



# 乙烯裂解炉辐射段技术的研究进展及工业应用

王国清\*, 周先锋, 石莹, 李蔚, 张永刚, 周丛, 杜志国

中国石油化工股份有限公司北京化工研究院, 北京 100013

\*通讯作者, E-mail: wanggq.bjhy@sinopec.com

收稿日期: 2014-06-24; 接受日期: 2014-08-01; 网络版发表日期: 2014-10-24

doi: 10.1360/N032014-00181

**摘要** 辐射段是乙烯装置裂解炉的关键组成部分, 烃类原料的裂解反应在辐射段炉管内发生, 如何实现最佳的裂解反应以及获得适宜的裂解产物分布和较高的产品经济价值是研究人员关注的重点. 本文介绍了辐射段炉管内裂解反应和辐射段传热的研究进展, 综述了热裂解反应动力学模型和辐射段传热及燃烧模型, 阐述了热裂解反应和辐射段传热的影响因素, 并介绍了其在蒸汽裂解炉上的应用.

**关键词**  
裂解炉  
辐射段  
炉管构型  
原料优化  
强化传热  
快速烧焦

## 1 引言

乙烯是重要的化工原料, 被称为“石化行业之母”. 目前, 世界上约 98% 的乙烯通过管式炉蒸汽裂解法生产得到. 裂解是烃类原料在高温条件下, 主要发生碳链断裂或脱氢反应(或自由基反应), 生成低碳烯烃及其他产物的过程. 经过几十年的发展, 管式炉蒸汽裂解技术具备了技术成熟、结构简单、运转稳定性好以及烯烃收率高等优点. 即使如此, 研究人员对管式炉蒸汽裂解技术的开发和革新从未间断过, 一直向着提高低碳烯烃收率、降低能耗、降低成本和适应市场变化的方向发展.

裂解炉是工业乙烯生产装置的核心单元, 由辐射段、对流段和急冷锅炉组成, 其中, 辐射段由炉管内的烃类裂解反应区域和炉管外的燃料气燃烧放热区域构成. 在辐射段炉管内, 烃类原料混合物快速吸收热量发生裂解反应, 生成以低分子量为主的烯烃混合物. 辐射段炉管构型、操作条件和原料特性等均会影响炉管内裂解反应的发生和改变产物分布. 辐射段炉管外主要有炉膛和供热系统组成, 供热系统主要是通过燃料气的燃烧, 将产生的热量通过炉管

传递到管内的烃类物质<sup>[1-3]</sup>. 辐射段炉管外的外部供热和炉管本身的传热效率, 也同样影响着炉管内的裂解反应和产物分布. 本文结合近年来的研究工作, 对辐射段炉管内裂解反应和辐射段传热两方面的相关研究进行简要综述, 介绍了热裂解反应动力学模型、辐射段传热和燃烧模型的研究, 阐述了热裂解反应和辐射段传热的影响因素, 以及上述研究成果在蒸汽裂解炉中的应用.

## 2 裂解炉辐射段的研究进展

### 2.1 辐射段模型研究

作为裂解炉的关键部分, 辐射段是研究人员关注的焦点. 辐射段技术的相关研究从实验和模型两方面进行, 如辐射段炉管的实验研究、裂解反应动力学模型的研究、辐射段炉管的传热模型研究和管外的燃烧供热模拟研究等, 而且这几方面的研究相互支持, 构成了裂解炉辐射段技术研究的整体.

为了有效地研究辐射段炉管内的烃类裂解反应, 研究人员需要在实验室建立可靠的实验装置模拟工

业裂解炉,相继建立了微反、单管、模拟炉、中试等多种模拟裂解装置.由于裂解反应本身的复杂性和工业裂解炉辐射段炉管构型的多样性(具有不同的管径、程数和长短等),以及为了满足模拟不同原料和不同产物分布的需求,模拟实验装置结构应可以改变以达到不同停留时间、温度等多种工业参数下的模拟,显然,微反和单管装置不能满足这些模拟要求;中试装置因原料消耗过大,也不适宜于实验室研究.中国石化北京化工研究院研究人员基于工业裂解炉的工艺条件,在国内最早开发了一种模拟热裂解装置,能够实现炉管内混合气体的平推流状态,并实现与实际生产装置相同的温度分布、停留时间、压力分布等条件下的模拟,进而获得与实际生产装置相近的产物分布.以此装置为基础,可以研究不同裂解原料的裂解性能,优化企业原料结构;研究裂解工艺条件对裂解产物组分分布的影响,建立反应动力学模型,用于设计开发、改造乙烯裂解炉;建立油品性质、工艺条件与裂解产物之间的收率预测模型,为企业裂解炉优化操作条件提供技术支撑.

