

机械设备

KH型喷嘴的研制及技术发展

陈志坚¹ 唐泽眉¹ 李永安² 王根兴² 于建忠³

1. 中国科学院力学研究所(北京市 100190)

2. 北京科力青科贸有限公司(北京市 100190)

3. 中国石油华北石化分公司(河北省任丘市 062552)

摘要:应用国外液滴雾化研究成果,结合流体力学基本原理,分析了KH喷嘴的雾化机理,给出了KH喷嘴的物理模型、理论计算和实验结果,确定了喷嘴结构型式和尺寸。证实了喷嘴的压力降是控制雾化粒度的关键。分析了油品、蒸汽量、喷嘴结构、操作参数等对雾化粒度的影响。提出喷嘴质量的评定标准。总结了使用KH喷嘴厂家的蒸汽量、干气、液体收率以及能耗情况。

关键词:催化裂化 雾化 KH喷嘴 干气收率

催化裂化装置进料喷嘴的作用是在高速蒸汽流的推动下,将原料油破碎分散成与催化剂微球粒度相当的极微细的油滴[SMD≤60 μm],使之与热催化剂充分混合,从而完成原料烃类的催化裂化反应。

性能优越的进料喷嘴可以提高装置轻质油收率,减少焦炭、降低干气产率和能耗。在掺炼渣油或以重油为原料时,还能起到提高掺渣率,减轻设备结焦,延长装置运行周期的作用。由此,品质优良的进料喷嘴可以为企业带来可观的经济效益。

目前有55家工厂的74套催化裂化装置使用KH喷嘴,总加工量为54.20 Mt/a,占炼油行业总加工量的50%,以下介绍KH喷嘴的使用情况。

1 KH喷嘴的雾化机理

KH喷嘴由两个喷管经混合室连接而成,其中原料油的破碎雾化机制非常复杂,可简要描述如下:原料油在通过第一喷管的高速蒸汽流的剪切和冲击作用下形成很强的湍流运动,并伴有很大的压力脉动和能量交换,原料油分裂破碎成薄片、细丝,最后形成粒径较粗的液滴。

油滴的破碎雾化与力学密切相关,液滴靠表面张力和分子间的黏性力(内摩擦力)来维持它的形状,使液体的形状破坏就要消耗能量,以克服维持油滴形状的表面张力和内部黏性力。用Weber数(We)和Ohnesorge数(Oh)可以合理表述高速射流的液滴变形,破碎和雾化特征。

$We = \rho_g v^2 d / \sigma$,是判别液滴破碎的重要无量纲参数,其中 ρ_g 是来流气体的密度, $v = (U_g - U_l)$ 表示气体和液体之间的相对速度, σ 指液滴介质的表面张力系数, d 是液滴直径。 We 代表了产生破碎作用的气流动力和维持液滴的表面张力之比,即来流气体的惯性力对液滴的表面张力之比。

$Oh = \frac{\mu_d}{(\rho_d D \sigma)^{0.5}}$,其中 ρ_d, μ_d 分别为液滴的密度和动力学黏性系数, σ 指液滴介质的表面张力系数。 Oh 表征原料油的黏性力和表面张力之比,是仅与液滴的物理特性有关的系数。从 Oh 的定义可知,液滴的黏度越大,表面张力越小, Oh 越大。对于一定 Oh 的原料油,存在一个使其破坏的临界 $We(We_c)$,当 We 高于临界值时,液滴将被破坏和雾化。

1987年,Pilch和Erdman^[1]所收集的7篇文献的实验研究结果,汇总了多种液滴的临界 We 和表征液滴特性的 Oh 的关系(见图1),图1中的曲线符合以下经验关系式:

$$We_c = 12(1 + 1.077 Oh)^{1.6}$$

图1中表明,在低于该曲线的区域中,液滴不会破碎。 Oh 越高,液滴破碎越困难。当 Oh 大于1,

收稿日期:2008-07-23。

作者简介:陈志坚,教授级高工,课题组长,1959年上海交大机械制造专业毕业,长期在中国科学院力学研究所从事流体力学研究。1987年开始主持KH型催化裂化喷嘴的研制开发与工程应用工作。联系电话:010-82873104

