

文章编号: 1000-0887(2006) 02-0223-07

螺旋型旋风分离器两相流场的数值模拟^{*}

易 林, 王灿星

(浙江大学 机械与能源工程学院, 杭州 310027)

(林建忠推荐)

摘要: 对螺旋型旋风分离器进行了两相流场的三维数值模拟。气体流场通过求解三维 N_S 方程得到, 湍流模型采用了雷诺应力模型。计算结果表明, 旋风分离器内部的流场分为两部分: 螺旋通道内比较稳定的流场和筒体中心区域的复合涡结构流场。对颗粒运动轨迹的计算表明, 颗粒在入口处的初始位置对颗粒分离有比较显著的影响。同时得到了不同入口速度下颗粒的分级效率曲线, 并给出了气体流量对旋风分离器性能的影响, 结果显示: 气体流量的增加会提高分离效率, 但同时导致压力损失的急剧增加。

关键词: 螺旋型旋风分离器; 数值模拟; 颗粒轨迹; 分离效率

中图分类号: O359; TQ051 文献标识码: A

引 言

螺旋型旋风分离器是一种新型的旋风分离器, 其结构如图 1 所示。这种旋风分离器的筒体由若干圈螺旋形通道组成, 含尘气体在螺旋通道中做旋转运动, 颗粒受离心力作用到达边壁被捕集。实验已经证实, 与普通旋风分离器相比, 螺旋型旋风分离器具有体积小、阻力低、收尘效率高、处理气体量大等优点^[1]。

旋风分离器内的流动是气体-颗粒两相流动。通常颗粒相所占的体积份数很小, 因此颗粒相对气体相的影响可以忽略。这样, 作为连续相的流体和作为离散相的颗粒可以分别独立求解, 即首先求解不考虑颗粒相时的气体流场, 然后计算颗粒在已求解流场中的运动轨迹。这亦是本文所采取的方法。

1 流场数值模拟

1.1 控制方程

旋风分离器内的流动可以认为是不可压湍流运动, 经过雷诺平均的连续性方程和动量方程可以表示如下:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

* 收稿日期: 2004_06_11; 修订日期: 2005_08_29

作者简介: 易林(1981—), 男, 安徽广德人, 硕士(E-mail: cnzjuyilin@yahoo.com.cn);

王灿星(1963—), 男, 浙江义乌人, 副教授, 博士(联系人. Tel: + 86_571_85615418; E-mail: mecwangcx@cmee.zju.edu.cn)。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}), \quad (2)$$

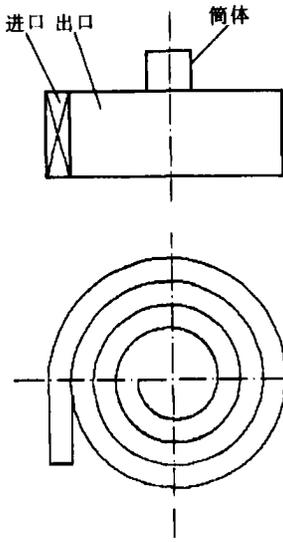


图 1 螺旋型旋风分离器示意图

其中 $\rho \overline{u_i u_j}$ 称为雷诺应力, 表示湍流脉动的影响。方程(1)和(2)是不封闭的, 因此必须给出合适的湍流模型, 来建立脉动量和平均量之间的关系。

1.2 湍流模型

湍流模型的选择直接影响数值计算结果的准确性。在对旋风分离器内的强旋流场进行模拟时, 标准 $k-\varepsilon$ 模型给出的结果不够准确, 这是因为标准 $k-\varepsilon$ 模型采用了湍流局部各向同性假设, 难以描述旋风分离器内各向异性的强旋流动。RNG $k-\varepsilon$ 模型在湍流粘性里考虑了旋流的影响, 因此预测的结果有所改进, 但这种改进仍然有限。雷诺应力模型是比较精确和复杂的一种模型, 它对雷诺应力建立输运方程, 可以计算各个独立的雷诺应力分量, 因此更加适合于旋风分离器内强旋流场的计算^[2]。基于此, 本文选用雷诺应力模型。

