

后处理工艺 2BP 料液中甲醇和乙醇的气相色谱分析

孙媛媛, 杨松涛, 牟 凌, 马精德, 姜国杜

中核集团四〇四有限公司 第三分公司, 甘肃 兰州 732850

摘要: 利用气相色谱技术, 为后处理工艺建立了测定 2BP 料液中甲醇和乙醇的分析方法。对甲醇、乙醇采用 FFAP 毛细管柱分析时, 测定结果表明: 甲醇、乙醇含量在 16~395 mg/L 范围内, 峰面积与浓度具有良好的线性关系, 其相关系数 r 分别为 0.999 1 和 0.999 8; 分析方法的检测下限分别为 2.7 mg/L 和 1.6 mg/L; 甲醇测量的相对标准偏差 $s_r < 7.0\%$ ($n=6$), 乙醇测量的相对标准偏差 $s_r < 9.0\%$ ($n=6$); 回收率在 95%~111% 之间。甲醛、甲酸、乙酸、硝酸、肼、甲基肼、甲胺和 N, N -二甲基羟胺在工艺可能存在的浓度范围内, 对甲醇和乙醇的定量分析无显著影响。

关键词: 后处理; 气相色谱; 甲醇; 乙醇

中图分类号: TL28 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2013)05-0284-07

doi: 10.7538/hhx.2013.35.05.0284

Analysis of Methanol and Ethanol in 2BP Solution of the Reprocessing by Gas Chromatography

SUN Yuan-yuan, YANG Song-tao, MU Ling, MA Jing-de, JIANG Guo-du

The Third Filial Company of 404 Company Limited,
China National Nuclear Corporation, Lanzhou 732850, China

Abstract: The analytical method for determination of methanol and ethanol in 2BP solution of the reprocessing by capillary gas chromatography was investigated in this paper. The test results show that the linearity between the peak area and concentration is excellent in the range of 16-395 mg/L with a correlation coefficient of over 0.999; the relative standard deviation of methanol (RSD) is better than 7.0% ($n=6$), the relative standard deviation of ethanol (RSD) is better than 9.0% ($n=6$); the minimum detectable limit (MDL) are 2.7 mg/L and 1.6 mg/L; the recovery rate of measurement is 95%-111%. The possible impurities which such as formaldehyde, methanoic acid, acetic acid, nitric acid, hydrazine, monomethyl hydrazine, methylamine and N, N -dimethylhydroxylamine did not affect the quantitative determination of methanol and ethanol by the analytical system.

Key words: reprocessing; gas chromatography; methanol; ethanol

近年来,乏燃料后处理工艺流程中无盐试剂的应用研究已引起了各国的重视^[1]。中试厂将试验在铀尾端流程使用 *N,N*-二甲基羟胺(DMHAN)和甲基胍(MMH)作为无盐还原剂。为控制铀的走向、摸索最佳操作条件,同时获得 DMHAN 和 MMH 在铀尾端流程中的行为,需要测定还原剂辐解产物甲醇和乙醇的浓度。

白酒行业经常采用气相色谱法测定白酒中甲醇和乙醇的含量^[2-3];宋崇林等^[4]采用气相色谱法分离测定了醇类燃料发动机中的甲醛、乙醛、苯、甲醇、乙醇、1,3-丁二烯;李高亮等^[5]采用气相色谱法测定 DMHAN;孙喜莲^[6]采用气相色谱法同时测定 DMHAN 及其辐解产物中的甲醇和甲醛。但其体系较简单,不能直接应用于后处理样品的测定。后处理工艺流程中料液体系复杂,在铀、钚分离循环中所用的还原反萃剂(2BX)^[7]中含有硝酸、单甲基胍、DMHAN,还原反萃铀以后反萃液(2BP)^[7]组成更加复杂,不仅有反应剩余的单甲基胍、DMHAN 以及铀、钚等放射性核素,还有少量由单甲基胍、DMHAN 的反应和辐解的产物^[8],如甲醇、甲醛、甲酸、胍、甲胺等。对于如此复杂料液组成中的甲醇、乙醇的分析,用普通的化学方法不能满足要求。气相色谱法能将甲醇、乙醇与其他组分分离,并通过检测器进行定量分析。本工作拟通过 TODGA-正十二烷萃取分离铀,之后采用气相色谱法,以后处理工艺料液中的甲醇、乙醇为研究对象开展定性和定量分析。

