

DOI: 10.3901/JME.2016.02.195

涡流空气分级机圆弧形叶片转笼的设计*

任文静¹ 刘家祥² 于源¹

(1. 北京化工大学机电工程学院 北京 100029;

2. 北京化工大学材料电化学过程与技术北京市重点实验室 北京 100029)

摘要: 涡流空气分级机分级粒径主要受转笼转速与入口风速匹配关系的影响。入口风速一定时, 转笼转速越高, 分级粒径越小, 但会造成流场速度分布不均匀, 而降低分级精度。利用 Fluent 软件对具有直叶片转笼结构的涡流空气分级机进行建模和数值模拟, 分析转笼内流场特性, 针对其流场不均匀及转笼入口冲角大等现象, 对转笼叶片的形状及安装角进行改进, 提出一种圆弧形叶片转笼的设计方法。通过数值模拟及物料试验对改进结果进行验证, 数值模拟结果表明: 圆弧形叶片转笼入口冲角减小, 流道内流场更加均匀, 分级粒径减小。碳酸钙分级试验结果与数值模拟结果吻合: 设计工况即入口风速为 12 m/s, 转笼转速为 1 200 r/min 时, 采用设计的圆弧形叶片转笼在保持分级精度不变的情况下, 分级粒径减小了 11.5%。

关键词: 涡流空气分级机; 转笼; 圆弧形叶片; 轴向漩涡; 分级粒径

中图分类号: TQ28

Design of Rotor Cage with Arc-blade for the Turbo Air Classifier

REN Wenjing¹ LIU Jiaxiang² YU Yuan¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Beijing Key Laboratory of Electrochemical Process and Technology for Materials,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

Abstract: The classification performance of a turbo air classifier is mainly affected by matching of air inlet velocity and rotating speed of rotor cage. With the same inlet velocity, increasing the rotating of rotor can decrease cut size to obtain ultra-fine powders. However, it will cause non-uniform distribution of fluid flow and decrease classifying accuracy. A model of the turbo air classifier with straight-blade rotor cage is established and the flow field is simulated by the software of Fluent. To solve the problems including non-uniform distribution of fluid flow and big angle of fluid-attack at the entrance of rotor cage, the blade's shape and installation angle are designed and improved. A method of designing arc-blade rotor cage is proposed. The simulation results indicate that for the arc-blade rotor cage, the angle of fluid-attack at the entrance of rotor cage is decreased, the flow field of channel in rotor cage becomes uniform, and the cut size is also reduced. Calcium carbonate classification experimental results are in agreement with simulation results. In the design condition that air inlet velocity is 12 m/s and rotating speed of rotor is 1 200 r/min, compared to the straight-blade rotor cage, the cut size is reduced 11.5% by using the turbo air classifier with arc-blade rotor cage without decreasing the classifying accuracy.

Key words: turbo air classifier; rotor cage; arc-blade; axial vortex; cut size

0 前言

涡流空气分级机作为第三代空气动力分级机以其结构简单、可靠, 工艺参数可调等优点成为主流的动态干式分级机, 广泛应用于水泥生产、精细化工等领域^[1]。随着超细粉体的广泛应用, 对分级

机分级性能的要求不断提高, 在获得超细粉体的同时, 更要保证分级精度、分级机效率等其他性能指标^[2]。物料颗粒在分级过程中同时受到惯性离心力和空气拽力的作用, 对于同种物料, 颗粒粒径越大、离心初速度越大其受到的惯性离心力越大; 空气速度场越强其受到的空气拽力越大。当惯性离心力相对较大时颗粒更容易被甩出进入粗粉, 反之将随空气通过转笼进入细粉^[3]。提高转笼转速可使颗粒获得更大惯性离心力, 进而获得更细产品, 但较大的