雷诺应力模型需要同时求解如下雷诺应力方程、湍动能 k 方程、湍动能耗散率 ε 方程^[3]:

$$\frac{D}{Dt}(\overline{u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\left(C_k \frac{k^2}{\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_l} \right] + P_{ij} + \Phi_{ij} - \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij}, \quad (3)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\left(C_k \frac{k^2}{\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_l} \right] + P_k - \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\left(C_\varepsilon \frac{k^2}{\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} \right] + C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

式中

$$P_{ij} = - \left[\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial u_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial u_k} \right], \quad P_k = - \overline{u_i u_l} \frac{\partial u_i}{\partial x_l},$$

$$\Phi_{ij} = - C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left[\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] - C_2 \left[P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P_k \right];$$

各经验常数为: $C_k = 0.10$, $C_\varepsilon = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_1 = 1.8$, $C_2 = 0.5$ 。

2 粒子运动数值模拟

在 Lagrange 坐标系下, 积分颗粒的运动方程可以得到颗粒运动轨迹。单个颗粒的运动方程为:

$$m \frac{du_p^i}{dt} = F^i, \quad (6)$$

式中 m 为颗粒质量, u_p^i 为颗粒速度, F^i 为颗粒所受的各种作用力。

尽管作用在颗粒上的力相当复杂, 但一般情况下并非所有的力都同等重要。在旋风分离器中, 当颗粒的密度远大于气体密度时, 可以认为曳力是起主导作用的, 其他的力可以忽略。

对于球状颗粒, 曳力表达式为:

$$F_D^i = m \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_p}{24} (u^i - u_p^i), \quad (7)$$

其中 μ 为流体相动力学粘度, u_p^i 和 u^i 分别为颗粒相速度和流体相速度, d_p 为粒径, ρ_p 为颗粒密度, Re_p 为颗粒雷诺数, $Re_p = (\rho_l/\mu) |u - u_p| \cdot C_D$ 为曳力系数, $C_D = a_1 + a_2/Re_p + a_3/Re_p^2$, 式中 a_1, a_2, a_3 根据颗粒雷诺数的范围取不同的值^[4]。

由于旋风分离器内的颗粒体积份数很小, 故可以忽略流体相和颗粒相的耦合作用, 并且认为颗粒与颗粒之间互不干扰。本文所计算的颗粒是微米级油烟气颗粒, 故可把颗粒近似为球状, 并且一旦颗粒运动到壁面时, 即认为颗粒被捕集。

3 计算条件及结果讨论

3.1 计算区域和边界条件

螺旋型旋风分离器结构尺寸如图 2 所示, 各参数为: 筒体高度 $h = 0.3$ m; 通道宽 $b = 0.1$ m; 排气管直径 $D_e = 0.28$ m; 筒体最大半径 $R_{max} = 0.55$ m。螺旋线为阿基米德螺旋线, 在极坐标下的方程为 $r = K \times \theta$, 常数 $K = 0.016$ 。圈数 $N = 3$, θ 从 5π 至 11π 段为螺线通道外壁面, θ 从 3π 至 9π 段螺线通道内壁面。

本文的数值模拟采用有限体积法^[5]。区域离散化后的计算网格如图 3 所示。控制方程的离散采用控制容积积分法, 其中对流项的离散采用 QUICK 格式。速度压力耦合的求解采用 SIMPLE 方法。计算的边界条件如下:

入口: 空气的入口速度分别为 10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s; 湍动能 $k = 1.5C_t^2 v_{inlet}^2$, 湍流强度 C_t 取 6%; 湍动能耗散率 $\varepsilon = C_\mu^3/4 k^{3/2}/(0.07L)$, 常数 $C_\mu = 0.09$, 特征长度 L 取入口宽度^[6]; 雷诺应力: $\overline{u_i u_j} = 2k/3 (i = j \text{ 时}), \overline{u_i u_j} = 0 (i \neq j \text{ 时})$ 。

