かめられている Rose の式が現在のところ有用であろう。

摩耗、発熱などの問題

ボールの摩耗については Rose ら³⁴⁾、神保¹⁴⁾、西竹³⁰⁾の報告があるがいずれも比表面積の増加量と摩耗量は比例関係になることおよび摩耗量は Rose ら³⁴⁾の式がほぼ妥当であることが示されている。振動ミルは発熱が大きくこれにともなうミル内の冷却が問題となる場合が生じるが、そのさいの伝熱係数については振動ミルの場合の実験ではないが Лайковская²⁰⁾、吉田⁴³⁾の実験結果が参考となろう。なお振動ミルの型式について神保

はこれをわかり易く分類しており、また個々の装置の特徴を紹介した文献^{9-11, 25, 29, 37, 45, 47, 49)}、および総説的な文献^{13, 16, 17, 19, 39, 46, 48)}がいくつかみられるので本稿における説明の不十分な点をこれらで補っていただきたい。

振動ミルの研究はここ数年來とくにわが国でさかんとなっているがまだ不明な点が案外多く今後の研究が期待される。とくにボールの運動、ボールへの粉体の付着などのような基礎的な問題をはじめ実際の面で疲労を考慮した機械的強度、騒音対策、共振を利用した大型装置の開発などの問題が今後の研究課題であろう。

引用文献

- 1) 青山道夫、重吉孝正：粉体工学研究会誌，8，412 (1969)
- 2) Bachmann, D.: *VDI-Z*, Nr. 2, 43 (1940)
- 3) Bachmann, D.: *ibid.*, Nr. 3, 82 (1940)
- 4) Batel, W.: *Chem.-Ing.-Tech.*, 30, 567 (1958)
- 5) Batel, W.: *ibid.*, 30, 651 (1958)
- 6) Both, H. U.: *Symposium Zerkleinerung*, S. 466 (1962)
- 7) Fuerstenau: *Min. Eng.*, 11, 1238 (1959)
- 8) 郷地俊介、清川英明、上田光明：粉体工学研究会誌，8，444 (1969)
- 9) 林 繁義：粉体工学研究会誌，5，1213 (1968)
- 10) 平田 博、西竹茂樹：ケミカルエンジニアリング，879 (1968)
- 11) 平田 博、西竹茂樹、渡辺 茂：安川電機，33, 356 (1969)
- 12) 神保元二：最近の化学工学，141 (1963)
- 13) 神保元二：粉体工学研究会誌，文献紹介 No. 139
- 14) 神保元二：粉体工学研究会誌，1，32 (1964)
- 15) 神保元二：同上，2，278 (1965)
- 16) 神保元二：化学工場，10, No. 8, 77 (1966)
- 17) 神保元二：化学装置，No. 7, 29 (1968)
- 18) 桑原好孝、山本 博、上田 康：粉体工学研究会誌，8，406 (1969)
- 19) Lesin, A. D., R. V. Lokshina: *Brit. Chem. Eng.*, 11, 44 (1966)
- 20) Лайковская, Е. Ю.: *Энергетика*, 9 [10], 105 (1966)
- 21) Maeder, M. J.: *Aufbereitungs-Technik*, Nr. 3, 175 (1965)
- 22) 松田一喜：材料，17, 499 (1968)
- 23) 増田 一：第2回プラント技術会議前刷 (1967)
- 24) 宮本直治：粉体工学研究会誌，8，440 (1969)
- 25) 森本益弘、松山卓哉、細川益男：粉砕 (細川粉体工学研究所)，No. 6, 3 (1961)
- 26) 森 芳郎、神保元二、山崎昌男：粉体工学研究会誌，4, 819 (1967)
- 27) 西竹茂樹：材料，18, 337 (1962)
- 28) 西竹茂樹：同上，17, 504 (1963)
- 29) 西竹茂樹：ケミカルエンジニアリング，29 (1968)
- 30) 西竹茂樹、松田一喜：材料，18, 331 (1962)
- 31) Raasch, J.: *Chem.-Ing.-Tech.*, 38, 125 (1964)
- 32) Rose, H. E., M. E. Sullivan: *Brit. Chem. Eng.*, 4, 450 (1959)
- 33) Rose, H. E., M. E. Sullivan: *Vibration Mills and Vibration Milling* (1961) Constable
- 34) Rose, H. E., G. Jimbo: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 41, 147 (1963)
- 35) Schmid, W. L. H.: *fördern und heben*, 606 (1965)
- 36) Smith, E. A.: *Laboratory Practice*, 15, 307 (1966)
- 37) 品川義和：安川電機，33, 371 (1969)
- 38) Tamura, K., T. Tanaka: *Ind. Eng. Chem., Process Design and Develop.*, 9, 165 (1970)
- 39) 田中達夫：化学装置，No. 9, 27 (1962)
- 40) 上田 康、山本 博、桑原好孝：粉体工学研究会誌，1, 12 (1964)
- 41) 上田 康、山内史朗、山本 博、桑原好孝：同上，2, 264 (1965)
- 42) 吉田哲夫、向阪保雄：化学工学，30, 1019 (1966)
- 43) 吉田哲夫、向阪保雄、大塚忠弘：粉体工学研究会誌，8，投稿中 (1971)
- 44) 吉田哲夫、向阪保雄、北村嘉秀：化学工学協会34年会要旨集，289 (1969)
- 45) 八木 正：粉体工学，5, No. 4, 125 (1963)
- 46) 横山藤平：ケミカルエンジニアリング，140 (1968)
- 47) ケミカルエンジニアリング，142 (1964)
- 48) *Brit. Chem. Eng.*, 12, 1107 (1967)
- 49) *Die Chemische Technik*, 15, Nr. 18, 195 (1942)

