

催化裂化装置新型进料喷嘴的 实验研究及工业应用

中国科学院力学研究所 燕化公司炼油厂

改善进料喷嘴的雾化性能对开发掺炼重油催化裂化装置起着重要作用。本文对气液两相进料喷嘴的雾化机理进行了深入探讨。在此基础上提出改善喷嘴雾化性能的途径：一是增加气相速度，以增加气液两相速度差来达到提高气动力的目的。使原料油滴在大的气动力作用下破碎或微细颗粒。二是适当提高喷嘴出口的液相速度，使两相对的喷嘴喷出微细液滴在提升管内对撞时能进一步撞碎，形成一团上升的雾样的极微细颗粒（实测SMD为 63μ ）团形直径比喷嘴射流直径大。依靠喷嘴的安装位置，使这些微粒能比较均匀地分布在提升管各个部位。

经过近二年的工作，研制出的KH-1型喷嘴在燕化炼油厂二催化使用已获得掺渣率提高6.29%，轻质油收率提高2.8%，蒸汽使用量下降到 500kg/h 以下的好效益。研制的KH-2型喷嘴，经济效益比KH-1型有提高，还成功地解决了提升管的振动问题。

一、综述

在石油炼制领域，催化裂化技术近几年来发展很快。高效率的催化剂不断被研制出来，与之相适应的新的反应器结构型式也相继被开发成功，使催化裂化的反应时间已由原来的七、八秒钟缩短到二、三秒钟，甚至

更短。这就要求供料系统——油喷嘴也要不断的改善。油喷嘴出口的雾化油滴是进入含有浓密固体催化剂的反应器（提升管）中（图1）。此处的催化剂正处于加速段。这些油滴与运动着的催化剂碰撞，并与对面喷嘴喷出的油滴对撞，获得最终的油滴粒度与油滴的分布。

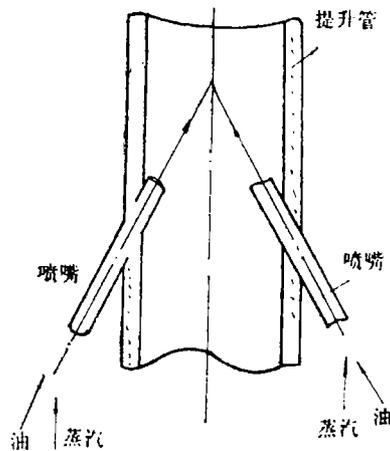


图1 催化裂化装置进料原理

根据生产实践，要求研制出来的新喷嘴喷出的雾化液滴的粒度要细，能均匀的分布在提升管的各个部位。并要求在整个运行期间不堵，磨损量小和耗蒸汽量小。总体分布均匀可使各部位的催化剂都能获得参加反应的机会。油滴粒度细使它遇到高温的催化剂

表面后，能很快气化进行反应，使反应效率明显提高，催化剂表面生焦也随之降低。最终达到提高掺渣率和轻质油收率的目的。

进料喷嘴是气液两相喷嘴。属于流体力学领域的两相流是个十分复杂的问题，影响因素很多。

二、喷嘴雾化机理

进料喷嘴是气液两相流的喷嘴，它的雾化机理是利用高速气流的能量，克服反应液体（原料油）的表面张力和粘度的约束，使原料油破碎成雾状的微细颗粒。

1. 韦伯数We的影响

是描述气动破碎的最主要的无量纲参数。它的数值是表示气动力克服液体表面张力，使液流或液滴破碎的能力。

$$We = \frac{\rho_g \cdot \Delta V^2 \cdot d}{\sigma}$$

其中： σ 是液体表面张力； ρ_g 是气体密度； ΔV 是气液两相速度差 $\Delta V = V_{气} - V_{液}$ ； d 是液滴直径。

气动力压强等于 $\frac{1}{2} \rho_g \cdot \Delta V^2$ ；由表面张力引起的液滴压强等于 $4\sigma \frac{\sigma}{d}$ 。因此韦伯数We实际上是表示气体动压强与液滴压强之比。当气体动压强足够大时，就能克服表面张力，使液滴破碎。韦伯数大于8，液滴开始破碎。韦伯数越大破碎时间愈短，破碎粒度愈细见图2~6。

