

基于红外光谱研究沥青燃烧机理和有害气体成分分析

吴珂¹, 朱凯², 黄志义¹, 王金昌^{1*}, 杨秦敏³, 梁培⁴

1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310027
2. 浙江大学能源工程学系, 浙江 杭州 310027
3. 浙江大学控制科学与工程学系, 浙江 杭州 310027
4. 中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 利用 Rosemount 气体分析仪和定碳炉搭建起固定床燃烧反应试验平台, 通过红外光谱分析技术定量分析沥青及其胶浆在高温速率条件下燃烧反应的有毒气态产物成分、及其释放规律。研究表明, 在高温速率、近等温条件下, 沥青及胶浆的燃烧过程可近似分为活泼挥发组分分析出燃烧、二次挥发分析出结合残炭燃烧两个阶段, 其主要气态产物为 CO₂, CO, NO, NO₂ 及 SO₂。沥青材料中活泼挥发组分含量是影响燃烧气态产物释放规律的关键因素之一, 减少沥青材料中活泼挥发组分的含量可有效降低燃烧气态产物的生成, 尤其是 CO 的产生。

关键词 固定床燃烧试验; 红外光谱分析; 沥青

中图分类号: U414.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)08-2089-06

引言

沥青来源丰富、价格适中, 同时具有良好的流变性、不透水性和粘弹性特点, 因此沥青作为粘结剂和基体前驱体被广泛应用于路面^[1-3]、住用建筑^[4]和复合材料制备^[5,6]等领域。然而, 沥青是由碳、氢等元素组成的复杂高分子材料, 具有易燃的特性^[7]。沥青燃烧释放不仅分解出氢、甲烷、苯及烷烃类易燃气体, 而且由于沥青中含有氮、硫等元素^[8], 还将产生 NO、SO₂、CO 等危及人身安全的有毒烟气。这些毒烟的危害甚至超过了火灾本身, 资料表明, 火灾中 85% 的人员死亡是由于吸入了有毒烟气^[9]。因此, 沥青材料的火灾安全性被越来越多的国内外研究者所关注。

目前, 国内外对于沥青材料的火灾安全性研究多集中于通过添加各种阻燃剂降低沥青材料的可燃性和抑制烟气释放方面^[10-12], 对沥青材料燃烧的机理、尤其是有毒烟气的释放规律研究较少。Michelle^[13]通过对几种巴西产沥青的 TG(热重)-DTA(差示热分析)-FTIR(傅里叶变换红外光谱)试验研究了沥青的热特性, 并结合动力学分析各种沥青样品的活化

能和热稳定性, 发现沥青存在一个主要的热解阶段, 大致从 290~500 °C, 质量损失约 80%。但该试验在惰性气体(N₂)环境下进行, 其反应气氛与火灾真实环境相去甚远, 研究结果尚不足以揭示沥青的燃烧机理。Xu^[14, 15]采用 TG-FTIR 联用分析技术研究了沥青及其胶浆材料在空气气氛下的燃烧反应过程, 发现沥青及其胶浆的燃烧过程历经 3 个不同的阶段, 并详细分析了各反应阶段的气态产物、以及氢氧化镁阻燃剂对沥青材料挥发组分释放的影响。但上述研究成果均为低升温速率(≤ 10 °C · min⁻¹)条件下的燃烧反应试验所得, 而实际火灾场景中升温速率往往超过 100 °C · min⁻¹(如隧道火灾一般在 5 min 内最高温度即可达到 1200 °C 左右), 显然, 已有研究的试验条件与实际情况存在较大差异。因此, 有必要进一步开展高温速率条件下沥青材料的燃烧试验研究。

研究利用 Rosemount 气体分析仪和定碳炉搭建起固定床燃烧反应试验平台, 通过光谱分析技术定量分析沥青及其胶浆在高温速率条件下燃烧反应的有毒气态产物成分、及其释放规律。这为揭示沥青材料的燃烧机理、定量评价火灾过程中沥青材料的安全性、以及合理选择阻燃剂等提供了理论参考依据。