烃类热裂解反应动力学模型是裂解炉辐射段的核心技术,主要研究裂解产物组分分布与原料和工艺参数之间的关系,从而用以指导生产操作、裂解炉的设计和开发.烃类热裂解反应动力学模型研究最早起步于20世纪30年代,烃类热裂解反应动力学模型陆续被开发<sup>[4]</sup>,如Technip公司的SPYRO、Lummus公司的PYPS等.按建立方法分类,烃类蒸汽裂解反应动力学模型可分为经验模型、半经验半机理模型、机理模型和人工智能模型,目前经验模型应用较少,其他3种应用较多.半经验半机理模型是以裂解理论和机理为基础,但模型中部分重要的参数则通过实验数据回归拟合得到,而不是从理论推导得到,受所涵盖的实验数据条件范围所限,外推时需慎重,如Lummus公司的PYPS模型.机理模型是以Rice理论为基础,根据原料组成,按自由基连锁反应机理建立的一种理论模型,该模型依据不同原料的自由基反应网络途径以及相应动力学参数的计算,反应网络大,求解时间长,而且随着原料组分的数量增加反应网络变得庞大,因此,计算时间和精度受限于原料的种类和组成,如Technip公司的SPYRO模型.人工智能模型是以人工神经网络(ANN)<sup>[5,6]</sup>为工具,对裂解实验数据进行相应的处理,经过训练和学

习,可在较短时间内计算出产品收率,中国石化北京化工研究院王国清和杜志国等<sup>[5,6]</sup>应用BP神经网络对加氢尾油和石脑油的热裂解产物收率进行预测,发现在保证基础训练数据的准确性和合理选取时,BP神经网络可有效预测裂解产物收率,而且时间较短.另外,该研究组基于大量不同原料的模拟热裂解装置和工业裂解炉的实验数据,建立了烃类热裂解反应动力学模型,开发了BCM软件,该软件包含了线性经验模型、非线性经验模型以及机理模型等模块,可对辐射段烃类热裂解反应过程进行模拟计算,各模块对烃类热裂解过程的模拟具有不同的特点(表1).因其较好的预测效果,该模型已经应用于辐射段工艺设计、裂解炉工艺条件优选、裂解原料优选以及裂解装置经济效益评价等领域.

辐射段炉管内的烃类裂解反应对温度十分敏感,为了获得适宜的温度分布,需要准确模拟辐射段的传热情况.辐射段的传热情况主要包括管内对流传热、管壁的热传导和管外的辐射传热.管内流体的对流传热,由传热系数和传热面积控制,热阻主要集中在管内的焦层和边界层,而传热面积主要由炉管构型决定<sup>[7,8]</sup>;基于热传导理论,管壁的热传导主要受管壁材质影响;在辐射段的传热研究中,最复杂的是管外的辐射传热,受到炉膛内的燃料气流动、燃烧、烟气流动、辐射传热等多种因素的影响<sup>[9,10]</sup>.以上3种传热方式通过共同作用影响着辐射段的传热效果.辐射段传热模型的发展,经历了从早期假设流体在流动和传热过程中径向温度和速度分布一致的一维模型,发展到考虑径向温度和速度分布不均一性的二维模型,到现在基于计算机模拟的多维模型.另外,辐射段的传热与管内的裂解反应也存在相互影响和耦合.近年来计算机模拟技术的发展,为揭示这样复杂的过程提供了技术支持,通过计算流体力学模拟,使辐射段传热模型与管内裂解反应模型相结合,可有效地模拟裂解工艺过程.

燃烧模型主要是模拟燃料的燃烧过程,解决燃

表1 BCM软件中各模块的特点

	线性经验模型	非线性经验模型	机理模型
运算速度	非常快	非常快	慢
预测精度	较差	较准确	较准确
适用原料范围	窄	较宽	较宽
工艺条件范围	窄	较宽	较宽
模型适用复杂度	简单	简单	复杂

料的时均燃烧速率,其目的是进一步求出时均的组分质量分率、密度及温度分布.在裂解炉的炉膛内,燃料气的燃烧过程属于燃料气和空气的非预混状态和快速燃烧过程.燃烧包含物理和化学过程,反应机理复杂,其反应速率可能受物理过程速率的控制,也可能受化学反应过程速率的控制,或者受两种过程速率的共同控制.在计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟计算过程中,目前能较好地模拟裂解炉燃料燃烧的燃烧模型有两种,即有限速率/涡耗散模型和非预混燃烧模型.有限速率/涡耗散模型<sup>[11, 12]</sup>是有限速率模型和涡耗散模型的结合体,有限反应速率的动力学参数根据 Arrhenius 公式确定,涡耗散模型表示整体反应速率由流体湍流流动混合控制;非预混燃烧模型减少了热化学参数的计算,将燃烧简化为一个混合问题,使用机率密度函数(probability density function)<sup>[11, 13]</sup>方法模拟燃料气高速流动中的燃烧过程,该方法主要用混合分数 $f$ 表示,在燃烧区域任一位置中,模型方程主要求解 $f$ .图 1<sup>[14]</sup>是两种燃烧模型模拟计算燃烧器燃气入口面的烟气温度场,图 1(a, b)分别代表有限速率/涡耗散燃烧模型和非预混燃烧模型的模拟计算结果.两种燃烧模型模拟的烟气温度场分布存在差别,有限速率/涡耗散燃烧模型计算烟气温度场的温度范围是 298.15~1721.94 K,底部燃烧器周围的低温区域较大,而非预混燃烧模型计算的温度范围是 298.15~2053.64 K,底部燃烧器周围低温区域小,且非预混燃烧模型的模拟计算结果显示在辐射段底部会形成高温区域,

