

# 金属卟啉催化丙烯环氧化的助剂与工艺研究

祁连山,王涛,魏永梅,田恒水\*  
(华东理工大学化工学院,上海200237)

**摘要:**研究了多种金属络合剂助剂对金属卟啉催化丙烯环氧化反应的影响以及相关反应条件筛选。结果表明,羟基对反应活性的影响明显,磷酸三丁酯为较优的助剂。考察了催化剂种类、催化剂浓度、反应温度、氧气进气速率、烯醛摩尔比和溶剂量对反应结果的影响。结果表明,以 $\text{Fe}(p\text{-CH}_3)\text{TPPCL}$ 为催化剂,在 $\text{Fe}(p\text{-CH}_3)\text{TPPCL}$ 浓度为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ 、进气速率为 $0.1 \text{ L/min}$ 、丙烯用量为 $10 \text{ L}$ 、烯醛摩尔比为 $1:1.15$ 、反应温度为 $100^\circ\text{C}$ 、溶剂用量为 $210 \text{ mL}$ 、反应时间为 $0.5 \text{ h}$ 的条件下,丙烯转化率为 $26.7\%$ ,环氧丙烷收率为 $25.6\%$ ,选择性为 $95.9\%$ 。

**关键词:**金属卟啉;环氧丙烷;金属络合剂;仿生催化;环氧化

**中图分类号:**TQ231

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2020)04-0193-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.04.041

## Research on auxiliaries and process of propylene epoxidation catalyzed by metalloporphyrin

QI Lian-shan, WANG Tao, WEI Yong-mei, TIAN Heng-shui\*

(School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The effects of several auxiliaries on epoxidation of propylene over metalloporphyrin are investigated, and related reaction conditions are screened out. It is indicated that hydroxyl group has a significant effect on the reactivity and tributyl phosphate is a better auxiliary. Influences of catalyst type, catalyst concentration, reaction temperature, oxygen intake rate, molar ratio of aldehyde to propylene and solvent amount are investigated, indicating the appropriate reaction conditions as follows:  $\text{Fe}(p\text{-CH}_3)\text{TPPCL}$  is used as catalyst with a concentration of  $1.2 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , oxygen intake rate is  $0.1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , the dosage of propylene is  $10 \text{ L}$ ,  $n(\text{propylene}) : n(\text{aldehyde}) = 1 : 1.15$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $210 \text{ mL}$  solvent is used and the reaction spends  $0.5 \text{ h}$ . Under these conditions, the conversion rate of propylene can reach  $26.7\%$ , the yield of propylene oxide can reach  $25.6\%$  with selectivity of  $95.9\%$ .

**Key words:** metalloporphyrin; propylene oxide; metal complexing agent; biomimetic catalysis; epoxidation

环氧丙烷(PO)作为重要的有机化工中间体,广泛用于生产聚醚多元醇、树脂、溶剂以及表面活性剂<sup>[1]</sup>。目前国内生产工艺主要有氯醇法、共氧化法以及过氧化氢法<sup>[2-4]</sup>。共氧化法存在工艺路线长以及经济效益依赖于联产品的价格的问题;过氧化氢法存在工艺尚不完善以及高浓度双氧水的储存问题;而氯醇法工艺产生大量废水废渣,对设备腐蚀严重,随着国家相关环保规划的出台,会加速氯醇法工艺的淘汰,PO的市场缺口将进一步扩大<sup>[4-5]</sup>。因此,开发新的绿色环保工艺成为发展的必然趋势。

近年来有学者通过合成特定催化剂<sup>[6-8]</sup>,将氢气与氧气在线合成双氧水,再与丙烯进行环氧化反应,但是该方法的各项指标都偏低,仍处于实验研究阶段。而金属卟啉作为一种仿生催化剂,在温和条件下具有高活性以及高选择性,现已应用于长链烯