出口: 取出口压力为大气压力。

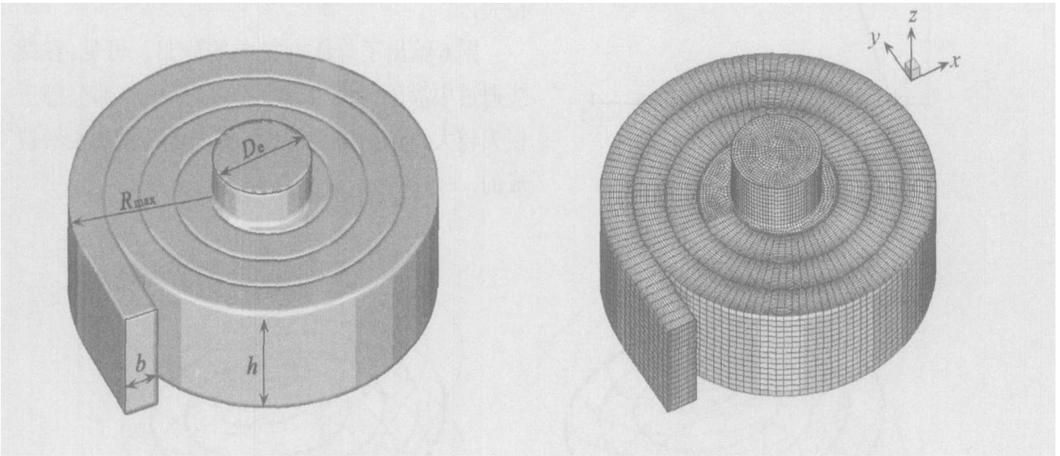


图 2 几何结构

图 3 计算网格

3.2 流场计算结果

计算结果表明, 气流在螺线通道内形成了一个比较稳定的切向流场, 这种流场有利于颗粒的分离。在筒体中心处, 流场变得比较复杂。此外计算结果还表明, 沿着排气管出口, 存在着一个回流区。这是由于中心区域强烈的气流旋转形成了负的压力梯度。

图 4 给出了入口速度为 20 m/s 时切向速度沿径向的分布。可以看出, 在筒体中心区域, 流场显示出复合涡结构: 中心的强制涡和外层的自由涡。强制涡的切向速度随径向距离 R 的