1) 振荡形破碎(韦伯数We在10附近)。

气动力压强略大于：液滴压强。经过若干次振荡才会破碎成二个

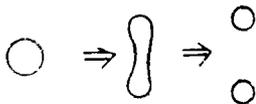


图 2

2) 袋状破碎(韦伯数We在20左右)

气动力压强增大，将液滴压成袋形，先是袋碎，接着边缘破碎。

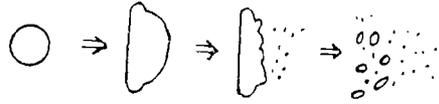


图 3

3) 锁骨状破碎(韦伯数约在70附近) 破碎时间比袋状短，粒度比袋状细。

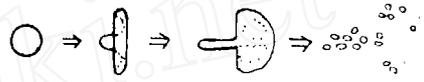


图 4

4) 表面剥离型破碎(韦伯数We约在1000左右)。

气动力压强很大，液滴还来不及发生较大变形，表面一层呈雾状迅速剥离。

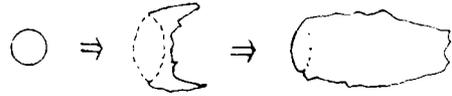


图 5

5) 灾难性破碎(韦伯数We约在5000左右)。

气动力压强十分强大，使液滴发生爆炸式破碎，时间极短，粒度极细。

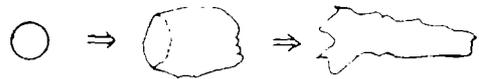


图 6

本喷嘴设计的基点是，增加速度差 $\Delta V = V_{气} - V_{液}$ ，以达到增加气动力压强 $\frac{1}{2} \rho_g \Delta V^2$ 的目的。

气液两相在喷嘴内流动过程中,速度差 ΔV 和液滴粒径 d 都随时间而变,因而韦伯数 We 也是个变量。在混合腔与喷嘴的收缩段, ΔV 较低,液滴直径较大。通过喉道的加速,气液速度差 ΔV 增加,液滴直径逐渐因破碎而变小。(喉道加速,气液两相速度都增加,但液向流速比气相流速低一个量级,因此实际上是提高了两相流的速度差 ΔV)。

2. 雷诺数 Re 的影响

除了悬浮液滴外,还有部分液体附着在喷嘴壁上向下游流动。这部分液体的雾化主要靠由于气液速度差 ΔV 作用在液体上的切应力,克服液体粘性,对液滴剥离而使液滴破碎。

雷诺数对液滴破碎的影响很复杂,例如:一对于液滴外部来说,气体雷诺数 $Re_g = \rho_g \cdot \Delta V \cdot d / \mu_g$ 是重要参数(ρ_g 是气体密度, ΔV 是气液速度差, $V\Delta = V_{气} - V_{液} = V_g - V_l$, d 是液滴粒径, M_g 是气体粘度)。对于液滴内部环流来说,液体雷诺数 $Re_l = \rho_l \cdot \Delta V \cdot d / M_l$ 是重要参数(ρ_l 是液体密度, M_l 是液体粘度)。对于两相流总体来说,内部流动与外部流动互相耦合,两种雷诺数都有影响。而对于壁上液膜雾化来说,直接,也是主要影响雾化效果的是特征长度雷诺数 Re_L , $Re_L = \rho_g \cdot V_g \cdot L / m_g$ (V_g 是气体速度, L —是特征长度,“g”—代表气体,“l”代表液体)。

综上所述,喷嘴雾化成微细颗粒是由于气液两相速度差 ΔV 的存在,($\Delta V = V_{气} - V_{液} = V_g - V_l$)产生相应的气动力所造成。喷嘴中间的液体雾化性能,主要是用近伯数 We 表示。即表示气动力克服液体表面张力,使之破碎成微细颗粒的能力。而在喷嘴壁上的液体的雾化性能,主要用雷诺数 Re 表示。 Re 表示气动力,克服液体粘性使之剥离并破