烃以及环烯烃的环氧化中<sup>[9-10]</sup>。纪红兵等<sup>[11]</sup>以四苯基锰卟啉为催化剂,对工艺条件进行优化,丙烯转化率可以达到 $38\%$ ,PO选择性为 $80\%$ ,但是反应机理尚不明确。笔者在课题组研究成果的基础上<sup>[12-14]</sup>,对反应机理进行了研究,结果表明,金属卟啉主要作为引发剂而不是环氧化过程的催化剂参与反应,并且金属卟啉解离后的金属离子对反应存在一定的影响<sup>[15]</sup>。因此,以铁系金属卟啉为催化剂,从反应助剂以及后续工艺两方面对环氧化反应进行研究。

## 1 实验部分

### 1.1 实验仪器和试剂

Nicolet 6700型红外光谱仪;Varian CARY 100型紫外-可见分光光度计;安捷伦 6980N 气相色谱

收稿日期:2019-12-28;修回日期:2020-02-04

作者简介:祁连山(1993-),男,博士研究生,研究方向为绿色化工,lsqi1993@163.com;田恒水(1958-),男,硕士,教授,研究方向为绿色化工,通讯联系人,hstian@ecust.edu.cn。

仪;CJ-0.5 型反应釜以及相配套的控制仪,威海新元化工机械有限公司生产。

实验过程中所用试剂均为市面所售分析纯试剂,吡咯在使用前重新蒸馏提纯,合成的卟啉经过柱色谱提纯。

### 1.2 催化剂制备与表征

根据文献[16-17]中所述的方法合成了四苯基卟啉、四-4-甲基苯基卟啉、四-4-甲氧基苯基卟啉、四-4-硝基苯基卟啉、四-4-氟苯基卟啉以及四-4-氯苯基卟啉,同时制备了相应的铁卟啉,并利用红外光谱仪和紫外-可见分光光度计对其进行表征,结果表征值和文献参考值基本一致。

### 1.3 丙烯环氧化过程

在 500 mL 高压釜中加入一定量的溶剂、金属卟啉、丙烯醛以及相应的助剂,密封反应釜并开始搅拌。通入一定量的丙烯,加热升温到设定温度,按照设定的进气速率通入氧气,在指定温度下反应到设定的反应终点,通入过冷液对反应体系进行降温,待温度降到 10℃ 左右,缓慢泄压,打开釜盖取样。

### 1.4 产品分析

样品主要为乙酸乙酯、环氧丙烷、丙烯醛、丙烯酸和乙酸。利用安捷伦 6890N 型气相色谱仪进行分析,所用色谱柱型号为 FFAP,内标物为正丁醇。

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应助剂

金属卟啉解离后的金属离子会导致环氧丙烷收率下降以及丙烯醛转化率升高<sup>[15,18-19]</sup>。因此,采用常见的金属离子络合剂作为反应助剂来进行研究<sup>[20]</sup>,反应结果如表 1 所示。

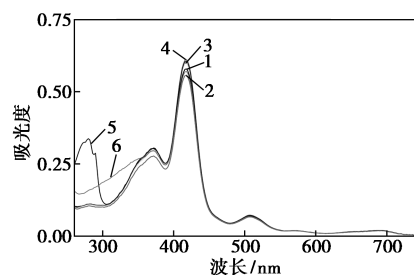
表 1 反应助剂种类对丙烯环氧化反应的影响

反应助剂	反应时间/h	丙烯转化率/%	PO 收率/%	PO 选择性/%	丙烯醛转化率/%	丙烯酸选择性/%
空白	1.0	40.6	30.5	75.1	80.5	49.2
磷酸	1.0	—	—	—	—	—
磷酸二丁酯	1.0	31.0	20.5	66.1	68.4	52.1
磷酸三丁酯	0.5	19.4	16.4	86.3	45.1	47.3
	1.0	43.6	32.3	74.0	79.5	49.8
吡啶乙酸	0.5	18.1	14.9	82.3	47.4	45.0
	1.0	43.4	32.0	73.7	79.2	49.1
8-羟基喹啉	1.0	40.5	27.3	67.4	77.7	50.7