收稿日期: 2012-02-20, 修订日期: 2012-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61154002, 51078331), 中国博士后科学基金项目(20090451471)和浙江省自然科学基金重点项目(Z1110222)资助

作者简介: 吴珂, 1979年生, 浙江大学建筑工程学院助理研究员 e-mail: wuke@zju.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: wjc501@zju.edu.cn

1 实验部分

1.1 样品

试验样品为道路工程中常用的 SBS 沥青(A1)、阻燃沥青(A2)和阻燃改性沥青(A3)及其所制备的沥青胶浆(AM1, AM2, AM3), 六种试样的工业分析和元素分析值见表 1。

1.2 仪器设备

固定床燃烧反应试验平台如图 1 所示。试验时将约

0.5 g 的沥青样品均匀铺放在扁长形的瓷舟内, 置于高温定碳炉内径为 25 mm 的透明石英玻璃管式反应器的高温段, 通过管式炉将样品从 300 °C 快速加热到 800 °C, 平均升温速率约为 120 °C · min⁻¹, 然后在 800 °C 下保持恒温直到反应结束(以测量到尾气中 CO₂ 和 CO 的浓度均接近反应前为标准)。反应气氛为空气, 其流量设定为 0.6 和 1.0 L · min⁻¹, 通过质量流量计控制, 然后通入石英玻璃管。燃烧气态产物通过干燥试管干燥、除灰后, 通入 Rosemount NGA2000 分析仪。

Table 1 Proximate and ultimate analysis of samples

Sample	Proximate analysis/Wt%, ad				Q _{net, ad} /(J · g ⁻¹)	Ultimate analysis/Wt%, ad				
	Moisture	Ash	Volatile matter	Fixed carbon		C	H	N	S	O
A1	1.96	1.64	83.91	12.49	42 335	87.86	5.18	0.66	3.16	1.5
AM1	1.12	47.25	36.22	15.41	12 372	32.77	3.43	0.31	0.28	14.8
A2	2.57	8.20	76.38	12.85	38 222	81.75	7.90	0.78	3.25	2.38
AM2	1.45	50.59	30.43	17.53	10 252	30.55	3.2	0.3	0.63	14.7
A3	2.73	4.23	79.47	13.57	40 159	81.94	10.44	0.35	2.60	0.44
AM3	1.34	51.31	28.45	18.90	11 330	32.74	3.76	0.25	0.83	11.61

Note: ad: Air dried basis; Q_{net, ad}: Air dried basis, low heating value; A1: SBS asphalt; AM1: SBS asphalt mortar; A2: Flame-retardant asphalt; AM2: Flame-retardant asphalt mortar; A3: Flame retardant modified asphalt; AM3: Flame retardant modified asphalt mortar

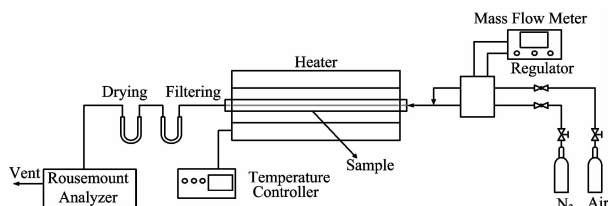


Fig. 1 Experimental device of fixed bed burning reaction

红外光谱法主要利用特征吸收谱带的频率和位移, 确定分子的化学结构推断分子的化学结构, 同时根据特征吸收谱带强度的改变, 对混合物和化合物进行定量分析。Rosemount NGA2000 烟气分析仪采用傅里叶变换红外原理, 能同时定性、定量分析八种无机气体组分, 其中的傅里叶红外分析模块通过选择那些比较孤立、受干扰较少的吸收峰进行分析, 能够灵敏地反映各组分浓度变化并较好地遵守朗伯-比尔定律, 其分析流程如图 2 所示。

