研究報告

水平円筒型混合機の所要動力*

Power Requirement of Horizontal Cylindrical Mixer

佐藤 宗武**

Munetake Sato

宮南 啓**

Kei Miyanami

矢野 武夫**

Takeo Yano

1. 緒 言

粉体混合機の合理的な設計、製作あるいは経済的な機種を選定ならびに操作条件の設定には混合機の混合速度最終到達混合度などとともに混合所要動力をも加味した総合的な性能評価が必要である。

混合機の所要動力には、混合する粉体を一定の運動状態に保つための動力、混合容器やかくはん羽根などの回転体の慣性モーメント、減速機、軸受けなどの動力伝達効率、その他起動時および定常運転時の機械的な動力消費などの種々の因子が関与している。

先に、著者らは容器回転型混合機内の粉体層の運動に伴う動力消費を i) 容器の転動運動によって傾く粉体層の重心位置の移動、ii) 粉体の加速および運動状態の維持および iii) 遠心効果と容器壁面での摩擦力の3つの成分からなるとした力学モデルで解析し、混合機の軸トルクの実測値と比較して良く一致することを確かめた¹⁾。

本報ではこれらの解析結果が Newton 数と Froude 数の2つの無次元項を含む新しい相関式で表現できることを示した。そしてこの無次元相関式中の諸係数は混合機の形状、寸法、粉体物性および操作条件(装入率)によって解析的に求められる。そこで、ここでは動力の推算に必要なこれらの係数値を算出するとともに利用に使用するように混合機の実用操作範囲内での値を線図として示した。この係数を用いて推算した動力と実験によって得られた動力を比較しこの相関式の有用性を確かめた。

2. 混合機の回転トルクの解析

水平円筒容器内に粉体を装入し(装入率 f [-]: 粉体容積/容器容積)回転させるときに混合機の回転軸に働くトルクの実測値 T [Kg·m]は、Fig. 1 に示したよう

に回転速度 N [rpm]の増加とともにわずかず増大し、容器の臨界回転速度 N_{cr} の約80%のところで最大値をとった。 N_{cr} を越えて回転速度を増加させると粉体は遠心力によって容器内壁に環状についてまわりだし、 T は急激に減少した。ここでは N_{cr} より小さい回転速度の範囲について取り扱うことにする。

2.1 重力によるトルク T_G

回転半径 R 、長さ L の円筒容器に粉体を装入して回転すると Fig. 2 に示すように粉体層表面が安息角 ϕ の傾きをもった半月形の状態を保つ。このとき粉体層の自重によって容器を復元しようとする作用と外力との釣り合いを考えると文献1)の結果から軸トルク T_G は次のように導かれる。

$$T_G = \pi \cdot R^3 \cdot L \cdot \rho_a \cdot \left(\frac{g}{g_c} \right) \cdot f \cdot G(f) \cdot \sin \phi \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 ρ_a は粉体の見かけ密度[kg/m³]、 f は装入率

Fig. 1 回転トルク T 対回転速度 N の関係

昭和53年5月26日受理

* 化学工学協会第43年會にて発表 (1978. 4 名古屋)

** 大阪府立大学工学部化学工学科 (〒591 堺市百舌鳥楠町4-804)

TEL 0722-52-1161

Fig. 4 係数A対装入率fの関係

(9)式の両辺を $R^3 \cdot L \cdot \rho_a \cdot (g/g_c)$ で割り整理すると次式が得られる。

$$\frac{T \cdot g_c}{R^3 \cdot L \cdot \rho_a \cdot g} = A + B \frac{R \cdot N_s^2}{g} \quad \dots\dots(10)$$

Fig. 5 係数B対装入率fの関係

ここで(10)式の左辺は Newton 数 [-] であり、右辺第二項は Froude 数 [-] である。係数AおよびBは(1), (5) および(8)式から次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} A &= \pi \cdot f \cdot G(f) \cdot \sin \phi \\ B &\equiv (B_0 + \mu_w C_0) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(11)$$

$$\text{ただし, } B_0 = \left(\frac{3}{4} \pi \right)^2 (1 - \cos^4 \phi)$$

$$C_0 = \left(\frac{3}{4} \pi \right)^2 \left[\frac{\pi}{90} \theta - \cos^2 \theta \right] \times \{ \tan(\gamma_b - \phi) - \tan(\gamma_a - \phi) \}$$

これらの2つの係数AおよびBは装入率f, 安息角phiおよび摩擦係数 μ_w のみの関数であり、これらの値がわかれば回転トルクTは(10)式から容易に計算できる。そこで簡便にトルクの計算ができるように実用混合操作範囲内で係数A, Bを以下に求めた。

4. 係数AおよびBの計算結果

Fig. 4に係数Aと装入率fの関係を安息角phiをパラメータとして示した。Aの値はfの増加とともに増大しf=0.5で最大値をとる。また安息角の大きい粉体ほどAは大きい値を示す。f>0.5の場合、すなわち粉体が回転軸を越える装入率範囲ではAは減少する。

Fig. 5には係数Bの値を摩擦係数 $\mu_w = 0.15 \sim 0.40$,

Fig. 6 実験値 $P \cdot g_c(\text{exp.})$ と推算値 $P \cdot g_c(\text{cal.})$ の比較

安息角 $\phi=20\sim50$ 度の範囲で計算して装入率 f に対してプロットした。 B の値は混合機の実用装入率範囲 ($f=0.2\sim0.4$) では主に μ_w の値によって変化し ϕ の値には影響されない。一方、 f の小さいところでは B の値は小さくなり、それとともに ϕ による差異が現われ、 ϕ の小さい粉体ほど B の値は大きい値をとった。