碎成微细颗粒的能力。而雷诺数是和尺寸直接有关的参数。

3. 在提升管内的状况

喷嘴喷出的微细颗粒油滴与相对应喷嘴喷出的同样油滴对撞;这些油滴也与运动着的固体催化剂发生碰撞。因为这些碰撞存在,要求喷嘴喷出的油滴有较高的速度。若速度低,对撞的油滴会汇成大液滴;若速度较高,则会进一步撞碎,形成最后的油滴粒度。这速度要高到什么程度,理论计算极为复杂,我们是靠实验来得到的。

同时依靠喷嘴的安装位置及油滴的碰撞分力,使最后形成的上升的团雾状的极微细颗粒能比较均匀地分布在提升管中。

喷嘴粒度测量值是碰撞后的粒度值。

我们采用目前国际上较通用的SMD(the Sauter meandiameter),称索太尔平均直径。

$$SMD = \frac{\sum n d_1^3}{\sum n d_1^2}$$

其中 d_1 是总数为 n 的各液滴的直径。

另一种用得较广的表示法是MMD,它表示概率为50%的直径,称质量中间直径,它精度为 $\pm 5\%$ 。

$$MMD = 1.20 SMD$$

三、喷嘴实验方案

1. 采用一比一的全尺寸冷态模拟试验

喷嘴进入提升管,一直到最后形成上升的团雾状的极微细颗粒,还不是个单纯的两相流问题。它还涉及气(高温蒸汽),液(油滴)固(催化剂)三相的相互碰撞,能量交换和化学反应,并伴有相变发生的复杂过程,不能采用简单的方法模拟。

喷嘴研究的指导思想,一是雾化后油滴

粒度细而均匀，并具有一定的速度。二是要求油滴能较均匀地分布在提升管中。

为了保证研制的新喷嘴能可靠的应用于生产，本喷嘴是在一比一的工业实验装置上进行全尺寸的冷态模拟试验。即将喷嘴不做任何尺寸上的缩小，在工业试验台上做实验。同时还将新研制的喷嘴与原用的喉管式喷嘴在生产实际参数除温度以外，其他完全相同的条件下进行对比试验。证明只有改进之后，才可以投入工业使用。

图7是一比一工业实验装置原理图。

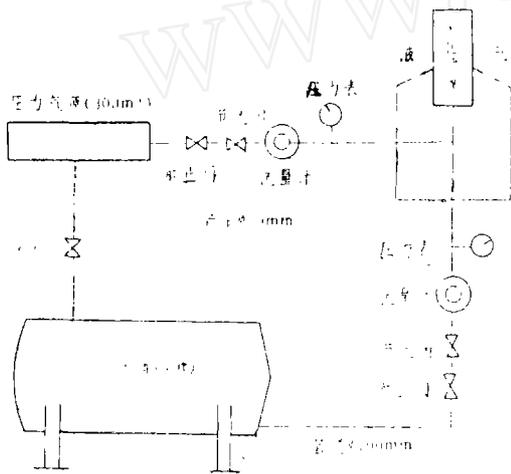


图7 雾化喷嘴工业实验装置

2. 实验参数与介质

生产实际参数见表1，我们建的工业实验装置所提供的参数除温度为常温外，其他完全相同。我们研制的喷嘴气体流量还可减少到400kg/h。

介质：用压缩空气代替270~300℃高温水蒸气，因为它们都是干燥气体。用压力水代替350~380℃的原油，因为一、它们的运动粘度都是 $0.9\text{m}^2/\text{s}$ ，二是20℃水的表面张力(0.074g·力/cm)大于20℃原油表面

张力(0.0265g·力/cm²)，当然更大于300℃以上原油的表面张力，因为表面张力是随温度的增加而减小。即油容易破碎。用常温水代替高温油，若水破碎得好，则高温油破碎得更好。

表 1

	油	水 蒸 气
压力kg/cm ²	5~6	8~6
温度 t C	350~380	270~300
流量 t/h	25~30	0.75~0.9
粘度 η 、操作温度 mm ² /S (厘沲)	<1.0	—
比重 $\rho_{20^\circ\text{C}}$ g/cm ³	0.88	—
ρ 操作温度	0.65	—
反应器压力kg/cm ² (提升管)	1.5~2	1.5~2 ϕ