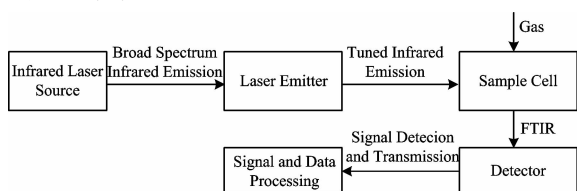


Fig. 2 Working principle and analysis process of Rosemount IR modules

2 结果与分析

2.1 沥青燃烧产物分析

沥青燃烧是一个放热、分解的物理化学过程。试验结果

显示, 沥青及沥青胶浆的主要燃烧气态产物有 CO₂, CO, NO, NO₂ 以及 SO₂。以 SBS 沥青及其胶浆为例, 典型的燃烧气态产物随反应进程的浓度变化曲线如图 3 所示。从图 3 可以看到, 无论是 SBS 沥青还是其胶浆, 样品中含碳成分的主要气态燃烧产物除了 CO₂ 外还有一定量的 CO, 说明样品燃烧不完全。同时, 在整个试验过程中, 可以观察到各样品在燃烧反应过程中均有大量的黑烟产生, 燃烧后反应器出口端以及排气管道内壁都附着有黑色的油状物质, 说明在加热以及燃烧过程中, 部分重质热解产物以及热解过程中所产生的炭黑来不及燃烧就被载气带走并在低温区凝结或者沉积下来, 从而降低了样品的燃烬率。

从浓度曲线可以看出, 随着样品开始着火燃烧, CO, NO 和 CO₂ 气体迅速释出并先后在短时间内达到最大浓度; 随后 NO₂ 和 SO₂ 气体开始释出, 相比前三种气体, 后者的释放时间延后了大概 30~40 s, 其原因为 NO₂ 和 SO₂ 的只有在较高温度下才会产生, 着火初期样品温度较低, 因此不会产生 NO₂ 和 SO₂ 气体, 随着燃烧反应的进行, 当样品被加热到一定温度后才逐渐产生了 NO₂ 和 SO₂。分析结果可知, 沥青以及沥青胶浆着火燃烧后, 在各主要产气中 CO 能够很快释放出来并率先达到最大浓度, 因此, 可以 CO 作为表征沥青及其胶浆开始着火燃烧的指标之一。

如图 3(a)所示, 沥青燃烧的 CO₂ 浓度曲线大致呈现出两个峰, 分别对应沥青燃烧过程的两个阶段, 即为挥发组分分析出燃烧阶段和二次挥发组分分析出结合残炭燃烧阶段, 与热重实验的结论一致^[16]。而沥青胶浆的燃烧过程与热重实验结果相比并没有明显地分化成挥发组分分析出燃烧、二次挥发组分分析出燃烧以及残炭燃烧三个阶段, 从 CO₂ 浓度曲线明显呈现出双峰结构来看, 如图 3(b)所示, 在高升温速率下沥青胶浆的二次挥发组分分析出燃烧过程与残炭燃烧过程

合二为一，这类类似于沥青的燃烧过程。同时，从 CO 浓度曲线上可以看出，无论是沥青还是其胶浆材料，在活泼挥发组分分析出燃烧阶段，由于活泼挥发组分的析出燃烧速率很快，因此造成短时间内供氧量不足，从而产生了大量的 CO；而经过前期活泼挥发组分分析出燃烧之后，由于二次挥发组分的析出与残炭燃烧速率相对较慢，因此耗氧速率相对前期有所下降，氧量相对充足，因此在后期的燃烧过程中不再有 CO 产生。可见，CO 主要在活泼挥发组分分析出燃烧阶段产生。