增加而增加,自由涡的切向速度随 R 的增加而减小。从图中还可以发现,切向速度随高度 z 变化很小。

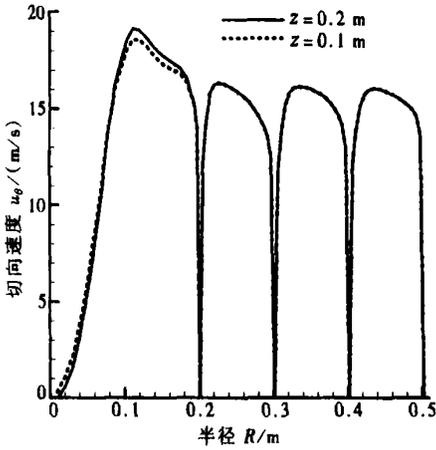


图 4 切向速度沿半径的分布

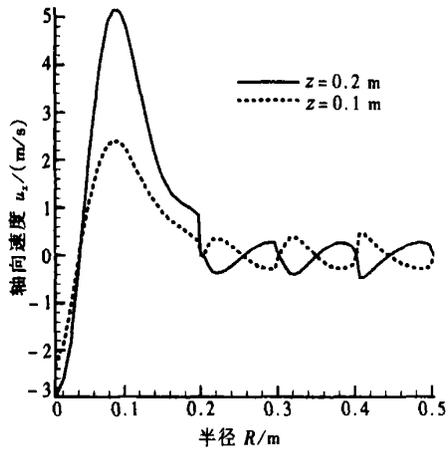


图 5 轴向速度沿半径的分布

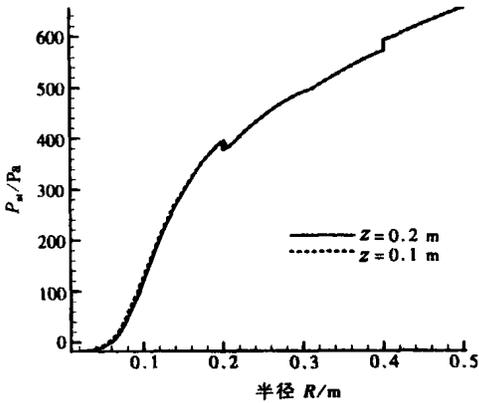
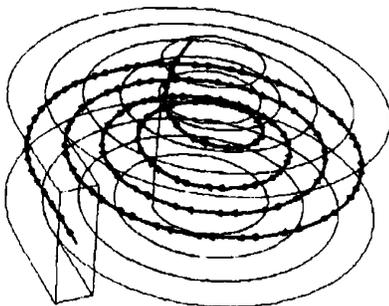


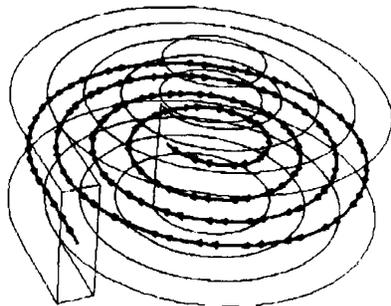
图 6 静压沿半径的分布

图 5 给出了轴向速度沿径向的分布。可以看出,在螺旋通道中轴向速度沿径向做小范围波动,且它们在通道上部和下部的变化趋势相反;在相同的径向距离上,上下两侧的轴向速度大小近似相等,方向相反。在筒体中心区域,一方面气体要排出,一方面回流要进入,因而轴向速度变化很大。

图 6 给出了静压沿径向的分布。可见,在螺旋通道中静压的损失较小,在筒体中心部分静压损失较大。这是由于中心区域气流的剧烈旋转造成的。



(a) 粒径: 5 μm



(b) 粒径: 10 μm

图 7 不同粒径的颗粒轨迹

3.3 颗粒相的计算结果

当气体和颗粒的入口速度均为 20 m/s 时,图 7 给出了初始位置相同时(均在入口平面中心处),不同粒径的颗粒运动轨迹。其中粒径为 5 μm 的颗粒穿过旋风分离器,粒径为 10 μm 的

颗粒被收集。可见在同样的入口位置, 粒径较大的颗粒只需旋转较少的圈数就能被捕集。

图 8 给出了粒径相同(都为 $11 \mu\text{m}$)、初始位置不同时颗粒的运动轨迹。可以发现, 颗粒的初始位置对其能否被捕集有显著影响。处于入口外侧的颗粒比处于内侧的更容易被捕集, 见图 8 (a)、(b)。这是因为入口外侧的颗粒距离外壁较近, 只需运行较短的距离就能到达壁面被捕集。此外, 在入口面上侧的颗粒, 其在螺线通道中的轨迹是一个逐渐上升的螺旋线, 在入口面下侧的颗粒, 其轨迹是一个逐渐下降的螺旋线, 见图 8(c) 和 (d)。这是由于螺旋通道内的轴向速度分布造成的: 从流场的计算结果可知, 螺旋通道内上下两侧的轴向速度大小近似相等, 方向相反。

