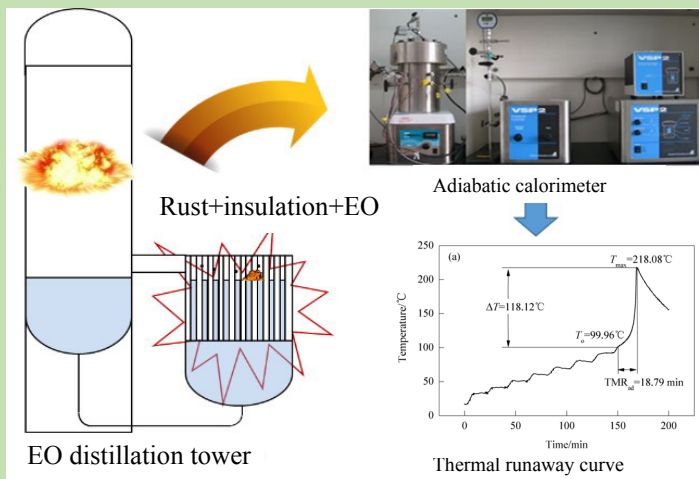


Effect of rust on runaway reaction of ethylene oxide aqueous solution

Jingru LIU*, Manping JIN, Lei ZHAO, Fan ZHANG*, Wei XU, Ning SHI

SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract: Exothermic reaction of ethylene oxide (EO) contacting with rust is believed to be responsible for explosion accidents of EO distillation tower. In order to systematically study the influence of iron rust/ Fe_2O_3 on the thermodynamic parameters of runaway reaction of EO aqueous solution, the adiabatic calorimetry tests of EO aqueous solution–rust/ Fe_2O_3 system were carried out by adiabatic calorimeter Venting Size Package-2 (VSP-2). The thermodynamic parameters such as the initial exothermic temperature, the maximum exothermic temperature and pressure,



time to maximum reaction rate, the adiabatic temperature rise, the variation of temperature and pressure during runaway reaction process were obtained for EO aqueous solution–rust/ Fe_2O_3 system. The results showed that under the experimental conditions the runaway reaction characteristics of EO aqueous solution–rust system were not obvious. There were no distinct temperature and pressure rise during reaction, and the maximum temperature and pressure of the system were lower than 200°C and 1.0 MPa respectively. For Fe_2O_3 contacting with EO aqueous solutions, the initial exothermic temperature, the maximum reaction temperature and pressure decreased with increase of EO aqueous solution concentrations, and the time to maximum reaction rate was less than 30 minutes. The initial exothermic temperature of 30wt% EO aqueous solution– Fe_2O_3 system was close to 100°C. The initial exothermic temperature of pure EO– Fe_2O_3 system was about 150°C and the adiabatic temperature risen close to 180°C. The addition of polymer in the Fe_2O_3 –EO aqueous solution system had no obvious effect on the catalytic induction of the runaway reaction, and the severity of the runaway reaction was lower than that of the Fe_2O_3 –EO aqueous solution system. Therefore, the catalytic induction of Fe_2O_3 solids on the runaway reaction of EO and its aqueous solution was more obvious compared to the on-site rust, and with the increase of EO mass fraction, the consequences of runaway reactions were more serious. The study on runaway reaction behavior of EO with rust would be useful for EO distillation process design and explosion accident prevention.

Key words: ethylene oxide; runaway reaction; adiabatic calorimetry; thermal stability; process safety

收稿: 2018-05-11, 修回: 2018-09-07, 网络发表: 2018-10-19, Received: 2018-05-11, Revised: 2018-09-07, Published online: 2018-10-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(编号: 2017YFC0804707)

作者简介: 刘静如(1988-), 男, 山东省泰安市人, 博士, 高级工程师, 研究方向为化工过程安全, E-mail: liujr.qday@sinopec.com. 张帆, 通讯联系人, E-mail: zhangf.qday@sinopec.com.

引用格式: 刘静如, 金满平, 赵磊, 等. 铁锈对环氧乙烷水溶液失控反应的影响. 过程工程学报, 2018, 18(增刊 1): 138–145.

Liu J R, Jin M P, Zhao L, et al. Effect of rust on runaway reaction of ethylene oxide aqueous solution (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(S1): 138–145, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.20180166.

铁锈对环氧乙烷水溶液失控反应的影响

刘静如*, 金满平, 赵磊, 张帆*, 徐伟, 石宁

中国石化安全工程研究院化学品安全控制国家重点实验室, 山东 青岛 266071

摘 要: 采用绝热量热仪对环氧乙烷(EO)水溶液-铁锈/ Fe_2O_3 体系进行了绝热量热实验, 得到了铁锈、 Fe_2O_3 固体与 EO 水溶液接触时的起始放热温度、最高放热温度和压力、绝热温升、失控反应过程温度、压力等参数。结果表明, 在实验条件下 EO 水溶液与现场铁锈接触时失控反应特征不明显, 未出现温度、压力剧升现象; 发生失控反应的起始放热温度、最高反应温度、最高压力等随 EO 浓度降低而减小, 达到最大反应速率的时间在 30 min 内, 30wt% EO 水溶液- Fe_2O_3 体系的起始放热温度接近 100℃, 纯 EO- Fe_2O_3 体系的起始放热温度为 150℃。 Fe_2O_3 固体比现场铁锈对 EO 及其水溶液失控反应的催化诱导作用更明显, 且随 EO 浓度升高, 失控后果更严重。