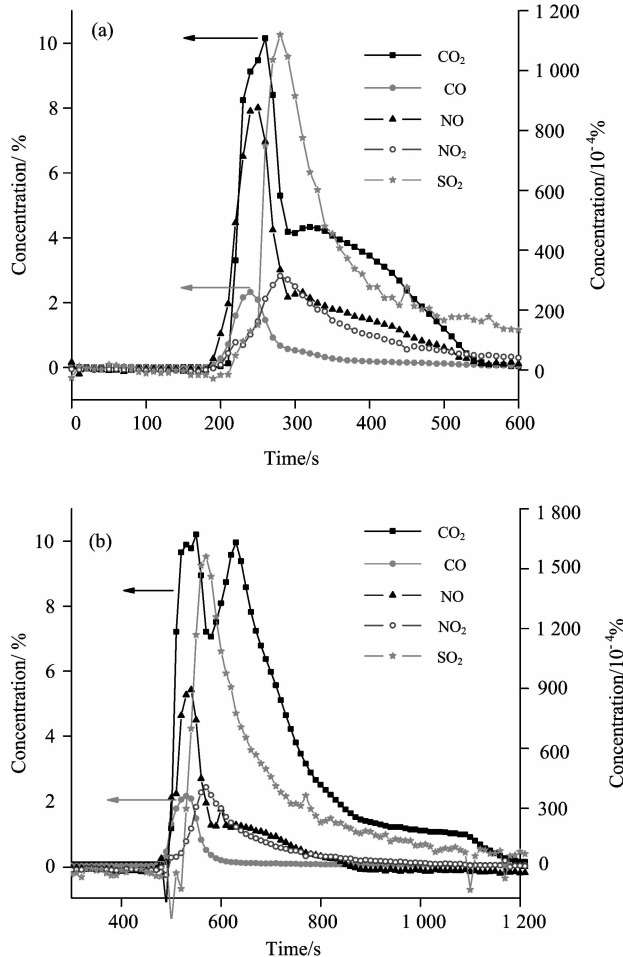


Fig. 3 Variation of combustion gaseous product with time

(a): SBS asphalt; (b): SBS asphalt mortar

在沥青及其胶浆的燃烧过程中有较大浓度的含碳、含氮以及含硫有害气体产生，各主要气态产物的总摩尔产量占比如表 2 所示。由表可以看出，无论是沥青还是沥青胶浆，燃烧气态产物中含碳污染物的总摩尔产量占比均达到 98% 以上，其中 CO₂ 占比达到 85% 以上。沥青胶浆的 CO 摩尔产量比明显小于沥青，这主要是因为沥青胶浆的活泼挥发组分含量相对沥青要低得多，因此其缺氧燃烧阶段所产生的 CO 量相对要少一些。但阻燃改性沥青及其胶浆的 CO 量特别高。摩尔占比排第三的为 SO₂，随后是 NO，占比最少的为 NO₂。

2.2 燃烧气态污染物的释放规律

由于活泼挥发组分燃烧阶段供氧量不足以及重质挥发组

分和炭黑因被载气带走从而来不及燃烧等原因，样品的燃烬率很难达到 100%。燃烬率以样品中碳元素完全转换为 CO₂ 的百分比来定义，显然从碳元素平衡的角度来看燃烬率低，则产生 CO 和炭黑所占比例越高。各样品的燃烬率如图 4 所示。可以看出，沥青胶浆的燃烬率要普遍高于沥青，从前面各主要气态污染物排放总量的摩尔占比分析可知，这主要是因为胶浆的活泼挥发组分含量较低所致。此外，从图 4 还可以看出，阻燃改性沥青及其胶浆比其他沥青及其胶浆的燃烬率要低。

Table 2 Molar proportion of major gaseous products from combustion

Sample	CO ₂ /%	CO/%	NO/%	NO ₂ /%	SO ₂ /%
A1	85.32	12.66	0.55	0.37	1.09
A2	81.63	15.51	0.43	0.64	1.79
A3	86.45	11.16	0.46	0.51	1.43
AM1	89.40	9.66	0.52	0.20	0.21
AM2	86.60	11.52	0.29	0.36	1.23
AM3	91.04	7.87	0.38	0.21	0.51

