鑄物用生型砂の混練所要動力に及ぼす引張強度と 引張破断エネルギーの影響[†]

寺下 敬次郎* 宮 南 啓* 木村 照雄**

Effect of Tensile Strength and Tensile-Breakup Energy on Mulling Power Requirement of Green Mold Sands

by

Keijiro TERASHITA, Kei MIYANAMI and Teruo KIMURA

(Department of Chemical Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai)

It is extremely important to clarify the relationship between mulling power requirement and tensile-breakup energy for rational design and evaluation of the industrial mulling processes.

In the present study, both transient and steady state mulling power has been measured and tensile process curves have been obtained by using a green mold sand with a bentonite as a binder calcined at various temperatures in a vertical cylindrical mixer.

The results obtained are as follows:

The tensile-breakup energy, time required to complete the mulling process and mulling power requirement are influenced by the tensile strength of the binder used and its calcined temperature. The mulling power requirement can be evaluated in terms of the tensile-breakup energy. These findings of the tensile process tests can be applied to estimate the power requirement for the mulling process.

(Received Jan. 14, 1983)

キー・ワード：混練，生型砂，混練所要動力，引張強度，引張破断エネルギー

1 緒 言

湿潤粉粒体の混練操作は化学工業をはじめ，食品，窯業および鑄物工業などにおいて広く用いられている。しかし，混練機の選定や設計あるいは操作の解析に必要な混練所要動力および混練状態の評価に関する報告は，極めて少ないといえる。とくに混練所要動力と混練物の引張破断エネルギーの関係などを検討した研究は見られない。

われわれは，すでに，混練物の引張強度や圧密特性¹⁾などから混練状態の評価できることを示すと同時に，湿潤粉粒体のかく拌抵抗に及ぼす固液系の充てん特性（ペンデュラー域，ファニキュラー域，キャピラリー域）と引張強度²⁾の関係を調べた。混練操作は主にペンデュラー域およびファニキュラー域を取り扱うが，その代表的な工業プロセスの一つとして鑄物用生型砂がある。このプロセスにおいては，生型砂が循環使用されているので，溶湯によって加熱された粘結剤を用い

た場合，生型砂の引張度や混練所要動力がどのような影響を受けるかを調べておく必要がある。

そこで本研究では，生型砂の混練（湿潤粉粒体の混合）を粘結剤の焼成温度を種々変化させて行い，かく拌抵抗を測定するとともに，得られた生型砂の破断過程曲線などを求めた。さらに，粘結剤の熱分析曲線および焼成ペントナイトや水-焼成ペントナイト系混練物のX線回折図を検討した。その結果に基づいて，生型砂の引張強度，混練所要時間および混練所要動力などを求め，これらに及ぼす粘結剤の焼成温度の影響を検討するとともに，引張破断に要するエネルギーにより混練所要動力を評価することを試みたので，報告する。

2 実験装置，実験方法および粉粒体試料

混練機として用いた垂直円筒型かく拌機とそのかく拌羽根形状を Fig. 1 に示した。かく拌槽は内径 140 mm，高さ 260 mm のメタクリル製垂直円筒である。かく拌羽根は二段十字重ねであり，上側と下側の羽根の迎え角はそれぞれ 60°，30°である。さらに下側の羽根は混練物をかき上げるように回転速度 $N=1s^{-1}$ で回転させた。すなわち，上下羽根間における圧延・

[†] 原稿受理 昭和58年1月14日

* 正 会 員 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町

** 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町

Fig. 1. Apparatus of vertical cylindrical mixer.