1 实验部分

1.1 仪器和试剂

FLGC9790 型气相色谱仪,氢火焰离子化检测器(FID),浙江福立分析仪器有限公司;色谱柱:FFAP 毛细管柱(改性聚乙二醇柱),30 m×0.25 mm×0.25 μm,中国科学院兰州化学物理研究所色谱中心;微量注射器,1 μL,上海高鸽仪器厂;800B 离心机,上海安亭科学仪器厂;XW-80A 旋涡混和器,上海五久自动化设备有限公司;HGH~300E 型氢气发生器、HGA-2L 型空气发生器,北京汇龙公司。

高纯氮气,纯度大于 99.99%,中核四〇四有限公司第二分公司提供;甲醇、乙醇(纯度大于 99.9%),37%甲醛(甲醇含量在 9%~11%),色谱纯,德国 MERCK 公司;甲酸、乙酸、硝酸、甲胺,分析纯,天津市科密欧化学试剂开发中心;正

十二烷、氢氧化钠、碳酸钠,分析纯,上海实验试剂有限公司;4.7 mol/L DMHAN 溶液、19 mol/L MMH 溶液、*N,N,N',N'*-四辛基-3-氧戊二酰胺(TODGA),中国原子能科学研究院提供;所用水均为去离子水。

0.2 mol/L TODGA(正十二烷为稀释剂):用天平称取约 29 g TODGA,以正十二烷稀释至 250 mL。取等体积的 0.2 mol/L TODGA-正十二烷溶液和 5%碳酸钠放入 1 L 分液漏斗中,手摇 5 min,弃去水相,洗涤 3 次。再用去离子水洗至中性;用等体积 0.1 mol/L 硝酸洗涤 3 次,每次 5 min,弃去水相,然后用去离子水洗至中性即可。在使用前用等体积新配的 1 mol/L 硝酸酸化。

饱和氢氧化钠溶液:称取 100 g 的固体氢氧化钠于 100 mL 的二次水中搅匀,待溶液澄清后,移取上层清液待用。

1.2 模拟 2BP 料液的制备

用 22.86 g/L Pu、酸度约为 2.90 mol/L 的工艺样品,按照工艺流程,用 30%TBP-煤油溶液在相比为 1:1 的条件下萃取 5 min,弃去水相并将有机相用 30%TBP 稀释至 Pu 质量浓度约为 15 g/L,制得 2AP。将 2BX 还原反萃剂与制备的 2AP 溶液以相比 1:3.3 萃取 5 min,水相即为 2BP 样品。

1.3 实验方法

将 2BP 样品用 0.2 mol/L TODGA-正十二烷萃取分离铀,用饱和氢氧化钠溶液调节 pH=5~9 后,进行气相色谱测量,以外标法进行定量。

2 结果与讨论

2.1 色谱条件的选择和优化

2.1.1 汽化温度的选择 通过试验不同的汽化温度,发现当汽化温度低于 115 °C 时,会造成汽化不完全和产生比较严重的拖尾峰,当汽化温度高于 140 °C,容易出现分叉峰,综合考虑选择汽化温度为 130 °C。

2.1.2 柱温的选择 柱温初始采用恒温 70 °C 时,甲醇、乙醇的分离度小于 1.5,DMHAN 保留时间大于 10 min。改用程序升温起始温度 50 °C 恒温 2.5 min,发现甲醇和乙醇的出峰时间在程序升温处,对峰面积积分带来一定的难度;然后改用 55 °C 恒温 3 min,甲醇、乙醇的分离度满足大于 1.5,之后采用程序升温,通过程序升温缩短 DMHAN 的出峰时间小于 6 min。综合考虑后最终确定色谱条件为:载气为高纯氮气,分流比为

25.7 : 1; 氢气流量为 30 mL/min, 空气流量为 300 mL/min, 尾吹氮气流量为 30 mL/min; 汽化温度为 130 °C, 检测器温度为 160 °C; DB-FFAP 柱温为程序升温: 起始温度 55 °C, 停留 3 min, 升温速率 10 °C/min, 至 70 °C 停留 0 min, 升温速率 20 °C/min, 至 120 °C 停留 0.5 min. 进样量为 1 μ L.