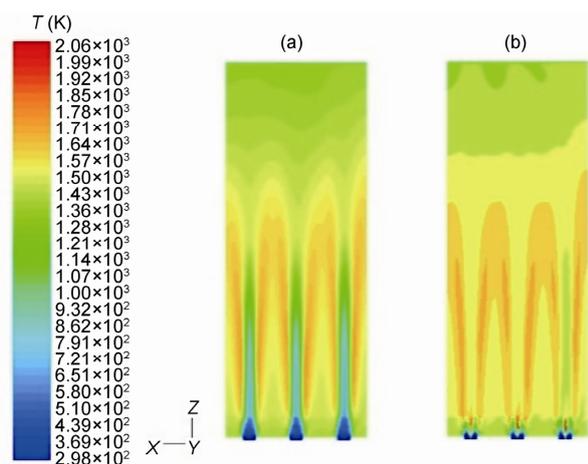


图 1 有限速率/涡耗散燃烧模型(a)和非预混燃烧模型(b)下燃烧器燃气入口面的烟气温度场<sup>[14]</sup>

该模型模拟结果的底部烟气温度场分布与实际现象不相符.非预混燃烧模型虽然很好地解决了其他模型求解诸多偏微分方程的难题,且能够预测中间组分、溶解效应和紊流化学耦合等问题<sup>[14, 15]</sup>,但模拟结果和实际存在差距,而有限速率/涡耗散模型的模拟计算结果更符合实际情况.

在裂解炉辐射段中,无论是管内还是管外,都发生着复杂的传质、传热、动量和反应过程,研究人员为了获得适宜的产物分布,对模拟裂解装置、热裂解反应动力学模型、辐射段传热模型和辐射段的燃料气燃烧模拟进行了广泛研究,并以此为基础获得适宜的原料组成、操作条件和炉膛燃烧烟气温度场分布等工艺条件,进而实现良好的产物分布.

## 2.2 辐射段管内裂解反应的研究

根据烃类热裂解反应动力学模型发现,辐射段管内的裂解反应受到反应条件,如温度分布、停留时间、烃分压、稀释比和原料性能等因素影响.研究表明,温度分布、停留时间、烃分压等与辐射段的炉管构型密切相关.随着管式炉裂解技术的发展,为了不断追求高温、短停留时间、低烃分压来获得目的低碳烯烃的高产率,辐射段炉管的构型也经历了渐进的发展过程,各专利商推出了一代又一代辐射段炉管构型,从裂解温度 800~820℃、停留时间 0.5 s 左右、原料适应性差的等径不分枝炉管构型发展到当今裂解温度 900℃、停留时间约 0.1 s 的单程小直径毫秒炉.为了缩短停留时间,近年来开发了更短的炉管.辐射段裂解反应与传热相互影响,没有任何因素可以单独影响裂解反应或传热.因此,在减小管长的同时,需要进行其他改变来抵消其对传热的影响.随着炉管长度的缩短,需要减小炉管的直径来提高热通量,提高传热效率,降低炉管管壁温度.

影响管内裂解反应的另一大因素是原料,原料的组成和组分影响着裂解过程中的温度分布,同样也影响着产物分布.北京化工研究院在裂解原料的研究上开展了大量的工作,张兆斌等<sup>[16]</sup>、王国清等<sup>[17]</sup>采用热裂解模拟实验装置,评价不同的原料,发现正构烷烃是优质的裂解原料,产物中低碳烯烃含量较多,同时以此为依据,建立了正丁烷、异丁烷和混合丁烷的热裂解自由基反应网络,结合量子化学 CBS-Q 优化方法和经典过渡态理论计算方法,优化了反应模型的动力学参数,并基于质量、能量和动量

平衡建立了完整的丁烷热裂解自由基反应模型。

石脑油是最主要的裂解原料, 其裂解性能因组分的差异存在很大区别. 张利军等<sup>[18]</sup>通过编制计算程序和定态方程组的求解方法, 可以获得石脑油的组分含量, 以这些组分的含量为基础, 通过机理模型或其他方式可以获得裂解产物分布. 张兆斌等<sup>[19]</sup>研究发现, F-T 合成的石脑油以及经过芳烃抽提和分子筛脱蜡等改性方法处理的石脑油, 其正构烷烃含量均较高, 裂解产物乙烯、丙烯收率之和均高于常规直馏石脑油 6~14 个百分点, 是优质的裂解原料. 加氢尾油来自炼油装置副产, 通过操作条件如辐射段炉管出口温度、水油比等参数等的研究表明, 加氢尾油的双烯(乙烯和丙烯)收率通常在 48% 以上, 也是优质的裂解原料<sup>[20]</sup>. 北京化工研究院通过实验研究还发现, 加氢尾油中单环环烷烃侧链大部分为长链烷基, 而三环及三环以上环烷烃中长侧链的比例明显减少, 不同数量的环对加氢尾油裂解性能的影响较大. 通过大量实验发现, 加氢尾油中的单环环烷烃以及其侧链上所占比列较大的长链烷基参与了裂解反应, 造成了不同环数环烷烃的裂解性能存在着很大的差异, 尤其是单环环烷烃的含量对加氢尾油的裂解性能影响较大. 基于此结论, 可利用气质联用技术对加氢尾油的详细组成进行定性定量分析, 然后对加氢尾油的收率预测模型进行适当的改进以提高其预测的精度.