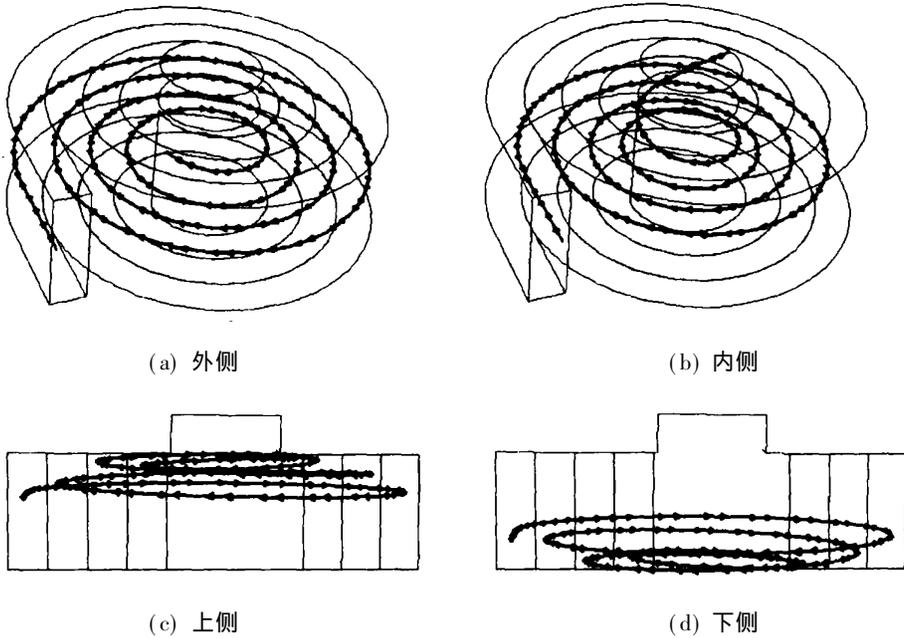


图 8 不同初始位置的颗粒轨迹(粒径为 $11 \mu\text{m}$)

在入口平面均匀放置一批给定粒径的颗粒, 计算它们的轨迹, 可以得到该粒径的分级分离效率^[7]。对一系列不同粒径的颗粒进行计算, 可以得到分级效率曲线, 同时可以得到该旋风分离器的临界直径(d_{100})和分割直径(d_{50})。在本次计算中, 在入口平面均匀放置了 300 个颗粒, 粒径从 $4 \mu\text{m}$ 逐渐增加到临界直径。图 9 给出了不同入口速度下的分级效率曲线。可见入口速度越大, 颗粒的分离效率越高。此外, 入口速度越大, 对应的分离效率曲线也越陡。这说明在具有较大的入口速度时, 颗粒粒径对分离效率的影响更加显著。

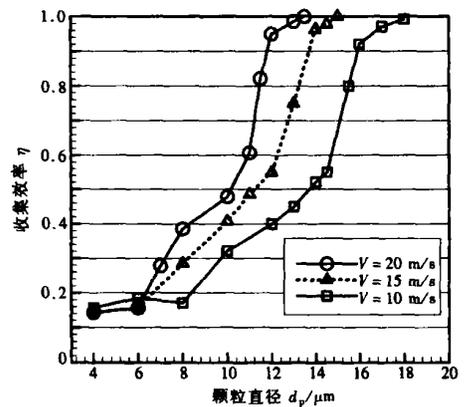


图 9 分离效率曲线图

旋风分离器的 3 个主要性能指标为: 气体流量、除尘效率、压力损失。图 10 和图 11 给出了它们之间的关系, 其中分离效率用分割直径表示。可以看出随气体流量的增加, d_{50} 变小, 即分离效率变高。但气体流量的增加会带来旋风分离器压力损失的急剧上升。因此, 选择合

适的进口速度是有必要的。

旋风分离器的压力损失, 常常用阻力系数 ξ 来反映: $\xi = \Delta p / (\rho u_{\text{inlet}}^2 / 2)$ 。数值模拟的结果显示, 对于该结构的旋风分离器, 阻力系数为 5 左右, 比一般旋风分离器的阻力系数要小。