2.1.3 保留时间的确定 在上述确定的色谱条件下, 将甲醇、乙醇、MMH 和 DMHAN 四种物质的混合标准水溶液注入气相色谱仪进行分析。甲醇、乙醇、MMH 和 DMHAN 的混合标准溶液的色谱图示于图 1。从图 1 可知, 甲醇、乙醇、MMH 和 DMHAN 分离效果较好, 且甲醇、乙醇、MMH 和 DMHAN 的保留时间分别为 2.45、2.85、4.81、5.40 min。

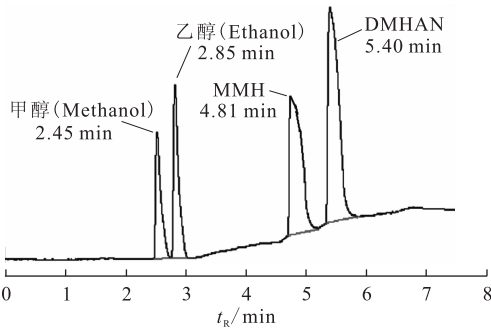


图 1 甲醇、乙醇、MMH 和 DMHAN 混合溶液的气相色谱图

Fig. 1 Gas chromatogram of mixture of methanol, ethanol, MMH and DMHAN

2.2 甲醇和乙醇标准曲线的绘制

分别移取甲醇 1.00 mL、乙醇 1.00 mL 于 1 L 容量瓶中, 以去离子水定容, 作为标准储备液备用。分别移取标准储备液 0.20、0.50、1.00、2.00、5.00 mL 于 10 mL 容量瓶中, 并用去离子水稀释至刻度。按照 2.1 节选定的色谱条件进样测

量, 绘制甲醇、乙醇浓度-峰面积的标准曲线, 示于图 2。由图 2 可知, 在进样浓度范围内, 甲醇、乙醇浓度与峰面积线性关系良好, 可采用多点校正法进行定量分析。在相同色谱条件下, 对未知样品进行分析, 由标准曲线 $y=34.49x+223.7$ 可计算甲醇样品的浓度, 由标准曲线 $y=56.11x-112.2$ 可计算乙醇样品的浓度。

2.3 干扰因素实验

在后处理工艺流程中, 2BP 为硝酸体系, 除钚、DMHAN 及 MMH 外, 可能会含有甲醛、甲酸、乙酸、胍、甲胺、TBP、煤油等组分, 所以考查了上述组分对甲醇和乙醇色谱分析的干扰。

2.3.1 硝酸的影响 由于分析所用的 FFAP 色谱柱是一种通过硝基对苯二甲酸 (TPA) 改性的聚乙二醇, 是一种强极性柱, 为了避免硝酸对色谱柱造成损害, 要求分析样品的 pH 要接近中性。因此, 硝酸体系的样品进行分析时, 需用 NaOH 溶液先中和硝酸, 使溶液 pH=5~9。由于硝酸钠在此分析条件下不会汽化而留在汽化室衬管中, 故对分析甲醇、乙醇的结果基本没有影响。

2.3.2 甲醛的影响 以 37% 甲醛溶液稀释 100 倍进行测定, 得到图 3。其中在 1.792、2.441、3.832 min 有 3 个色谱峰; 1.792、3.832 min 的色谱峰较小, 对甲醇、乙醇和 DMHAN 的色谱峰无影响; 2.441 min 的色谱峰和甲醇色谱峰保留时间基本一致。2.441 min 的色谱峰实际为甲醇色谱峰。37% 甲醛溶液的密度为 1.09 kg/L, 甲醇含量在 9%~11% 之间。稀释 100 倍的甲醛溶液中, 甲醇含量应该在 981~1 199 mg/L, 配制质量浓度为 981 mg/L 和 1 199 mg/L 的甲醇溶液进行测定, 甲醇峰面积为 34 578 μ V·s 和 41 987 μ V·s。2.441 min 的色谱峰为 37 887 μ V·s, 符合试剂标识的浓度范围, 甲醛在当前色谱条件下, 响应值较小, 对甲醇、乙醇和 DMHAN 的测定无干扰。