### 2.3 辐射段传热的研究

在辐射段传热过程中, 管内的对流传热由传热系数和面积控制, 面积由炉管构型决定, 传热系数依赖于管内流体的流动状态, 而流体的流动状态又与炉管内结构和炉管构型密切相关, 因此, 炉管构型是影响辐射段传热的重要因素. 在裂解反应初期, 反应转化率低, 生成物较少, 线速度增加不明显, 物料需要大量吸收热量, 小直径的炉管因具有比表面积大可以满足此时高热强度的要求. 在反应中后期, 裂解反应转化率逐步提高, 物料体积急剧增加, 线速度迅速提高, 压力降增大, 结焦速率加快, 因此, 大直径的炉管更能满足此时的工艺条件要求. 为了实现上述裂解反应的最佳条件, 乙烯技术专利商通常采用不同炉管构型、炉管长度和炉管变径等方式来满足不同裂解条件的需要<sup>[9]</sup>. 近年来, 专利商推出了几种新型的炉管, 如 2/1-1 型两程炉管<sup>[21]</sup>(图 2)、多管程炉(管

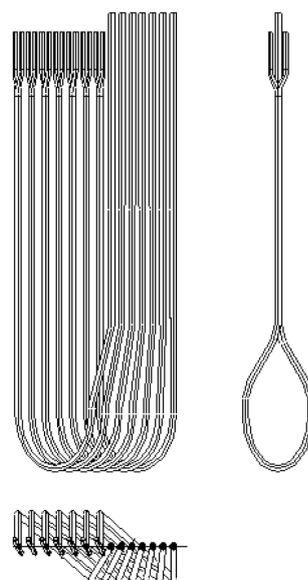


图 2 2/1-1 型两程炉管示意图<sup>[21]</sup>

程数约为 4~10)<sup>[22]</sup>、“U”型炉管<sup>[23]</sup>和一种特殊的两程炉管构型<sup>[24]</sup>. 在这些特殊的两程炉管中, 第一程炉管的弯管和第二程的弯管分别在两个不同平面弯曲, 弯管倾斜角度灵活确定, 保证炉管不易弯曲, 节约炉膛空间, 具有更大的生产能力.

为提高炉管的传热系数, 从 20 世纪 80 年代中期以来, 许多公司研究推出了不同结构的异形管<sup>[25]</sup>, 以及在圆管内外增加强化传热构件<sup>[26, 27]</sup>来提高传热系数的新型炉管, 如 Lummus 公司推出的应用在 SRT-VF 型炉的第一程炉管中的螺旋梅花管、Kellogg 公司(现 KBR 公司)推出的应用于新型毫秒炉中的内梅花螺旋形炉管、日本 Kubota 公司推出的 MERT 炉管<sup>[28, 29]</sup>等. 这些技术都是通过改变流体的流动状态来提高传热系数, 但是这些方法存在炉管的制造难度大、制造费用高、炉管的压降增加过大以及炉管内结焦不易清除等问题. 中国石化北京化工研究院和有关合作单位开发的扭曲片管强化传热技术制造相对简单, 同时又避免了炉管压降增加过大和结焦不易清除的缺点, 在乙烯生产企业得到了广泛应用<sup>[30~32]</sup>.

辐射段最复杂的传热方式是管外的辐射传热, 其影响因素很多, 包括炉膛内燃料气燃烧供热情况. 研究表明, 燃烧器的分布是影响炉膛内燃烧烟气状态的主要因素, 进行不同燃烧器的组合来适应不同原料、目的产物选择性和裂解工艺条件等是需要研究

的问题之一<sup>[33]</sup>。通过采用 CFD 模拟技术对底部燃烧器 100%供热(简称全底烧供热)和底部燃烧器与侧壁燃烧器供热比例为 70%和 30%(简称联合供热)两种方案进行研究后发现, 两种供热条件下裂解炉辐射段运行状态存在差异。联合供热方式使辐射段上方热量加强, 在侧壁燃烧器位置热量集中, 形成了烟气的高温区域, 更有利于在裂解反应的开始阶段提供大量的热量, 使裂解原料快速升温, 适合需要两程炉管和较短停留时间进行裂解的原料。

在辐射段的研究中, 管内的裂解反应与辐射段的热量传递之间相互关联耦合。为了实现适宜的裂解反应, 辐射段炉管需要合适的温度分布, 而这种温度分布是通过炉膛烟气的温度分布、炉管材质、炉管构型和管内流体状态等因素来实现的。因此, 在裂解炉辐射段的研究中, 需要整体考虑燃烧、流动、传热和烃类裂解反应等过程, 为提高裂解炉生产能力、增加经济效益和设计新型裂解炉等提供方向。

### 3 裂解炉辐射段技术的工业应用

#### 3.1 裂解炉的工程设计技术

裂解炉的工业化和技术进步始终围绕提高烃类裂解反应的选择性、降低原料消耗、降低能耗、降低污染物排放、降低投资以及大型化展开攻关研究。在我国科研技术人员的不懈努力下, 我国裂解炉技术在较短时间内完成了引进、国产化和再出口过程。1984 年, 原中国石化总公司组织中国石化工程建设公司、北京化工研究院和天华化工机械及自动化研究院设计院有限公司开发裂解炉技术, 其中北京化工研究院负责辐射段炉管和原料裂解性能的技术攻关部分, 开展烃类原料和产物分析、热裂解模拟试验以及裂解反应动力学模型等研究工作, 20 kt/a 的 CBL-I 型裂解炉在辽阳投产, 达到当时国际同类型裂解炉的先进水平。进入 20 世纪 90 年代, 北京化工研究院及其他单位先后开发了 CBL-II~VII 型裂解炉, 依据工厂实际选择适宜的炉管构型, 获得了较好的裂解产物分布和经济效益, 满足国内 600 kt/a 乙烯装置的生产需求。目前, 为了配合我国乙烯装置的新一轮扩能改造和建设 800 kt/a 以上乙烯装置的需要, 中国石化已开发出单炉年产 100 kt 及以上规模的大型裂解炉<sup>[34, 35]</sup>。2012 年 11 月, CBL 裂解炉技术应用在马来西