注:Fe(*p*-CH<sub>3</sub>)TPPCl 浓度为 1.6×10<sup>-5</sup> mol/L, *n*(助剂):*n*(金属卟啉)=6:1,乙酸乙酯用量为 200 mL,氧气进气速率为 0.1 L/min,搅拌速率为 500 r/min,反应温度为 100℃。

由表 1 可以看出,反应助剂对于反应活性的影响较明显,含有羟基的反应助剂对反应活性都有一定的抑制作用。特别地,对于磷酸系助剂,磷酸三丁酯的活性最高,磷酸二丁酯其次,含有 3 个羟基的磷酸在 1 h 内基本没有反应发生。而对于磷酸三丁酯以及吡啶乙酸,反应活性有所提高,但是并不明显,并且在 PO 收率出现小幅上升时,丙烯醛的转化率基本保持不变,说明金属离子络合剂确实将金属卟啉解离的金属离子络合,减少了部分丙烯醛的自氧化消耗。

反应助剂羟基的引入使得反应活性出现下降,推测羟基与金属卟啉有一定的弱结合,使得金属卟啉与醛引发反应的诱导期变长,通过紫外扫描考察助剂与金属卟啉之间的弱结合作用,结果如图 1 所示。



1—空白;2—磷酸三丁酯;3—磷酸二丁酯;4—磷酸;  
5—吡啶乙酸;6—8-羟基喹啉

图 1 反应助剂与金属卟啉溶液的紫外谱图

由图 1 可以看出,所有的助剂均与金属卟啉发生了弱结合作用,使得金属卟啉引发反应的诱导期出现了较明显的差异。

上述数据表明,反应助剂的作用主要体现在与金属卟啉的弱结合导致诱导期出现差异以及络合金属离子减少丙烯醛的转化率两方面,后续采用磷酸三丁酯作为反应助剂来对工艺条件进行筛选。

### 2.2 工艺条件筛选

#### 2.2.1 催化剂种类对反应的影响

在金属卟啉浓度为 1.6×10<sup>-5</sup> mol/L、*n*(磷酸三丁酯):*n*(金属卟啉)=6:1、溶剂乙酸乙酯用量为 200 mL(液相)、丙烯用量为 10 L(气相)、*n*(丙烯):*n*(丙烯醛)=1:1、转速为 500 r/min、反应温度为 100℃、反应时间为 0.5 h 以及氧气进气速率为 0.1 L/min 的条件下,考察铁系卟啉不同取代基对反应活性的影响,主要分析对比了以下 6 种铁卟啉:四-4-甲基苯基铁卟啉、四苯基铁卟啉、四-4-硝基苯基铁卟啉、四-4-氟苯基铁卟啉、四-4-氯苯基铁

卟啉以及四-4-甲氧基苯基铁卟啉,反应结果如表2所示。

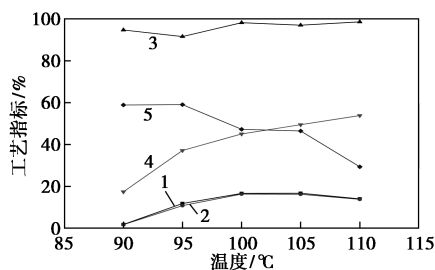
表2 催化剂种类对环氧化反应的影响

催化剂种类	丙烯 转化率/ %	PO 收率/ %	PO 选择性/ %	丙烯醛 转化率/ %	丙烯酸 选择性/ %
Fe( <i>p</i> -CH <sub>3</sub> )TPPCL	19.4	16.4	84.5	45.1	47.3
FeTPPCL	17.0	14.2	83.5	45.6	43.8
Fe( <i>p</i> -NO <sub>2</sub> )TPPCL	17.7	15.0	84.7	44.7	44.8
Fe( <i>p</i> -F)TPPCL	15.9	13.3	83.6	45.7	41.7
Fe( <i>p</i> -Cl)TPPCL	17.6	14.8	84.1	47.6	42.2
Fe( <i>p</i> -OCH <sub>3</sub> )TPPCL	16.0	13.3	83.1	47.6	41.2