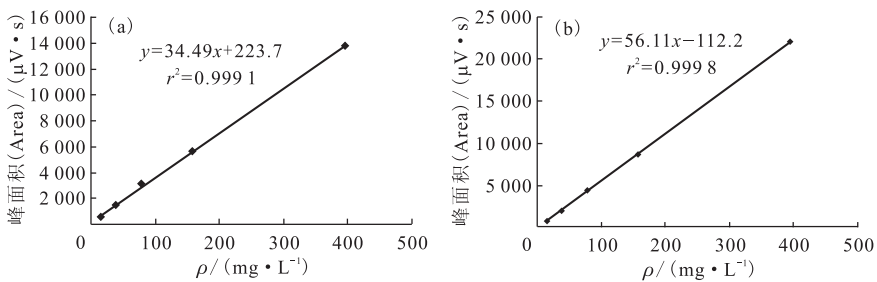


图 2 甲醇(a)、乙醇(b)峰面积与浓度的标准曲线

Fig. 2 Methanol(a) and ethanol(b) correction curve of peak area to concentration

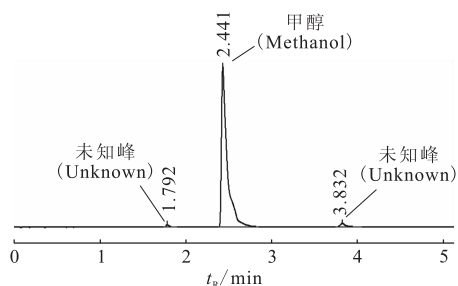


图 3 甲醛溶液的色谱图

Fig. 3 Gas chromatogram of formaldehyde

2.3.3 甲酸、乙酸、甲胺、肼、DMHAN 和 MMH 的影响 选用检测器为氢火焰离子化检测器仅对含碳有机化合物有响应,所以肼等不含碳的组分对甲醇、乙醇的分析没有影响。甲酸、乙酸和甲胺在此条件下不出峰。配制甲酸、乙酸、肼、甲胺、MMH 浓度分别为 0.26、0.17、0.35、0.13、0.4 mol/L, 甲醇、乙醇质量浓度分别为 158、158 mg/L, DMHAN 浓度为 0.4 mol/L 的混合样品进行测定, 结果示于图 4。甲醇测得值为 163 mg/L, 乙醇测得值为 152 mg/L, 相对误差在 ±5% 以内。甲酸、乙酸、甲胺、肼和 MMH 在此色谱条件下没有明显的响应峰或能与甲醇、乙醇和 DMHAN 完全分离, 所以高出甲醇和乙醇 10 倍以上的甲酸、乙酸、甲胺、肼、DMHAN 和 MMH 对甲醇和乙醇的分析没有影响。

2.3.4 水相中夹带的 TBP 和煤油以及 TODGA-正十二烷萃取的影响 配制硝酸浓度为 1 mol/L、甲醇质量浓度为 320 mg/L、乙醇质量浓度为 320 mg/L、DMHAN 浓度为 9.40 mmol/L 的混合溶液, 将上述溶液和 30% TBP-煤油等体积混合

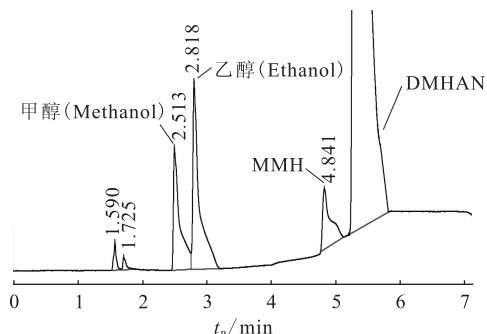


图 4 甲酸、乙酸、甲胺、肼、甲醇、乙醇、MMH 和 DMHAN 混合溶液的色谱图

Fig. 4 Gas chromatogram of mixture of methanoic acid, acetic acid, methylamine, hydrazine, methanol, ethanol, MMH and DMHAN