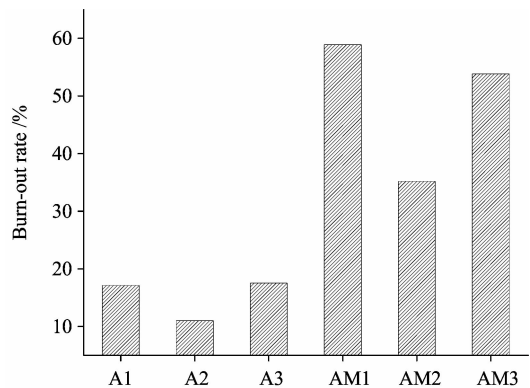


Fig. 4 Burn-out rate of the samples

各试样燃烧气态产物的单位排放量如图 5 所示。可以看到，总体上，各沥青的 CO₂ 单位排放量要略高于沥青胶浆，阻燃改性沥青及其胶浆的 CO₂ 单位排放量要略低于其他类沥青和胶浆。尽管各试样的初始质量相近，但各沥青胶浆的 CO 单位排放量要比相应沥青低一半左右，这与前面的分析结果相符。SO₂ 的排放量主要取决于样品的含硫量，由工业分析结果可知，沥青的含硫量一般比相应胶浆高 2~9 倍，因此单位沥青的 SO₂ 排放量要远高于相应的胶浆。考虑到试验的燃烧温度低于 1 500 °C，燃烧过程中所产生的 NO 主要为燃料型 NO，即 NO 中的氮主要来自于样品中的氮元素，因此其排放量主要受样品含氮量和氛围中氧量以及 NO 转换为 NO₂ 反应速率的影响。总体上，各沥青的 NO 单位排放量比相应的胶浆高将近一倍。从 NO₂ 的排放情况来看，单位沥青的 NO₂ 排放量几乎为相应胶浆的 3 倍左右，这主要是因为 NO₂ 的生成对温度比较敏感。由于沥青的热值远高于相应的胶浆，因此，尽管其燃尽程度不及胶浆，但总体上的燃烧放热仍高于胶浆，从而令试验过程中沥青样品的实际温度要大