这样的冷态试验，从流态角度来看，冷态与热态是一样的，即与生产实际是符合的。从雾化性能角度来看，冷态差于热态，即若冷态雾化得好，则热态一定更符合要求。

在两相流喷嘴，使液滴破碎的力是气动力，而气动力是由气液两相速度差 ΔV 造成($\Delta V = V_{\text{气}} - V_{\text{液}}$)，气动力正比于 ΔV^2 。这些前面已叙述过。在其他条件相同的情况下，热态的高温饱和水蒸气的速度大大地高于冷态压缩空气的速度，即 $V_{\text{热}} > V_{\text{冷}}$ ， $\Delta V_{\text{热}} > \Delta V_{\text{冷}}$ 。所以冷态的雾化比冷态强得多。即生产中的雾化颗粒比实验室测出的颗粒要小。实验室研制出雾化性能好的喷嘴，在生产中应用效果也一定会好。我们研制的KH-1型与KH-2型喷嘴在燕山公司炼油厂使用证实，这二种喷嘴都能获得较好的经济效益。

四、喷嘴的设计

喷嘴的工作参数见表1。

我们选用内混合式喷嘴，目的是使液体适用范围大。即从粘度很小的稀油开始，一直到粘度很大的渣油。

1. 设计依据

(1) 按气液流量比设计

气液质量流量比是影响雾滴粒径的一个最重要的参数，气液比 = 气体流量 / 液体流量 = $Q_{气}/Q_{液}$ 。气液比值增大时，雾滴粒径减小。一般喷嘴的气液流量比介于0.1~10之间。小于0.1，即使很容易雾化的料液，雾化情况也会很快恶化。10是比值增大到使雾滴变细的上限值，超过10，只能是浪费能量而达不到明显减小雾滴粒度的效果。

燕化公司炼油厂给的气液比 $Q_{气}/Q_{液} = \frac{900}{30000} = 0.03$ （见表1）允许增加到0.05~0.08。仍小于0.1。而我们还得知胜利炼油厂蒸汽使用量约为400~300kg/h，气液比为0.01~0.0134。为了使本喷嘴应用范围大，我们设计喷嘴使用的气液比范围0.013~0.03；原料油的流量为30t/h，蒸汽量为400~900kg/h。

因气液比小于0.1，不能按常规的方法设计，而要进行专门的设计计算^[2]。

我们的喷嘴在生产上实际使用的蒸汽流量范围为400~600kg/h，而仍能保持较好的雾化性能。

(2) 取尽可能大的韦伯数We。

雾化机理已介绍，增加韦伯数We与雷诺数Re的好处是增加气动力，以克服原料油的表面张力与粘度的约束，破碎或雾状的微细颗粒。提高韦伯数We与雷诺数Re，只能采取尽量加大气体速度的方法，以增加气液

速度差 ΔV ，达到增加气动力的目的。

本喷嘴采用二级喉道加大气体速度的双喉道喷嘴，用来提高 ΔV 。并在喷嘴结构尺寸上保证有足够的破碎时间。

(3) 喷嘴各部分通道截面积足够大

催化裂化装置的进料喷嘴使用特点之一是流量大， $Q_{原料油} = 30t/h$ 。运行时间长，约10个月以上。要求喷嘴不会因堵塞而影响生产；不会因截面小而引起大的摩擦和磨损而造成喷嘴失效，雾化性能恶化而影响经济效益。喷嘴的各部分通道截面大也有利于渣油的通过。

(4) 使喷嘴出口液滴速度比较大。

在提升管内参加反应的原油雾化成极微细颗粒是由喷嘴出口油滴与运动着的催化剂碰撞，主要还是和相对应喷嘴出口油滴碰撞后形成的。若出口油滴速度大，可以进一步破碎。若速度小，就会汇成大油滴。所以喷嘴出口油滴速度大，可以达到进一步雾化的目的。油滴速度高，还可以克服油和催化剂表面的传质阻力，同时还克服油在催化剂表面的吸附，减少催化剂的生焦率。