圧縮作用ならびに羽根回転によるせん断作用などにより混練が促進される。かく拌羽根⑧は負荷変動に対して一定回転速度を保つように制御された電動機①により駆動させた。また、かく拌抵抗はひずみゲージ式トルク変換器③（容量：5 kg・m）により測定した。

ペントナイト（粘結剤）および生型砂（混練物）の引張破断試験は、つり下げ式粉体層付着力測定機で行った。また、ペンナイトの焼成にはシリコニット坩堝炉を用いた。常温から所定の温度まで約3時間で昇温し、焼成温度で2時間保ち、そののち外気により自然放冷した。

試料砂の配合割合（重量基準）は、生型砂の生産プロセスと同じである骨材（豪州産けい砂、 $D_{50}=345\mu\text{m}$ ）100、粘結剤（米国産 Na 系ペントナイト）7、二次粘結剤（日本産石炭粉、 $D_{50}=120\mu\text{m}$ ）1.5 および水3である。これらの混合・混練は、まずけい砂にペントナイトを混合し、つぎに、この混合物に石炭粉を添加混合して、最後に水を加えて混練した。なお、得られる生型砂（混練物）の重量は1.34 kgである。

3 結果および考察

3・1 粘結剤の熱分析曲線およびX線回折図

粘結剤であるペントナイトの熱分析曲線を Fig. 2 に示した。吸熱ピークは126℃近くで認められ、この温度付近まで重量が著しく減少していることから、吸着水が放出されている。

Fig. 2. TG-DTA curves of bentonite.

Fig. 3. X-ray diffraction charts for bentonite.

ることがわかる。また、500℃付近より吸熱と重量の減少が現れ、692℃で吸熱ピークを示している。すなわち、500℃付近よりペントナイトの主成分粘土鉱物であるモンモリロナイトの構造水（OH 基）の脱出がはじまり、700℃近くで大部分の脱水が終っている。さらに800℃ $\geq$ になると構造変化もしくは脱水相から新しい結晶相へ移行するという吸熱および発熱ピークが認められた。

Fig. 3 はシリコニット坩堝炉で焼成温度 C_T を種々変化させて得られたペントナイトのX線回折図の一例を示したものである。焼成温度 C_T が高くなるにつれてモンモリロナイトの含有量は少なくなっていることがわかる。すなわち、ペントナイトの焼成温度が高くなると粘結剤としての機能が劣化する傾向にあると考えられる。なお、ペントナイト-水系の混練物のX線回折図から、焼成温度 $C_T \geq 700^\circ\text{C}$ になると水分子がモンモリロナイトの結晶層間に侵入しないことを確かめている。このことから、焼成温度 $\geq 700^\circ\text{C}$ になればモンモリロナイトの結晶構造に破壊が生じていることがわかる。

走査型電子顕微鏡で調べた未焼成ペントナイトの一次粒子は2~5 μm がほとんどであった。しかし、焼成温度 $C_T=550^\circ\text{C}$ 付近になると焼結が起り、見掛けの粒径が10~25 μm のものが多くなった。また、 $C_T \geq 700^\circ\text{C}$ の高温になると焼結がさらに進み、見掛けの粒径が30 μm 以上のものも多くなっていることがわかった。

3・2 生型砂の引張強度および引張破断エネルギー

Fig. 4 には焼成温度 C_T を種々変化させて得られたペントナイト（粘結剤）の引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ の一例を示した。引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ は焼成温度 C_T が高くなるにつれて減少し、 $C_T=550^\circ\text{C}$ 付近で最も小さい値を示して、焼成温度が800℃になると $\bar{\sigma}_{x,T}$ が逆に大きい値を示す

という興味ある結果が得られた。焼成温度 $C_T=550^\circ\text{C}$ 付近まで引張強度が C_T の増加とともに小さい値を示すのは、吸着水の放出によるごく微小な水膜付着力の減少、吸着水の放出する付近においてはモンモリロナイトの含有量の減少と広い意味での化学的な結合力の減少、さらに構造水が脱出し始めるとモンモリロナイトに構造（結合）変化が生じることによるものと推察される。また、焼成温度 $C_T=800^\circ\text{C}$ において引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ が大きい値を示しているのは、焼結により粒子間に固体架橋が形成され、その結果付着・凝集力

Fig. 4. Relationship between tensile strength $\bar{\sigma}_{x,T}$ and void fraction $\bar{\epsilon}_0$ (Na-bentonite).