关键词: 环氧乙烷; 失控反应; 绝热量热; 热稳定性; 过程安全

中图分类号: X937

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)S1-0138-08

1 前言

环氧乙烷(Ethylene Oxide, EO)是一种简单的环醚, 三元环张力较大且不稳定, 一定条件下易开环发生异构化、聚合、歧化和分解等反应^[1-3]。当铁锈、碱类、水等杂质与 EO 接触时能诱发其发生开环反应, 同时放出大量热并导致密闭设备内压力急剧升高, 达到一定温度时 EO 剧烈分解, 从而引发爆炸事故^[4-6]。历史上多个企业的 EO 精制系统均发生过严重爆炸事故^[7]。

1987 年英国石油 (BP)公司位于比利时安特卫普的工厂发生过 EO 精制塔爆炸事故, 经调查推断 EO 由入孔泄漏到保温层中, 在铁锈和水的作用下发生聚合反应放出热量, 热量积聚导致反应失控并最终发生 EO 分解爆炸。1989 年, 巴斯夫(BASF)同样位于安特卫普的 EO 精制塔发生爆炸, 事故原因可能为保温层内 EO 聚合生成聚乙二醇, 在检修过程中与空气接触氧化放热, 热量积聚致塔内 EO 分解爆炸^[8]。1991 年联碳公司(UCC)位于德克萨斯的工厂也发生过 EO 精制塔爆炸事故, 该事故起因于再沸器循环中断, 使塔釜液位降低, 再沸器加热管对 EO 加热, 在铁锈杂质诱发下发生失控反应, 热量积聚后 EO 分解爆炸。2015 年 4 月中国某企业乙二醇装置 EO 精制塔发生爆炸事故, 原因是 EO 水溶液在再沸器与铁锈、保温棉接触发生了放热反应, 热量积聚形成热点, 引发爆炸并传播到塔内。

上述几起 EO 精制塔爆炸事故中, 均有 EO 或其水溶液与铁锈接触引起放热反应, 研究铁锈对 EO 失控反应的诱发规律及影响后果十分必要。一些文献采用量热手段考察了碱类物质、氧化铁、水等杂质对 EO 热稳定性和失控反应的影响规律^[9-12], Liu 等^[13]对其进行了归纳总结^[13]。Levin^[14]系统研究了不同种类的氧化铁对 EO

失控反应特性的影响规律, 分析了体系的热力学参数变化规律。

多数研究考察不同杂质如氧化铁、碱等对纯 EO 热稳定性的影响, 目前对铁锈-EO 水溶液体系的失控反应特性的研究尚不系统和充分。本工作采用绝热量热仪对不同浓度 EO 水溶液-铁锈/ Fe_2O_3 体系进行量热实验, 考察了失控反应动力学关键参数, 分析了失控反应发生的条件和后果。

2 实验

VSP-2 绝热量热仪(美国, Fauske & Associates 公司)如图 1 所示, 由进样管线、样品加热器、磁力搅拌器、热电偶和压力平衡系统等组成。

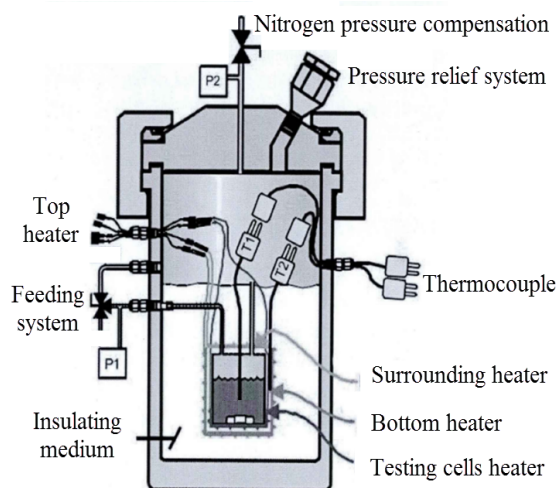


图 1 VSP-2 绝热量热仪示意图

Fig.1 Schematic diagram of adiabatic calorimeter VSP-2

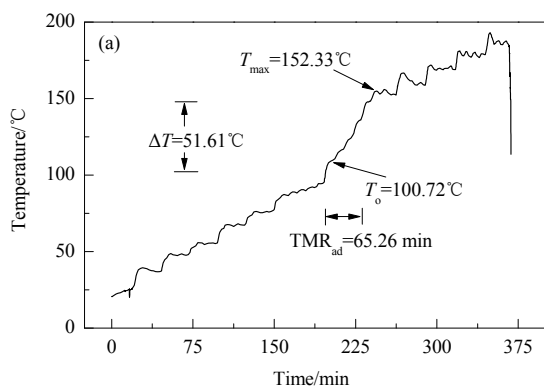
先将 EO 液体低温冷冻, 取适量配制制成不同浓度的 EO 水溶液, 将量热罐与加热器、进样管线和压力补偿