震荡 5 min, 弃去有机相, 对水相进行测定得图 5。由图 5 可知, 煤油在水相有一定残留, TBP 在此条件下不会出峰。使用 0.2 mol/L TODGA-正十二烷对水相采用不同相比萃取 3 次, 对水相调节酸度后进行测定得图 6。可以看到残留的煤油明显减少, 对甲醇和乙醇的测量结果列于表 1。从表 1 的数据可知, 通过 0.2 mol/L TODGA-正十二烷对样品 1 : 1 萃取 3 次以后, 煤油对样品中甲醇乙醇测量的干扰很小, 测量相对误差均在 ±5% 以内; 初次萃取相比在 1 : 1 ~ 5 : 1 之间, 之后再以相比 1 : 1 萃取 2 次对样品中甲醇乙醇测量的影响较小, 测量相对误差均在 ±5% 以内。0.2 mol/L TODGA-正十二烷溶液中钚质量浓度大于 10 g/L 时, 会出现凝胶现象, 所以要以样品钚浓度的 1/10 来确定初次萃取相比。

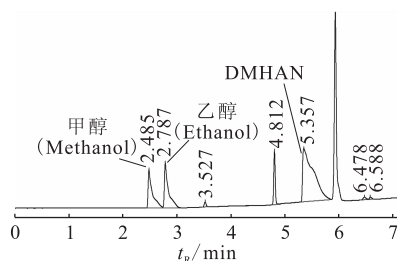


图 5 30% TBP-煤油萃取后的水相谱图

Fig. 5 Gas chromatogram of after extraction using 30% TBP-kerosene

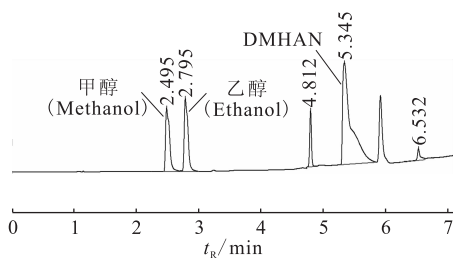


图 6 0.2 mol/L TODGA-正十二烷萃取 3 次后的水相谱图

Fig. 6 Gas chromatogram of after three extractions using 0.2 mol/L TODGA-dodecane

2.3.5 钚的影响和分离 2BP 中钚质量浓度约为 48 g/L, 在测定样品中甲醇、乙醇前必须进行钚的分离, 以避免对色谱柱的损害。取模拟 2BP (Pu 质量浓度 29.30 g/L), 取 6 mL 与 2 mL 酸化后的 0.2 mol/L TODGA-正十二烷混合, 振荡萃取 5 min 后, 离心分相, 取出萃余水相, 然后采用相同方法萃取 2 次, 得到萃余水相。取第 2 次和

第 3 次萃取的萃余水相进行钚浓度分析(α 计数法)。结果如下: 萃取第 1 次萃余水相钚质量浓度: 0.205 g/L ; 萃取第 2 次萃余水相钚质量浓度: $3.65 \times 10^{-3} \text{ g/L}$; 萃取第 3 次萃余水相钚质量浓度: $4.61 \times 10^{-4} \text{ g/L}$ 。根据上述分离结果, 配制含有一定钚浓度的甲醇和乙醇的混合溶液, 按实验

方法进行测定, 其结果列于表 2。通过测定结果, 判断萃取后残留钚对甲醇、乙醇测定的影响。从表 2 结果可知, 钚质量浓度在 $1.0 \times 10^{-2} \text{ g/L}$ 以下时, 均不影响测定结果。而 2BP 样品萃取后的残留钚质量浓度远小于 $1.0 \times 10^{-2} \text{ g/L}$, 所以对甲醇、乙醇的测量不产生影响。

表 1 0.2 mol/L TODGA-正十二烷对甲醇和乙醇样品测定的影响

Table 1 Effect of determination of methanol and ethanol using 0.2 mol/L TODGA-dodecanoic

样品 (Samples)	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	萃取条件 (Extraction way)	$\rho_{\text{det}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	相对误差 (Relative error)/%
甲醇 (Methanol)	320	相比(Phase ratio): 1 : 1, $t=5 \text{ min}$, 萃取次数(Times): 3	314	-1.88
乙醇 (Ethanol)	320		309	-3.44
甲醇 (Methanol)	320	相比(Phase ratio): 3 : 1, $t=5 \text{ min}$, 萃取次数(Times): 1	312	-2.50
乙醇 (Ethanol)	320	相比(Phase ratio): 1 : 1, $t=5 \text{ min}$, 萃取次数(Times): 2	306	-4.38
甲醇 (Methanol)	320	相比(Phase ratio): 5 : 1, $t=5 \text{ min}$, 萃取次数(Times): 1	307	-4.06
乙醇 (Ethanol)	320	相比(Phase ratio): 1 : 1, $t=5 \text{ min}$, 萃取次数(Times): 2	302	-4.69