由表2可以看出,不同取代基的铁卟啉对丙烯环氧化反应的影响并不明显,在吸电子以及供电子取代基之间也没有明显的规律。根据之前的研究<sup>[7]</sup>,金属卟啉在丙烯环氧化反应中主要起引发剂的作用,而铁系卟啉在该体系中引发时间较短(在5 min左右),使得取代基的不同对引发反应的诱导期影响并不明显,此外,取代基结构不同也导致金属卟啉结构发生变化,使其规律并不明显。综合考虑,选择四-4-甲基苯基铁卟啉作为体系催化剂。

### 2.2.2 温度对反应的影响

在Fe(*p*-CH<sub>3</sub>)TPPCL浓度为 $1.6 \times 10^{-5}$  mol/L、*n*(磷酸三丁酯):*n*(金属卟啉)=6:1、溶剂乙酸乙酯用量为200 mL、丙烯用量为10 L、*n*(丙烯):*n*(丙烯醛)=1:1、转速为500 r/min、反应时间为0.5 h以及氧气进气速率为0.1 L/min的条件下,考察反应温度对于丙烯环氧化反应的影响,结果如图2所示。



1—丙烯转化率;2—PO收率;3—PO选择性;  
4—丙烯醛转化率;5—丙烯酸选择性

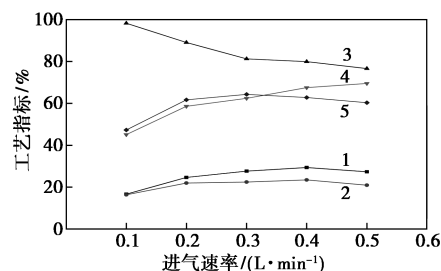
图2 温度对丙烯环氧化反应的影响

由图2可以看出,温度对丙烯环氧化的影响明显,在100°C以内的较低温区,随着温度的提升,反应速率增加明显,丙烯转化率、PO收率以及丙烯醛的转化率增加明显。但是在100°C以后,随着温度

的升高,PO的转化率出现小幅下降。原因在于体系活性中间体为过氧酰基,存在醛的自氧化以及丙烯环氧化两条反应路径,前者的自由能垒较低,反应偏向于醛的自氧化,以及高温环境下导致PO分解以及其他聚合副反应,使得随着温度的提升,PO收率以及丙烯酸选择性出现下降。综合考虑,反应温度在100°C时较为合适。

### 2.2.3 进气速率对反应的影响

在Fe(*p*-CH<sub>3</sub>)TPPCL浓度为 $1.6 \times 10^{-5}$  mol/L、*n*(磷酸三丁酯):*n*(金属卟啉)=6:1、溶剂乙酸乙酯用量为200 mL、丙烯用量为10 L、*n*(丙烯):*n*(丙烯醛)=1:1、转速为500 r/min、反应时间为0.5 h以及反应温度为100°C的条件下,考察氧气的进气速率对环氧化反应的影响,结果如图3所示。



1—丙烯转化率;2—PO收率;3—PO选择性;  
4—丙烯醛转化率;5—丙烯酸选择性

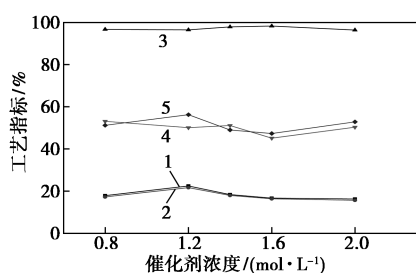
图3 进气速率对丙烯环氧化反应的影响

由图3可以看出,氧气进气速率对PO的收率以及PO的选择性影响明显。由于反应体系的活性中间体为过氧酰基,随着氧气进气速率的提升,体系内的过氧酰基以及过氧酸的浓度变高,使得主副反应的反应速率均有提升,由于醛的自氧化过程自由能垒较低,反应速率相对更高,使得PO的收率提升并不明显,但是PO在过氧酰基以及过氧酸的浓度提升时,副反应加剧,使得PO选择性出现大幅下降。综合考虑,氧气的进气速率为0.1 L/min时较为合适。