亚建立的 90 kt/a 裂解炉一次开车成功, 标志着中国石化成为乙烯裂解炉技术的国际专利商, CBL 裂解炉技术已成功走向国外。

截止 2013 年底, 基于 CBL 技术建设的各种炉型新建和改造的裂解炉共计 117 台, 乙烯年生产能力达 11.53 Mt。其中, 年乙烯生产能力 100 kt 及以上裂解炉共计 73 台, 年乙烯生产能力 9.09 Mt, 改造裂解炉(包括辐射段炉管)且单炉能力小于 100 kt 的万吨裂解炉共计 44 台, 年乙烯生产能力达 2.445 Mt<sup>[36]</sup>。

#### 3.2 扭曲片强化传热技术的应用

在辐射段炉管构型确定后, 还可通过提高对流传热系数来增加传热效率。中国石化北京化工研究院与合作单位共同开发的扭曲片管强化传热技术是通过在辐射段炉管中分段加入几小段带有扭曲片的整铸管, 迫使管内的流体产生径向扰动, 减薄管壁附近的流动边界层, 增大传热系数, 从而起到强化传热的作用。对其结构和应用进行数值模拟后的结果从理论上证明了扭曲片管的强化传热作用。图 3 为 CFD 软件模拟的流体流过扭曲片前后流型的变化<sup>[37]</sup>, 与图中左侧的加扭曲片前的流体状态相比, 扭曲片加入后流体的流动状态发生改变, 流体旋转前进, 切向速度增大, 湍流的流动程度增大, 扭曲片管构件强化了过程传热。

图 4 为扭曲片管加入前后辐射段炉管最高炉管壁温度随裂解炉运行时间的变化情况<sup>[38]</sup>, 结果发现, 未加扭曲片管时炉管的管壁温度(TMT)始终比加入扭曲片管时高, 而且未加扭曲片管时 TMT 上升速度比加入扭曲片管时的上升速度快。研究表明, 扭曲片管可有效降低壁温和提高传热系数。工业应用实验表明, 当乙烯收率相同时, 裂解炉的处理量可提高 7%左右, 炉管外壁温度下降 20℃以上, 同时炉管压降仅增加 15%左右, 运行周期延长 50%以上, 全年平均节省燃料 1%~3%<sup>[39]</sup>。该项技术在国内乙烯生产装置已经得到广泛应用, 截止 2013 年底, 使用该项技术的裂解炉达 107 台, 乙烯生产能力为 7.35 Mt, 并推广至国外。

