

鉄粉酸化反応層の熱特性に関する研究

(シート状反応層の熱解析)

村田圭治* 中畑仁志** 荒賀浩一* 小松幸雄***

Thermal characteristics in a layer of corroding iron powder

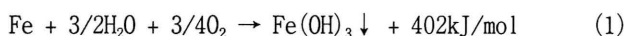
Keiji MURATA, Hitoshi NAKAHATA, Koichi ARAGA, Yukio KOMATSU

This paper presents an analytical investigation on the thermal characteristics in a layer of an exothermic powder mixture that is utilized in body warmers, hot compresses and so on. The research objective is to develop a manufacturing method that enables the exothermic temperature to be controlled in order to prevent cases of low-temperature burns. The authors analyze numerically variation over time of the temperature distribution and the generated heat in a layer of the exothermic powder mixture. Although the analytical and experimental results are in accordance qualitatively, the analysis overestimates dependence of temperature distribution on time.

Keyword Corrosion, Iron Powder, Porous media, Chemical reaction, Numerical analysis

1. はじめに

金属の腐食酸化反応に伴う反応熱を携帯用カイロや温シップ等の熱源として利用する技術はよく知られており、金属が鉄の場合、主たる反応は



であるとされている。これらの技術は特に温熱治療の分野で世界的に需要が大きく、就寝時にも連続して使用できる安全性が強く求められている。しかしながら近年、発熱温度が設定値を大きく超えて低温火傷を起こす事例が数多く生じている。著者らは、発熱体粉末の発熱温度を精度よく制御するためにはシート状に積層した発熱体粉末層の熱特性を十分に把握する必要があると考え、前回までに食塩水を保持させたバーミキュライト(保水剤)を鉄粉や活性炭粉末(触媒)と混合して試験用発熱体粉末とし、反応によって失われる酸素量から反応速度を測定して反応速度式の作成⁽¹⁾およびシート状に積層した発熱体粉末層の

熱特性を実験的に調べた⁽²⁾。式(2)は反応速度 \dot{r} を発熱体粉末層が単位体積あたり、単位時間当たりに反応する酸素のモル数と定義した場合の反応速度式である。

$$\dot{r} = 1.27 \times 10^{-2} Y_{w0}^{3.48} \left(\frac{T}{273} \right)^{15.7} (1-X)^{14.6} C_{O_2} \left[\frac{\text{kmol}-O_2}{\text{m}^3\text{s}} \right] \quad (2)$$

ここで、 Y_{w0} はバーミキュライトに吸収させた食塩水量を鉄粉全量が完全に水酸化第二鉄へと反応するのに必要な食塩水量で除して無次元化した値であり、 X は反応率で反応した鉄粉の割合を、 T は反応温度をそれぞれ表している。今回、式(2)を用いてシート状に積層した発熱体粉末層の熱流動解析を行い、実験結果と比較・検討したのでここに報告する。

2. 解析モデルおよび基礎式

図1に座標系と解析モデルを示す。主な仮定、基礎式、初期条件および境界条件は以下のとおりである。

主な仮定

- 1) 発熱体粉末層は多孔質体と見なせる。

*近畿大学工業高等専門学校 総合システム工学科 機械系

**近畿大学工業高等専門学校 専攻科生産システム工学専攻

***FJ テック熊野研究所

2) 発熱体粉末層内では局所熱平衡が成り立ち、発熱体粉末とガスの局所温度は等しい。

3) 発熱体粉末層の厚さは十分に薄く、諸量は時間 t と厚さ方向座標 x の関数である。

4) 発熱体粉末層内での水蒸気濃度は小さく、ガスは酸素と窒素の2成分からなる。

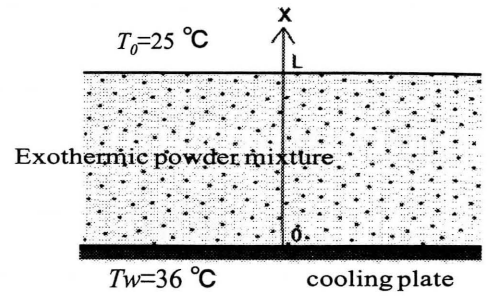


Fig.1 Analytical model

基礎式

・連続の式 (質量保存即)

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = -\dot{r}M_{O_2} \quad (3)$$

・運動方程式 (修正 Darcy 則⁽³⁾)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho u u}{\varepsilon} \right) = & -\frac{\mu\varepsilon}{K} u - \rho C \varepsilon |u| - \frac{\partial(P\varepsilon)}{\partial x} - \rho g \varepsilon \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{\varepsilon} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{\varepsilon} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

・エネルギー保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \{ \rho C_p \varepsilon + \rho_s C_s (1-\varepsilon) \} T + \frac{\partial}{\partial x} (\rho C_p u T) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{r} M_{O_2} \Delta h \end{aligned} \quad (5)$$

・化学種 O_2 の保存式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon w) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho w u) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \dot{r} M_{O_2} \quad (6)$$

・状態式

$$P = \rho R T \quad (7)$$

式(3), (5), (6)における反応速度 \dot{r} には実験式(2)を用いた。有効熱伝導率 λ_e と有効拡散係数 D_e はそれぞれ式(8)および式(9)により算出した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_g} = \varepsilon + \frac{1-\varepsilon}{1/\pi + 2/3(\lambda_g/\lambda_p)} + \gamma \text{Re}_p \text{Pr} \quad (8)$$

$$\frac{D_e}{D_g} = \varepsilon + \gamma_D \text{Re}_p \text{Sc} \quad (9)$$

式(8)右辺第3項および式(9)右辺第2項は、ガスが粒子に衝突することによって生じる混合効果を表しており、 γ および γ_D は経験定数で $\gamma=0.1$, $\gamma_D=1/12$ とした⁽⁵⁾。