注(Note): 相比为 $V(\text{TODGA}) : V(\text{水})$ (Phase ratio is $V(\text{TODGA}) : V(\text{water})$)

表 2 残留钚对甲醇、乙醇测定的影响

Table 2 Effect of residual plutonium to methanol, ethanol measurement

$\rho(\text{Pu})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		甲醇(Methanol)		乙醇(Ethanol)	
	甲醇 (Methanol)	乙醇 (Ethanol)	$\rho_{\text{det}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	相对误差 (Relative error)/%	$\rho_{\text{det}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	相对误差 (Relative error)/%
1.0×10^{-2}	220	160	223	1.36	157	-1.88
1.0×10^{-3}			220	0.00	158	-1.25
1.0×10^{-4}			224	1.82	161	0.62

2.4 样品分析

2.4.1 样品预处理

2.4.1.1 用取样器移取 2 mL 样品于 15 mL 萃取管中, 根据样品钚质量浓度 $\rho(\text{Pu})(\text{g/L})$, 向其中加入 $(2\rho(\text{Pu})/10)$ mL 酸化后的 0.2 mol/L TODGA-正十二烷溶液, 混合萃取 5 min, 离心分相, 取出下层水相; 之后采用相比 1 : 1 萃取

5 min, 离心分相, 取出下层水相; 之后再采用相比 1 : 1 萃取 5 min, 离心分相, 最后得到萃余水相约 1.5 mL。

2.4.1.2 准确移取 2.4.1.1 节最后得到的萃余水相 1~1.5 mL 于 5 mL 容量瓶, 加入一定量的去离子水, 然后用氢氧化钠溶液调节容量瓶内料液 $\text{pH}=5\sim 9$, 最后用去离子水定容。

2.4.2 样品的测定 根据气相色谱仪操作规程打开色谱仪,按 2.1 节设定气相色谱条件,打开计算机,读取设定好的方法,输入样品稀释倍数,移取 1 μL 处理好的样品(2.4.1.2 节)进样,仪器测量得出谱图和相应组分的浓度。以 1.2 节配制甲醇和乙醇样品,按上述步骤进样分析,结果列于表 3。从表 3 可见,该方法分析甲醇和乙醇的精密度良好,其甲醇含量测定相对标准偏差(s_r)优于 7.0%($n=6$),乙醇含量测定相对标准偏差优于 9.0%($n=6$)。

2.5 重加回收率

以 2.4.2 节中的甲醇质量浓度为 36.6、213 mg/L 和乙醇质量浓度为 39.4、162 mg/L 分别模拟 2BP 样品 1 mL,分别加入 1 mL 甲醇质量浓度为 30 mg/L 和 211 mg/L、乙醇质量浓度为 40 mg/L 和 160 mg/L 的标准溶液,按 2.4 节中的步骤分析,结果列于表 4。由表 4 结果可知,甲醇重加回收率在 95%~110%之间,乙醇重加回收率在 95%~111%之间。

表 3 测定不同浓度甲醇、乙醇的精密度

Table 3 Determination precision of various methanol, ethanol concentration sample

样品(Samples)	$\rho_{\text{det}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$						$\bar{\rho}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$s_r/\%$
甲醇(Methanol)	211	209	221	212	210	213	213	2.03
	36.8	40.7	38.3	35.3	34.8	33.9	36.6	6.91
乙醇(Ethanol)	160	170	156	167	160	158	162	3.37
	40.2	44.7	41.2	36.8	38.1	35.7	39.4	8.35

表 4 重加回收率(R)