#### 3.3 快速在线烧焦技术的应用

在烃类热裂解制乙烯时, 裂解炉辐射段炉管内表面会有焦炭形成, 影响管内传热, 会使管内传热阻力增大、管内径变小, 导致管壁温度升高, 管内压降

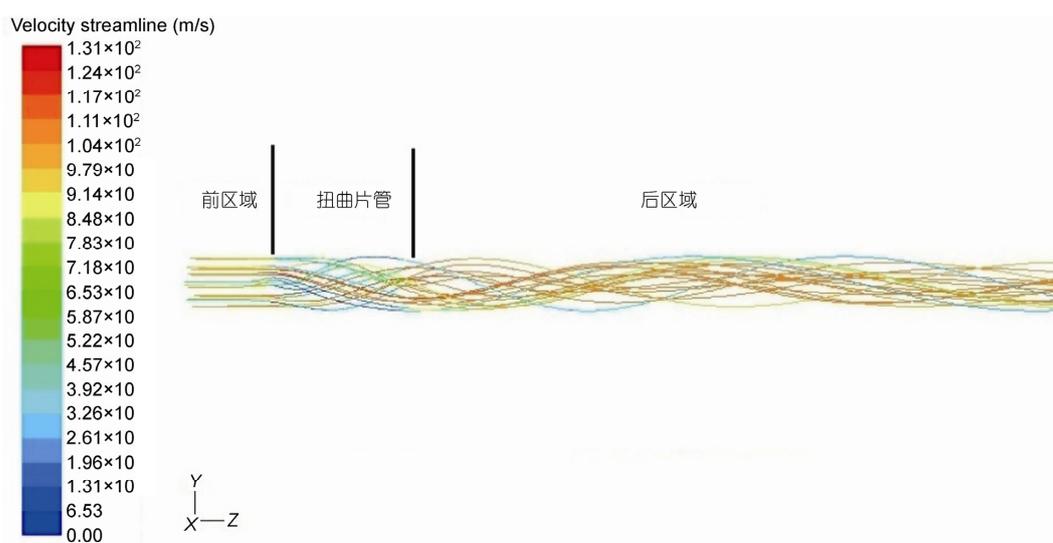


图3 流体流过扭曲片管前后流型变化示意图<sup>[37]</sup>

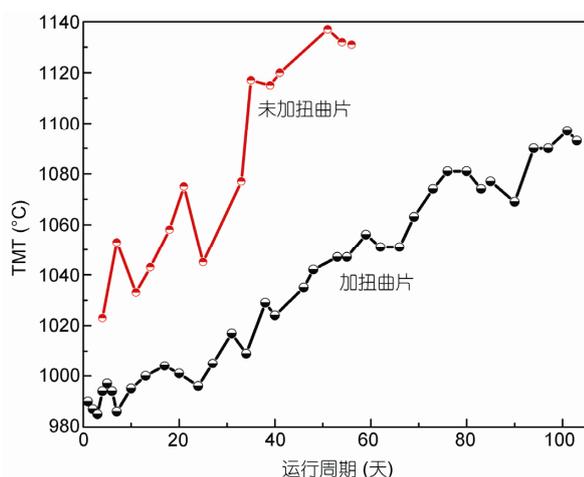


图4 增加与未加扭曲片管时炉管管壁的温度变化<sup>[38]</sup>

增大, 最终导致裂解炉停止进料, 进行烧焦. 研究烧焦过程<sup>[40-42]</sup>以及减少烧焦时间<sup>[43]</sup>是延长裂解炉运转时间的重要途径. 目前, 辐射段炉管烧焦一般采用水蒸气和空气混合物, 将管内的焦炭以缓慢氧化燃烧或水煤气反应的方式除去, BASF 纯空气在线烧焦技术应用方面最广泛<sup>[44, 45]</sup>. 烧焦过程中的主要问题是: 烧焦释放的热量过大时, 会造成炉管局部过热, 导致炉管出现烧穿、弯曲、断裂的现象. 因此, 如果在烧焦过程中控制氧气与碳的化学反应速率和烧焦尾气中 CO 和 CO<sub>2</sub> 的体积含量, 即可控制烧焦过程释放的热量, 从而避免炉管出现局部过热现象, 确保炉管的安全. 杜志国等<sup>[46, 47]</sup>开发了一套空气水蒸气混合物

在线烧焦的改进方法, 以烧焦模型和烧焦过程模拟为基础, 并以工业裂解炉烧焦尾气在线实时分析装置为手段, 实现对裂解炉辐射段炉管烧焦尾气中的 CO<sub>2</sub>、CO 和 O<sub>2</sub> 体积浓度进行在线实时分析, 对烧焦过程进行调节, 在确保裂解炉安全的前提下加快烧焦速度, 减少烧焦时间. 图 5 所示为应用这种快速烧焦技术前后, CO<sub>2</sub> 和 CO 体积浓度随时间的变化状况, 发现使用这种快速烧焦技术后尾气中 CO 和 CO<sub>2</sub> 含量起始浓度高、下降速度快、烧焦时间短, 有利于降低乙烯生产装置的能耗<sup>[48]</sup>. 该技术已被乙烯生产企业采用, 部分企业应用结果见表 2.

### 3.4 工业化软件的应用

在乙烯生产中, 不同的裂解原料对应不同的炉型、不同的最佳工艺条件, 通过优化裂解炉工艺条件, 能够使产品分布最好、价值最大, 从而降低装置能耗和物耗. 研究人员一直致力于工业化软件的开发, 用来根据不同的裂解原料和不同的目的产物分布, 提出不同的工艺条件, 为工业生产服务. 杜志国等<sup>[49]</sup>结合大量的不同裂解原料的模拟裂解装置数据和工业生产数据, 建立了基于人工智能的多元非线性回归模型—BCM 软件. 模型的输入变量为石脑油、加氢尾油等油品物性和热裂解工艺条件, 其中与原料物性关联的条件包括氢含量、芳烃指数(BMCI)、相对密度、中平均沸点、正构链烷烃含量、异构链烷烃含

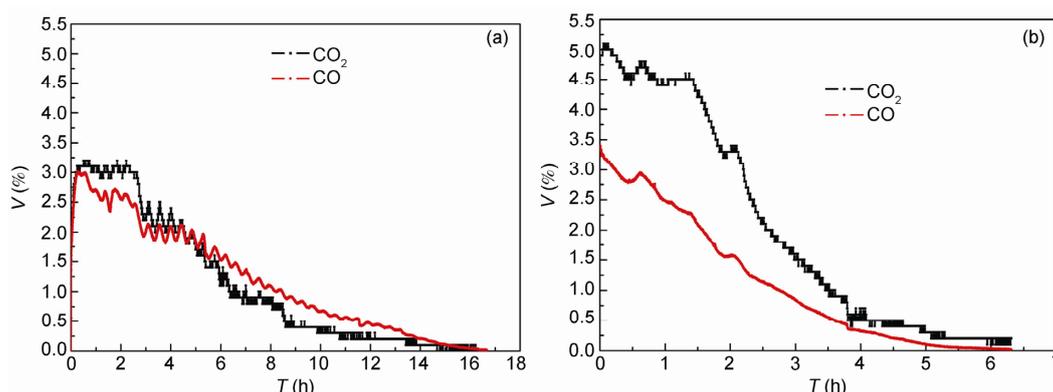


图5 未应用快速烧焦技术(a)与应用快速烧焦技术(b) CO<sub>2</sub>和CO 体积浓度(V)随时间(T)的变化图<sup>[48]</sup>

表2 裂解炉在线快速烧焦技术工业应用

企业	燕山石化	茂名石化	广州石化
炉型	SL-I、GK-V、CBL-III、SRT-IV(HC)	SL-II、SL-I-M	USC
原料	轻烃、石脑油、加氢尾油、柴油	石脑油、加氢尾油	石脑油、加氢尾油
原设计烧焦时间(辐射段) (h)	20~27	24.5~28	24~36
快速烧焦间(辐射段) (h)	4~8	8~14	8~10

量、芳烃含量、环烷烃含量 8 个变量; 与热裂解工艺条件相关联的条件包括水蒸气与原料的质量比(水油比)、停留时间、炉管出口温度(COT)、炉管出口压力(COP) 4 个变量. 模型的输出变量为烃类原料热裂解产物收率, 分别为氢气、甲烷、乙烯、丙烯和丁二烯等 22 种产物收率. 利用支持向量机训练软件对训练样本数据进行学习, 通过支持向量机模型, 建立输入变量与输出变量之间的映射关系, 构建出基于人工智能的多元非线性回归模型, 其预测值误差在 10% 以内. 以此建立的非线性经验模型能够为烯烃企业提供裂解原料优选、裂解工艺条件优化等技术支持. 目前, 该软件已在多家烯烃厂使用, 并为企业带来了良好的收益.