Fig. 5. Relationship between tensile stress $\bar{\sigma}_x$ and horizontal displacement δ_x .

Fig. 6. Relationship between tensile strength $\bar{\sigma}_{x,T}$ and void fraction $\bar{\epsilon}_0$ (green mold sand).

(焼結凝集)が増大することによるものと考えられる。

生型砂(混練物)の引張破断過程曲線(引張応力 $\bar{\sigma}_x$ 対水平変位 δ_x の関係)の一例をFig. 5に示した。ここでの生型砂は、次節で述べるように、かく拌抵抗が定常値 T_s を示したときに得られたものである。Fig. 5からわかるように、引張応力 $\bar{\sigma}_x$ が最大値 $\bar{\sigma}_{x,T}$ を示す付近で生型砂が明りょうに破断し、その後 $\bar{\sigma}_x$ は急激に減少している。ここでは、引張応力 $\bar{\sigma}_x$ の最大値を引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ とし、その値が得られる変位を破断変位 $\delta_{x,T}$ と呼ぶことにした。引張破断過程曲線を模式的に表すとFig. 5中の図のようになる。そこで図中の諸量に注目して、以下の考察を行うことにする。

Fig. 6は種々の焼成温度 C_T におけるベントナイトを粘結剤として用いて得られた生型砂の引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ を示したものである。生型砂の引張強度 $\bar{\sigma}_{x,T}$ は $C_T = 550$ °Cで最も小さい値を示していることがわかる。この結果は、焼成ベントナイトそのものの引張強度と同じ傾向にあるといえる(Fig. 5参照)。すなわち、生型砂の引張強度の値には、粘結剤であるベントナイトの $\bar{\sigma}_{x,T}$ が反映されている。したがって、ベントナイトの引張強度を把握することは極めて重要である。

Fig. 7には生型砂(混練物)の引張破断に要したエネルギー W_t とベントナイトの焼成温度 C_T の関係を示した。引張破断エネルギー W_t の値は、焼成温度 $C_T = 110 \sim 500$ °Cまでは C_T の増加とともに小さくなり、 $C_T = 550$ °Cで急激に減少し、それ以上の焼成温度になると W_t は逆に増大している。このように、生型砂の引張破断エネルギーが焼成温度 $C_T \leq 550$ °Cにおいて C_T の増加とともに小さい値を示すのは、膨潤ベントナイトの付着力が減少することによる。また、 $C_T \geq 700$ °Cではモンモリロナイトの結晶層間に水和がほとんど起らないことから、粒子間の水分量が増加する。その結果、

Fig. 7. Relationship between tensile-breakup energy W_t and calcined temperature C_T .

液体架橋による水膜付着力の作用が増大し、 W_t が大きい値を示したと考えられる。以上の結果から、生型砂の引張破断エネルギーは、ベントナイト粒子結晶片の付着水や液体架橋の大小ならびにベントナイトそのものの引張強度などの影響を受けていることがわかった。

3・3 生型砂のかく拌抵抗と混練所要時間

焼成温度 C_T をいろいろ変化させて得られた粘結剤を用いて、生型砂の混練過程におけるかく拌抵抗の時間的変化を調べた結果の一例をFig. 8に示した。同図においては、けい砂(骨材)、ベントナイトおよび石炭粉(二次粘結剤)の混合過程におけるかく拌抵抗の時間的変化を省略してある。Fig. 8からわかるように、焼成温度 $C_T = 110$ °Cおよび300°Cのベントナイトを用いた生型砂のかく拌抵抗 T は、水が添加され混練の進行にともない単調に増加したのち定常値 T_s を示している。これに対し、 $C_T \geq 550$ °Cを用いた生型砂のかく拌抵抗 T は、水の添加とともに急激に増大し、短時間で T_s に到達していることがわかる。

かく拌抵抗が定常値 T_s に到達すれば、混練が終了していることを生型砂(混練物)の引張強度の測定値あるいは走査型電子顕微鏡の観察結果より確かめてい

Fig. 8. Relationship between mixing torque T and mixing time t .