随着 Oh 的增加,使液滴破碎雾化所需要的 We 急剧增长。

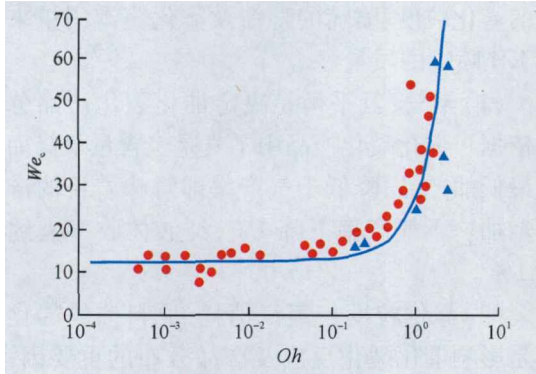


图 1 临界 We

Fig. 1 Data of We_c

目前,判定液滴破碎的条件常使用下列 Weber 数准则,即系统数据:

$$1/2\rho_g(U_g - U_l)^2 > 4\sigma/d$$

由上式可知, We 大于 8 时液滴开始破碎, We 越大,破碎时间越短,液滴也越细。这个准则定性 与图 1 的结果一致。

2 物理模型和设计计算

设计喷嘴的目的是要根据原料油的性质,获得所需的 We , 获取较细的液滴雾化粒度。KH 型喷嘴的结构如图 2 所示,由第一喷嘴,混合室和 第二喷嘴三部分组成,为内混合式双喉道进料喷嘴。在 KH 喷嘴中液体的破碎雾化有三次:第一喷嘴 喉道中的超声速气射流引射液体薄片造成的雾 化;第二喷嘴喉道中气液两相流加速流动的第二次雾化以及第二喉道之后射流的碰撞造成进一步的 雾化。由于蒸汽的速度很高,在喷嘴中的流动 可以认为是绝热等熵的。

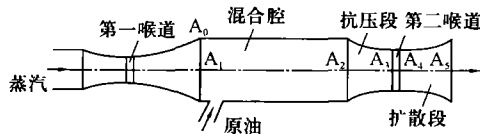


图 2 KH 喷嘴结构示意图

Fig. 2 Sketch of KH nozzle

注:图中 A 为截面积

喷嘴的设计计算按下列步骤进行。

(1) 第一喷嘴计算

根据用户的条件和要求,确定初始参数(初 始参数用下标“0”表示):喷嘴进口的蒸汽压力 p_0 , 温度 T_0 和密度 ρ_0 , 进口的蒸汽量 Q_0 及需处理 的原料油量 Q_1 。

第一喷嘴中只通蒸汽,第一喷嘴的喉道是整 个喷嘴系统的最小截面,设该处是马赫数 $M_* = 1$ 的临界状态,需通过此截面的蒸汽流量为 Q_0 。

①由初始参数确定第一喷嘴喉道截面积 A_* , 及第一喉道处的参数(下标“*”代表第一喉道处 的参数)。

$$T_* = T_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right) \quad (1)$$

$$p_* = p_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2)$$

$$\rho_* = \rho_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3)$$

$$\text{喉道处的临界声速为: } \alpha_* = \sqrt{\frac{2\gamma p_0}{(\gamma + 1)\rho_0}} \quad (4)$$

喉道处的蒸汽速度为: $u_* = M_* \alpha_* = \alpha_*$, 由 此可定出第一喷嘴喉道的截面积 $A_* = \frac{Q_0}{\rho_* u_*}$ 。

