

玄武岩纤维增强酚醛树脂复合材料 高温热分析研究

High Temperature Thermal Analysis of Basalt Fiber
Reinforced Phenolic Composite

魏化震, 张清辉, 李锦文

(中国兵器工业集团 第五三研究所, 济南 250031)

WEI Hua-zhen, ZHANG Qing-hui, LI Jin-wen

(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

摘要: 通过对 B7/S157 玄武岩纤维增强酚醛树脂复合材料和 G/S157 玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料体系进行高温热分析研究、热力学计算及高温反应产物成分分析, 结果表明: 玄武岩纤维中的氧化铁及氧化亚铁成分可在化学反应中充当催化剂, 改变材料体系中碳硅反应历程, 使得碳硅反应可在相对较低温度下进行, 促进材料的吸热效应, 有别于玻璃纤维增强防热复合材料。

关键词: 玄武岩纤维; 酚醛树脂; 热分析; 碳硅反应

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.01.013

中图分类号: TQ327.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)01-0064-04

Abstract: The B7/S157 basalt fiber reinforced phenolic composite and G/S157 glass fiber reinforced phenolic composite were investigated by high temperature thermal analysis, thermodynamic calculation and composition analysis on the high temperature reaction products. The results show that the iron in basalt acts as the catalyst which changes the carbon-silica reaction process, decreases the reaction temperature and improves the reaction endothermic effect. The analysis results of basalt fiber reinforced phenolic composite are different from those of the glass fiber reinforced phenolic composite.

Key words: basalt fiber; phenolic resin; thermal analysis; carbon-silica reaction

硅质纤维增强酚醛树脂基复合材料烧蚀防热作用机制为熔化-炭化型, 其烧蚀过程如下^[1-5]: 材料在外部热源(如气动热、火箭发动燃气热流)作用下开始升温, 当温度达到酚醛树脂基体热分解温度时, 树脂基体将逐渐炭化, 释放气体而留下固体碳结构, 随着温度的进一步升高, 硅质类纤维(如玻璃纤维、高硅氧纤维等)开始熔融并吸热, 以玻璃“珠”或“液膜”的形式顺气流方法沿表面流动, 同时表面发生汽化和化学反应, 在消耗表面物质(烧蚀)的同时, 吸收热量。有文献^[6]报道 C-SiO₂ 类型的复合材料在高温条件下, 如前所述会发生熔融、汽化、分解和化学反应等过程而吸收能量, 其中 SiO₂ 的汽化与分解, C 与 SiO₂ 的化学反应具有较大的吸热效应, 从热防护观点来看这是很重要的。因此这些物理、化学过程之间的关系和应当考虑哪些主要化学反应是重点关注的。材料在实际烧蚀过程中通常变化非常激烈, 材料表面温度在几秒内急升至 2000K 以上, 因此在如此短的时间内很难研究材料的具体变化历程, 而热分析技术^[7-9]能方便地连续跟踪

材料在程序控制温度下热量、质量等参数随温度或时间的变化情况, 是揭示材料在高温下变化规律的有力工具。热分析过程中升温速率通常在 1~30K·min⁻¹ 之间, 相当于烧蚀过程的“慢镜头”, 因此采用热分析技术研究材料的烧蚀机理具有很好的参考价值。本工作对玄武岩纤维增强酚醛树脂复合材料开展高温热分析研究, 试图通过热力学计算和反应产物成分分析推断出该类材料在高温下可能发生的吸热反应, 同时考察了玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料, 并进行了比较分析。

1 实验

1.1 实验材料

玄武岩纤维增强酚醛树脂复合材料(简称 B7/S157, 下同)、玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料(简称 G/S157, 下同)均采用模压工艺制备, 树脂含量均为 30%(质量分数)。玄武岩纤维(BC7-800), 浙江石金