### 2.2.4 催化剂浓度对反应的影响

在*n*(磷酸三丁酯):*n*(金属卟啉)=6:1、溶剂乙酸乙酯用量为200 mL、丙烯用量为10 L、*n*(丙烯):*n*(丙烯醛)=1:1、转速为500 r/min、反应时间为0.5 h、反应温度为100°C以及氧气进气速率为0.1 L/min的条件下,考察金属卟啉的浓度对丙烯环氧化反应的影响,结果如图4所示。

由图4可以看出,在实验浓度范围内,催化剂浓度对于丙烯转化率、PO收率以及PO选择性影响并



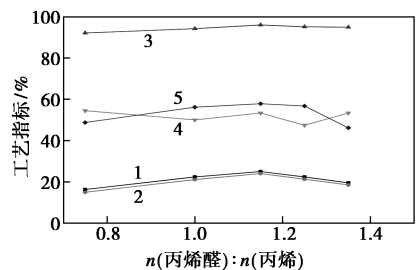
1—丙烯转化率;2—PO 收率;3—PO 选择性;  
4—丙烯醛转化率;5—丙烯酸选择性

图 4 催化剂浓度对丙烯环氧化反应的影响

不明显,对丙烯醛的转化率以及丙烯酸的选择性有着较明显的影响,但是规律并不明显。在低浓度区时,提高催化剂浓度,使得金属卟啉引发反应的速率提升,体系内富集的氧气较少,使得丙烯转化率和 PO 收率出现小幅上升并伴随着较低的丙烯醛转化率;在高浓度区时,随着催化剂浓度提高,引发时间也出现了一定的延长,原因在于金属卟啉在引发反应后与活性中间体之间仍存在弱结合,导致引发时间变慢,特别地,对于催化剂浓度高到一定程度后,反应甚至不能发生。并且在金属卟啉解离后产生的金属离子的浓度越高对于过氧酸的分解的影响也越明显,使得丙烯醛转化率以及丙烯酸选择性有所提升。综合考虑,金属卟啉较优浓度为  $1.2 \times 10^{-5}$  mol/L。

### 2.2.5 丙烯醛用量对反应的影响

在  $\text{Fe}(p\text{-CH}_3)\text{TPPCl}$  浓度为  $1.2 \times 10^{-5}$  mol/L、 $n(\text{磷酸三丁酯}) : n(\text{金属卟啉}) = 6 : 1$ 、溶剂乙酸乙酯用量为 200 mL、丙烯用量为 10 L、转速为 500 r/min、反应时间为 0.5 h、反应温度为  $100^\circ\text{C}$  以及氧气进气速率为 0.1 L/min 的条件下,考察丙烯醛用量对环氧化反应的影响,结果如图 5 所示。



1—丙烯转化率;2—PO 收率;3—PO 选择性;  
4—丙烯醛转化率;5—丙烯酸选择性

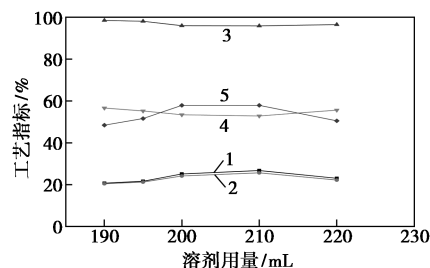
图 5 丙烯醛与丙烯摩尔比对丙烯环氧化反应的影响

由图 5 可以看出,丙烯醛用量对于环氧化反应

有一定的影响。在提升丙烯醛的用量时,丙烯转化率和 PO 收率均有一定的提升,原因在于丙烯醛浓度提升,使得体系内中间体的浓度升高,主反应的反应速率有小幅提升;但是当继续提升丙烯醛的用量时,丙烯转化率和 PO 收率均有一定的下降,原因在于当活性中间体浓度提升到一定层次时,使得体系内的过氧酸浓度升高,导致反应偏向于副反应。对于丙烯醛转化率以及丙烯酸的选择性,由于同时受到环氧化、自氧化以及聚合等反应的影响,使其并没有明显的规律。综合考虑,较适宜的丙烯醛与丙烯的摩尔比为 1.15 : 1。