* 国家自然科学基金青年基金资助项目(51204009)。20150228 收到初稿, 20150831 收到修改稿

转笼转速又会造成转笼内流场不均匀,降低分级精度^[4]。

作为细粉输送的必经通道,转笼内部流场特性是影响分级性能的关键因素之一,因此国内外诸多学者致力于涡流空气分级机转笼结构优化的研究。刘家祥等^[5]对转笼叶片间惯性反旋涡进行了探讨;HIDETO 等^[6]通过数值模拟对比分析了转子转速对分级性能的影响;王成端等^[7]分析了转笼结构和性能参数对分级性能的影响;GUO 等^[8-9]分别提出了不同转笼底盘及 Z 型叶片的结构改进。尽管前人在转笼的设计和优化上取得一定成果,但目前对于转笼内流场分布的理论分析尚不充分,转笼内流道特性及结构改进有待进一步研究。本文借用经典流体力学软件——Fluent,对现有直叶片转笼涡流空气分级机进行建模及数值模拟,并对转笼内流道特性及入口速度分布进行了深入分析。指出直叶片转笼结构存在的两点问题:转笼转速较大时叶片间气流轴向漩涡运动较强,导致流道内速度分布梯度过大,甚至出现气流反旋,使细粉无法顺利通过转笼进入细粉收集器;气流在转笼入口处与直叶片存在较大冲角,易造成颗粒撞击叶片反弹,无法进入转笼。针对这两个问题,本文提出了一种圆弧形叶片转笼的设计方法。通过数值模拟及物料试验对比直叶片和圆弧形叶片转笼流场分布及分级效果,结果表明圆弧形叶片转笼流道内速度分布更加均匀,入口冲角基本为零,入口处颗粒与叶片的碰撞概率大大减小;设计工况下,采用圆弧形叶片转笼,可在保持分级精度不变情况下,降低分级粒径。该研究为涡流空气分级机的设计提供了理论指导。

1 直叶片转笼数值模拟与流道分析

1.1 涡流空气分级机建模与条件设置

应用 Fluent 软件对涡流空气分级机进行建模及数值模拟。建立涡流空气分级机模拟模型如图 1 所示,其主要结构尺寸如下:转笼内外缘半径为 76 mm、106 mm,高 95 mm,内部径向均布 32 个转笼叶片,在半径为 136 mm 的圆周均布 24 个导风叶片,且与径向夹角为 75°,导风叶片和转笼叶片的宽、厚、高均为 30 mm、3 mm、95 mm;蜗壳由两个半径为 180 mm、弦长为 350 mm 的圆弧曲面组成;进气口截面的宽 62 mm,高 95 mm。对转笼进行网格局部加密,网格总数为 354 456。

给定设计工况:入口风速 12 m/s,转笼顺时针旋转,转速 1 200 r/min,喂料速度 120 kg/h。涡流空气分级机工作时满足颗粒体积分数低于 10%,因此忽略颗粒对连续相的影响只进行气流单相模拟^[10]。将分级机模型分为蜗壳区、转笼旋转区及中心出口区,各区域连接面设为内表面。设定入口为速度入口,大小为 12 m/s,出口为压力出口。转笼区域按 1 200 r/min 顺时针旋转,且转笼叶片面相对旋转区域静止。选择适用于模拟旋流、高应变率流动的 RNG $k-\varepsilon$ 模型,RNG Options 项选择湍流为主,壁面采用标准壁面函数进行处理。采用 SIMPLEC 耦合算法,残差值为 1×10^{-4} 。

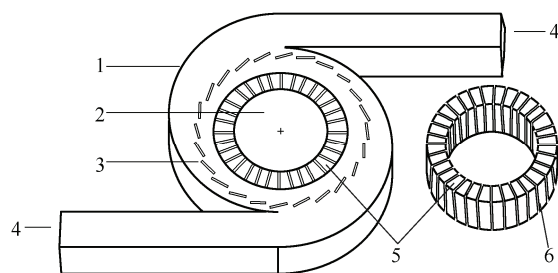


图 1 涡流空气分级机模拟模型

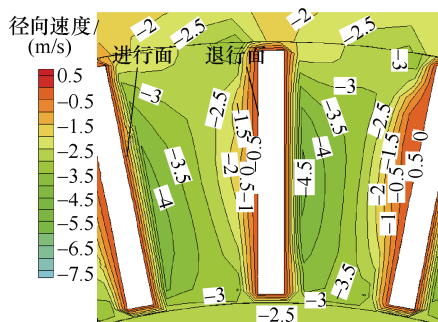
1. 蜗壳 2. 细粉出口 3. 导风叶片 4. 气流入口 5. 转笼
6. 转笼叶片