大高于胶浆, 因此造成 NO_2 生成量增大。

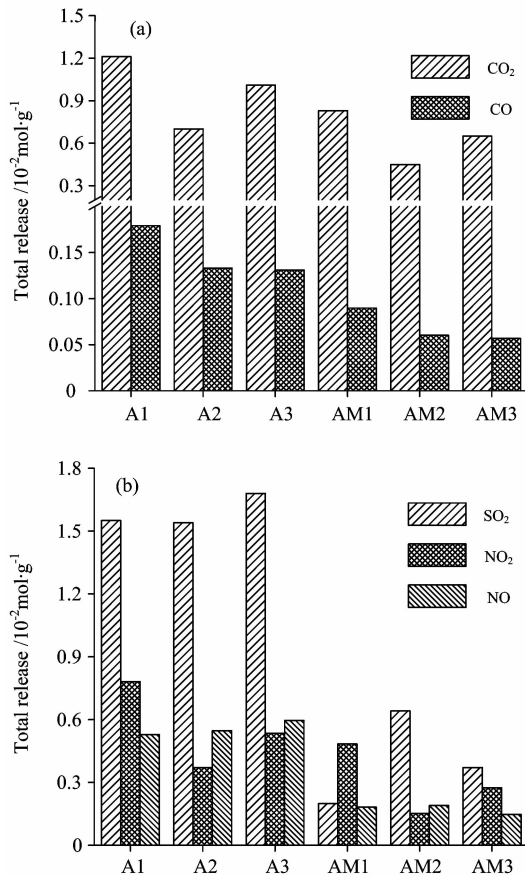


Fig. 5 Emission intensity of gaseous combustion products of the samples

图 6 为各试样燃烧气态产物的最大释放速率 u_{\max} 。可以看出, 对于燃烧过程中产生的 CO_2 , CO , SO_2 , NO 和 NO_2 这五种主要气态污染物, 沥青燃烧所产生的最大释放速率均高于相应的胶浆。对比图 3 可以看到, 燃烧气态产物中 CO , CO_2 及 NO 的浓度峰值均对应于活泼挥发分析出燃烧阶段的最大燃烧速率, 而 SO_2 、 NO_2 的最大浓度峰也位于该燃烧阶段内, 因此在供氧量相同情况下活泼挥发组分的含量对各气体的最大释放速率有决定性作用。此外, 由前面各气态污染物单位排放量的分析可知, 样品的含硫、含氮量以及热值等因素都对 SO_2 、 NO 和 NO_2 的排放有极其重要的影响。一般, 含硫量越高, 可能的最大 SO_2 释放速率越大; 含氮量越高, 可能的最大 NO 释放速率越大; 热值越高, 可能的 NO_2 释放速率越大, 但同时由于 NO 转换为 NO_2 的速率变大使得 NO 的释放速率会有一定程度的下降。由于沥青类的活泼挥发组分含量比较高, 而且含硫量、热值等都高于胶浆类, 因此综合以上各种影响因素, 沥青燃烧的气态污染物的最大释放速率均高于相应的胶浆。在沥青类试样中, 阻燃改性沥青的 CO , SO_2 及 NO_2 最大释放速率比其他两种沥青要高一倍左右, 而 NO 的最大释放速率则要低一半左右, 但 CO_2 的最大释放速率与其他两种沥青相比却没有明显的差别, 同时从图 5 来看, 其各气体释放总量与其他两种沥青也没有较大的差

别。造成这一现象的原因可能是样品在瓷舟内没有均匀展开、团聚成团。这样在着火燃烧初期, 样品所在的局部范围内形成较为强烈的缺氧气氛, 从而使 CO 瞬间最大释放速率加大, 同时也因团聚体散热面相对较小, 从而在短时间内样品能够被燃烧放热以及外部热源辐射加热到相当高的温度, 因此造成 SO_2 和 NO_2 的产生速率加大, 这也就意味着在短时间内 NO 转换为 NO_2 的速率加大, 因此 NO 浓度反而随之减少。

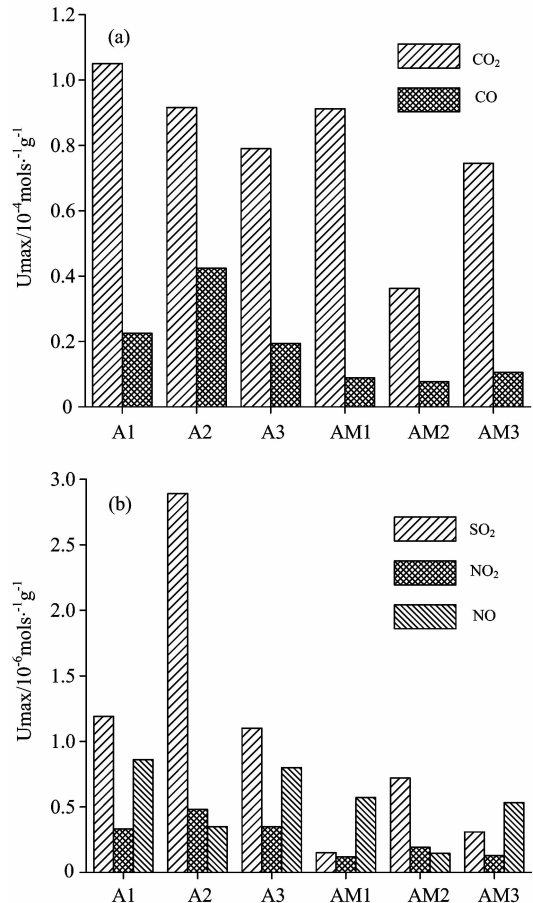


Fig. 6 Max release rate of combustion gaseous products of the samples

Table 3 Mean release rate of gaseous combustion products of the samples

Sample	Mean release rate/(mol · s ⁻¹ · g ⁻¹)				
	CO ₂	CO	NO	NO ₂	SO ₂
A1	4.314E-05	5.271E-06	2.370E-07	1.430E-07	4.690E-07
A2	4.679E-05	4.762E-06	2.650E-07	1.519E-07	4.272E-07
A3	4.219E-05	3.531E-06	1.621E-07	1.325E-07	3.808E-07
AM1	2.860E-05	3.092E-06	1.860E-07	4.777E-08	5.676E-08
AM2	1.744E-05	2.320E-06	7.580E-08	6.542E-08	2.673E-07
AM3	2.435E-05	2.582E-06	1.245E-07	4.498E-08	1.326E-07