初期条件および境界条件

$t=0$:

$$u(x,0) = 0, \quad T(x,0) = T_0, \quad w(x,0) = 0,$$

$$\rho(x,0) = \frac{P_0}{R_{N_2} T_0}$$

$x=0$:

$$u(0,t) = 0, \quad T(0,t) = T_w,$$

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{x=0} = 0$$

$x=L$:

$$\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h(T(L,t) - T_0) + h_D \rho (w_{H_2O} - w_{H_2O,0}) \Delta H_v,$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=L} = 0$$

3. 計算結果および考察

式(3)~(7)を適宜無次元化した後、コントロールボリューム法によって差分化し、SIMPLE法(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation)を用いて数値的に解いた。図2は計算結果の一例で、縦軸は冷却壁への放熱熱流束と温度、横軸は経過時間である。ここで、 $T_1 \sim T_4$ は粉末層内温度で粉末層下面温度を T_1 、粉末層下面から高さ3 mm, 6 mm, 9 mm 上部をそれぞれ、 T_2, T_3, T_4 、周囲温度を T_0 とした。比較のため、図3に実験によって得た結果⁽²⁾を示す。但し、横軸のスケールの違いに注意を要する。

計算条件は以下のとおりである。周囲温度 T_0 および冷却壁の温度 T_w は、それぞれ 25 °C, 36 °C で一定、粉末層全体の初期温度は周囲温度に等しく $T(x,0)=T_0$ 、粉末層内の酸素濃度の初期値は $w(x,0)=0$ 、粉末層上面の酸素濃度は $w(L,t)=w_0=0.233$ とした。また、粉末層の空隙率を $\varepsilon=0.3$ とした。

計算結果と実験結果は定性的に見れば、概ね一致したものの、定量的には、必ずしも一致しているとは言い難い結果となった。これは今回、計算の簡略化のため、気相中の水蒸気の影響を無視し計算を行った。そのため、特に高温状態時に酸素濃度が高い状態に維持され、発熱量が大きくなり過ぎたことが考えられる。また、今回の計算では反応率を大きく見積もり過ぎているため、反応時間に違いが出たことも考えられる。今後、モデルの変更も含めて、解析手法を検討していく。

4. おわりに

今回、発熱体粉末層の熱流動解析を行った。計算結果と実験結果は概ね一致したものの、定性的に見れば、必ずしも一致しているとは言い難い結果となった。今後、モデルの変更も含め解析手法を検討し、発熱体粉末層の熱特性の予測法を確立する。

参考文献

- (1) 村田ら, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2007 講演論文集(2007-11).
- (2) 村田ら, 日本機械学会 東海支部 2009 講演論文集(2009-3).
- (3) Vafai, K. and Tien, C. L., Int. J. Heat Mass Transfer, 24(1981), 195-203.
- (4) 伝熱工学資料, 日本機械学会, (1986), 91-94.
- (5) Tien, C. L. and Hunt, M. L., Chem. Eng. Process. 21(1987), 53-63.

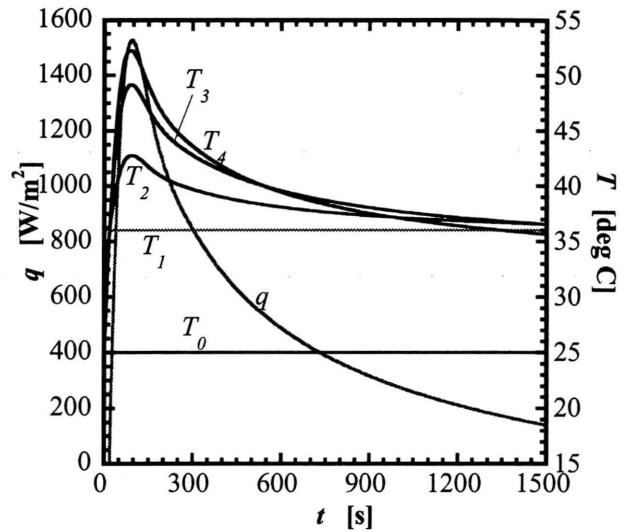


Fig.2 Analytical results

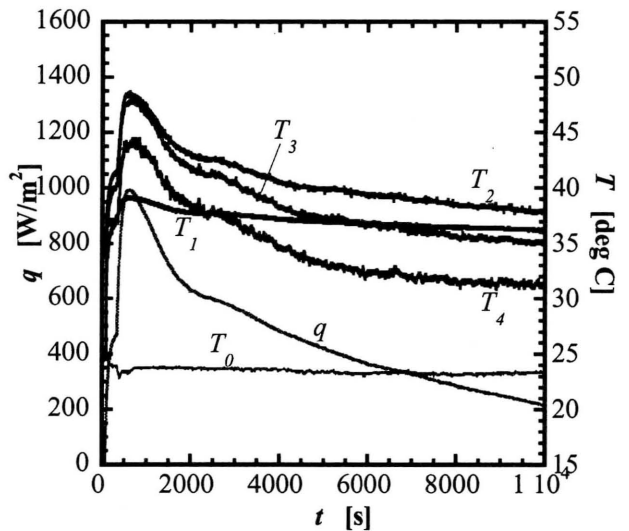


Fig.3 Experimental results