②第一喷嘴出口参数的确定:参考优质喷嘴 设计,根据初始参数,初步选取第一喷嘴出口面 积。从出口截面和喉道截面的面积比,可定出第 一喷嘴出口处的马赫数 M_1 。

$$\frac{A_1}{A_*} = \frac{1}{M_1} \left[\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (5)$$

从而可以确定第一喷嘴出口处的流动状态:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\frac{p_1}{p_0} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right)^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (7)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right)^{-\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (8)$$

(2) 混合室计算:混合室的计算在于确定第 二喷嘴的进口条件,此时假定蒸汽与原料油已经 均匀混合,根据混合室内流体的连续性方程、动 量守恒、能量守恒和状态方程,可以得到第二喷 管入口处的所有流动参数 T_2, ρ_2, p_2, V_2 和 A_2 。

(3) 扩压段计算:扩压段是指混合室出口到 第二喷嘴出口之间的部分,中间经过第二喉道。由 于汽相密度大大低于液相密度,因此在从扩压段 进口到第二喉道的收缩段内汽相会比液相加速更 快,从而形成汽液相速度差,使液滴进行第二次雾 化。经过第二喉道后,汽液两相混合流的速度也逐 渐降低,压力回升到提升管内的压力。工程上常

常采用实验研究与计算相结合的方法。如第二节所述,用第二喷管前压力来评估原料油的雾化粒度。

3 喷嘴的实验研究

(1)理论计算得出的喷嘴各部分尺寸可知,KH 喷嘴通道面积大,实际应用中不会发生堵塞。

(2)KH 模型能做到气液速度差大,加速度大,可以获得较大的 We ,达到 SMD 60 μm 左右的雾化粒度。

(3)因为用的是标准的拉瓦尔喷管,阻尼小,在运行过程中损失小,能耗小,使喷嘴雾化能量充分应用在雾化上。因理论计算中有一些假设,有误差,同时用多相流来计算雾化粒度的理论目前还不完善,这些都要通过实验来验证和补充。

4 喷嘴的压力降 Δp_s 和喷嘴前压力的确定

(1) Δp_s 是指喷嘴内部的压力降,即图 3 所示混合腔的出口处压力和喷嘴出口处的压力差。通过理论计算与多项实验证实,第二喷嘴进出口的压力差 Δp_s 越大,雾化粒度 SMD 越小。雾化粒度 SMD 和 Δp_s 间呈反比关系。实际生产中喷嘴的雾化粒度由喷嘴的压力降来保证。

图 3 中曲线即表示 $SMD-\Delta p_s$ 实测试验得到的喷嘴压力降与雾化粒度的关系。从图 3 可知, Δp_s 在 0.3 ~ 0.4 MPa 时, SMD 在 58 ~ 73 μm 。

(2)喷嘴前压力——包括油压和蒸汽压力:从理论计算和实测数据可知, Δp_s 在 0.3 ~ 0.4 MPa 时, SMD 为 58 ~ 73 μm 。因此,基于上述因素而决定喷嘴前压力为:

$$p_b = \Delta p_s + p_r + p_i$$

喷嘴前压力受到提升管的压力 p_r ,原料泵出口压力和喷嘴内部流动状态 p_i 等条件的限制。

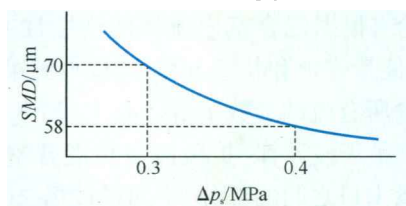


图 3 $SMD-\Delta p_s$ 实测关系

Fig. 3 SMD versus Δp_s

5 KH 喷嘴的工业应用

从 2004—2006 年中国石化、中国石油各厂的

生产统计数据来分析 KH 喷嘴的干气收率、蒸气用量、产品收率及能耗、剂耗。从分析结果和原料油的雾化粒度、喷嘴的寿命及雾化蒸汽用量来评定 KH 喷嘴的质量。

(1)干气:氢平衡是决定催化裂化产品分布的依据。催化裂化产品中干气是氢含量最高而价值最低的产品,降低干气产率即意味着目的产品的增加。干气产率下降 1%,纯液体收率大约增加 1%。