各试样气态燃烧产物的平均释放速率如表 3 所示。整体来看, 气态燃烧产物的平均释放速率与其单位排放量的分布规律具有相当高的一致性, 无论是何种气态产物, 沥青类样

品在燃烧过程中的平均释放速率均高于相应的沥青胶浆。由于 CO_2 和 CO 的单位排放量相对数量级比较大, 在沥青及沥青胶浆的燃烧过程中, CO_2 和 CO 的平均释放速率要比 NO 、 NO_2 及 SO_2 等高 1~2 个数量级。

2.3 空气流量对燃烧气态产物释放的影响

表 4 列出了改性沥青胶浆分别在空气流量为 0.6 和 1.0 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时燃烧产物的主要参数。可以看出, 随着空气流量的增大, 更多的重质热解产物及炭黑在燃烧完毕之前被带走从而造成化学不完全燃烧损失增大, 因此样品的燃烬率大为

降低, 并使 CO_2 , CO , NO 的单位释放量、最大释放速率及平均释放速率均随之降低。从碳平衡的角度来看, 烟气中炭黑的排放量会随之增加。但另一方面, 由于外加热源的存在弱化了空气流量变化对样品温度的影响, 同时供氧量的相对增加令燃烧过程中的氧化性气氛加强, 因此从整体来看增大空气流量有利于 NO_2 和 SO_2 的产生, 从而使 NO_2 和 SO_2 的各项参数增加。同时, 由于 NO_2 的产生加剧了 NO 的消耗, 相比之下 NO 各参数受空气流量变化的影响比 CO_2 和 CO 更明显。

Table 4 Main parameters of combustion gaseous products under various air flows

Air flow /($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	Burn-out rate/%	Gaseous products	Emission intensity /($\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	Max release rate /($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	Mean release rate /($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)
0.6	58.82	CO_2	8.29E-03	9.05E-05	2.86E-05
		CO	8.97E-04	8.88E-06	3.09E-06
		NO	4.84E-05	5.71E-07	1.86E-07
		NO_2	1.82E-05	1.19E-07	4.78E-08
		SO_2	1.99E-05	1.50E-07	5.68E-08
1.0	16.46	CO_2	2.32E-03	2.19E-05	1.01E-05
		CO	5.39E-04	7.85E-06	2.70E-06
		NO	8.87E-06	1.20E-07	4.67E-08
		NO_2	1.81E-05	2.01E-07	6.98E-08
		SO_2	4.22E-05	6.13E-07	1.69E-07

3 结 论

(1) 固定床燃烧试验表明, 沥青及其胶浆燃烧的主要气态产物为 CO_2 , CO , NO , NO_2 及 SO_2 。其中, 含碳污染物的摩尔占比达 98% 以上, 其中 CO_2 占绝大多数(均超过 81%), 其次是 CO , SO_2 的摩尔占比排第三, NO 次之, NO_2 最少。

(2) 在高升温速率、近等温条件下, 沥青及胶浆的燃烧过程可近似分为活泼挥发组分析出燃烧、二次挥发析出结合残炭燃烧 2 个阶段。初始阶段, CO , NO 和 CO_2 气体最先释放出并在短时间内迅速达到最大浓度; 燃烧到一定温度时, NO_2 和 SO_2 才开始产生。可以 CO 作为表征沥青及其胶浆着火指标之一。