5. 実験結果と計算値との比較

実験装置は回転半径 $R=0.045\sim0.135$ [m]、長さ $L=0.24\sim0.36$ [m] の寸法の異なる4種の水平円筒で容器の軸と駆動用モーターの間に抵抗線歪型トルク変換器を設けたものである。操作範囲は装入率 $f=0.1\sim0.5$ 、回転速度については $0 < N/N_{cr} \leq 0.8$ とし、種々の粉体試料について回転トルク T を測定した。(Table 1 参照)

Table 1 粉体物性

	d_p [μ]	ρ_a [kg/m ³]	ϕ [deg]	μ_w^* [—]
豊浦砂	105~350	1,580	35.0	0.317
ジルコンサンド	"	2,980	33.0	0.375
ホワイトアランダム	"	1,960	44.0	0.335
ガラス粉末	"	1,340	39.3	0.303
ポリ塩化ビニル	"	609	38.8	0.346
石灰石	"	1,320	34.0	0.337

(*アクリル容器壁に対する値)

Fig.6 にトルクの実測値から得た所要動力 $P \cdot g_c(\text{exp.})$ ($=2\pi N_s T g_c$) と係数 A および B を用いて推算したトルクから求めた所要動力 $P \cdot g_c(\text{cal.})$ を比較して示した。図より $P \cdot g_c(\text{exp.})$ と $P \cdot g_c(\text{cal.})$ とは比較的良好に一致しており精度は $\pm 20\%$ 以内であった。これより粉体物性、操作条件および装置寸法が与えられると係数 A , B を用いて容易に動力の推算が可能であることが示された。

6. 結 言

水平円筒型混合機の回転トルク変動曲線を測定し、これを粉体層の重心に働く重力と粉体の円運動を持続させる力および遠心力によって生じる容器壁での摩擦力の和としたモデルを考えて解析した。これより回転トルクと種々のパラメータ (回転径、混合槽長、装入率、回転速度、粉体見掛け密度、摩擦係数、安息角) 間の関係が2つの無次元数からなる関係式で表現できることを明らかにした。この無次元式中の係数は解析的に求まり、ここでは粉体装入率、安息角、壁面摩擦係数の実用範囲内の値に対して計算し線図で示した。

この結果より、混合機の寸法、粉体の種類および操作条件が与えられると混合機内の粉体の運動によって生じる軸トルクの推算が可能となった。実測値と推算による所要動力は $\pm 20\%$ の精度で一致することが確かめられた。

使 用 記 号

A	: 係数 (i) 式	[—]	R	: 円筒半径	[m]
B	: 係数 (ii) 式	[—]	r	: 半径方向距離	[m]
F	: 力	[Kg]	T	: トルク	[Kg·m]
f	: 装入率	[—]	$\bar{u}$	: 平均速度	[m/sec]
$G(f)$	: 粉体層重心までの距離比 ($=l/R$)	[—]	W	: 粉体装入量	[kg]
g	: 重力の加速度	[m/sec ²]	β	: 重心と鉛直線のなす角度	[°]
g_c	: 重力換算係数	[kg·m/Kg·sec ²]	η	: 回転方向に測った角度	[°]
k	: 壁面摩擦係数の補正係数	[—]	θ	: 中心角の1/2	[°]
L	: 混合機円筒部長さ	[m]	μ_w	: 壁面摩擦係数	[—]
l	: 回転軸から重心までの距離	[m]	ρ_a	: 粉体見掛け密度	[kg/m ³]
N, N_s	: 回転速度	[rpm], [rps]	ρ_c	: 垂直応力 (半径方向)	[Kg/m ³]
N_{cr}	: 臨界回転速度	[rpm]	ϕ	: 安息角	[°]
P	: 動力	[Kg·m/sec]	ω	: 回転角速度	[rad/sec]

引 用 文 献

- 1) 佐藤, 吉川, 奥山, 矢野: 粉体工学研究会誌, 14, 669 (1977)

Authors' Abstract

Power Requirement of Horizontal Cylindrical Mixer by

Munetake SATO, Kei MIYANAMI and Takeo YANO

(Department of Chemical Engineering, University of Osaka Pref.)

Power requirement of horizontal cylindrical mixers has been measured with a variety of solid powders.

A dimensional analysis of the basic force balance equations including gravity, inertia and friction forces has been made to obtain useful correlation of the power data in terms of the operating conditions and the dimensions of the mixers and the properties of the powders (specifically, the bulk density and the friction factor between the vessel wall and the powders bed).

The Newton number and the Froude number, both non-dimensional terms have been found important for the estimation of power requirement for this type of mixer. They can be correlated by the following equation :

$$[\text{Newton No.}] = A + B[\text{Froude No.}]$$

where, A and B are constant. These are functions of the charge ratio, the angle of repose and the friction coefficient of wall. The values of the above constants, A and B , have been calculated for the various conditions, and power requirement has been estimated. An agreement between the measured power and the one predicted by the correlations is within an accuracy of $\pm 20\%$.

List of Figures and Table

- Fig. 1** The relation between torque and rotational speed
- Fig. 2** Force balance of the solids bed in the cylinder
- Fig. 3** Circulating flow of the solids and the kinetic force

Fig. 4 The relation between constant, A and charge ratio, f

Fig. 5 The relation between constant, B and charge ratio, f

Fig. 6 Comparison of the experimental results with calculated results

Table 1 The properties of the powders