### 2.2.6 溶剂用量对反应的影响

在  $\text{Fe}(p\text{-CH}_3)\text{TPPCl}$  浓度为  $1.2 \times 10^{-5}$  mol/L、 $n(\text{磷酸三丁酯}) : n(\text{金属卟啉}) = 6 : 1$ 、丙烯用量为 10 L、 $n(\text{丙烯}) : n(\text{丙烯醛}) = 1 : 1.15$ 、转速为 500 r/min、反应时间为 0.5 h、反应温度为  $100^\circ\text{C}$  以及氧气进气速率为 0.1 L/min 的条件下,考察溶剂乙酸乙酯的用量对环氧化反应的影响,结果如图 6 所示。



1—丙烯转化率;2—PO 收率;3—PO 选择性;  
4—丙烯醛转化率;5—丙烯酸选择性

图 6 溶剂用量对丙烯环氧化反应的影响

由图 6 可以看出,溶剂的用量对环氧化反应有一定的影响,但是影响并不明显。在溶剂用量较少时,增加溶剂用量,使得丙烯在溶剂中的含量提升,可以小幅提高丙烯转化率以及 PO 收率;当溶剂用量继续提升时,金属卟啉的质量一定,导致整体浓度降低,从而影响反应活性。综合考虑,较适宜的溶剂用量为 210 mL。

## 3 结论

在金属卟啉仿生催化丙烯环氧化的助剂与工艺研究中,含有羟基的金属离子络合剂对反应活性影响明显,较合适的助剂为磷酸三丁酯;反应温度以及氧气进气速率对环氧化反应影响明显,其他工艺条件对主反应影响不明显,而对丙烯醛的转化率影响较明显。因此,反应的适宜条件为:催化剂  $\text{Fe}(p\text{-}$

CH<sub>3</sub>) TPPCl 的浓度为  $1.2 \times 10^{-5}$  mol/L、反应温度为 100℃、进气速率为 0.1 L/min、丙烯用量为 10 L、烯醛摩尔比为 1:1.15、溶剂用量为 210 mL、反应时间为 0.5 h。