(iii) 流体エネルギーを利用したミル*

奥 田 聡**

流体エネルギーを粉砕操作に応用する場合、二つの目的がおもに考えられる。一つはいわゆるジェットミルにみられるように流体の有するエネルギーで粒子自体を加

速して粒子同志または粒子と固体壁との衝突によって粉砕を達成しようとするもので一般に微粉砕機にこの原理が適用されている。もう一つは流体に同伴して原料粒子が流れる場合の混合効果、渦流効果、分散効果および冷却効果によって粉砕を達成または助長しようとするも

* 昭和45年10月24日受理

** Satoshi Okuda 同志社大学工学部化学工学教室

ので、いわゆるエア・スエプト型微粉砕機がこれに相当する。ここではこれら二種の粉砕機について、その構造上の特徴、粉砕操作についての基礎研究の発展、応用面において述べる。

ジェットミル

構造：実用化されている代表的ジェットミル¹⁵⁾としてこれまでに① Jet-O-Mizer (Stephanoff²⁸⁾, 1941年), ② Microniser (Andrews¹⁾, 1936年), ③ Trost Jet Mill (Trost (1956年) および Wilson¹¹⁾, 1964年), ④ Blaw-Knox Mill (Croft と Bechtel⁴⁾, 1952年), ⑤ Majak-Jet Pulverizer, ⑥ ニューマチック・ジェットミル¹⁵⁾ などがある。

①と②とは同じ類型に属し、①が垂直型であるのに対して②は水平型である点が異なるが、ともに粉砕室を循環する気流に乗って運動している原料粒子がノズルからの噴出気流によって加速され、粒子同志の衝突をおこし、粉砕を進めるものであると考えられている²⁹⁾。①、②はともに分級器を粉砕機の中にうまく組み入れている点でも似通っている。③、④、⑤はジェット気流で加速された粒子同志を2方向または3方向から衝突させることによって粉砕を達成させる点で似ている。⑥は最近わが国で開発されたもので、②の Microniser に一見似ているが、②では空気のみを噴射する空気ノズルを用いているのに対し、⑥では超音速ノズルまたは空気エセクター式ノズルに空気のみでなく、原料粒子を供給し、固気混合流の形で噴出せしめること、および固気混合流で超音速ノズルを通過する際の粉砕をも目的としている点が異なっている。また、粉砕室のほかに分級室を備えており、分級室で分級された粗粒はもどり管またはもどり用の環状溝をとってふたたび粉砕管にもどされるくふうがなされている。もちろん粉砕室では Microniser と同様な作用による粉砕もおこなわれているが、粉砕管よりの加速粒子が粉砕室を旋回している粒子に衝突することによる粉砕であるため空気ノズルからの空気で加速された粒子同志の衝突による①または②の方法と異なった方法であるとみてよい。超音速ノズルによる他の方法として、超音速空気ノズルを直接に原料の粉粒体層に突っ込んで、粉砕する方法がある²⁹⁾。奥田らは超音速ノズル中を原料粒子を固気混合流で流し、直接有効な微粉砕が可能であることを報告した^{16,17)}。また、このようなノズル内での粉砕を連続閉回路方式にした場合の装置および特性についても報告した^{18,19)}。なお粉粒体層に空気ジェットを吹込み、ジェット吸い込み粉砕についてはすでに1958年森、神保の研究¹¹⁾がある。なお空気エセクター式ジェットミルについては奥田らの研究²⁰⁾およびエセクター式ジェットミルを二段に組

合せたミルの本邦特許³⁰⁾がある。また Jet-O-Mizer の O 型循環路中に特異な分級器および原料供給器を組み込んだ工夫³¹⁾もある。

ジェットミルについての基礎研究：前節①、②に属する粉砕機の特性については Rumpf²³⁻²⁵⁾、森、神保¹²⁾、Dotson⁵⁾、Behrens²⁾、Priemer²²⁾、Kuerten と Rumpf⁹⁾、Hendry⁶⁾ などによってすでになされている。