## 4 展望

经过多年的技术开发和持续积累, 裂解炉辐射

段技术日趋成熟, 尤其在工业裂解炉整体设计、烃类裂解反应模型、原料评价和优化、辐射段炉管构型、扭曲片管强化传热、裂解炉快速在线烧焦等领域取得一系列进展. 但是, 仍然存在装置规模小、能耗物耗较高、原料优化不够、环保和综合利用水平较低等问题. 裂解炉辐射段是裂解炉的关键部分, 辐射段技术的进步直接影响到整个裂解装置的运行效益, 未来辐射段技术研究主要集中在以下 4 个方面: (1) 顺应裂解炉装置大型化发展趋势的技术要求, 进行辐射段炉管构型及布置方案等的研究; (2) 组合新的单元技术进行超短停留时间辐射段炉管的设计, 以获得更高的目的产物收率, 降低裂解炉的物耗; (3) 开发和改进类似扭曲片管的过程强化技术, 改善辐射段炉管内外的传热, 降低裂解炉的能耗; (4) 改进和提升数值模拟技术, 进行原料和裂解产品价值优化技术的开发, 提高乙烯装置的经济效益.

## 参考文献

- 1 张勇. 烯烃技术进展. 北京: 中国石化出版社, 2008
- 2 王强. 我国乙烯工业发展漫谈. 乙烯工业, 2008, 20: 60-64

- 3 王松汉. 乙烯装置技术与运行. 北京: 中国石化出版社, 2009
- 4 杜志国, 王国清, 李蔚, 张永刚, 张兆斌, 张利军. 烃类蒸汽裂解反应动力学模型进展. 乙烯工业, 2010, 22: 12-16
- 5 王国清, 杜志国, 张利军, 张兆斌, 张永刚, 周丛. 应用 BP 神经网络预测石脑油热裂解产物收率. 石油化工, 2007, 36: 699-704
- 6 杜志国, 王国清, 张兆斌, 张永刚, 张利军, 李蔚. 应用 BP 神经网络预测加氢尾油热裂解产物收率. 乙烯工业, 2009, 21: 8-11
- 7 杨元一. 轻质油热裂解制乙烯裂解炉工艺数学模型. 大庆石油学报, 1981, 11: 71-98
- 8 Sundaram KM, Froment GF. Two dimensional model for the simulation of tubular reactors for thermal cracking. *Chem Eng Sci*, 1980, 35: 364-371
- 9 周先锋. 裂解炉的辐射段模拟和横跨段结构优化研究. 博士学位论文. 北京: 北京化工大学, 2013
- 10 王国清. 裂解炉数值模拟技术进展. 石油化工, 2010, 39: 476-481
- 11 America ANSYS Inc. *User's Guide of Fluent Documentation*. 12.0., 2010
- 12 Gran IR, Magnussen BF. A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 2. Influence of combustion modeling and finite-rate chemistry. *Combust Sci Tech*, 1996, 119: 191-217
- 13 Delarue BJ, Pope SB. Calculations of subsonic and supersonic turbulent reacting mixing layers using probability density function methods. *Phys Fluids*, 1998, 10: 487-498
- 14 Zhou XF, Yang YY, Wang GQ, Zhang LJ, Liu Y. Estimating the operation status of steam cracking furnace using numerical simulation with combustion models. *China Petrol Process Petrochem Technol*, 2012, 14: 52-63
- 15 周先锋, 张利军, 王国清. 裂解炉在不同燃烧模型下的简化模拟研究. 石油化工, 2008, 37(增刊): 126-128
- 16 张兆斌, 李华, 张永刚. 丁烷热裂解自由基反应模型的建立与验证. 石油化工, 2007, 36: 44-48
- 17 王国清, 张兆斌, 张利军, 张永刚, 杜志国. 轻质裂解原料性能研究. 乙烯工业, 2008, 20: 44-46
- 18 张利军, 张永刚, 王国清, 杨元一. 石脑油的组成预测方法. 化工进展, 2011, 30: 278-284
- 19 张兆斌, 王国清, 张永刚, 许士兴. 优化裂解原料的初步研究. 石油化工, 2008, 37: 8-11
- 20 张永刚, 张兆斌, 周丛. 加氢裂化尾油热裂解性能分析研究. 乙烯工业, 2008, 20: 34-36
- 21 何细藕, 李昌力, 陈硕, 张利军. 两程辐射段炉管的乙烯裂解炉. 中国专利, CN101062882A, 2007-10-31
- 22 何细藕, 李昌力, 张兆斌. 一种多管程乙烯裂解炉. 中国专利, CN102051197A, 2011-05-11
- 23 何细藕, 李昌力, 张兆斌. 一种辐射段炉管采用“U”形结构排布的裂解炉. 中国专利, CN101062883, 2007-10-31
- 24 何细藕, 陈硕, 李金科, 张兆斌. 一种两程辐射炉管的裂解炉. 中国专利, CN101062884, 2007-10-31
- 25 Bergles AE. Some perspectives on enhanced heat transfer second generation heat transfer technology. *ASME J Heat Transfer*, 1988, 110: 1082-1096
- 26 张政, 张建文. 厚翅片管内流体流动和传热的数值分析. 工程热物理学报, 1994, 15: 430-434
- 27 张建文, 张政. 螺旋内翅片管内充分发展流体流动与传热的数值分析. 高校化学工业学报, 1999, 13: 114-120
- 28 杉谷纯一, 前健一, 古田正夫. 热交换管. 中国专利, CN1121996, 1996-05-08
- 29 乾正弘, 滨田薰, 大坪宪司. 具有螺旋翅片的裂化管. 中国专利, CN1711340, 2005-12-21
- 30 朱耀宵, 郑志, 曾清泉, 宁秀珍, 楼琅洪, 许适群, 王国清, 白清举. 一种热交换管及其制造方法和应用. 中国专利, CN1260469, 2000-07-19
- 31 林宗虎, 汪军, 李瑞阳, 崔国民. 强化传热技术. 北京: 化学工业出版社, 2007
- 32 柴诚敬, 张国亮. 化工流体流动与传热. 北京: 化学工业出版社, 2009
- 33 周先锋, 杨元一, 张利军, 王国清, 刘俊杰. 采用数值模拟研究不同供热形式对裂解炉运行的影响. 石油化工, 2010, 39: 1221-1227
- 34 王国清, 曾清泉. 裂解技术进展. 化工进展, 2002, 21: 29-33
- 35 何细藕. 乙烯裂解炉技术进展. 现代化工, 2001, 21: 13-17
- 36 王子宗, 何细藕. 乙烯装置裂解技术进展及其国产化历程. 化工进展, 2014, 33: 1-9
- 37 王国清, 周先锋, 张利军. 扭曲片管强化传热技术在乙烯裂解炉中的应用. 见: 2012 年石油天然气及石化装备管理与技术研讨会论文集. 克拉玛依: 中国石油大学出版社, 2012: 245-253
- 38 王国清, 张利军, 许士兴. 扭曲片管强化传热技术在裂解炉中的应用. 乙烯工业, 2006, 18: 19-22
- 39 王国清, 曾清泉. 乙烯裂解炉管强化传热. 石油化工, 2001, 30: 528-530
- 40 Heynderickx GJ, Schools EM, Marin GB. Coke combustion and gasification kinetics in ethane steam crackers. *AIChE J*, 2005, 51: 1415-1428
- 41 Heynderickx GJ, Schools EM, Marin GB. Simulation of the decoking of an ethane cracker with a steam/air mixture. *Chem Eng Sci*, 2006, 61: 1779-1789
- 42 Heynderickx GJ, Schools EM, Marin GB. Optimization of the decoking procedure of an ethane cracker with a steam/air mixture. *Ind Eng*

