurements of petroleum fluid inclusions: methane, n-alkanes, and carbon dioxide quantitative analysis[J]. Geofluids, 2001(1): 2-10.
- [12] 张 鼎,宋孚庆,王汇彤. 石油中饱和烃类的喇曼特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 33 - 36.
- [13] 张 鼎,田作基,冷莹莹,等. 烃和烃类包裹体的拉曼特征[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(7): 900-907.
- [14] 魏东涛,贾 东,赵应成,等. 准噶尔盆地南缘白垩系原油成藏特征[J]. 地质论评, 2008, 54(3): 145-155.
- [15] Matthias Radke. Application of aromatic compounds as maturity indicators in source rocks and crude oils[J]. Marine and Petroleum Geology, 1988(5): 224-236.