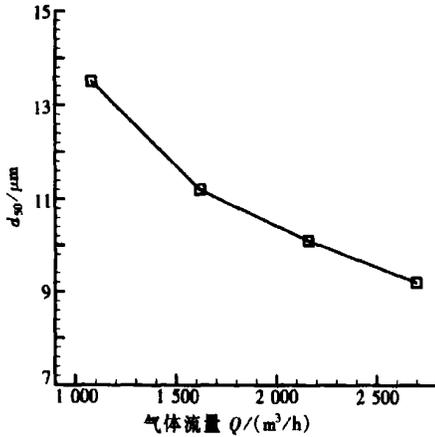


图 10 颗粒分割直径和流量的关系

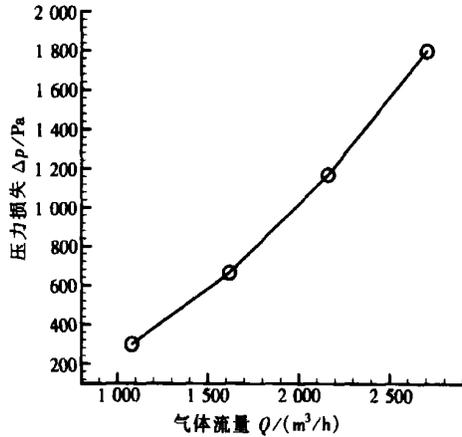


图 11 压力损失和流量的关系

4 结 论

本文计算了螺旋型旋风分离器内的三维两相流场。对流体相进行计算时, 根据强旋流的流动特点, 湍流模型采用了雷诺应力模型。计算的结果表明, 螺旋通道中的流场是比较稳定的切向流场, 这种流场有利于颗粒的捕集分离; 在筒体中心区域, 流场由内层的强制涡和外层的自由涡组成, 流场变化剧烈, 压力损失很大。

通过对颗粒运动轨迹的计算, 显示出颗粒在入口处的初始位置对其运动轨迹有较大影响。本文对不同入口速度下的工况进行了计算, 得到了相应的分级效率曲线, 以及气体流量、分离效率、压力损失之间的关系。结果表明, 入口速度的增加导致分离效率的提高, 但同时导致压力损失的增加, 因此有必要选择合适的进口速度。数值模拟结果还显示出对于本文结构的旋风分离器, 其阻力系数为 5 左右, 比一般旋风分离器小。

[参 考 文 献]

- [1] 赵家林 高庆有. 连续螺旋旋风除尘器的结构特点分析[J]. 山东建材学院学报 1997 11(1): 71—74.
- [2] 王海刚 刘石. 不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较[J]. 热能动力工程 2003 18(4): 337—342.
- [3] 林建忠. 湍动力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社 2000 84—93.
- [4] Morsi S A Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. J Fluid Mech 1972 55(2): 193—208.
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社 2001 28—39 135—183.
- [6] Hoekstra A J Derksen J J Van Den Akker H E A. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones[J]. Chemical Engineering Science 1999 54(13): 2055—2065.
- [7] Griffiths W D Boysan F. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers[J]. J Aerosol Sci 1996 27(2): 281—304.

Numerical Simulation of Three Dimensional Gas Particle Flow in a Spiral Cyclone

YI Lin WANG Can_xing

(College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou 310027, P. R. China)

Abstract: The three_dimension gas_particle flow in a spiral cyclone is simulated numerically. The gas flow field was obtained by solving the three_dimension Navier_Stokes equations with Reynolds stress model (RSM). It is shown that there are two regions in the cyclone the steadily tangential flow in the spiral channel and the combined vortex flow in the centre. Numerical results for particles trajectories show that the initial position of the particle at the inlet plane substantially affects its trajectory in the cyclone. The particle collection efficiency curves at different inlet velocities were obtained and the effects of inlet flow rate on the performance of the spiral cyclone were presented. Numerical results also show that the increase of flow rate leads to the increase of particles collection efficiency but the pressure drop increases sharply.

Key words: spiral cyclone; numerical simulation; particle trajectory; collection efficiency