玄武岩纤维有限公司;玻璃纤维(SC8-570),南京玻璃纤维纤维研究设计院;酚醛树脂(S157 树脂),中国兵器工业集团第五三研究所。

1.2 实验过程

采用 STA449C 型综合热分析仪在惰性气氛(N_2)下以 $15K \cdot min^{-1}$ 升温速率分别对 B7/S157, G/S157 复合材料在 350~1750K 温度范围内进行 TG-DTA 热分析。

2 结果与讨论

2.1 高温热分析

图 1 显示的是 B7/S157, G/S157 复合材料在 350~1750K 温度范围内 TG, DTG 及 DTA 曲线变化情况。

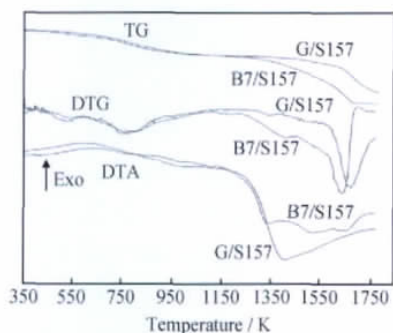


图 1 B7/S157, G/S157 复合材料热分析曲线

Fig. 1 The thermal analysis curves of B7/S157 and G/S157 composites

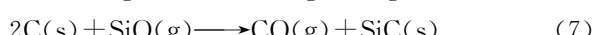
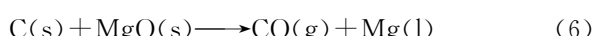
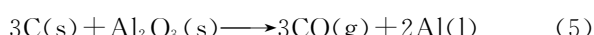
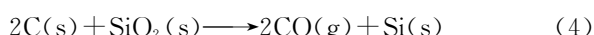
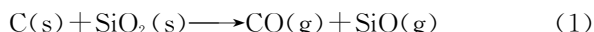
从图 1 中的 TG 曲线来看,随着温度升高,复合材料逐渐失重,在低于 1100K 时 B7/S157 和 G/S157 复合材料热失重率基本相同,但高于 1100K 之后在相同温度下 B7/S157 复合材料热失重率均大于 G/S157 复合材料。B7/S157 复合材料在高于 1100K 之后就明显失重,到 1680K 后失重基本结束;G/S157 复合材料在 1100~1560K 温度范围内仅有少量失重,在高于 1560K 之后才迅速失重。结合 DTG 曲线可知,复合材料热失重分为三个阶段:(1)温度低于 620K 时的热失重应为复合材料吸附水及小分子汽化所致;(2)温度在 620~1100K 范围内的热失重应为复合材料基体树脂热分解所引起;(3)温度高于 1100K 之后的热失重为复合材料纤维软化、熔融、汽化及存在化学反应所致。

从 DTA 曲线来看,复合材料在低于 1100K 时仅表现有小幅吸热效应,主要的吸热过程出现在 1100K 之后,但在此过程中 B7/S157 和 G/S157 复合材料表

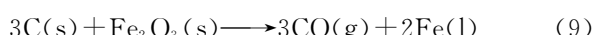
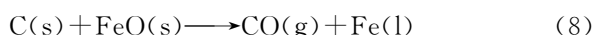
现出来的吸热效应有所不同。结合 TG, DTG 曲线来看, G/S157 复合材料在 1100~1560K 温度范围表现出吸热效应时所对应的失重却很小,说明 G/S157 复合材料在此温度范围内的吸热效应是纤维增强体软化、熔融吸热所致, 1560K 后才开始迅速失重, 1560K 后的失重应为化学反应所致。与 G/S157 复合材料不同, B7/S157 复合材料在 1100K 左右开始出现吸热效应的同时, 热失重也较大, 说明 B7/S157 复合材料在纤维增强体熔融的同时出现了化学反应。而且 DTA 曲线显示其吸热峰为多峰, 更加说明在此阶段 B7/S157 复合材料出现多种吸热效应, 不仅有纤维熔融吸热, 还有化学反应吸热。