*Chem Res*, 2006, 45: 7520–7529

- 43 Schools EM, Froment GF. Simulation of decoking of thermal cracking coils by steam/air mixtures. *AIChE J*, 1997, 43: 118–126
- 44 Saarbrücken BL, Hesse P, Schuster R. Method of decoking a cracking plant. US Patent, 4376694, 1983-03-15
- 45 Sliwka A, Fred K. Process for the thermal decoking of cracked gas coolers. US Patent, 4420343, 1983-12-13
- 46 杜志国, 王国清, 张永刚, 张利军, 张兆斌. 一种加快工业裂解炉在线烧焦的控制方法. 中国专利, CN101423453, 2009-05-06
- 47 杜志国, 张永刚, 王国清, 张兆斌, 张利军, 周丛, 田岐. 一种管式裂解炉在线清焦的方法. 中国专利, CN101372630, 2009-02-25
- 48 陈德焯, 杜志国. 裂解炉辐射段炉管在线快速烧焦技术. *石油化工*, 2008, 37: 1054–1058
- 49 杜志国, 王国清, 张利军, 张兆斌, 张永刚, 周丛, 巴海鹏, 周先锋. 基于支持向量机的热裂解产物收率的预测方法. 中国专利, CN101727609A, 2010-06-09

## Research progress and industrial application of radiant section technology of ethylene cracking furnace

WANG GuoQing<sup>\*</sup>, ZHOU XianFeng, SHI Ying, LI Wei, ZHANG YongGang,  
ZHOU Cong, DU ZhiGuo

Beijing Research Institute of Chemical Industry, SINOPEC, Beijing 100013, China

\*Corresponding author (email: wangqg.bjhy@sinopec.com)

**Abstract:** Radiant section is the key component of the cracking furnace, and the cracking reaction of hydrocarbons occurs in the coils of radiant section. In the research of radiant section, the focus is how to obtain the proper product distribution and the high economic benefit. This review reports the research progress of cracking reaction in the radiant coils and the heat transfer in radiant section. The kinetic model of thermal cracking reaction, the heat transfer model and the combustion model are introduced. The factors influencing the thermal cracking reaction and the heat transfer are presented, and the application of the above research on the cracking furnace are introduced as well.

**Keywords:** cracking furnace, radiant section, coil design, feedstock optimization, heat transfer enhancement, quick decoking