系统连接,用注射器通过进样管线向量热罐内加入约 50 g 溶液,装填系数约 40%。设置温度范围 20~250℃,升温步长为 10℃,等待时间为 15 min,仪器对温度的检测灵敏度为 0.02℃/min,即当检测到温度上升速率超过 0.02℃/min 认为发生了放热,否则进入下一个加热-等待-搜索循环直至温度上限 250℃。

EO 液体(纯度≥99.9%,上海神开气体技术有限公司),自制去离子水,铁锈和 EO 聚合物取自某石化企业乙二醇生产装置的精馏塔再沸器。

3 结果与讨论

刘静如等^[15]曾对纯 EO 及其水溶液的热稳定性进行了研究,本工作在此基础上,采用绝热量热方法对铁锈/ Fe_2O_3 固体-EO 水溶液体系的失控反应特性进行研究,分析热力学参数的变化规律。



3.1 铁锈-EO 水溶液体系

3.1.1 铁锈-50wt EO 水溶液体系(装填系数 10%)

在量热池内加入少量待测样品考察失控反应后果,避免加入量过多造成设备超温、超压而损坏。实验所用铁锈取自工厂生锈的设备,反应条件见表 1。

表 1 铁锈-50wt EO 水溶液反应绝热测试实验条件
Table 1 Adiabatic calorimetry experiment conditions for rust-50wt% EO aqueous solution reaction

Condition	Parameter
Sample	5 g EO, 5 g water, 0.22 g rust
Packing factor/%	10
Experiment type	Closed test
Initial temperature/℃	20
End temperature/℃	250
Temperature step/℃	10
Waiting time/min	15

铁锈-50wt EO 水溶液反应过程温度和压力随时间的变化如图 2 所示。

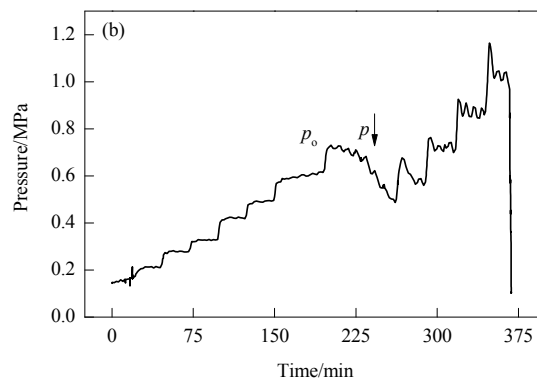


图 2 铁锈-50wt EO 水溶液反应过程温度和压力随时间的变化(装填系数 10%)

Fig.2 Temperature and pressure variation of rust-50wt EO aqueous solution during reaction (packing factor 10%)

实验中,100.72℃(T_0)时检测到放热,经过 65.26 min 放热停止,温度最高升至 152.33℃(T_{\max}),恢复加热-等待-搜索模式后,直至 190℃未检测到放热。密闭体系的压力来自 EO 和水的蒸汽产生的饱和蒸气压,放热过程中由于 EO 逐渐反应消耗掉,体系压力有所下降。文献^[15]中,50%的 EO 水溶液起始放热温度为 90.60℃,最高放热温度为 251.49℃,最高压力 3.73 MPa,绝热温升 160.89℃,绝热条件下达到最大反应速率的时间(TMR_{ad})为 62.69 min,加入 2.2%铁锈杂质后 EO 水溶液的失控反应特征不明显。体系的温度超过 100℃时,随反应进行,液相逐步汽化,反应放热与汽化吸热抵消,体系累积的热量不足以维持自加速反应,后期失控反应特征不明显。

3.1.2 铁锈-50wt EO 水溶液体系(装填系数 40%~45%)

考虑装填系数 10%的 EO 水溶液-铁锈体系失控反应不明显,增大装填量至正常水平(装填系数 40%~45%),维

持杂质含量仍为 2%左右,反应条件见表 2。

表 2 铁锈-EO 水溶液(50wt%)反应绝热测试实验条件(装填系数 40%~45%)

Table 2 Adiabatic calorimetry conditions for rust-50wt% EO aqueous solution reaction (packing factor 40%~45%)

Condition	Parameter
Sample	20 g EO, 20 g water, 0.8 g rust
Packing factor/%	40~45
Experiment type	Closed test
Initial temperature/℃	20
End temperature/℃	250
Temperature step/℃	10
Waiting time/min	15

铁锈-50wt% EO 水溶液反应温度和压力的变化规律如图 3 所示。

实验中 110.30℃时检测到放热,经过 27.15 min 放热停止,恢复加热-等待-搜索模式后,直至 180℃未检测到放热。放热过程中压力有下降趋势。增大样品的装