2.2 热力学计算

玻璃纤维主要含有 SiO_2 , Al_2O_3 , MgO 等成分, 玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料在高温下玻璃纤维与树脂残余物(焦炭)可能发生的反应如下^[10]:



玄武岩纤维除含有 SiO_2 , Al_2O_3 , MgO 等成分外, 还含有较高含量的 FeO 及 Fe_2O_3 ^[11,12], 因此对于 B7/S157 复合材料, 高温下除可能发生式(1)~(7)反应外, 焦炭还将与 FeO 及 Fe_2O_3 产生碳热还原反应, 生成熔融铁, 铁再与纤维中的 SiO_2 成分反应^[13]:



系统中部分物质的热力学数据见表 1^[14], 其中 $C_{p,m} = a + b \cdot T + c \cdot T^{-2} + d \cdot T^2$, 其他物质的热力学数据可查阅文献^[14]。

由下列热力学公式及各物质的相关热力学数据可分别计算出式(1)~(10)等化学反应分别在 1100, 1560K 时各反应的焓变 $\Delta_r H_m^\theta$ (1100K), $\Delta_r H_m^\theta$ (1560K) 及标准自由能变化 $\Delta_r G_m^\theta$ (1100K), $\Delta_r G_m^\theta$ (1560K), 见表 2。

$$C_{p,m}(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^{-2} + d \cdot T^2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta_r H_m^\theta(T) &= \Delta_r H_m^\theta(298.15K) + \int_{298.15}^T \Delta C_{p,m}(T) dT \\ &= \Delta_r H_m^\theta(298.15K) + \Delta a(T - 298.15) + \\ &\quad \frac{\Delta b}{2}(T^2 - 298.15^2) - \Delta c\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right) + \end{aligned}$$

表 1 部分相关物质的热力学数据

Table 1 The thermodynamic data of some relative compositions

Composition	$\Delta_f H_m^\theta(298.15\text{K})$	$S_m^\theta(298.15\text{K})$	$C_{p,m}/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})(298.15\sim 2000\text{K})$			
	$/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	a	$b\cdot 10^3$	$c\cdot 10^{-5}$	$d\cdot 10^6$
C(s)	0	5.740	0.109	38.940	-1.481	-17.385
CO(g)	-110.541	197.661	28.409	4.1	-0.46	0
SiO ₂ (s)	-907.01	45.87	71.626	1.891	-39.058	0
SiO(g)	-100.416	211.569	29.824	8.238	-2.063	-2.28
SiC(s)	-73.22	16.611	50.79	1.95	-49.204	8.205
FeO(s)	-272.04	60.75	50.802	8.615	-3.310	0
Fe ₂ O ₃ (s)	-825.5	87.45	98.282	77.822	-14.853	0
Fe(l)	15.544	36.175	28.175 ^①	-7.318 ^①	-2.895 ^①	25.041 ^①
			-263.454 ^②	255.810 ^②	619.232 ^②	0 ^②
			-641.905 ^③	696.339 ^③	0 ^③	0 ^③
			1946.255 ^④	-1788.335 ^④	0 ^④	0 ^④
			-561.932 ^⑤	334.143 ^⑤	2912.114 ^⑤	0 ^⑤
			23.991 ^⑥	8.360 ^⑥	0 ^⑥	0 ^⑥