Fig. 9. Relationship between mulling time t_s and calcined temperature C_T .

る。したがって、 T_s に到達する時間 t_s (Fig. 8 参照) を求めることは混練操作において極めて重要である。Fig. 9 には混練所要時間 t_s に及ぼすベントナイトの焼成温度 C_T の影響を示した。 $C_T \geq 550^\circ\text{C}$ の粘結剤を用いた生型砂の混練所要時間 t_s は、 $C_T \leq 500^\circ\text{C}$ のものに比べて短いことがわかる。すなわち、モンモリロナイトの構造水の脱水が始まる付近から結晶の層間に水和の起らない粘結剤（ベントナイト）を用いた場合、混練は早く進行するといえる。

3・4 混練所要動力と引張破断エネルギーの関係

定常かく拌抵抗 T に到達するまでの混練所要動力 $P/2\pi N$ (Fig. 8 参照) を Fig. 10 に示した。混練所要動力の値は、焼成温度 500°C までは C_T の増加につれて小さくなり、 550°C 付近で急激に減少し、それ以上の C_T になると大きくなっていることがわかる。このような傾向は、生型砂（混練物）の引張破断エネルギー (Fig. 7) と同様である。

Fig. 11 は引張破断に要したエネルギー W_t と混練所要動力 $P/2\pi N$ の関係を示したものである。Fig. 11 からわかるように、混練所要動力は引張破断に要したエネルギーの増加とともに増大している。すなわち、生型砂（湿潤粉粒体）の混練所要動力を引張破断エネルギーで評価できる。

4 結 言

粘結剤の熱分析、焼成ベントナイトおよび水-焼成ベントナイト系混練物の X 線回折より、粘結剤（ベントナイト）の引張強度ならびに引張破断エネルギーなど

Fig. 10. Relationship between mulling power requirement $P/2\pi N$ and calcined temperature C_T .

Fig. 11. Relationship between tensile-breakup energy W_t and mulling power requirement $P/2\pi N$.

を考察した。

粘結剤の引張強度は、焼成温度の低い領域 ($C_T \leq 550^\circ\text{C}$) においては水膜付着力の減少とモンモリロナイトの構造変化により焼成温度の増大につれて小さい値を示し、焼成温度の高い領域 ($C_T \geq 600^\circ\text{C}$) では粒子の固体架橋などにより増大する。この粘結剤の引張強度と焼成温度の関係は、生型砂の引張強度や引張破断エネルギーの値に反映する。また、生型砂の結合機構は、焼成温度の低い領域においては膨潤ベントナイトの付着力、高温領域では水膜付着力（液体架橋）であることを示した。さらに、生型砂（湿潤粉粒体）の混練所要動力を引張破断エネルギーで評価できることを明らかにした。すなわち、混練プロセスへ引張破断試験結果が応用できる。

最後に、本研究に対して、多大のご助言を賜った大阪府立大工業技術研究所森正博主任研究員に深く感謝の意を表す。

（昭和57年10月7日 第20回粉体に関する討論会にて講演）

参 考 文 献

- 寺下敬次郎, 宮南 啓, 木村照雄, 粉体工学会誌, **20**, 9, 3 (1983).
- 寺下敬次郎, 宮南 啓, 小西孝信, 吉田純二, 材料, **30**, 873 (1981).
- 藤井謙治, 横山藤平, 粉体工学会誌, **16**, 686 (1979).
- 寺下敬次郎, 宮南 啓, 木村照雄, 塚口英世, 化学工学協会第48年会にて発表, p. 19 (1983) 京都