填量至 40%~45%后，体系的起始放热温度、最高放热温度、最高压力和绝热温升均有所增大，而 TMR_{ad} 大大降低，但失控反应特征仍不明显。

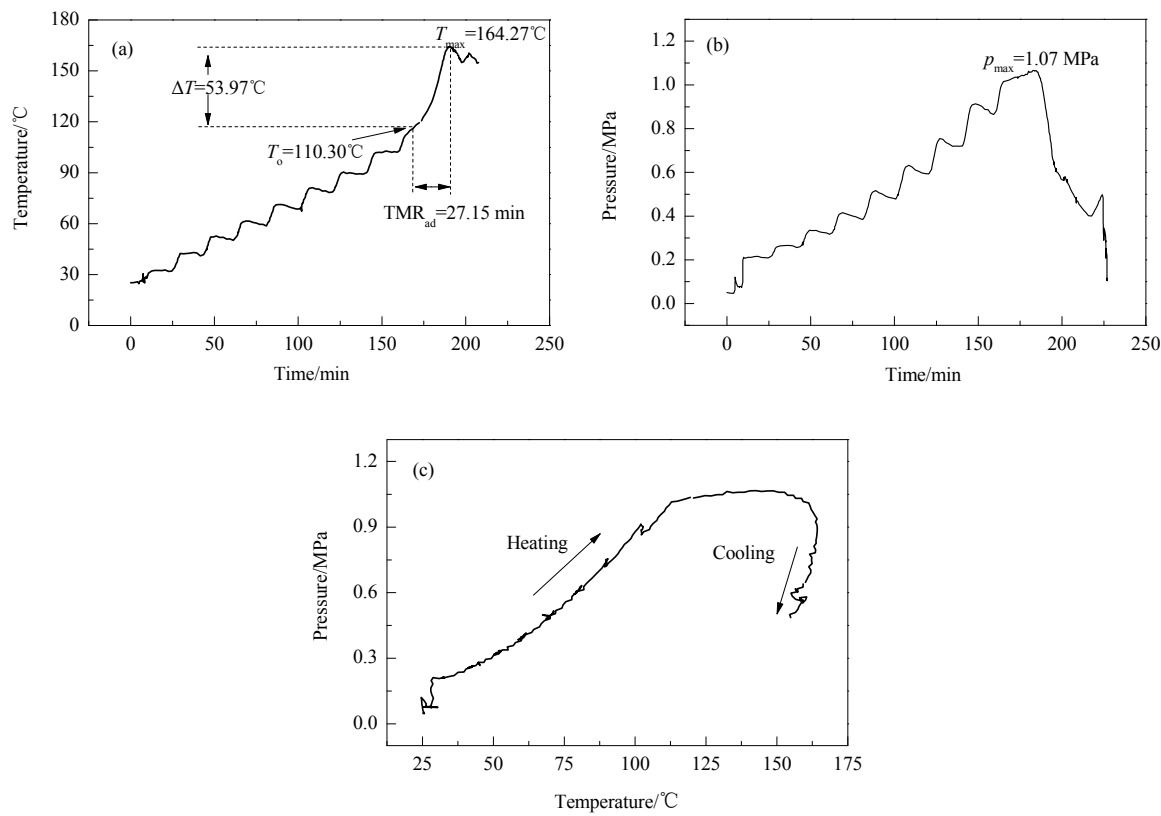


图3 铁锈-50wt% EO 水溶液反应温度和压力的变化规律(装填系数 40%~45%)
Fig.3 Temperature and pressure variation of rust-50wt% EO aqueous solution during reaction (packing factor 40%~45%)

虽然历史上几次 EO 精制系统爆炸原因均被认为与铁锈有关，但铁锈能否诱导 EO 在更低的温度发生失控反应一直存在争议^[16]。Dever 等^[17]的研究表明，铁锈对 EO 失控反应的催化特性与铁锈的分子结构、比表面积、形貌和粒径等因素有关。 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、FeO 和 Fe_3O_4 几种杂质中，比表面积最大的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的催化效果最好，其它几种氧化铁的催化效果在 300℃ 以上时才较明显。现场铁锈成分复杂，在 20~250℃ 未表现出对 EO 失控反应的显著催化特性。

3.2 Fe_2O_3 固体-EO 水溶液体系

3.2.1 Fe_2O_3 -保温棉-30wt% EO 水溶液体系

考虑到现场铁锈在实验条件下对 EO 的催化反应效果不明显，选取几种典型工况考察纯 Fe_2O_3 固体与 EO 体系的失控反应特性。模拟 EO 水溶液泄漏到精制塔保温棉中，并与氧化铁接触形成绝热环境的工况，实验条件见表 3。

Fe_2O_3 -30wt% EO 水溶液温度和压力变化规律如图 4 所示。99.96℃ 时检测到放热，经 18.79 min 迅速达到失控反应最高温度 218.08℃，放热过程中压力没有下降，

反应体系最高压力达到 2.26 MPa。失控反应过程中压力与 $-1/T$ 呈直线关系，由于 EO 沸点为 10.8℃，温度迅速上升过程中，液相沸腾，反应过程中的压力完全由反应物料的蒸汽压产生。

表 3 Fe_2O_3 -30wt% EO 水溶液反应绝热测试实验条件
Table 3 Adiabatic calorimetry conditions for Fe_2O_3 -30wt% EO aqueous solution reaction