Note:①298-800K;②800-1000K;③1000-1042K;④1042-1060K;⑤1060-1184K;⑥1184-1665K

表 2 各化学反应在高温下的标准焓变及标准自由能变化

Table 2 The standard heat of formation and Gibbs free energy of the reactions

Reaction equation	$\Delta_r H_m^\theta(1100\text{K})$ $/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\Delta_r G_m^\theta(1100\text{K})$ $/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\Delta_r H_m^\theta(1560\text{K})$ $/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$\Delta_r G_m^\theta(1560\text{K})$ $/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
(1)	585.117	205.149	674.907	148.200
(2)	415.341	227.398	509.278	-45.989
(3)	505.071	132.475	604.481	77.150
(4)	578.526	191.611	670.268	131.490
(5)	1355.322	699.899	135.304	426.835
(6)	496.137	272.266	495.052	178.985
(7)	-80.046	-72.674	-70.426	-71.049
(8)	173.711	-2.660	168.144	-75.462
(9)	499.984	-51.7487	459.546	-131.765
(10)	411.406	-67.704	506.763	-167.067

$$\frac{\Delta d}{3}(T^3 - 298.15^3) \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \Delta_r S_m^\theta(T) &= \Delta_r S_m^\theta(298.15\text{K}) + \int_{298.15}^T \frac{\Delta C_{p,m}(T)}{T} dT \\ &= \Delta_r S_m^\theta(298.15\text{K}) + \Delta a(\ln T - \ln 298.15) + \\ &\quad \Delta b(T - 298.15) - \Delta c\left(\frac{1}{T^2} - \frac{1}{298.15^2}\right) + \\ &\quad \frac{\Delta d}{2}(T^2 - 298.15^2) \tag{13} \\ \Delta_r G_m^\theta(T) &= \Delta_r H_m^\theta(T) - T\Delta_r S_m^\theta(T) \\ &= \Delta_r H_m^\theta(298.15\text{K}) + \\ &\quad \left(-298.15\Delta a - \frac{298.15^2\Delta b}{2} + \frac{\Delta c}{298.15} - \frac{298.15^3\Delta d}{3}\right) \\ &\quad + \left(\Delta a - \Delta_r S_m^\theta(298.15\text{K}) + \Delta a\ln 298.15 + \right. \\ &\quad \left. 298.15\Delta b - \frac{\Delta c}{2 \times 298.15^2} + \frac{298.15^2\Delta d}{2}\right) T - \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta b}{2}T^2 - \frac{\Delta c}{2}T^{-1} - \frac{\Delta d}{6}T^3 - \Delta aT\ln T \tag{14}$$

式中: $C_{p,m}(T)$ 为物质在 T 温度下的恒压摩尔热容, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\Delta C_{p,m}(T)$ 为化学反应中各物质在 T 温度下的恒压摩尔热容变化, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\Delta_r H_m^\theta(T)$ 为化学反应在 T 温度下的标准焓变(即反应热), $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; $\Delta_r S_m^\theta(T)$ 为化学反应在 T 温度下的标准熵变化, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; $\Delta_r G_m^\theta(T)$ 为化学反应在 T 温度下的标准自由能变化, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; a, b, c, d 分别为物质在 T 温度下的热容温度系数, 单位分别为 $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}$, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-3}$; $\Delta a, \Delta b, \Delta c, \Delta d$ 分别为化学反应中各物质在 T 温度下的热容温度系数变化, 单位分别为 $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}$, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-3}$ 。

当 $\Delta_r G_m^\theta(T) < 0$ 时, 化学反应才可自发进行, 因此由表 2 可知, 惰性条件下 G/S157 复合材料在温度达到 1100K 时化学反应式(1)~(6)等均不能自发进行, 反应式(7)的 $\Delta_r G_m^\theta(T) < 0$, 但此反应须有 SiO 存在才能发生, 同时须反应式(1)或反应式(2)先发生的前提下才可发生; 在温度达到 1560K 时反应式(2)和反应式(7)可自发进行, 且反应式(2)为强吸热反应, 反应热高达 $415.341\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 反应物 CO 来源于酚醛树脂热分解产生的 CO。

对于 B7/S157 复合材料, 当温度达到 1100K 之后, 反应式(7)~(10)均可自发进行, 且反应式(8)~(10)均为强吸热反应。反应式(8), (10)的总反应式为反应式(1), 说明玄武岩纤维中铁成分在复合材料的高温反应中充当了催化剂的角色, 改变了碳硅反应历程, 使得在 G/S157 复合材料中不能进行的碳硅

