B 1 0 5

カーボンブラック反応炉の流動解析

西脇勝也[○] (旭カーボン㈱) 鈴木修 (旭カーボン㈱) 高見潤一 (旭カーボン㈱)
松原幸治 (新潟大) 小林睦夫 (新潟大)

Carbon black reactor analysis

Katsuya NISHIWAKI, Osamu SUZUKI, Junichi TAKAMI, Koji MATSUBARA, and Mutsuo KOBAYASHI

ABSTRACT

Isothermal gas simulation was performed for three patterns of carbon black (CB) reactors using standard $k-\epsilon$ model to treat turbulent flow. In addition, Lagrangean simulation was made to predict flow time corresponding to the time span of CB traveling in the hot gasses. Numerical results thus obtained are compared with geometrical properties of CB aggregate sampled from the CB reactors whose geometric shapes are the same as the numerical models. Numerical data suggested that flow time is key to control indicators of CB aggregate size.

Key Words: Carbon black reactor model, Numerical Simulation, CB geometrical property, Flow time

1. はじめに カーボンブラック (CB) は、工業的に製造されるすすであり、ゴム製品およびタイヤの補強剤や黒色顔料等として利用されている⁽¹⁾。工業材料として CB を用いる場合、CB 凝集体寸法やその分布が重要になるが、それらの制御は経験によってなされているのが現状である。本研究では、CB 反応炉モデルに対して数値解析を行い、計算結果を実際にサンプルした CB 凝集体の幾何特性と比較し、CB の凝集機構について考察する。

2. 計算手法 ファーネス方式 CB 反応炉では、高温燃焼ガス流中において原料油を熱分解することで CB を生成し、水噴霧によって反応を停止させる。解析対象とする CB 反応炉モデルを図 1 に示す。本計算では、CB 生成領域 (図の斜線部) に対して気流解析を行い、また原料油噴霧位置から反応停止位置までの流体粒子の滞留時間を求める。

気流解析では、実際に CB 粒子をサンプルした 3 種類の炉形状 R1, R2 および R3 (図 2 参照) を取り上げ、原料油と水を考慮せず非圧縮性・等温気流に対して 2 次元定常解析を行った。乱流モデルとして標準形 $k-\epsilon$ モデルを用い、また壁面ではスリップ条件を適用した。流速条件の表示には流入速度 U_0 と絞り部直径 D を基準とするレイノルズ数 Re を用いるものとし、 $Re=67,000, 89,000, 150,000$ において計算を行った。同じ手法による二次元後ろ向きステップ流に対する計算によると、スリップ条件を用いたため壁面近傍の乱れは再現できなかったが、ステップ背後における循環流域の寸法とステップ下流部における乱れ強さは既存の実験値⁽²⁾とほぼ一致することが示された。

滞留時間解析では、気流解析領域の入口断面から出口断面までの滞留時間を粒子追跡法によって計算し、その外側において一様流を仮定して得られる滞留時間を加えることで、CB 生成炉モデル全体に対する滞留時間とした。一部の検討では乱流拡散を無視したが、これを考慮する場合はランダムウォークによって模擬した。壁面境界条件として完全弾性衝突を仮定した。このようにして得られる滞留時

間は、原料油の蒸発速度と CB 生成速度をともに無限大と仮定した場合の CB 凝集体のそれに対応する。

3. 温度の推定 表 1 に実験条件を示す。予備実験によると、絞り部 (気流解析領域入口部) 上流側の燃焼領域における放熱損失は燃料低発熱量の約 20 パーセントであった。この結果を参考にして推定した絞り部温度 T_0 を表 2 に記入した。また、CB 生成領域において原料油の熱分解反応、それにより生じる CB と水素の酸化反応を考慮し、これらの反応が完了したと仮定して得られる炉内最終温度 T_f も表 2 に記した。文献⁽³⁾の検討から、このような温度推算法の妥当性が示唆されている。参考のため、燃焼領域において完全燃焼を仮定して計算された絞り部残存酸素濃度も表 2 に示した。 T_0 が約 300K のバラツキを示すが、燃焼領域における空気過剰率が異なるためである。 T_0 が低いとき T_f が高くなるのは、この場合に絞り部における残存酸素量が大きく、発熱反応である酸化反応が多く生じるためである。

