

文章编号:1671-6833(2005)03-0069-04

工艺对旋转填料床功率影响的实验分析

陈海辉, 曾莹莹

(南华大学机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:通过测量在不同气、液流量及转速条件下逆流型、错流型旋转填料床的功率,分析了旋转床功率与工艺参数之间的关系.实验结果表明:在正常工作范围内气流量对填料床功率几乎没有影响;从干床到湿床功率从干床到湿床时产生一个突跃,而后随流量增加呈直线平稳增长;干床功率随转速缓慢增长,而湿床功率随转速 n 增长较快;单位质量液体的湿床能耗随流量增加而减少;净功率与湿床功率之比随转速、流量的提高而增加.增大液流量,适当提高转速可提高旋转床功率的有效利用程度.

关键词:旋转填料床;功率;实验分析;能耗

中图分类号: TQ 021.1 **文献标识码:** A

0 引言

旋转填料床强化传质传热已得到了一致认可,开始了实际应用,在设计工作中其功率是个重要参数,国内外学者对旋转填料床功率方面展开的研究不多.M. Keyvani 和 N. C. Gardner 认为旋转床功率近似为^[1]: $P=a\omega+b\omega^{1.5}+c\omega^2+d\omega^3$. 其中 a 为克服轴承摩擦阻力所消耗的功率, b 为风力所消耗的功率, c 为提高液体速度所消耗的功率, d 为克服填料摩擦阻力所消耗的功率. 他们实验表明:1 kg 液体总能耗为 1.0 kJ,基本上与泵输送流体的消耗可比. 北京化工大学柳松年等人于 1997 年对超重力分离机(用于分离的旋转床)的功率进行了分析^[2],认为有 5 个方面的功率:①液体通过旋转填料层时所需要的功率, $P_1=QV_L \cdot (r_0^2-r_i^2) \omega^2$;②克服进入填料层时液体的惯性所需要的功率, $P_2=0.5QV_{Fi}^2 \omega^2$;③克服轴承的摩擦所消耗的功率 P_3 ;④转鼓与空气摩擦消耗的功率 P_4 ;⑤克服干燥转子惯性,由静止达到额定转速的启动功率 P_5 . 转子启动阶段消耗功率应该是 $P_5+P_4+P_3$,在启动完毕,进入连续运转阶段时,旋转填料床所消耗功率为 $P_1+P_2+P_3+P_4$. 柳松年等人于 1998 年进行了功率测定^[3],他们的测试表明: P_1+P_2 占旋转填料床所消耗功率的 90%左右.

旋转床有错流型和逆流型两种形式,其填料也各种各样,因此液相的分散程度不一样,单位质量液体通过旋转填料层所获得的能量就不一样^[4,5]. 笔者通过测试两种旋转床在不同工艺条件下的功率,探索旋转填料床功率与工艺参数之间的关系.

1 测试方案

1.1 实验装置

图 1 为测量逆流型填料床的功率示意图,三相四线电源 9 经过闸刀开关 8,结到电能表 7 上,从电能表 7 输出电源驱动带动转子 5 的电机 6. 图 2 为测量错流型填料床的功率示意图,电机带动转子 3 和轴流型风扇 5.

上海华立电表厂出产的电能表,精度为 B1 级. 逆流型填料床结构见文献[4,5],结构尺寸:转子外径 320 mm,转子内径 70 mm,填料片数 5,填料高度 15.5 mm,比表面积 645 m⁻¹,填料区间容积 3.36×10⁻³ m³,干床空隙率 0.838. 错流型填料床结构见文献[4,5],其转子丝网孔径 1.2 mm,额定转速为 1 300 r·min⁻¹.

1.2 测试方法

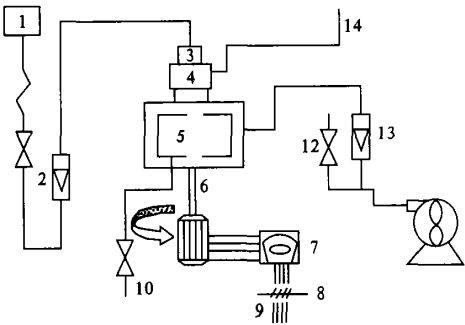
旋转填料床气、液流量为零时所耗功率定义为干床功率 P_{dry} , P_{dry} 反映的是转子转动性能. 液相通过旋转填料床时的功率定义为湿床功率 P_{wet} , P_{wet}

收稿日期:2005-04-08;修订日期:2005-05-25

基金项目:湖南省科技攻关项目(04C551)

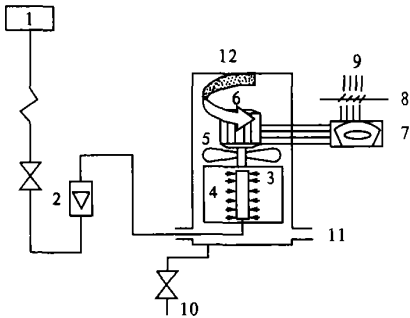
作者简介:陈海辉(1968-),男,湖南省衡阳市人,南华大学副研究员,博士,主要从事强化传热传质研究.