反应能够在 B7/S157 复合材料中进行,增强了材料的吸热效应。

2.3 X 射线衍射分析

图 2、图 3 分别为 G/S157 和 B7/S157 复合材料高温热分析残留物 XRD 谱图,图 2 显示 G/S157 复合材料高温热分析残留物转变成低温型石英(图 2 中显示的氧化铝成分可能是试样中混入了热分析氧化铝坩埚所致),而图 3 显示 B7/S157 复合材料高温热分析残留物转变成复杂的沸石类物质。值得注意的是在 G/S157 和 B7/S157 复合材料高温热分析残留物中均未发现有 SiC 出现,因此可以说明尽管热力学计算表明化学反应式(7)虽然可自发进行,但实际加热过程中并未发生,该结果与文献[6]结论一致,这可能是由于高温下复合材料中残留的焦炭比熔融纤维含量要少得多,焦炭是被二氧化硅等氧化物所包围,在熔融层中没有多余的碳供氧化硅反应,这一点与采用碳热还原法合成碳化硅有所不同,在合成碳化硅时通常要求碳与二氧化硅物质的量之比应大于 4 : 1,二氧化硅是由碳所包围的。

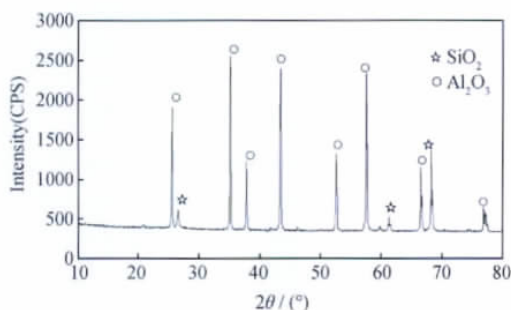


图 2 G/S157 复合材料热分析残留物 XRD 谱图
Fig. 2 The XRD pattern of the reaction products of G/S157 composite

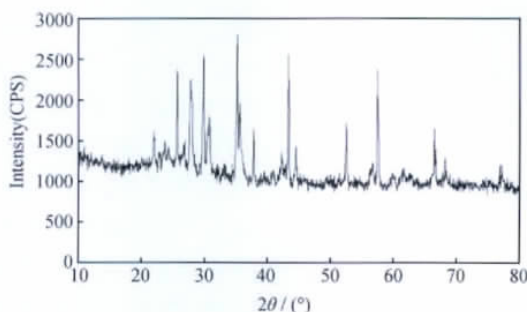


图 3 B7/S157 复合材料热分析残留物 XRD 谱图
Fig. 3 The XRD pattern of the reaction products of B7/S157 composite

3 结论

(1)高温条件下 B7/S157 玄武岩纤维增强酚醛树脂复合材料与 G/S157 玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料表现出不同的热失重变化及吸热效应,B7/S157 复合材料在 1100K 左右开始出现纤维增强体熔融吸热效应的同时发生化学反应,产生热失重;G/S157 复合材料也在 1100K 左右开始出现吸热效应,但直到温度达到 1560K 后才发生反应,出现热失重现象。

(2)玄武岩纤维增强酚醛树脂基复合材料的主要烧蚀机理同玻璃纤维增强酚醛树脂类似,主要通过材料自身热容吸热、基体热分解(炭化)吸热、纤维增强体熔融吸热及化学反应吸热等方式起到烧蚀防热的作用。其最大的不同点是玄武岩纤维中的氧化铁及氧化亚铁成分可在化学反应中充当催化剂,改变材料中碳硅反应历程,使得碳硅反应可在相对较低温度下进行,促进材料的吸热效应。