4. 計算結果

4. 1 炉内流動特性 $Re=89,000$ に対する乱流エネルギーの分布を図 2 に示す。炉形状 R3 では、 $x/D=7.1\sim 10$ に設けた第 2 絞り部によって流れが強く加速されるため、その下流部で乱れが大きくなる。これに対して、炉形状 R2 では徐々に流路直径が大きくなるため流れは比較的緩やかに変化し、乱れが最も弱く、炉形状 R1 では乱れが中間的な強さを示す。なお、本計算では壁面による低レイノルズ数効果を無視したため、 $Re=67,000, 89,000, 150,000$ においてレイノルズ数依存性は極めて小さいことが示された (図省略)。

4. 2 滞留時間 乱流拡散の影響を考慮した解析に加えて循環流域の影響を知るため乱流拡散を意図的に無視した解析を行い、両方の結果を比較した。それによると、乱れの影響によって流体粒子の一部が循環流域内を通過するようになるため、乱流拡散を考慮すると滞留時間の平均値 $\overline{t_f}$ が 3 パーセント程度大きくなり、その標準偏差 $t_{f,rms}$ が 3

～6 倍に大きくなった (図省略)。後述のように滞留時間は CB の幾何学特性を決める重要な要因であるため、循環流域の存在が CB 特性に影響している可能性が示唆された。

5. 計算結果と実験結果の比較

前述のように本計算ではレイノルズ数効果が十分小さかったため、 $Re=89,000$ における計算値を実験条件に対応する U_0 と D でスケールして用いる。CB は複雑な凝集構造⁽¹⁾を有するが、その幾何特性を表す量として、CB 吸油量に相当する 24M4DBP 値に注目する。

図 3 では、24M4DBP と平均滞留時間 $\bar{t}_f$ との相関を示す。 $\bar{t}_f$ の無次元化には、流入速度の影響を顯示するため速度スケール v/D と長さスケール D を用いた。図 3 から、全体的に 24M4DBP と滞留時間に正の相関が有り、滞留時間が長くなると CB 凝集体がより発達することが示唆されている。図 4 では、24M4DBP と乱流エネルギーの相関を示す。図 4 から、乱流エネルギーと 24M4DBP には正の相関がある。炉形状 R3 では、第 2 絞り部の下流で乱流エネルギーが大きくなるため、他の炉形状とは特異的である。以上のことから、CB 凝集体サイズは滞留時間および乱流エネルギーと正の相関があることが示唆されるが、凝集体サイズには原料油接触効率、炉断面内の原料油蒸気濃度も影響すると考えられ、詳細については不明である。

6. 結言

CB 反応炉に対して気流解析と滞留時間を行い、それらの結果を CB 凝集体に関する実験値と比較検討し、CB 吸油量 (24M4DBP) に対する滞留時間の影響を明らかにした。

参考文献

- (1) 久英介ら、カーボンブラック便覧、カーボンブラック協会編、1995。
- (2) 笠木ら、第 9 回流体計測、第 6 回流体制御合同シンポジウム講演論文集、(1991)、77-82。
- (3) 青木・三浦、ケミカルエンジニアリング、1998(1)、11-17。

Table 1 experimental conditions.

Case	Geom	Re	L_t	L_e	AR [kg/kg]	MOR [kg/kg]
R1-1	R1	67000	1.1D	46.4D	1.15	0.104
R1-2	R1	84000	4.5D	46.4D	1.27	0.092
R1-3	R1	85000	6.0D	46.4D	1.29	0.084
R2-1	R2	68000	1.1D	53.6D	1.16	0.12
R2-2	R2	150000	4.5D	53.6D	1.58	0.068
R2-3	R2	150000	6.0D	53.6D	1.58	0.063
R3-1	R3	81000	1.1D	56.4D	1.13	0.097
R3-2	R3	94000	4.5D	56.4D	1.27	0.074

Geom= reactor geometry, Re=Reynolds number,
 L_t = length between oil spray and first expansion,
 L_e =length between first expansion and water spray,
 AR= air ratio in combustion region,
 MOR= flow rate ratio of material oil to combustion gasses.

Table 2 Estimated values of temperature.

Case	AR [kg/kg]	OR [kg/kg]	T_0 [K]	T_f [K]
R1-1	1.15	0.0301	2060	1808
R1-2	1.27	0.0482	1950	1882
R1-3	1.29	0.0507	1934	1914
R2-1	1.16	0.0312	2053	1754
R2-2	1.58	0.0828	1733	2033
R2-3	1.58	0.0828	1733	2056
R3-1	1.13	0.0258	2178	1909
R3-2	1.27	0.0468	2056	2037

OR=oxygen ratio at throat, T_0 =throat temperature,
 T_f =temperature at fully developed stage,
 see Table 1 for AR.

Fig. 1 Carbon black reactor model.

Fig. 2 Turbulence energy, k/U_0^2 .

Fig.3

Fig4