同时对模型进行网格细分,对比不同网格总数模拟结果发现再增加网格数量对模拟结果基本无影响,符合网格独立性要求。

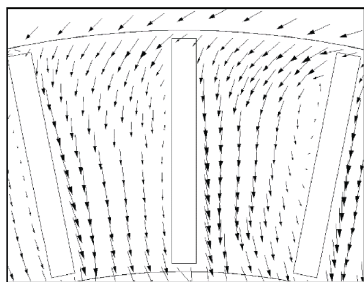
1.2 直叶片转笼流道特性分析

图 2a 为直叶片转笼流道内气流径向速度云图,其中灰度和数字代表径向速度大小,负号代表方向指向转笼中心。可以看出,流道内存在较大的速度梯度($-4.5 \sim 0.5$ m/s),这会造成颗粒在流场中运动不稳定^[11]。进行面附近气流径向速度达到 -4.5 m/s,易使大颗粒被空气拽入转笼,收集为细粉;退行面附近气流径向速度为正(0.5 m/s),方向背离转笼中心,气流反旋,细粉易被带出转笼,进入粗粉,影响分级效果。

图 2b 为直叶片转笼流道内气流相对转笼速度(以下简称相对速度)矢量图。图中气流相对速度在进行面附近较大,且指向转笼中心,而靠近退行面时出现反旋,与图 2a 分布规律一致。此外,在入口处,气流进入转笼前后,相对速度方向发生偏转,流体以较大角度冲击叶片,造成冲击损失,干扰流场稳定,当气流携带颗粒撞击叶片时将造成颗粒的反弹,影响分级效果。



(a) 直叶片转笼流道内气流径向速度云图



(b) 直叶片转笼流道内气流相对速度矢量图

图 2 直叶片转笼流道内速度分布

2 圆弧形叶片转笼设计及数值模拟

2.1 圆弧形叶片转笼的设计及理论分析

2.1.1 叶片入口安装角的确定

为改善转笼入口处速度分布, 需要对入口速度进行进一步理论分析。气流进入转笼后, 一方面受转笼叶片的推动做旋转运动, 另一方面又在中心负压的作用下沿叶片向内运动^[12]。流体的牵连速度 u , 相对速度 w , 绝对速度 v , 在入口处形成气流入口速度三角形^[13], 如图 3 所示, 其中 γ 为入口处绝对速度与圆周速度夹角, 即入口绝对速度角; β_1 为入口处相对速度与牵连速度反向夹角, 即入口相对速度角, i 为相对速度与叶片型线夹角, 即冲击角。

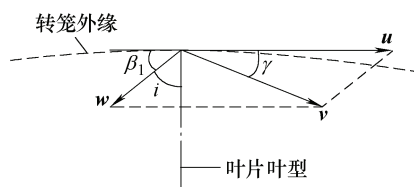


图 3 转笼外缘入口速度三角形

对入口速度进行分析, 在直叶片转笼模拟所得流场中建立转笼外缘处 $r_1=106\text{ mm}$ 的圆柱面, 通过 Fluent 计算, 得出该面的平均径向速度 $v_r=2.4\text{ m/s}$, 切向速度 $v_t=10.9\text{ m/s}$, 计算出转笼入口处的绝对速度大小和方向, 即

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2} \quad (1)$$

$$\gamma = \arctan \frac{v_r}{v_t} \quad (2)$$

牵连速度即转笼外缘圆周速度, 求得

$$u = \frac{2\pi r_1 N \times 10^{-3}}{60} \quad (3)$$

式中 N ——转笼转速, $N=1\ 200\text{ r/min}$;

r_1 ——转笼外缘直径, $r_1=106\text{ mm}$ 。

在入口速度三角形中, 利用余弦定理可求出相对速度的大小和方向, 即

$$w = \sqrt{u^2 + v^2 - 2uv \cos \gamma} \quad (4)$$

$$\beta_1 = \arccos \frac{u^2 + w^2 - v^2}{2uw} \quad (5)$$

代入数值得 $w=3.4\text{ m/s}$; $\beta_1=45^\circ$ 。

$$i = 90^\circ - \beta_1 = 45^\circ \quad (6)$$

即气流进入转笼时以 45° 的冲击角冲击叶片。为避免冲击, 令转笼入口处叶片型线沿相对速度方向, 则叶片入口安装角(入口处型线与圆周速度反向夹角)为 45° 。

2.1.2 圆弧形叶片叶型的确定

对流道内气流运动特性进行分析。当叶片无限多时, 气流将完全沿叶片型线运动, 如图 4 中 b 所示, 流道内速度均匀分布。但实际叶片间存在间距, 当叶片以角速度 ω 绕转笼中心旋转时, 流道内流体由于本身的惯性及黏性不足, 将以同等大小的角速度绕流道中心反向旋转, 该运动被称为轴向漩涡运动^[12], 如图 4 中 a 所示。a、b 运动速度在进行面一侧方向相同, 叠加后相对速度增大, 在退行面一侧方向相反, 叠加后相对速度减小, 最终形成图 3 中 c 所示的速度分布。转笼转速越大轴向漩涡越大, 相对速度梯度则越大, 当转笼转速增加到一定数值, 叶片退行面一侧速度则会反向, 出现气流反旋。