2. KH型喷嘴的设计和实验过程

从喷嘴的雾化机理已知，气液两相喷嘴液体要破碎成细颗粒，只能靠气体的能量来达到。炼油厂催化装置进料喷嘴与其他类型喷嘴的最大差别是允许的气液比小（进料喷嘴为0.013~0.05，其他喷嘴为0.1~10）相应的用气量少。若条件相同，从气体处直接转换的能量也少。要改善雾化，只能采用提高速度的办法，即充分利用装置上能提供的压力能源，将它全部用来转换成气体能量。据此来选用喷嘴的结构类型及计算尺寸。

按气液比0.03范围，根据国内外资料选定一种内混合型喷嘴类型。按工厂提出的工况（表1）所示的压力、流量和温度，照顾到

其他设计依据，即韦伯数 We 大，即取气相速度大，适当增加出口的液相速度，取尽可能大的通道面积等各个方面，计算出一个尺寸范围。在此范围内加工出四种不同尺寸的喷嘴。还根据文献资料介绍的，在别的喷嘴上已行之有效的提高雾化效果的方法，如加声共振腔，加碰撞板，加斜锥度等方法，最后形成四种系列共12种方案的喷嘴，在力学所自建的一比一的工业实验装置上，与原用喉管式喷嘴一起作对比，筛选实验，见图7。

实验的参数是在保证原料油的流量30t/h的前提下，首先使液体压力接近于工厂提出的6kg/cm²，一般应当小一些，约在5kg/cm²以防止生产中有突然情况，进油量上不去。其次使气体压力接近8~9kg/cm²。此时气体流量控制在不大于900kg/cm²即可认为是符合要求。按我们计算的尺寸，做实验结果发现，气量超过400kg/h后，再增加用气量，雾化效果变化不大，与喉管式喷嘴相比，都还比较好。为了节省蒸汽量，提高催化剂寿命，我们选用了小的用气量喷嘴。

筛选的方法是观察对比喷嘴出口射流的速度、粒度、流态与扩散角等，比较直观。

实验是在室外场地上进行的。由于液体流量大(30t/h)，喷嘴出口管径的直径很大，喷射高度达15m，呈抛物线状，返落下来的雾状液滴遍布整个实验场。所以粒度与速度都无法用精密仪器如激光测雾仪、激光测速仪等精密仪器。

在喷嘴对喷实验后发现，对撞后形成上升的团雾状的极微细颗粒，团雾的直径比喷嘴射流大，且分散均匀。用自制采样器，放在对喷点上方约3m处，距对喷轴线约1.5m。为了采样方便，我们把喷嘴放平对喷。采样速度约300毫秒。采的是对撞后冷态粒度值。采样直径φ15mm，在玻璃上涂100

厘泊粘度的硅油，厚度80~100μ。采样液体压力5.5kg/cm²流量30t/h，气体压力为8kg/cm²，流量为600kg/h粒度SMD为63η见图8。

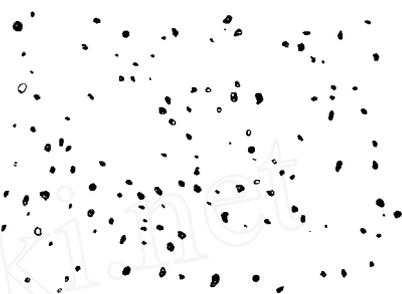


图8 对喷后雾化白粒度(·25)

速度无法测量，为弥补这方面的不足，采用计算法：

两相流基本方程为：

$$(1 - \xi_l) \rho_g \cdot V_g \cdot A(X) = Q_g = \mu Q_l$$

$$\xi_l \cdot \rho_l \cdot V_l \cdot A(X) = Q_l$$

$$(1 - \xi_l) \rho_g \cdot V_g \cdot dV_g + \xi_l \cdot \rho_l \cdot V_l \cdot dV_l + dp = 0$$

$$P = R \cdot \rho_g \cdot T$$

其中“g”——气体 “l”——液体

ξ_l ——液体分数 Q_g ——气体流量

ρ_g ——气体密度 V_g ——气体速度

Q_l ——液体流量 ρ_l ——液体密度

V_l ——液体速度 $A(X)$ ——计算X

处速度时相应面积 P ——压力

$$\eta = \frac{Q_g}{Q_l} \text{——气液流量比, } T \text{——温度}$$

根据雾化喷嘴的流动特点，设温度是常数，气相速度与液相速度比在某一定范围内是常数，即

$$T_g = T_l = \text{Const}$$

$$V_l/V_g = K = \text{Const}$$

喷嘴的运行条件:

蒸汽压力 $10\text{kg}/\text{cm}^2$; 温度 320°C

原料油压力 $6\text{kg}/\text{cm}^2$; 温度 350°C

流量 $30\text{t}/\text{h}$ 比重 $0.65\text{g}/\text{cm}^3$

提升管压力 $1.5\sim 2\text{kg}/\text{cm}^2$

表2 计算后数据指喷嘴各截面的平均值

	蒸汽	原料油
流量 t/h	0.45~0.5	30
第一喉道喉部速度 m/m	500~700	
混合腔内原料油速度 m/S		7~4
在混合腔内平均速度 m/S	25~35	5~8
第二喉道处速度m/S	130~140	50~60
喷嘴出口处速度m/S	170~180	70~80

3. KH型喷嘴的特点

(1)气体从轴线通过第一喉道进入混合腔, 原油从侧面进入混合腔, 受到通过第一

喉道高速气流的冲击, 第一次破碎。

(2)气液两相从混合腔通过第二喉道, 喷向提升管。这时气液两相都获得加速, 由于气相速度比液相速度高出一个量级, 气相速度的增加大于液相速度的增加, 因此实际上也是提高了气液两相的速度差 ΔV , 也就是增加了气动力。原料油通过第二喉道时又受到第二次气动力的冲击, 破碎成较细的颗粒。

(3)第二喉道KH-1型为普通的单喷头 KH-2型分为二个喷头。

五、新型进料喷嘴的 工业应用效果

KH-1型进料喷嘴在燕化公司炼油厂二催化装置上运行了一个周期(9个月), KH-2型已运行3个多月, 均取得了很好的经济效益。KH-1型在运行中同原喉管式喷嘴一样, 存有振动问题。KH-2型已很好地解决了这个问题, 各个时期的使用情况如下。

表3 原料油性质

项 目	喉管式喷嘴	KH-1	KH-2 ^[1]	KH-2 ^[2]
馏程($^\circ\text{C}$)				
2%	313	336	316	319
10%	372	387	372	378
50%	442	452	427	450
馏出($\text{ml}/500^\circ\text{C}$)	71	68	71	68
残碳(wt%)	1.85	2.18	2.01	2.20
NiP ppm	2.2	3.0	2.90	6.0

注: [1]掺炼大庆减渣28%左右。 [2]掺炼华北减渣16%左右。

表4 主要操作条件

项 目	喉 管 式	KH-1	KH-2
新鲜原料量 (t/h)	105	99.0	101.0
掺渣量 (wt%)	14.43	20.72	21.28[1]
回炼比	0.40	0.48	0.47
原料预热温度 (°C)	370	368	375
提升管出口温度 (°C)	488	475	490
再生温度 (°C)	627	620	642
沉降器顶压力 (kPa)	126.5	120.7	127.5
再生器顶压力 (kPa)	156.0	147.20	155.0
再生器藏量 (t)	92.0	82.0	85.0
催化剂单耗 (kg/t)	0.73	0.70	0.75
主风量 (Nm ³ /h)	91000	89000	93000
烟气组成V%			
CO ₂	14.5	14.2	14.30
CO	0	0	0
O ₂	3.5	3.6	4.20