反映的是转子消耗的总功率. 湿床功率 P_{wet} 与干床功率 P_{dry} 相减, 就得到转子对流体所作的净功 P_{net} , P_{net} 主要是用来提高流体的速度, 使液体雾化, 提高比表面积, 克服流体流经填料床时的摩擦阻力及液体惯性. $P_{\text{net}} = P_{\text{wet}} - P_{\text{dry}}$. 液体通过旋转填料层以及克服液体惯性所需要的功率定义为旋转填料床的离心功率, 单位质量流体的离心功率为 $\left(r_0^2 - 0.5r_i^2\right) \omega^2$, 反映了液体分散程度. 单位流量的功率即为其每千克流体的能耗.



1—高位水槽;2—流量计;3—喷射式进水管;
4—气水分离器;5—转子;6—电机;7—电能表;
8—闸刀开关;9—三相四线电源;10—排液口;
11—风机;12—气流旁路;13—进气流量计;14—出气口

图 1 测量逆流型填料床功率流程图
Fig.1 Process of measure power for counter current rotating packed bed



1—高位水槽;2—流量计;3—转子;4—喷射式进水管;
5—轴流型风扇;6—电机;7—电度表;
8—闸刀开关;9—三相四线电源;
10—排液口;11—进气口;12—出气口

图 2 测量错流型填料床功率流程图
Fig.2 Process of measuring power for cross flow rotating packed bed

电能表转盘每 450 转, 耗电为 $1\text{ kW}\cdot\text{h}$, 换算成国际单位为 $3\,600\text{ kJ}$. 通过计数电能表转盘, 可以简易换算出电耗. 设每测量 10 min , 电能表转盘转 x 个圆周, 则旋转床总功率为

$$P = \frac{3.6 \times 10^6}{450} \times \frac{x}{600} = 13.33x \quad (1)$$

设电能表转盘转 10 转所需时间为 t , 即总功率为

$$P = \frac{3.6 \times 10^6}{450} \times \frac{10}{t} = \frac{80\,000}{t} \quad (2)$$

电机效率取 95%, 本实验中电机依靠皮带传动转子, 其效率可取 95%. 能量从电机传递到旋转床转子的传递效率为 η , 则 $\eta = 0.95 \times 0.95$.

2 逆流填料床实验结果

2.1 干床功率 P_{dry}

逆流型旋转床的干床功率 P_{dry} 如表 1 所示.

表 1 逆流填料干床功率
Tab. 1 Dry Bed Power P_{dry} consumed by the counter flow rotating packed bed

转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	546	910	1 274	1 638	2 002
干床功率 P_{dry}/W	244	256	256	267	278

从表 1 看出, 干床功率 P_{dry} 要达到某一个值才能启动旋转床, 启动后 P_{dry} 随转速呈直线缓慢增加. 这表明轴承滑动摩擦系数低. 回归出逆流填料干床总功率 P_{dry} 与转速的关系:

$$P_{\text{dry}} = 232.6(1 + 8.91 \times 10^{-4} \omega) \quad (3)$$

2.2 气流量的影响

表 2 为液流量 Q_L 在 $0.4\text{ m}^3/\text{h}$ 、气流量 Q_g 变化时旋转填料床总功率情况.

表 2 逆流填料床总功率
Tab.2 Total power consumed by the counter flow rotating packed bed

转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	气液流量/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)				w
	$Q_g=0$	$Q_g=0$	$Q_g=20$	$Q_g=30$	
	$Q_L=0$	$Q_L=0.4$	$Q_L=0.4$	$Q_L=0.4$	
546	244	467	480	489	
910	256	544	549	541	
1 274	256	611	615	624	
1 638	267	633	633	645	
2 002	278	656	665	650	

从以上实验测试来看, 气流量对填料床总功率几乎没有影响. 从我们整个实验来看, 在其他液流量情况下, 只要旋转填料床在不发生液泛, 在正常工作的情况下, 气流量对填料床总功率的影响与表 2 相似. 因此, 在以下功率分析中, 不再考虑气流量的影响.