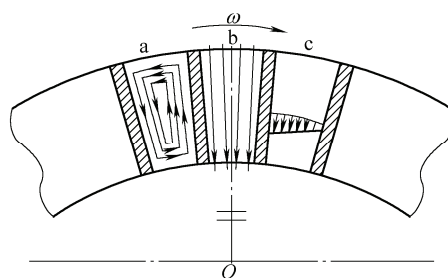


图 4 转笼流道内流体运动分析

取流道内流体微团进行动力学分析, 如图 5 所示, 建立局部坐标系, s 轴为微团所在处相对速度

方向, \mathbf{n} 轴与 \mathbf{s} 轴垂直。

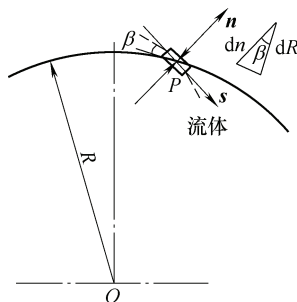


图 5 转笼流道内流体微团受力分析

由力学相对运动理论^[12], 可得出 \mathbf{n} 轴方向力学平衡方程为

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \left(\omega^2 R \cos \beta + \frac{w^2}{R_c} + 2\omega w \right) \quad (7)$$

式中 $\partial p / \partial n$ ——压力 p 在 \mathbf{n} 轴方向变化值, 即微

团所受合力, Pa;

ρ ——气体密度, kg/m^3 ;

$\omega^2 R \cos \beta$ ——流体微团牵连加速度;

ω ——叶片角速度, rad/s ;

β ——微团处气流相对速度角, $(^\circ)$;

R ——微团到转笼中心距离, m;

w^2 / R_c ——相对加速度;

R_c ——微团所在处流线的曲率半径, m;

$2\omega w$ ——哥式加速度。

复合运动伯努利方程在 \mathbf{n} 轴方向的微分形式为

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial n} - w \frac{\partial w}{\partial n} \right) \quad (8)$$

式(7)、(8)联立, 代入 $u = \omega R$, $\cos \beta = dR/dn$ 得

$$\frac{\partial w}{\partial n} = -2\omega - \frac{w}{R_c} \quad (9)$$

式(9)表明流道内相对速度分布与流线曲率半径 R_c 和叶片角速度有关, 当工况确定时 R_c 是影响相对速度分布的唯一因素, 故对 R_c 进行讨论。

(1) 叶片为直叶片时, $R_c = \infty$, 方程式(9)的解为

$$w = -2\omega n + C_1 \quad (10)$$

(2) 当叶片为非直叶片时, 方程式(9)的解为

$$w = \exp\left(\frac{-n}{R_c}\right) (C_2 \pm 2\omega R_c) - 2\omega R_c \quad (11)$$

并将 $\exp(-n/R_c)$ 泰勒展开, 整理得

$$w = C_2 \left(1 \pm \frac{n}{R_c} \right) - 2\omega n \quad (12)$$

式中, C_1 、 C_2 为常数, 可见, 流体相对速度 w 在 \mathbf{n}

方向呈线性变化, 直叶片时变化率为 2ω ; 进行面为凸面的非直叶片时, 式(12)中取负号, w 在 \mathbf{n} 方向变化率为 $(2\omega + C_2/R_c)$; 进行面为凹面时的非直叶片时, 式(12)中取正号, w 在 \mathbf{n} 方向变化率为 $[-2\omega + C_2/R_c]$ 。对比可知进行面为凹面的非直叶片 w 在 \mathbf{n} 轴方向的变化率最小, 则其 \mathbf{n} 轴方向速度梯度最小。因此, 将直叶片改为进行面为凹面的圆弧叶片可减小流道内速度梯度。