### 参考文献

- [1] Nijhuis T A, Makkee M, Moulijn J A, *et al.* The production of propene oxide: Catalytic processes and recent developments [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2006, 45 (10): 3447-3459.
- [2] Russo V, Tesser R, Santacesaria E, *et al.* Chemical and technical aspects of propene oxide production via hydrogen peroxide (HPPO process) [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(3): 1168-1178.
- [3] 崔小明. 国内外环氧丙烷的供需现状及发展前景分析 [J]. *石油化工技术与经济*, 2016, 32(1): 16-22, 57.
- [4] 胡立峰, 陈彬, 王凤. 我国环氧丙烷生产工艺现状分析及进展 [J]. *山东化工*, 2018, 47(4): 39-42.
- [5] 李春耕, 凌世明. 环氧丙烷生产工艺研究 [J]. *中国氯碱*, 2019, (5): 23-28.
- [6] Chowdhury B, Bravo-Suárez J J, Daté M, *et al.* Trimethylamine as a gas-phase promoter: Highly efficient epoxidation of propylene over supported gold catalysts [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2006, 45(3): 412-415.
- [7] Du M, Huang J, Sun D, *et al.* Propylene epoxidation over biogenic Au/TS-1 catalysts by Cinnamomum camphora extract in the presence of H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> [J]. *Applied Surface Science*, Elsevier B. V., 2016, 366: 292-298.
- [8] Hikazudani S, Mochida T, Yano K, *et al.* Mono-atomically dispersed Pd on TiO<sub>2</sub> as a catalyst for epoxidation of light olefins at low temperatures in the presence of H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> [J]. *Catalysis Communications*, 2011, 12(15): 1396-1400.
- [9] Sun C, Hu B, Liu Z. Efficient and ecofriendly options for the chemoselective oxidation of alkenes using manganese porphyrin and dioxigenin [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 232: 96-103.
- [10] 周贤太, 纪红兵, 裴丽霞, 等. 金属卟啉催化剂应用于均相氧化反应的研究进展 [J]. *有机化学*, 2007, (9): 1039-1049.
- [11] Li Y, Zhou X, Chen S, *et al.* Direct aerobic liquid phase epoxidation of propylene catalyzed by Mn (III) porphyrin under mild conditions: Evidence for the existence of both peroxide and Mn (IV)-oxo species from in situ characterizations [J]. *RSC Adv*, Royal Society of Chemistry, 2015, 5(38): 30014-30020.
- [12] 赵付强, 田恒水. 金属卟啉仿生催化制备环氧丙烷 [J]. *化工进展*, 2016, 35(2): 519-523.
- [13] 王正磊, 周同心, 王涛, 等. 双核金属卟啉催化丙烯制备环氧丙烷的研究 [J]. *现代化工*, 2017, 37(9): 135-138.
- [14] 张晶花, 祁连山, 田恒水. 锰卟啉仿生催化制备 1,2-环氧丁烷 [J]. *现代化工*, 2019, 39(12): 105-110.
- [15] Qi L, Wang T, Wei Y, *et al.* Mechanism of propylene epoxidation via O<sub>2</sub> with co-oxidation of aldehydes by metalloporphyrins [J]. *European Journal of Organic Chemistry*, 2018, 2018 (46): 6557-6565.
- [16] Sun Z, She Y, Zhong R. Synthesis of p-substituted tetraphenylporphyrins and corresponding ferric complexes with mixed-solvents method [J]. *Frontiers of Chemical Engineering in China*, 2009, 3(4): 457-461.
- [17] Adleb A D, Longo F R, Finarelli J D, *et al.* A simplified synthesis for meso-tetraphenylporphine [J]. *Journal of Organic Chemistry*, 1967, 32(2): 476.
- [18] Bawn C E H, Hobin T P, Raphael L. The metal-salt-catalyzed oxidation of acetaldehyde [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1956, 237 (1210): 313-324.
- [19] Bawn C E H, Williamson J B. The oxidation of acetaldehyde in solution. Part II.—Kinetics and mechanism of the formation of peracetic acid [J]. *Trans Faraday Soc*, 1951, 47: 735-743.
- [20] 王霁, 杨守生. 三种液体稳定剂对过氧乙酸稳定效果的实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2010, 6(3): 42-46. ■

### 霍尼韦尔推出创新两相液体冷却技术

霍尼韦尔近日宣布推出创新液体冷却技术 Solstice® E-Cooling, 主要用于高性能电子设备。与传统的空冷和水冷方法相比, 该新型制冷剂效率更高, 并降低了类似使用高性能服务器的数据中心等应用的运营成本。

Solstice® E-Cooling 是霍尼韦尔革命性新一代低全球变暖潜值 (GWP: Global Warming Potential) 制冷剂技术系列的新锐成员, 采用两相液态冷却工艺冷却电子设备的同时降低对环境的影响。新技术现已上市, 并已在佛罗里达州奥兰多市的美国制冷展 (AHR) 上首次亮相。

与单相液冷系统 (液体在整个制冷过程中始终保持液态) 相比, Solstice® E-Cooling 的两相液冷工艺更节能, 冷却

效果更均匀, 性能更好, 且所需泵功率更低。同时, Solstice® E-Cooling 也是一种绝缘流体解决方案, 不会因接触液体而短路受损。

霍尼韦尔在开发领先的制冷剂 (包括 R-410A、Solstice® yf, Solstice® ze 和 Solstice® zd) 方面具有悠久的历史。Solstice® E-Cooling 具有超低全球变暖潜值和零臭氧消耗潜能, 可有效提高制冷性能, 同时最大限度降低对环境的影响。霍尼韦尔旗下制冷剂产品组合均已实现了商业化, 两相液态冷却的可行性也已得到实践证明, 且 Solstice® E-Cooling 等产品在全球范围内的广泛应用也充分证明了其卓越性能。(凌颖)