注：[1]7月18日至22日对喷嘴进行了标定，此值系5天平均值。20日至22日掺炼华北减渣。

表5

项 目	单 价 元/t	喉 管	KH-1	KH-1 与喉管比		KH-2	KH-2-5 喉管比	
				变化率 ±%	利润元		变化率 ±%	利润元
加工量 t	[1]140	320021	283558					
掺渣率wt%	[2] 55	14.43	20.72	+6.29	+ 5.35	21.28	+6.85	+ 5.82
产品分布wt%								
干气	40	3.62	4.40	+0.78	+ 0.31	2.58	-1.04	- 0.42
液态烃	120	11.15	7.54	-3.61	- 4.33	5.90	-5.25	- 6.30
汽油	580	50.03	48.82	-1.21	- 7.02	47.0	-3.03	-17.75
柴油	330	27.91	31.92		+13.23	37.45	+9.54	+31.48
焦炭		6.84	6.98	+1.02		7.20		
合计					+ 7.54			+13.01

注：[1]蜡油价格 [2]渣油价格 KH-1型喷嘴年可获利571.5万元。
按1988年实际加工 75.8×10^4 t计 KH-2型喷嘴年可获利985万元。

表6 催化剂的主要性质

项 目	喉管式	KH-1	KH-2
定碳 (wt%)	0.15	0.10	0.13
Ni (ppm)	3300	4000	3900
Sb (ppm)	6200	6400	4400

4. 经济效益

喉管式喷嘴取1988年1~4月取率平均值, KH-1取1988年9~12月收率平均值, KH-2取7月18日至22日收率平均值进行对比见表5。

六、结束语

经过近二年的工作, 研制出KH-2型喷嘴, 通过在燕化炼油厂二催化上使用二个多月证明能较好地解决提升管的振动问题。同时它的雾化性能也和KH-1型类似。在做实验时我们用观察对比法可以看出, 原用喉管式喷嘴、KH-1型喷嘴、KH-2型喷嘴。三者比较, 喉管式喷嘴最差, KH-1型与KH-2型类似。另外做实验时我们还用混合腔压力PE来对比它们三者雾化关系, 结果也相同, 因 $PE \propto \frac{1}{d}$ [6], d—是雾化后粒径, PE越大, d越小。实验时实测混合腔压力PE, 原用喉管式喷嘴为 0.87 kg/cm^2 , KH-1型为 3.4 kg/cm^2 , 2KH-2型为 3.27 kg/cm^2 。但KH-2型是双喷头喷嘴雾化颗粒分布更趋合理, 所以在燕化炼油厂使用经济效益证明高于KH-1型喷嘴。与原用喉管式喷嘴相比, 提高掺渣率和轻质油收率使蒸气用量下降到 $400 \sim 500 \text{ kg/h}$, 节约了能源。

本喷嘴是按燕化炼油厂二催化的具体条件来设计的。经济效益的获得除了喷嘴外还对管路系统作了改进。如用在其他炼油厂还要根据以下参数对喷嘴稍作修改如原料油质

量、工作参数(压力、温度、流量)的改变和对不同的管路系统作不同的修改等。

参 考 文 献

[1] A.H. Lefebvre, Prog Energy Combust Sci Vol.6 P.233-261 1980 "Airbrast Atomization"

[2] P.J. Mullinger, Journdl of Nhe Institute of Fuel, Vol.47 December 1974

"The design and Parformance of internal mixing multiyet twin-fluid atomizers"

[3] Takeshi Sakai, Masao Kito, Proceedings of the 1st international Conference Onliquid Atomization and Spray Systems, Tokyo August 27-31, 1978 (ICLAS-78)

"CHARACTERISTIC of Internal Mixing Twin-Fluid Atomizer"

[4] R.W. Tate "Droplet Size Distribution Data For Internal Mixing Pneumatic Atomizers" Imperial College, London 819/10 July, 1985 (ICLASS-85)

[5] G. Reineche and G.D. Waldman "Shoch Layer Shatterind of Cloud DroPs im Reentry Fight" AIAA, PaPer75~152

[6] J.M. Chawla ICLASS-85 LP/IA/5/1~LP/IA/5/7

[7] 普郎特 流体力学概论 科学出版社 1974

[8] 陈国桓《化工设备设计》1No.5 P.13~18

"喷雾干燥中气流式喷嘴的设计"

[9] K.R. May Jour Sci Instrum, Vol27 May, 1950