(2)雾化粒度与蒸汽消耗:原料油的雾化粒度是影响催化裂化反应及产品分布的重要因素。雾化粒度越小,目的产品的收率越高。

原料油雾化粒度的影响因素是多方面的,包括:

①原料油品性质:油品质量差,碳/氢比值过高,密度大,黏度大,雾化困难,导致雾化粒度大。原料油品的性质是影响雾化效果的最重要的因素。

②喷嘴结构尺寸:在生产实践中,雾化粒度通过喷嘴的压力降来保证,出口尺寸减小,会增加气液速度差, We 值提高,使粒度细化,表现形式为喷嘴压力降大,喷嘴前压力高。

③喷嘴的操作参数。包括油品与雾化介质蒸汽的流量、压力、温度。

进料喷嘴原料油的量由装置能力及工厂计划预定,一般不便更改。但可在工厂提出的流量范围内变动,原料油增加,油压上升,喷嘴压力降增加,粒度细化。目前装置设计的喷嘴进料压力基本在 0.9 MPa 以下。

④雾化蒸汽。原料油通过喷嘴时,在喷嘴流道内受到雾化蒸汽形成的强大气流动力的推动,克服了油滴表面张力和黏性力的约束,破碎分散成 60 μm 左右的极微细的颗粒流,由出口均匀地喷入提升管催化剂床层内。蒸汽量越大,雾化粒度越小。但蒸汽量过大不一定能达到预定目的,还会引起不利结果。

(3)KH 喷嘴的寿命:从以下两方面着手延长 KH 喷嘴的寿命和提高质量:改进喷嘴头部材料,使其抗磨能力大大增强;根据部分炼油企业大幅度提高加工高黏度重质原料的要求,改进喷嘴出口第二喉道的几何结构,减少阻尼和设备磨损。使用寿命由 2 a 提高到 3 a 以上。

(4)KH 喷嘴的使用情况见表 1 ~ 3。

表 1 2006 年中国石油化工股份公司
干气收率最低催化裂化装置

Table 1 Low dry gas yield FCC units of
SINOPEC in 2006

项 目	喷嘴 型号	加工 能力/ Mt·a ⁻¹	原料密度 (20℃)/ kg·m ⁻³	残炭, %	干气, %	能耗/ kg·t ⁻¹	剂耗/ kg·t ⁻¹
中国石化		50.41			4.37	60.56	1.00
天津	UOP	1.30	0.910	0.64	2.03	79.89	0.97
金陵 II 套	KH	1.00	0.915	3.54	2.26	49.66	1.20
石家庄 I 套	KH	0.90	0.912	3.42	3.02	60.80	1.20
石家庄 II 套	KH	0.80	0.928	4.50	3.32	80.56	1.24
安庆	KH	1.40	0.913	2.27	3.40	52.75	0.92
高桥 I 套	KH	0.90	0.908	4.03	3.57	63.79	0.82
高桥 II 套	KH	0.60	0.905	3.75	3.57	76.34	1.05
茂名 I 套	KH	0.90	0.900	0.38	3.57	60.21	1.23
镇海 I 套	KH	1.80	0.911	3.67	3.78	50.42	0.57