综上, 可确定一弦长沿径向分布、入口安装角为 45° 的圆弧形叶片, 如图 6a 所示其半径

$$R_0 = \frac{1}{2} b \frac{1}{\cos 45^\circ} \quad (13)$$

式中 b ——转笼内外缘间距, $b = 30 \text{ mm}$ 。

求得 $R_0 = 21 \text{ mm}$, 圆弧形叶片转笼模型如图 6b 所示。

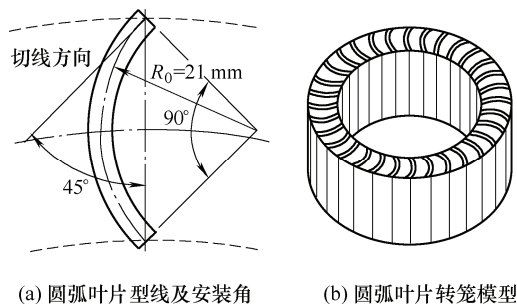
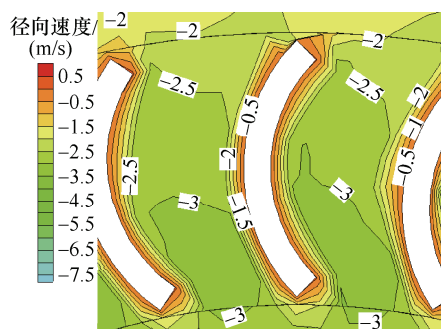


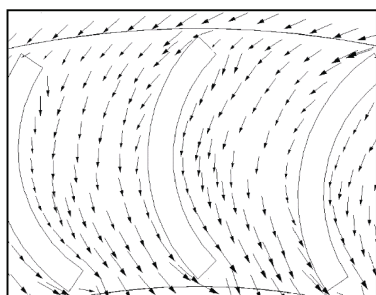
图 6 圆弧形叶片转笼结构

2.2 圆弧形叶片转笼流场数值模拟及分析

图 7a 为圆弧形叶片转笼流道内气流径向速度云图, 速度大小在 $2.5 \sim 3.5 \text{ m/s}$, 速度梯度显著减小, 分布更加均匀。直叶片退行面一侧速度过小、进行面一侧速度过大的情况得到改善, 避免细粉在反旋气流作用下收集为粗粉, 粗粉在大径向速度作用下收集为细粉。图 7b 为圆弧形叶片转笼流道内相对速度矢量图, 相对速度分布较直叶片转笼结构时更均匀, 气流反旋现象消失。且在转笼入口处气流流线与叶片型线基本重合, 气流对叶片的冲击减小。

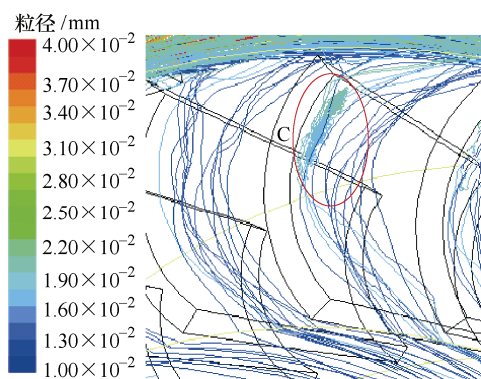


(a) 圆弧形叶片转笼流道内气流径向速度分布云图



(b) 圆弧形叶片转笼流道内气流相对速度矢量图

图 7 圆弧形叶片转笼流道内速度分布图



(b) 圆弧形叶片转笼内颗粒轨迹

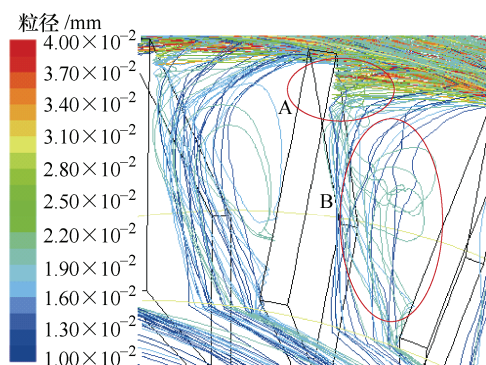
图 8 两种结构转笼内颗粒轨迹

3 离散相模拟

为对比改进前后两种结构下颗粒运动情况, 进一步说明圆弧叶片转笼结构对粉体分级的作用。在连续相模拟所得流场内加入离散相, 模拟颗粒轨迹。

由于分级机内颗粒体积分数低于 10%, 因此模拟采用离散相模型(Discrete phase model, DPM)中的欧拉-拉格朗日算法^[14]。离散相与连续相间进行非耦合计算, 仅考虑连续相模拟所得流场对颗粒的作用, 忽略颗粒对连续相的影响^[15]。颗粒设为碳酸钙(CaCO_3), 密度为 $2\,720\text{ kg/m}^3$, 粒径满足 Rosin-Rammler 分布。在环形区 $z=94$ 平面内颗粒入射处, 建立半径由 107 mm 到 110 mm 圆环面作为颗粒入射源, 颗粒初始速度为 0。