参考文献

- [1] 姜贵庆,刘连元. 高速气流传热与烧蚀热防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [2] 何洪庆,严红. EPDM 的烧蚀模型[J]. 推进技术,1999,20(4):36-39.
HE Hong-qing, YAN Hong. Ablation model of EPDM[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(4): 36-39.
- [3] 姜卫陵,酆江涛,赵云峰,等. 玻璃纤维/酚醛复合材料的烧蚀性能研究[J]. 导弹与航天运载技术,2003,(5):47-50.
JIANG Wei-ling, LI Jiang-tao, ZHAO Yun-feng, et al. The method of studying ablation properties of ablative material [J]. Missiles and Space Vehicles, 2003, (5): 47-50.
- [4] 邢连群. 低密度硅基材料烧蚀机理分析与工程计算[J]. 航天器工程,2001,10(2):8-15,26.
XING Lian-qun. Ablative mechanism analysis of low density silica matrix materials with its engineering calculation [J]. Spacecraft Engineering, 2001, 10(2): 8-15, 26.
- [5] 国义军. 炭化材料烧蚀防热的理论分析与工程应用[J]. 空气动力学学报,2001,10(2):8-15,26.
GUO Yi-jun. An analysis of a charring ablative thermal protection system with its engineering application[J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2001, 10(2): 8-15, 26.
- [6] 欧阳水吾,郑国铭,杨希霓. 高硅氧增强塑料的烧蚀理论及试验结果[J]. 宇航学报,1981,(1):14-22.
OUYANG Shui-wu, ZHENG Guo-ming, YANG Xi-ni. A theory for the ablation of silica-reinforced phenolic resin plastics and the experiment data [J]. Journal of Chinese Society of Astronautics, 1981, (1): 14-22.
- [7] 蔡正千. 热分析[M]. 北京:高等教育出版社,1993.
- [8] 李余增. 热分析[M]. 北京:清华大学出版社,1987.

(下转第 84 页)

深度较小,腐蚀并没有沿腐蚀沟槽向纵深快速扩展,而是在表层珠光体发生腐蚀后再由晶界向晶内腐蚀铁素体,在金属表层铁素体腐蚀完前下一层铁素体不会发生显著的腐蚀,从而使得环烷酸腐蚀基本呈均匀腐蚀的形貌。

3 结论

(1) 腐蚀实验数据表明冲刷角对 20G 低碳钢的环烷酸腐蚀行为存在一定影响,同时冲刷角对环烷酸腐蚀速率的影响与腐蚀温度及流速有关。

(2) 温度是环烷酸腐蚀极为重要的影响因素,20G 低碳钢的环烷酸腐蚀在 280~320℃ 温度区间存在腐蚀峰值,超过 320℃ 腐蚀速率随温度呈下降趋势。

(3) 20G 低碳钢发生环烷酸腐蚀时珠光体优先溶解,在金属表面形成大量腐蚀沟槽;在珠光体腐蚀完后由铁素体晶界向晶内逐渐发生溶解;在表层铁素体腐蚀结束前下一层铁素体不会发生显著溶解。

参考文献

- [1] 梁春雷,陈学东,艾志斌,等. 环烷酸腐蚀机理及其影响因素研究综述[J]. 压力容器, 2008, 25(5): 30-36.
- [2] GROYSMAN A, BRODSKY N, PENNER J, et al. Study of corrosiveness of acidic crude oil corrosion and its fractions[A]. Corrosion 2005[C]. Houston: NACE International, 2005. 568-580.
- [3] GROYSMAN A, BRODSKY N, PENNER J, et al. Low temperature naphthenic acid corrosion study [A]. Corrosion 2007 [C]. Houston: NACE International, 2007. 569-578.
- [4] SLAVCHEVA E, SHONE B, TURBULL A. Review of naphthenic acid corrosion in oil refining[J]. British Corrosion Journal, 1999, 34(2): 125-131.
- [5] NUGENT M J, DOBIS J D. Experience with naphthenic acid corrosion in low TAN crudes[A]. Corrosion 98[C]. Houston: NACE International, 1998. 577-586.