Condition	Parameter
Sample	15 g EO, 35 g water, 0.9 g Fe_2O_3 , with insulation
Packing factor/%	40~45
Experiment type	Closed test
Initial temperature/°C	20
End temperature/°C	250
Temperature step/°C	10
Waiting time/min	15

不含 Fe_2O_3 和保温棉的 30% EO 水溶液^[15]起始放热温度为 79.83℃，最高放热温度为 139.52℃，绝热温升为 59.69℃， TMR_{ad} 为 104.92 min，无明显失控反应特征。加入 1.77% Fe_2O_3 和保温棉后，失控反应特征明显，表明 Fe_2O_3 对 EO 水溶液的失控反应具有催化促进效应，80~100℃ 是 Fe_2O_3 固体发挥催化作用的阶段，同时保温

棉和反应物形成的绝热环境促进了绝热自加速反应进程^[18].

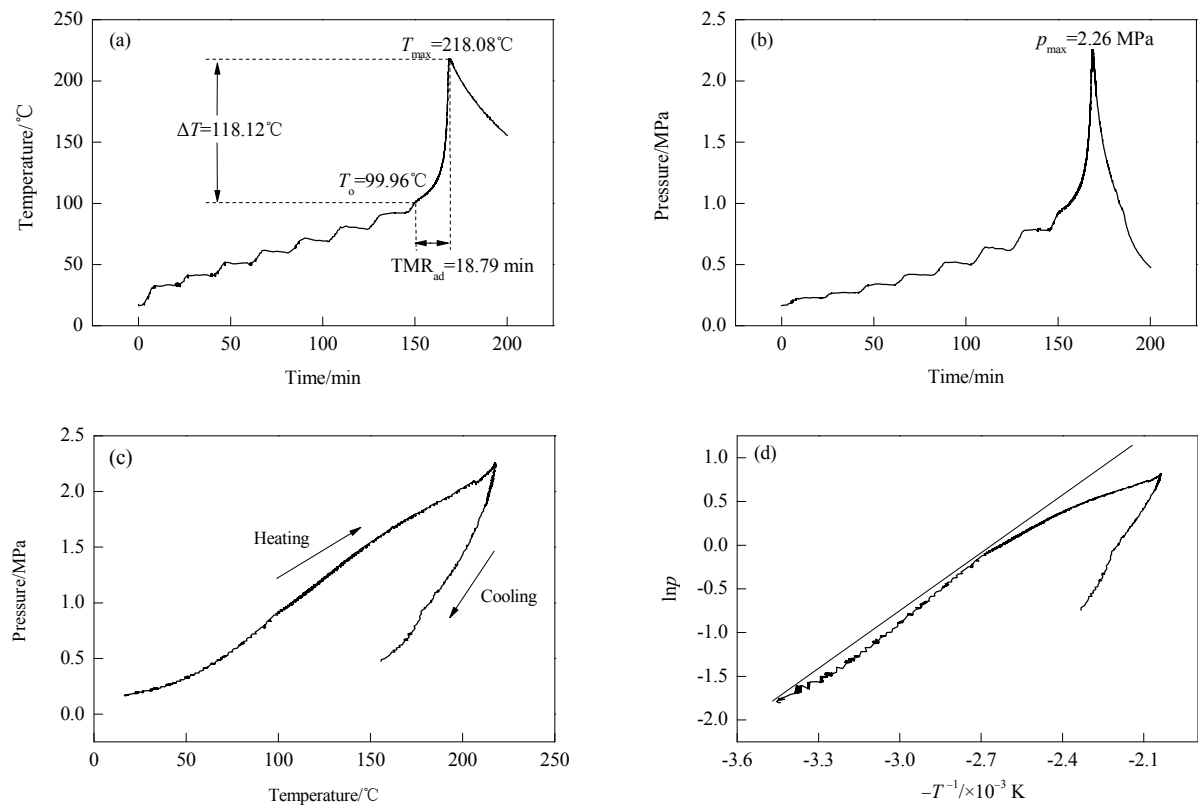


图 4 Fe_2O_3 -30wt% EO 水溶液反应温度和压力的变化规律
Fig.4 Temperature and pressure variation of Fe_2O_3 -30wt% EO aqueous solution during reaction

3.2.2 Fe_2O_3 -聚合物-50wt% EO 水溶液体系

为考察聚合物对 EO 水溶液失控反应的影响, 杂质中除 Fe_2O_3 外又添加少量聚合物固体, 主要成分为聚乙二醇, 实验条件见表 4.

表 4 Fe_2O_3 -聚合物-50wt% EO 水溶液反应绝热测试实验条件
Table 4 Adiabatic calorimetry experiment condition for Fe_2O_3 -polymer-50wt% EO aqueous solution reaction

Condition	Parameter
Sample	20 g EO, 20 g water, 0.8 g Fe_2O_3 , 0.4 g polymer
Packing factor/%	40~45
Experiment type	Closed test
Initial temperature/ $^{\circ}\text{C}$	20
End temperature/ $^{\circ}\text{C}$	250
Temperature step/ $^{\circ}\text{C}$	10
Waiting time/min	15

Fe_2O_3 -聚合物-50wt% EO 水溶液反应温度和压力

的变化规律如图 5 所示. 实验中 120.18 $^{\circ}\text{C}$ 时检测到放热, 经 24.91 min 达到失控反应最高温度 239.05 $^{\circ}\text{C}$, 放热过程中压力没有下降, 反应体系最高压力达到 3.15 MPa. 在失控反应过程中, 压力对数与 $-1/T$ 呈直线关系, 由于 EO 沸点为 10.8 $^{\circ}\text{C}$, 在温度迅速上升的过程中, 液相沸腾, 反应中的压力完全由反应物料的蒸汽压产生.