表 2 2006 年中国石油天然气股份有限公司
干气收率最低催化裂化装置

Table 2 Low dry gas yield FCC units of
PetroChina in 2006

项 目	喷嘴 型号	加工 能力/ Mt·a ⁻¹	原料密度 (20℃)/ kg·m ⁻³	残炭, %	干气, %	能耗/ kg·t ⁻¹	剂耗/ kg·t ⁻¹
中国石油		46.15			4.13	66.09	0.84
锦州 I 套		0.80	0.890	0.20	2.64	52.50	0.40
乌鲁木齐 II 套		1.20	0.900	5.20	3.04	66.48	0.92
锦州 II 套		1.00	0.889	6.35	3.08	58.78	0.43
大连 II 套	KH	0.80	0.905	1.60	3.15	85.18	1.25
大庆石化 II 套		1.00	0.900	6.59	3.34	87.49	1.05
哈尔滨 III 套	KH	1.20	0.897	9.37	3.37	60.90	0.56
呼和浩特	KH	0.90	0.902	2.44	3.57	78.18	0.43
华北 II 套	KH	1.60	0.914	4.56	3.65	61.85	0.83
大连 IV 套	KH	3.50	0.911	1.36	3.90	48.95	0.78

表 3 2006 年 KH 型喷嘴在 0.8 Mt/a 以上催化裂化装置的应用情况

Table 3 Application of KH nozzle on FCC unit with capacity more than 0.8 Mt/yr in 2006

厂 名	能力/ Mt·a ⁻¹	密度	残炭, %	汽/油, % (蒸汽量)	产品分布, %				能耗/ kg·t ⁻¹	剂耗/ kg·t ⁻¹	
					干气	液体收率	轻油收率	焦炭			
镇海 I 套	1.80	0.912	2.36	4.6	3.78	84.59	63.77	6.42	50.42	0.57	
镇海 II 套	3.00	0.902	2.16	3.04	3.97	83.42	64.54	4.95	41.51	0.61	
上海高桥 I 套	0.90	0.909	1.40	2.5	3.57	84.81	69.76	6.12	63.79	0.83	
上海高桥 II 套	0.60	0.905	1.36	4.0	3.57	82.83	61.64	8.02	76.34	1.05	
上海高桥 III 套	1.40	0.912	1.36	3.5	4.08	83.60	68.25	8.05	57.76	0.70	
齐鲁 I 套	1.40	0.919	2.50	3.0	4.02	84.41	69.52	4.82	59.25	0.81	
茂名 I 套	0.90	0.901	1.36	4.0	3.57	82.41	69.23	3.58	49.48	1.11	
扬杨子	0.80	0.920	0.20	4.5	4.61	82.07	67.49	5.72	59.72	0.75	
安庆	1.20	0.914	4.27	5.5	3.40	84.27	65.16	7.00	52.75	0.92	
大连 IV 套	3.50	0.908	1.36	3.8	3.90	81.51	68.02	7.98	48.95	0.78	
大庆炼化 I 套	1.80	0.915	2.47	4.7	4.59	82.20	56.81	8.70	80.54	1.45	
大庆炼化 II 套	1.00	0.905	1.36	4.0	3.34	84.97	61.45	6.70	87.49	1.05	
哈尔滨 II 套	0.60	0.897	0.37	4.0	4.12	84.17	66.15	6.94	69.49	0.79	
哈尔滨 III 套	1.20	0.879	0.37	4.4	3.37	85.05	70.56	7.12	60.60	0.56	
华北 I 套	0.90	0.930	0.56	4.5	4.22	80.26	64.73	10.34	63.95	0.60	
华北 II 套	1.00	0.930	0.70	4.0	3.65	80.55	64.34	10.10	61.85	0.83	
吉林 I 套	1.40	0.904	0.36	3.5	4.71	82.38	69.10	7.95	59.21	0.64	
锦州 III 套	1.80	0.920	0.940	4.87	5.0	2.62	85.83	69.58	6.68	55.27	0.56
乌鲁木齐 I 套	0.80	0.865	0.900	0.30	1.2	3.13	90.85	80.96	4.00	57.49	0.48
长庆 I 套	1.40	0.918	0.36	3.5	4.31	83.52	69.47	8.35	65.28	0.98	
呼和浩特	0.90	0.914	0.44	4.8	3.05	84.97	74.68	6.33	70.25	0.45	
抚顺 I 套	1.00	0.895	0.64	4.5	3.57	83.98	67.61	8.14	78.18	0.43	