颗粒轨迹如图 8 所示, 图 8a 为直叶片转笼内颗粒轨迹图, 图中显示部分颗粒在进入转笼时以较大冲角撞击叶片, 弹出转笼(如图中 A 所示); 部分颗粒轨迹在叶片流道内发生多次回旋(如图中 B 所示), 细粉在流道内停留时间增加, 阻碍细粉通过, 且增大了颗粒与叶片的碰撞概率, 影响分级效率。圆弧叶片转笼颗粒轨迹图(图 8b)中叶片流道内颗粒轨迹在这两点有很大改善, 入口冲击减小, 且未出现颗粒轨迹回旋现象。进入转笼内颗粒轨迹灰度表明圆弧叶片结构比直叶片结构下进入转笼的颗粒粒



(a) 直叶片转笼内颗粒轨迹

径小, 即分级粒径减小。但由于圆弧叶片弦长沿径向, 其型线在中间位置存在较大偏转, 使部分颗粒进入转笼后与叶片发生碰撞, 反弹后又在较大的气流作用下向前运动继续撞击叶片, 形成图 8b 中 C 所示轨迹堆积现象, 对分级造成不利影响。

4 物料试验

物料分级试验以碳酸钙为原料, 其粒度组成如表 1 所列。采用螺旋喂料机喂料, 进料速度为 120 kg/h ; ZRQF-C30M/S 智能热球式风速仪、光电式 DT2234A 转速表测量入口风速和转笼转速, 试验除设计工况外, 另取其他三组工况进行比较。

表 1 碳酸钙原料粒度组成

粒级/ μm	体积分数(%)
0~2	5.09
2~5	7.93
5~16	17.81
16~21	10.84
21~28	19.66
28~43	25.06
43~60	11.85
>60	17.50

通过 Easysizer20 型激光粒度分析仪对原料及分级产物进行粒度测定, 并计算分级粒径 d_{50} 、分级精度 K 。试验结果列于表 2 中。

表 2 转笼叶片改进试验结果

转笼转速/ (r/min)	入口风速/ (m/s)	分级粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$		分级精度 K	
		直叶片	圆弧叶片	直叶片	圆弧叶片
1 200	14	29.13	27.99	0.71	0.71
1 200	12	28.36	25.10	0.69	0.71
1 200	10	26.72	24.32	0.67	0.69
1 200	8	24.81	21.86	0.58	0.52

结果表明设计工况(风速 12 m/s , 转笼转速

1 200 r/min)下,改进后的分级机分级粒径为 25.10 μm 较改进前同工况下的 28.36 μm 减小了 11.5%,分级精度为 0.71,略有增加。对于原直叶片转笼获得分级粒径为 25 μm 左右时工况如下:风速 8 m/s,转笼转速 1 200 r/min(以下用 8~1 200 表示),其分级精度仅有 0.58,即获得相同分级粒径产品时,改进后的涡流空气分级机分级精度更高。

表 2 显示,其他工况下分级粒径也均减小,这主要由于圆弧形转笼流道内速度均匀,无速度过大区域,减小了对粉体径向空气拽力。虽然圆弧形叶片转笼入口处流体与叶片冲击减小,流道内流场更加均匀,但分级精度并未明显提高,主要因为部分颗粒通过流道时,轨迹运行到中途与圆弧叶片反复碰撞,颗粒在碰撞中反弹或落入粗粉,影响分级精度。同时设计工况下入口安装角具有一定适用范围,当入口风速与转笼转速匹配关系偏离设计工况较大时,入口相对速度角与安装角不再相等,降低分级精度,如工况为 8~1 200 时分级精度由直叶片转笼结构时的 0.58 降到 0.52。因此,在所需设计工况下,改进的圆弧形叶片转笼较直叶片转笼可在保持分级精度不变的情况下降低分级粒径。