2.3 液流量、转速的影响

旋转填料床的液流量、转速是影响总功率的主要因素,湿床功率 P_{wet} 如表3所示.

表3 逆流型旋转填料床的湿床功率

Tab.3 Wet bed power consumed by counter flow rotating packed bed

转速/ (r·min ⁻¹)	湿床功率/W				
	$Q_L=0/(m^3·h^{-1})$	$Q_L=0.4/(m^3·h^{-1})$	$Q_L=0.5/(m^3·h^{-1})$	$Q_L=0.6/(m^3·h^{-1})$	$Q_L=0.7/(m^3·h^{-1})$
546	244	467	489	511	534
910	256	544	611	644	667
1 274	256	611	644	667	689
1 638	267	633	711	756	822
2 002	278	656	722	778	867

从表3看出:①填料床的湿床功率 P_{wet} 随液流量 Q_L 增大而增大.即使在低转速下,从干床到湿床, P_{wet} 出现一个突跃,而后呈直线平稳增长;②干床功率 P_{dry} 随转速 n 缓慢增长,而湿床功率 P_{wet} 随转速 n 增长较快;③单位质量流体的湿床能耗随流量增加而减少,如在转速 $2\,002\,r·min^{-1}$ 下,液流量为 $0.4\,m^3·h^{-1}$ 时 $1\,kg$ 液相的湿床能耗为 $5.9\,kJ$,液流量为 $0.7\,m^3·h^{-1}$ 时 $1\,kg$ 液相的湿床能耗为 $4.5\,kJ$;④净功率与湿床功率之比反映了功率的有效利用程度,它随转速、流量的提高而增加.在液流量为 $0.7\,m^3·h^{-1}$ 下,转速 $546\,r·min^{-1}$ 时有效率为 54% ,转速 $2\,002\,r·min^{-1}$ 时有效率为 68% ;在液流量为 $0.4\,m^3·h^{-1}$ 下,转速 $546\,r·min^{-1}$ 时有效率为 47% ,转速 $2\,002\,r·min^{-1}$ 时有效率为 58% .

2.4 单位质量液体的净能耗

不同流量下每千克液体的净能耗如图3所示.液流量为 $0.4\,m^3·h^{-1}$,转速从 500 到 $1\,300\,r·min^{-1}$ 时,每千克液体净能耗急剧增加,以后基本稳定在 $3.4\,kJ/kg$.其他流量在转速 $1\,600\,r·min^{-1}$ 以后的单位质量液相分散的净能耗基本稳定在 $3.0\,kJ/kg$.流量小的单位质量液相净能耗与流量大的相差较大,随着转速增加,相差变小,说明液相流量小分散程度好,随着转速的增加分散程度提高,最后趋向某一定值,这与实际情况相符.

在图3中最低的曲线表示每千克液体的离心能耗,从中看出它在每千克流体的净能耗中所占比重随着转速的提高而增加,但最大不到 40% .

3 错流型填料床实验结果

错流型填料床的功率分析主要考察丝网层、液流量对其的影响,实验结果见表4.

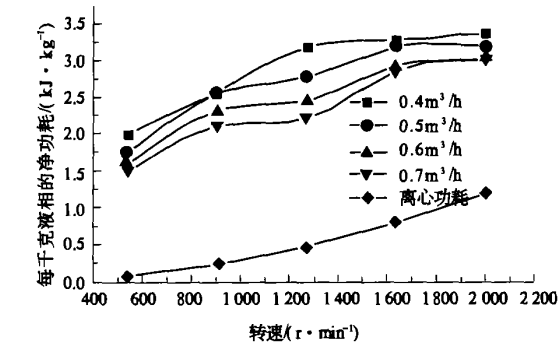


图3 每千克液相的净能耗
Fig.3 Net consumed energy per one kilogram mass

3.1 液流量的影响

第1~2层丝网净功率减去第1层丝网净功率便是第2层丝网净功率,第1~3层丝网雾化净功率减去第1~2层丝网雾化净功率便是第3层丝网净功率.如表4,干床功率 P_{dry} 随丝网层数增加而增大.由表4数据计算得出, P_{wet} 随流量 Q_L 增长呈直线增加,但每千克液相的湿床能耗却随液流量增加而减少,其净能耗在实验流量范围内基本上保持不变,只与丝网层数有关.当流量为 $6\,m^3·h^{-1}$ 的液体通过三层丝网时,每千克液体湿床能耗为 $1.1\,kJ$,与泵输送流体所耗功率近似.当 $1\,m^3·h^{-1}$ 液体通过三层丝网时,每千克液体的湿床能耗达 $2.2\,kJ$.因此大流量有利于降低能耗.