- [6] OMAR YEPEZ. On the chemical reaction between carboxylic acids and iron, including special case of naphthenic acid[J]. Fuel, 2007, 86: 1162-1168.
- [7] CRAIG H L. Temperature and velocity effects in naphthenic acid corrosion [A]. Corrosion 96[C]. Houston: NACE International, 1996. 603-613.
- [8] OMAR YEPEZ. Influence of different sulfur compounds on corrosion due to naphthenic acid[J]. Fuel, 2005, 84: 97-104.
- [9] WU Xin-qiang, JING He-ming, ZHENG Yu-gui, et al. Erosion corrosion of various oil refining materials in naphthenic acid[J]. Wear, 2004, 256: 133-144.
- [10] 高延敏, 陈家坚, 雷良才, 等. 环烷酸腐蚀研究现状和防护对策[J]. 石油化工腐蚀预防, 2000, 17(2): 6-12.
- [11] ZETLMEISL M. A laboratory and field investigation of naphthenic acid corrosion inhibition [A]. Corrosion 95[C]. Houston: NACE International, 1995. 334-350.
- [12] CHEN Xue-dong, AI Zhi-bin, YANG Tie-cheng, et al. Analysis method of failure likelihood on pressure equipment with combined action of multi-failure mechanism [A]. PVP2010 [C]. Washington: ASME, 2010. 25665-25669.
- [13] GUTZTEIT J. Naphthenic acid corrosion in oil refineries[J]. Materials Performance, 1997, 16(10): 24-35.
- [14] SCATTERGOOD G L, STRONG R C, LINDLEY W A. Naphthenic acid corrosion, an update of control methods[A]. Corrosion 87[C]. Houston: NACE International, 1987. 197-209.
- [15] BLANCO E, HOPKINSON B. Experience with naphthenic acid corrosion in refinery distillation progress units[A]. Corrosion 83 [C]. Houston: NACE International, 1983. 99-109.
- [16] 陈碧凤, 杨启明. 常减压设备环烷酸腐蚀分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(1): 74-76.

基金项目: 国家 863 重点资助项目(2009AA04480204)

收稿日期: 2011-08-24; 修订日期: 2011-12-28

作者简介: 饶思贤(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属的腐蚀与失效, 联系地址: 安徽省马鞍山市安徽工业大学机械工程学院(243032), E-mail: raosixian@ahut.edu.cn

(上接第 67 页)

- [9] 刘振海. 热分析导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [10] BEECHER N, ROSENSWEIG R E. Ablation mechanisms in plastics with inorganic reinforcements[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 1961, 31(4): 532-539.
- [11] 曹海琳, 郎海军, 孟松鹤. 连续玄武岩纤维结构与性能试验研究[J]. 高科技纤维与应用, 2007, 32(5): 8-13.
- CAO Hai-lin, LANG Hai-jun, MENG Song-he. Experimental research on the basic structure and properties of the continuous basalt fiber[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2007, 32(5): 8-13.
- [12] 闫全英. 玄武岩纤维制备的热工机理和材料研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.

- [13] CHENYSANTHOU A, GRIVISON P, JHA A. Formation of silicon carbide whiskers and their microstructure [J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(10): 3463-3476.
- [14] CHASE Jr M W, NIST-JANAF. Thermochemical Tables [M]. 4th ed. New York: the American Chemical Society and the American Institute of Physics for the National Bureau of Standards, 1998.

收稿日期: 2012-09-07; 修订日期: 2012-11-15

作者简介: 魏化震(1964—), 男, 研究员, 从事复合材料、防热材料、烧蚀涂料等方面研究工作, 联系地址: 山东济南市 108 信箱中国兵器工业集团第五三研究所(250031), E-mail: weihz53@sina.com