Table 4 Recovery rate (R) of measurement

样品(Samples)	$m/\mu\text{g}$	$m_{\text{add}}/\mu\text{g}$	$m_{\text{det}}/\mu\text{g}$	$R/\%$	样品(Samples)	$m/\mu\text{g}$	$m_{\text{add}}/\mu\text{g}$	$m_{\text{det}}/\mu\text{g}$	$R/\%$
甲醇(Methanol)	213	211	440	107.6	甲醇(Methanol)	36.6	30	66.8	100.7
		211	443	109.0			30	65.4	96.0
		211	420	98.1			30	66.1	98.3
		211	445	110.0			30	67.2	102.0
		211	414	95.3			30	68.8	107.3
		211	418	97.2			30	65.1	95.0
乙醇(Ethanol)	162	160	334	107.5	乙醇(Ethanol)	39.4	40	80.1	101.8
		160	339	110.6			40	82.8	108.5
		160	317	96.8			40	78.8	98.5
		160	327	103.1			40	77.5	95.3
		160	315	95.6			40	83.1	109.2
		160	321	99.4			40	77.9	96.2

2.6 检出限

在此色谱条件下,记录基线噪声,按 3 倍基线噪声计算出甲醇和乙醇的检出限分别为 2.7 mg/L 和 1.6 mg/L。

2.7 实际工艺样品测定

按 2.1 节设定气相色谱条件,打开计算机,读取设定好的方法,输入样品稀释倍数,移取 1 μL 处理好的实际 2BP 工艺样品(2.4.1.2 节)进样,

仪器测量得出谱图和相应组分的浓度。谱图示于图 7,由标准曲线计算出 2BP 工艺样品中的甲醇含量为 0.172 g/L,乙醇含量小于方法下限。

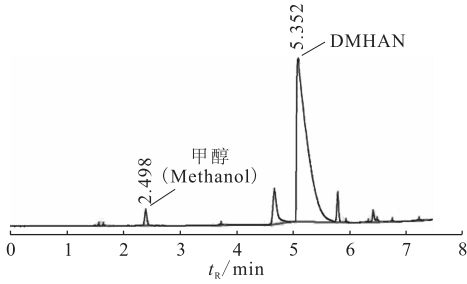


图 7 2BP 实际样品的色谱图

Fig. 7 Gas chromatogram of 2BP solution

3 结 论

(1) 建立了气相色谱测定后处理工艺 2BP 料液中甲醇和乙醇的分析方法。该方法对于 16~395 mg/L 范围内的甲醇和乙醇,峰面积与浓度具有良好的线性关系,其相关系数 r 均达到 0.999 以上,测定精密度(s_r)分别优于 7.0%和 9.0%($n=6$),重加回收率在 95%~111%之间,能够满足后处理控制分析的要求,方法可靠。

(2) 分析样品中含有 10 倍量甲醇的硝酸、乙酸、胼、甲酸、甲胺、DMHAN 和 MMH 时,不会

影响甲醇、乙醇的定性定量分析。0.2 mol/L TODGA-正十二烷萃取 2BP 样品后的残留钚对甲醇、乙醇的测量不产生影响。

(3) 气相色谱仪对甲醇的检出限为 2.7 mg/L,对乙醇的检出限为 1.6 mg/L。

参考文献:

- [1] 叶国安. Purex 流程中有机无盐试剂的应用分析[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(2): 152-158.
- [2] 李歆. 毛细管柱气相色谱法同时测定白酒中的乙酸乙酯、甲醇、异丁醇、异戊醇和己酸乙酯[J]. 中国化工贸易, 2012(10): 78-78.
- [3] 张丹妮. 白酒中甲醇的检测[J]. 中国科技博览, 2012(23): 431-431.
- [4] 宋崇林. 醇类燃料发动机非常规排放物直接进样分析测量方法的研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(6): 531-536.
- [5] 李高亮, 何辉, 陈辉, 等. N, N -二甲基羟胺的气相色谱分析[J]. 化学试剂, 2008, 30(7): 515-516.
- [6] 孙喜莲. 新型有机无盐还原剂 N, N -二乙基羟胺和 N, N -二甲基羟胺的辐射稳定性研究[D]. 上海: 上海大学, 2004.
- [7] 姜圣阶, 任凤仪, 马瑞华, 等. 核燃料后处理工学[M]. 北京: 原子能出版社, 1995: 164.
- [8] 何辉, 王方定, 胡景妍, 等. N, N -二甲基羟胺在铀钚分离中的应用和计算机程序的开发[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2001.