注:喷嘴寿命 > 3 a。

表 1 和表 2 是中国石油化工股份有限公司和中国石油天然气股份有限公司 2006 年的生产统计数据,仅取干气收率排名最低的装置进行统计。可以看出,使用 KH 喷嘴的厂家占绝大多数, KH 喷嘴的干气产率均小于当年干气产率的平均值, 4% 以下占多数。此外,能耗和剂耗多数小于当年的

平均值,说明 KH 喷嘴经济效益较好。

表 3 是中国石油化工股份有限公司和中国石油天然气股份有限公司 2006 年使用 KH 喷嘴的 70 余个装置中 22 个 0.8 Mt/a 以上催化裂化装置的生产数据统计,可以看出, KH 喷嘴在 22 个装置上使用,效益较好。KH 喷嘴使用的蒸汽量较小,在

4.0%~4.5%;干气产率较低,4%以下占大多数;而液体收率大多为83%~84%;能耗中等。

6 KH型喷嘴技术的改进和发展

KH型喷嘴研发推广使用二十年来,不断改进和提高。取得了如下进展:

(1)干气收率低,干气产率下降约1%,纯液体收率大约增加1%。

(2)低雾化蒸汽量。与同类喷嘴相比,雾化蒸汽量低1%~2%,有效地降低了装置能耗和污水排放量。

(3)对特重特差油品的适应能力强。目前国内各厂炼制高黏度和高比例的渣油,金属、残炭及

杂质特别多,提升管结焦严重。使用KH喷嘴以后,可以做到基本不生焦,液体产品收率可达到80%以上,而干气、焦炭产率则大幅度降低。

(4)将对KH喷嘴采用计算机模拟,以便优化和调整设计参数,数值结果和实验相结合,改进KH喷嘴的结构。

参考文献

- [1] Pilch M, Erdman C. Use of break-up time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced break-up of a liquid drop. *Int. J. Multiphase Flow*, 1987, 13: 741-757.

(编辑 苏德中)

DEVELOPMENT OF KH ATOMIZING NOZZLES AND TECHNOLOGY

Chen Zhijian¹, Tang Zemei¹, Li Yong'an², Wang Genxing², Yu Jianzhong³

1. *Mechanics Research Institute of China Academy of Sciences (Beijing 100190, China)*

2. *Beijing Keliqing Technology & Trade Co., Ltd. (Beijing 100190, China)*

3. *PetroChina Huabei Petrochemical Company (Renqiu 062552, Hebei, China)*

Abstract: Based upon the research achievements of liquid droplet and in consideration of principles of fluid mechanics, the atomizing mechanisms of KH nozzle is analyzed, the physical model of KH atomizing nozzle, theoretical calculation and tests results are given, and the construction and dimensions of atomizing nozzle are determined. It is proved that the pressure drop of the nozzle is a critical factor to control the sizes of atomized droplets. The impact of oil and steam rates, nozzle construction and operating parameters, etc on the sizes of the droplets is analyzed. The standards for assessment of nozzle quality are presented. The steam requirement, dry gas and liquid yields and energy consumption of KH atomizing nozzles are discussed.

Key Words: fluidized catalytic cracking, atomization, KH nozzle, dry gas yield

国内外动态

美国通过费托合成生产喷气燃料

美国于2008年9月中旬宣布通过费托合成生产出喷气燃料。Rentech公司从其在科罗拉多州Commerce市的费托合成产品验证装置第一次生产出了喷气燃料。该装置通过天然气蒸汽重整生产由氢气和一氧化碳组成的合成气,再通过费托反应将合成气转化为石蜡,费托反应在

浆液反应器中及在约250℃和1.5~2.5MPa下,采用铁基催化剂进行。完全一体化的装置采用UOP公司技术将费托产品进行改质,生产出420加仑/天喷气燃料和柴油燃料。

(钱伯章摘译自 *Chemical Engineering*, 2008-09-18)