表4 错流型填料床功率

Tab.4 Power consumed by the cross flow rotating packed bed

液流量/ ($m^3·h^{-1}$)	第1层丝网		第1~2层丝网		第1~3层丝网	
	湿床功率	净功率	湿床功率	净功率	湿床功率	净功率
0	533	0	667	0	993	0
1	613	80	774	107	1 066	133
2	720	187	880	213	1 200	267
3	773	240	987	320	1 380	447
4	853	320	1 067	400	1 466	533
5	906	373	1 200	400	1 653	720
6	960	427	1 227	560	1 866	933

3.2 丝网层的影响

由表4数据计算得出错流型填料床净功率随丝网层数变化情况,第一丝网层净功率最大,第二丝网层净功率较小,第三丝网层净功率较大.如液流量为 $4\,m^3·h^{-1}$ 时,第一丝网层净功率 $320\,W$,第二丝网层净功率只有 $80\,W$,第三层丝网净功率也只有 $127\,W$.

这是因为液体在第一层丝网从近似静止状态到高速状态,需要较多的能量;液滴在达到第二层

丝网上时,依然具有较大动能,无需得到较多能量,便可以脱离丝网,故能耗最小;第三层丝网能耗较大,是因为从第三层丝网转动惯性力矩较大的缘故.

4 结果分析

从实验结果分析可知,增大液流量,适当提高转速可提高旋转床功率的有效利用程度.通过对比发现转子结构不同,各自的功率特点也不相同.

逆流型旋转床具有以下特点:

(1) 干床功率要达到某一个值才能启动旋转床,启动后随转速呈直线缓慢增加.

(2) 在正常工作范围内,气流量对旋转床功率几乎没有影响.

(3) 每千克液相的净能耗,在低转速范围内随着转速的增大而快速增加,在高速范围内随着转速的增大而缓慢增加.转速增大到某一值之后,每千克液体的净能耗不再增加,而趋向某一值.

(4) 每千克液体的离心能耗在流体的净能耗中所占比重随着转速的提高而增加,但最多不到40%.

错流型旋转床有以下特点:

(1) 每千克液体的净能耗在实验流量范围内基本上保持不变,只与丝网层数有关.

(2) 液相在每层丝网得到的净能耗差别较大,每层丝网分散液相的能力不一样.

从节能观点优化结构应该注意以下方面:

(1) 增大液流量、适当提高转速,能降低单位质量液体的湿床功率,提高功率的有效利用.

(2) 错流型填料床的丝网填料位置要合理布置.

参考文献:

- [1] KEYVAN M, GARDNER N C. Operating characteristics of rotating beds [J]. Chem Eng Prog, 1990, 29(5): 917~920.
- [2] 柳松年,郭 锴,宋云华,等.超重力分离机的功率分析[J].北京化工大学学报,1997,24(1): 51~56.
- [3] 柳松年,宋云华,杜婉瀛,等.超重力分离机的功率分析[J].北京化工大学学报,1998,25(1): 39~45.
- [4] 陈海辉.旋转填料床流体力学及传质传热特性研究[D].广州:华南理工大学,1999.6.
- [5] 陈海辉,曾莹莹.旋转填料床的研究应用[M].长沙:国防科技大学出版社,2002.

Experiment and Analysis of RPB'S Power Affected by Process

CHEN Hai -hui, ZENG Ying -ying

(School of Mechanical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China)

Abstract: The relationship between Rotating Packed Bed (RPB)'s power and process parameters is studied through by measured power of counter-current RPB and cross-flow RPB under various gas flow rates, liquid flow rates and rotating speeds. The result shows that: gas flow rate within work scope has little effect on RPB's power; the wet bed's power suddenly increases at the point of from dry bed to wet bed, then linearly and smoothly increases with the accretion of liquid flow ratio; dry bed's power slowly increases with the accretion of rotating speed, wet bed's power quickly increases with the accretion of rotating speed; wet bed's consumed energy by per kilogram liquid decreases with the augment of liquid flow rate; the ratio of net power to wet bed's power increases with augment of rotating speed and liquid flow rate. It is augment of liquid flow rate and rotating speed that increase efficiency of RPB's power.

Key words: rotating packed bed (RPB); power; experiment and analysis; consumed energy