相比 Fe_2O_3 -30wt% EO 水溶液体系, Fe_2O_3 -聚合物-EO 水溶液(50wt%)体系的起始放热温度随 EO 水溶液增大而显著升高, 最高压力和 TMR_{ad} 有所增大, 绝热温升基本维持不变, 约为 118 $^{\circ}\text{C}$. 聚合物的加入对 EO 水溶液失控反应的诱发效果不明显, 相比 50wt% EO 水溶液, Fe_2O_3 -聚合物-50wt% EO 水溶液体系的起始放热温度增大, 最高放热温度和绝热温升降低, 最高压力相差不大, TMR_{ad} 有所降低, 失控反应的严重程度有所降低.

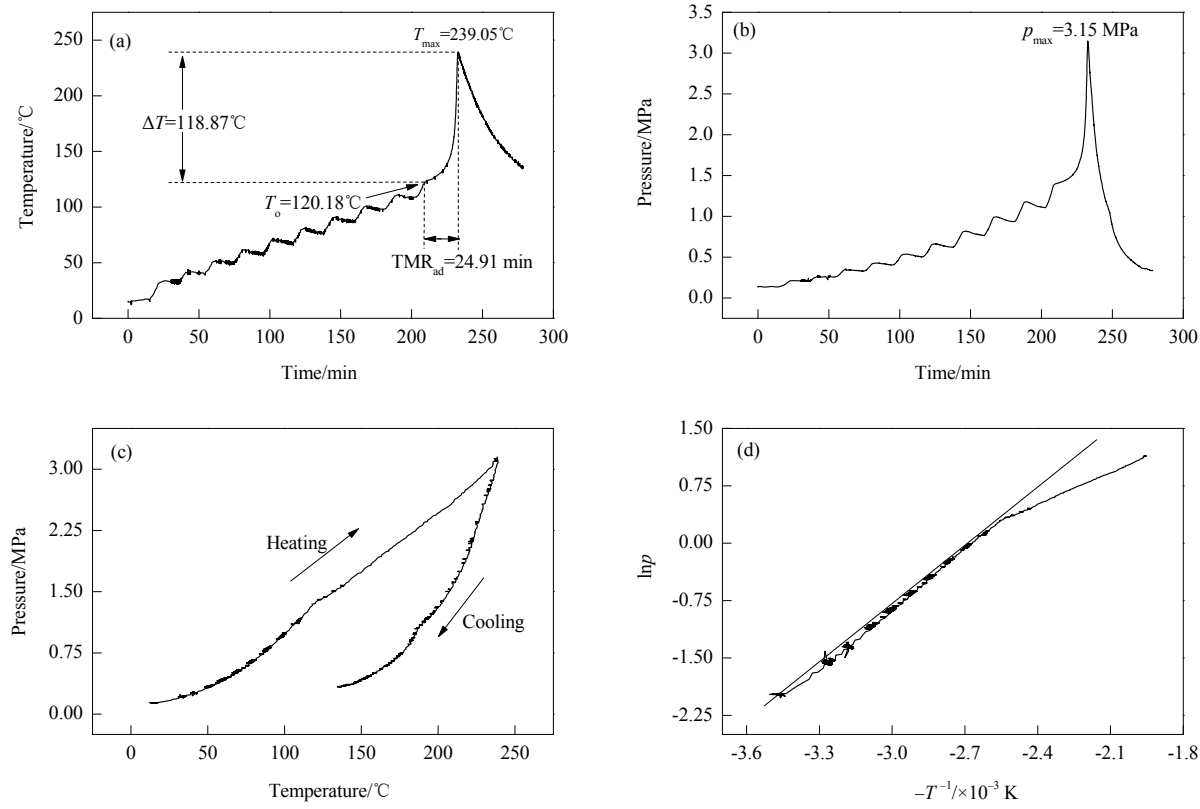


图 5 Fe_2O_3 -聚合物-50wt% EO 水溶液反应温度和压力的变化规律

Fig.5 Temperature and pressure variation of Fe_2O_3 -polymer-50wt% EO aqueous solution during reaction

3.2.3 Fe_2O_3 -保温棉-EO 体系反应绝热测试

考察纯 EO 与 Fe_2O_3 、保温棉接触的失控反应特性，实验条件见表 5。

表 5 Fe_2O_3 -保温棉-EO 反应绝热测试实验条件

Table 5 Adiabatic calorimetry experiment condition for Fe_2O_3 -insulation-EO aqueous solution reaction