(3) 活泼挥发组分含量对沥青及其胶浆燃烧反应的燃烬率、气态产物释放量、释放速率等具有显著的影响。减少沥青材料中活泼挥发组分的含量可有效降低燃烧气态产物的生成、尤其是 CO 的产生。

(4) 试验结果表明, 沥青材料燃烧气态产物中 SO_2 的释放量主要取决于试样的含硫量; 而 NO 的排放量则主要受样品含氮量、氛围中的含氧量、以及 NO 转换为 NO_2 反应速率的综合影响; 而 NO_2 的生成则主要受温度的控制。

(5) 空气流量对沥青及其胶浆燃烧气态产物的释放规律也有较大影响。随着空气流量的增大, CO_2 , CO 和 NO 的单位释放量、最大和平均释放速率均下降, NO_2 以及 SO_2 的各项参数上升; 燃烧产物中碳黑的排放量将随之增加。

References

- [1] Tekalur S A, Shukla A, Sadd M, et al. Construction and Building Materials, 2009, 23(5): 1795.
- [2] Xiao F P, Amirkhanian S N. Materials and Structures, 2010, 43(1-2): 223.
- [3] Abolfazl Z S, Ali S, Salman E N. Construction and Building Materials, 2010, 24(7): 1239.
- [4] Asi I M. Building and Environment, 2007, 42(1): 325.
- [5] HUANG Jian, HAO Zhi-biao, ZOU Wu, et al(黄 剑, 郝志彪, 邹 武, 等). Journal of Inorganic Materials(无机材料学报), 2010, 25(3): 321.
- [6] LI Hai-liang, LI He-jun, LU Jin-hua, et al(李海亮, 李贺军, 卢锦花, 等). Journal of Inorganic Materials(无机材料学报), 2011, 26(2): 197.
- [7] Yu J Y, Cong P L, Wu S P. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2277.
- [8] Al-Hadidy A I, Tan Y Q. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1456.
- [9] Alarie Y. Critical Reviews in Toxicology, 2002, 32(4): 259.
- [10] Wu S P, Cong P L, Yu J Y, et al. Fuel, 2006, 85(9): 1298.

- [11] Chen D H, Zhang H P, Zheng Q K, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2008, 19(9): 1353.
- [12] Wu S P, Mo L T, Cong P L, et al. *Fuel*, 2008, 87(1): 120.
- [13] Mothé M G, Leite L F M, Mothé C G. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2008, 93(1): 105.
- [14] Xu T, Huang X M. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2010, 87(2): 217.
- [15] Xu T, Huang X M. *Fuel*, 2010, 89(9): 2185.
- [16] WU Ke, HUANG Zhi-yi, XU Xing(吴珂, 黄志义, 徐兴). *China Journal of Highway and Transport(中国公路学报)*, 2009, 22(2): 77.

Research on the Combustion Mechanism of Asphalt and the Composition of Harmful Gas Based on Infrared Spectral Analysis

WU Ke¹, ZHU Kai², HUANG Zhi-yi¹, WANG Jin-chang^{1*}, YANG Qin-min³, LIANG Pei⁴

1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
2. Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
3. Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
4. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Abstract By using the Rosemount gas analyzer and the test platform of fixed bed built by carbon furnace, the harmful gaseous compositions and the release rules of asphalt and mortar under high temperature rate were analyzed quantitatively based on infrared spectral analysis technology. The results indicated that the combustion process of the asphalt and mortar can be approximately divided into two stages stage of primary volatile combustion, and stage of secondary volatile release combined with fixed carbon combustion in isothermal condition with high heating rate. The major gaseous products are CO₂, CO, NO, NO₂ and SO₂. the volatile content is one of the key factors affecting the release rules of gaseous combustion products in asphalt, and reducing the volatile content in asphalt materials can effectively reduce the generation of gaseous combustion products, especially CO.

Keywords Fixed bed combustion reaction experiment; Infrared spectral analysis; Asphalt

(Received Feb. 20, 2012; accepted May 26, 2012)

* Corresponding author

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpfx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社