5 结 论

(1) 基于转笼入口速度三角形分析,转笼叶片安装角与气流入口相对速度角相等时,可减小气流与叶片的冲击,使入口速度更加稳定,降低颗粒撞击叶片反弹概率。

(2) 涡流空气分级机转笼叶片进行面为凹面可削弱气流轴向漩涡造成的流道内相对速度梯度大的现象,使转笼流道内速度更加均匀。

(3) 提出了一种圆弧形叶片转笼的设计方法,通过数值模拟和物料试验证明了该方法获得的圆弧形叶片在设计工况下流场分布均匀,分级粒径减小,并相比直叶片转笼结构下获得相同分级粒径时分级精度更高。

(4) 圆弧叶片弦长沿径向分布时流道存在较大偏转,使进入转笼内的颗粒易与叶片发生碰撞,影响分级精度,有待进一步改进。

参 考 文 献

- [1] SHAPIRO M, GALPERIN V. Air classification of solid particles: A review[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2005, 44(2): 279-285.
- [2] YU Y, LIU J, ZHANG K. Establishment of a prediction model for the cut size of turbo air classifier[J]. Powder Technology, 2014, 254(13): 274-280.
- [3] HIROSHI M, TOSHIKO S. Mechanism of particle separation and analysis of fish-hook phenomenon in a circulating air classifier[J]. Powder Technology, 2012, 218: 57-63.
- [4] GUO L, LIU J, LIU S. Flow field characteristics of the rotor cage in turbo air classifiers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(3): 426-432.
- [5] 刘家祥, 徐德龙, 赵江平, 等. 改进涡流分级机内惯性反旋涡对颗粒分选的影响[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(1): 63-66, 88.
- LIU Jiaxiang, XU Delong, ZHAO Jiangping, et al. The effects of inertia counter-rotating vortices in vortex classifier on particle classification[J]. J. Xi'an Univ. of Arch & Tech., 1998, 30(1): 63-66, 88.
- [6] HIDE TO Y, UMI N, KUNIHIRO F. Effect of blade rotation on particle classification performance of hydro-cyclones[J]. Powder Technology, 2006, 164: 103-110.
- [7] 王成瑞, 陈海焱, 陈文梅. 超微粉涡轮分级机性能参数分析[J]. 四川大学学报, 2000, 32(6): 47-50.
- WANG Chengrui, CHEN Haiyan, CHEN Wenmei. Analysis of performance parameters of superfine powder wormgear classifier[J]. Journal of Sichuan University, 2000, 32(6): 46-50.
- [8] GUO L, LIU J, LIU S. Velocity measurements and flow field characteristic analyses in a turbo air classifier[J]. Powder Technology, 2007, 178: 10-16.
- [9] XU N, LI G, HUANG Z. Numerical simulation of particle motion in turbo classifier[J]. China Particuology, 2005, 3(5): 275-278.
- [10] GAO L, YU Y, LIU J. Study on the cut size of a turbo air classifier[J]. Powder Technology, 2013, 237: 520-528.
- [11] ITO M, SUTOH K, MATSUDA T. Classification efficiency of a cage-type air classifier [J]. ZKG Int., 1996, 49(3): 133-144.
- [12] 安连锁, 吕玉坤. 泵与风机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008
- AN Liansuo, LÜ Yukun. Pump & fan[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008
- [13] 唐照付, 聂波, 张俊林, 等. 漩涡风机叶片侧边型线的研究[J]. 流体机械, 2013, 41(4): 21-25.
- TANG Zhaofu, NIE Bo, ZHANG Junlin, et al. Research on the shape of blade side of vortex blower[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(4): 21-25.
- [14] 李良超, 徐斌, 杨军, 等. 基于计算流体力学模拟的下沉与上浮颗粒在搅拌槽内的固液悬浮特性[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 185-191
- LI Liangchao, XU Bin, YANG Jun, et al. Sinking/floating

particles solid suspension characteristics in stirred tank based on CFD simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(12): 185-191.

- [15] 赵新学, 金有海. 排尘口直径对旋风分离器壁面磨损影响的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 142-148.
ZHAO Xinxue, JIN Youhai. Effect of dust discharge diameter on wall erosion in cyclone separator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 142-148.