Condition	Parameter
Sample	40 g EO, 0.8 g Fe_2O_3 , with insulation
Packing factor/%	40~45
Experiment type	Closed test
Initial temperature/ $^{\circ}\text{C}$	20
End temperature/ $^{\circ}\text{C}$	250
Temperature step/ $^{\circ}\text{C}$	10
Waiting time/min	15

Fe_2O_3 -保温棉-EO 体系反应温度和压力的变化规律如图 6 所示。

149.53 $^{\circ}\text{C}$ 时检测到放热，经过 20.12 min 达到失控反应最高温度 327.15 $^{\circ}\text{C}$ ，放热过程中压力没有下降，反应体系最高压力达到 6.56 MPa。在失控反应过程中，压力对数与 $-1/T$ 基本呈直线关系，EO 沸点为 10.8 $^{\circ}\text{C}$ ，在温度迅速上升的过程中，液相沸腾，反应过程中的压力完全由反应物料的蒸汽压产生，反应中无气体产生。

相比纯 EO 在约 200 $^{\circ}\text{C}$ 开始放热反应^[12]，加入 Fe_2O_3 和保温棉杂质后，起始放热温度迅速降至约 150 $^{\circ}\text{C}$ ，最

高放热温度和绝热温升有所降低， TMR_{ad} 降至 20 min，该工况下一旦发生失控反应，人员很难及时操作应对，因此应尽量避免纯 EO 在保温棉内形成绝热环境并与 Fe_2O_3 杂质接触。

绝热量热参数比较见表 6。

4 结 论

针对 EO 水溶液-铁锈/ Fe_2O_3 体系，选取几种典型工况条件进行绝热量热实验，得到如下结论：

(1) EO 水溶液与现场铁锈接触时在 20~250 $^{\circ}\text{C}$ 范围内失控反应特征不明显，体系最高温度和压力分别低于 200 $^{\circ}\text{C}$ 和 1.0 MPa。

(2) 不同浓度的 EO 水溶液与 Fe_2O_3 固体接触时，发生失控反应的起始放热温度、最高反应温度和最高压力等随 EO 浓度降低而减小，达到最大反应速率时间均低于 30 min。

(3) 30wt% EO 水溶液- Fe_2O_3 体系的起始失控温度降至 100 $^{\circ}\text{C}$ 以下；纯 EO- Fe_2O_3 体系的起始放热温度在 150 $^{\circ}\text{C}$ ，绝热温升接近 180 $^{\circ}\text{C}$ 。

(4) Fe_2O_3 -EO 水溶液体系中加入聚合物对其失控反应催化诱导作用不明显，失控反应严重程度比 Fe_2O_3 -EO 水溶液体系更低。

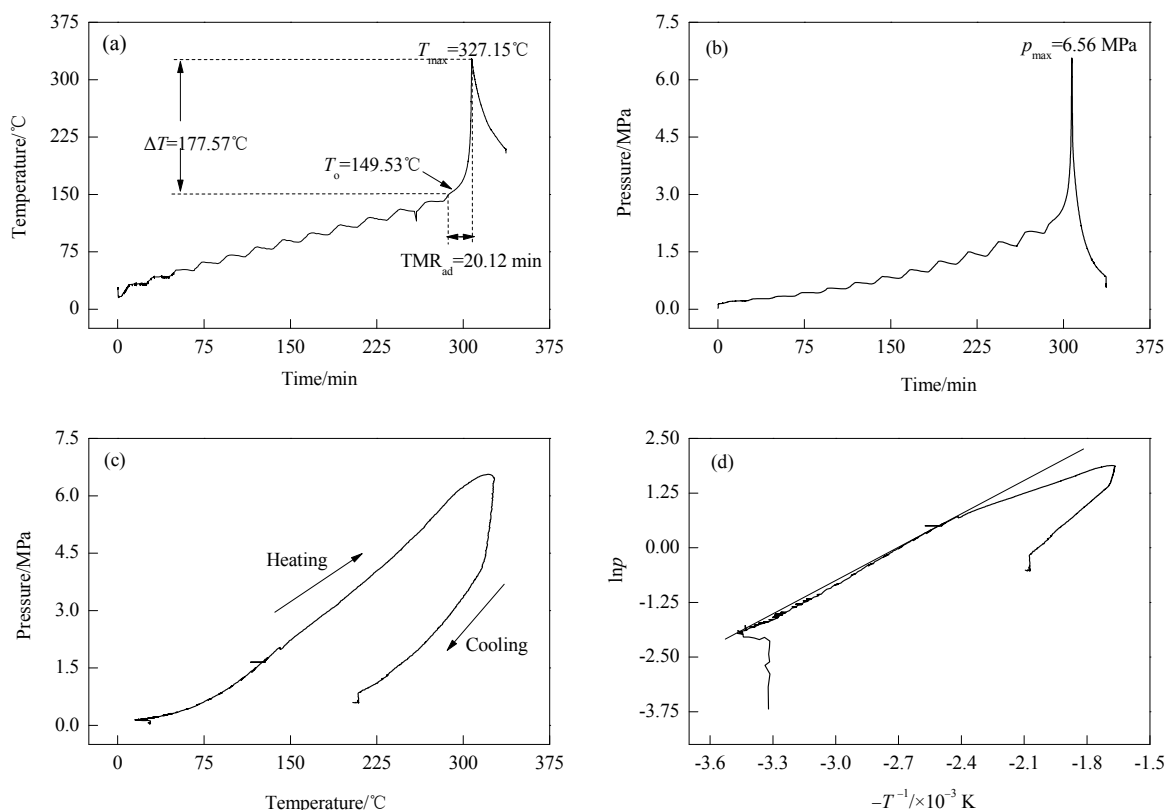
图 6 Fe_2O_3 -保温棉-EO 体系反应温度和压力的变化规律Fig.6 Temperature and pressure variation of Fe_2O_3 -insulation-EO during reaction

表 6 绝热量热参数比较

Table 6 Comparison of adiabatic calorimetry parameters at different conditions

Sample	Packing factor/%	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_{\max}/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\text{TMR}_{\text{ad}}/\text{min}$	p_{\max}/MPa	Remark
Rust-50wt% EO (aq)	10	100.72	152.33	51.61	65.26	—	—
Rust-50wt% EO (aq)	40-45	110.30	164.27	53.97	27.15	1.07	—
Fe_2O_3 -30wt% EO (aq)	40-45	99.96	218.08	118.12	18.79	2.26	Runaway
Fe_2O_3 -polymer-50wt% EO (aq)	40-45	120.18	239.05	118.87	24.91	3.15	Runaway
Fe_2O_3 -insulation-EO (aq)	40-45	149.53	327.15	177.57	20.12	6.56	Runaway

参考文献

- [1] Peschel A, Jörke A, Sundmacher K, et al. Optimal reaction concept and plant wide optimization of the ethylene oxide process [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 207: 656-674.
- [2] Lee H J, Ghanta M, Busch D H, et al. Toward a CO_2 -free ethylene oxide process: homogeneous ethylene oxide in gas-expanded liquids [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(1): 128-134.
- [3] Peschel A, Karst F, Freund H, et al. Analysis and optimal design of an ethylene oxide reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(24): 6453-6469.
- [4] Joshi A, You X, Barckholtz T A, et al. Thermal decomposition of ethylene oxide: potential energy surface, master equation analysis, and detailed kinetic modeling [J]. Journal of Physical Chemistry A, 2005, 109(35): 8016-8027.
- [5] Pekalski A A, Zevenbergen J F, Braithwaite M, et al. Explosive decomposition of ethylene oxide at elevated condition: effect of ignition energy, nitrogen dilution, and turbulence [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 118: 19-34.
- [6] Britton L G. Thermal stability and deflagration of ethylene oxide [J]. Plant/Operations Progress, 1990, 9(2): 75-86.
- [7] Bubbico R, Dore G, Mazzarotta B. Risk analysis study of road transport of ethylene oxide [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1998, 11(1): 49-54.
- [8] June R K, Dye R F. Explosive decomposition of ethylene oxide [J]. Plant/Operations Progress, 1990, 9(2): 67-74.
- [9] Freeder B G, Snee T J. Alkali-catalysed polymerization of ethylene oxide and propylene oxide-hazard evaluation using accelerating rate calorimetry [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1988, 1(3): 164-168.
- [10] Melhem G A, Gianetto A, Levin M E, et al. Kinetics of the reactions of ethylene oxide with water and ethylene glycols [J]. Process Safety Progress, 2001, 20(4): 231-246.
- [11] 王犇, 刘毛毛, 赵琳, 等. 环氧乙烷热稳定性及杂质对其影响研究 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 123-127.
- [12] Wang B, Liu M M, Zhao L, et al. On the thermal decomposition kinetics of ethylene oxide and effects of the impurities in it [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(5): 123-127.
- [12] Dinh L T T, Rogers W J, Mannan M S. Reactivity of ethylene oxide in contact with basic contaminants [J]. Thermochimica Acta, 2008, 480(1): 53-60.

- [13] Liu J R, Zhang F, Xu W, et al. Thermal reactivity of ethylene oxide in contact with contaminants: a review [J]. *Thermochimica Acta*, 2017, 652: 85–96.
- [14] Levin M E. The reactivity of ethylene oxide in contact with iron oxide fines as measured by adiabatic calorimetry [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 104(1): 227–245.
- [15] 刘静如, 孙峰, 刘文旭, 等. 环氧乙烷水溶液失控反应特性研究 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(6): 2234–2239.
- Liu J R, Sun F, Liu W X, et al. On the runaway reaction characteristics of the ethylene oxide aqueous solutions [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(6): 2234–2239.
- [16] Viera G A, Simpson L L, Ream B C. Lessons learned from the ethylene oxide explosion at Seadrift, Texas [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1993, 89(8): 66–75.
- [17] Dever J P, George K F, Hoffman W C. Ethylene oxide, Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology, 4th Edition [M]. New York: John Wiley & Sons, 1994: 915–959.
- [18] Wilcock E, Rogers R L. A review of the phi factor during runaway conditions [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1997, 10(5/6): 289–302.