作者简介: 任文静, 女, 1989 年出生。主要研究方向为粉体制备, 叶轮机械的设计, 计算流体力学。

E-mail: wenjingrenbuct@163.com

于源(通信作者), 女, 1976 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为粉体制备技术, 叶轮机械的设计与制造。

E-mail: yuyuanjd@263.net

第 5 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

单晶石英表面低损伤的摩擦诱导纳米加工研究

作者: 宋晨飞

毕业学校: 西南交通大学

指导教师: 钱林茂

本文主要研究石英表面低损伤的摩擦诱导纳米加工方法。首先, 石英屈服前摩擦表面可直接形成纳米凸起结构, 据此提出石英表面摩擦诱导直接加工方法。凸结构机械性能与基体接近, 但化学稳定性降低。为进一步减少加工损伤, 根据摩擦区域石英材料可被 KOH 溶液选择性去除的现象, 提出了石英表面摩擦诱导选择性刻蚀加工方法。研究表明摩擦化学作用可显著降低摩擦诱导加工损伤, 改善所加工结构的性能。文中阐明了扫描参数(载荷、扫描次数、扫描速度)和刻蚀温度对所提摩擦诱导纳米加工的影响规律。通过透射电镜观测、X 射线光电子能谱分析等手段, 揭示了摩擦诱导纳米加工机理。为验证所提出的摩擦诱导选择性刻蚀机理和化学作用对加工损伤的影响, 分别在玻璃表面和砷化镓表面进行了摩擦诱导纳米加工研究。主要研究内容和创新点如下。

(1) 揭示出石英表面摩擦诱导纳米凸结构的形成机理, 提出了摩擦诱导直接加工方法。

利用金刚石探针在单晶石英表面摩擦可直接加工纳米凸结构, 凸结构形成的有效赫兹接触压力范围为 $0.4 P_y$ 到 P_y (P_y 是石英屈服时对应的赫兹接触压力)。所加工纳米结构高度随扫描次数和扫描载荷的增加而增加并逐步平稳。X 射线光电子能谱和透射电镜观测结果表明摩擦导致的晶格变形主导了凸起结构的形成。通过控制探针扫描轨迹, 实现了纳米点、线、面等各种纳米结构的可控加工。尽管加工区域弹性模量比单晶基体下降了 $1.1\% \sim 11.6\%$, 但仍能承受微机电系统典型的接触压力。由于加工区域含有晶格缺陷, 凸结构可被 KOH 溶液选择性去除。

(2) 阐明了石英摩擦诱导区域材料刻蚀去除的规律和机理, 建立了摩擦诱导选择性刻蚀加工方法。

结合无磨损扫描和 KOH 溶液刻蚀, 提出摩擦诱导选择性刻蚀加工。详细研究了其加工规律, 发现刻蚀厚度随扫描载荷和扫描次数的增加而增加, 随扫描速度的增加而减小。提高刻蚀温度有利于提高加工效率, 但不影响最终加工深度。透射电镜观测表明晶格畸变层不能够被 KOH 溶液刻蚀, 结合非晶石英的对比刻蚀结果, 选择性刻蚀加工机理可归因于摩擦诱导非晶层在 KOH 溶液中的快速化学反应。刻蚀动力学分析发现载荷不改变刻蚀反应活化能, 其反应机制和刻蚀剂在扫描区域的优先扩散有关。通过优化扫描参数和刻蚀温度, 实现了线阵列、斜面、多级台阶等图案的低损伤、高效率可控加工。所加工结构具有高度的化学稳定性, 刻蚀后弹性模量比单晶石英基体下降了仅 $0.2\% \sim 2.6\%$, 该方法更适用于石英表面低损伤纳米加工。

(3) 验证了摩擦诱导选择性刻蚀机理和摩擦化学作用对低损伤加工的意义, 分别提出了玻璃和砷化镓表面摩擦诱导纳米加工方法。

X 射线光电子能谱分析表明玻璃扫描区域被 HF 溶液刻蚀后形成难溶物 AlF_3 , 该结果不仅验证了摩擦诱导选择性刻蚀加工机理和反应机制, 而且为玻璃表面摩擦诱导纳米加工方法提供理论依据。基于化学作用对低损伤加工的影响, 利用摩擦化学在砷化镓表面实现了低损伤摩擦诱导纳米加工, 加工所需接触压力仅为砷化镓屈服时接触压力的 11% 。高分辨透射电镜观测显示砷化镓加工区域下方无位错存在。

综上所述, 本文基于摩擦引起的石英表面结构变化及化学性质变化, 提出了摩擦诱导直接加工和摩擦诱导选择性刻蚀加工方法。探索了玻璃、砷化镓表面摩擦诱导纳米加工, 加深了对摩擦化学作用降低加工损伤的认识。本研究的结果不仅有助于丰富纳米摩擦学的基础理论, 而且有望推动低损伤摩擦诱导加工在石英等材料纳米加工领域的应用。