Rumpf は粒子の平均飛行距離をあたえる計算式を示し、粒子を加速に必要な距離を計算した²³⁾。また実際に亜音速および超音速の空気ジェット中での粒子の加速の様子をストロボスコープによって測定した²⁵⁾。森、神保は粉砕に表面粉砕と体積粉砕のあること、およびジェット粉砕機の処理量はコンプレッサ馬力の 1.5~2.5 乗に比例して増加することをあきらかにした¹²⁾。Dotson はジェットミル、コンカルボールミル、流動層における粉砕について比較研究をおこなった⁵⁾。Behren²⁾ と Priemer²²⁾ はいろいろの材料の金属板への衝突による粉砕について、また Kuerte と Rumpf⁹⁾ は砂糖や硫化亜鉛-マンガンのような粉砕とともにケイ光を発する物質を試料として Microniser および Jet-O-Mizer 型ジェットミルの粉砕の様子を観測し、空気ノズルの口径の影響、噴射角およびノズルの数の影響をしらべた。Muscheknautz ら¹⁰⁾も最近 microniser 型ミルについて噴射角と粉砕室内の静圧分布、速度分布の関係を混合比をパラメーターにして述べている。また原料粒子供給のためのインジェクターの特性についても付記されている。また Venkateswarlu ら²⁶⁾は Jet-O-Mizer について、方解石を試料にして実験をおこない、固体供給速度、供給粒子径、空気ノズル圧と製品の粒度分布、比表面積、滞留量および滞留時間ならびに粉砕速度の関係をしらべた。さらにまた Ridgway と Walton²⁷⁾は Trost ミルを用いてジェットミルの粉砕エネルギー効率(単位消費動力当りの表面積増加)がミルの容量が大きくなるほどよくなることを示した。奥田ら¹⁶⁾は超音速ノズル(De Laval 型ノズル)の中を圧縮空気とともに固気混合流の形で試料を流し、ノズル粉砕の研究をおこなった。その結果、ノズルのど部を通る場合の粒子相互の衝突、摩擦による粉砕が最も典型的な表面粉砕で、最も粒径の小さい微粉砕をおこなうことができる。なおノズル中で加速された粒子流にノズル側壁から二次的な圧縮空気を吹きこむとこの噴出空気であらたに粒子同志の衝突が誘起されるが、この場合の粉砕は製品の粒度分布から体積粉砕支配であることがわかった。Microniser はじめ Jet-O-mizer における粉砕室の側壁からの噴出空気による粉砕はこのような実験により、むしろ体積粉砕支配であると考えられ、循環気流に乗ってくり返し粉砕されることにより、順次微粉側に粒度分布が移動するものであることがあき

らかにされた。Hendry¹⁾はジェットミルの粉碎について分級関数、選択関数、破碎関数の形で数学的モデルをあたえた。

ジェットミルの応用例：ジェットミルの特長は相当量の空気を膨張させて用いることによりジュールトムソン効果による低温効果を期待できることである。したがって弱熱性材料、高分子材料などのいわゆる特殊物質の粉碎²⁾に効果がある。中山¹³⁾はニューマチック超音速ジェットミルによるいろいろの無機物質および有機物質の粉碎における処理速度（固体供給速度すなわち混合比が大きいほど処理速度が大きい）と製品粒径の関係を求め、一般に処理速度が大きいほど製品粒径は大きくなることを示した。また原料中の水分が原料粒子の帯電性とも関連して影響をあたえる場合があることを示した。

神保¹⁾も Jet-O-Mizer について、ミルへの粒子供給速度がある値をこえて小さくなると、急激に小さくなるが、その傾向はさらに供給速度の小さい領域で反転して、しだいに一定の値に近づき供給速度 0 において限界粒子径に達する傾向があることを示した。

ジェットミルのはかの特長は凝集物の解砕ならびに分散による微粒化に適していることである。その点農薬や酸化チタンの粉碎には大きい効力を発揮する。また X 線分析試料の作成など、機械的エネルギーによる粉碎としてはジェットミルは微粒砕が最も可能である、近時超微粒体が工業のいろいろの分野で要求されるが、ジェットミルの用途はますます拡大するものと思われる。

エア・スエプト型粉碎機

衝撃粉碎機には大量の空気を吸い込んで冷却と分散、さらに砕製物の分級に使用しているものが多い。とくに高分子材料、弱熱性物質、付着および粘着性物質の粉碎には大量の空気の吸込みが砕碎操作を容易にするうえに必要である。エア・スエプト型粉碎機²¹⁾はこのような要求より生まれたものである。

エア・スエプト型ミルとしては西独 L. Paltmann 社のエア・スエプトミル、Ref. Si 型²⁾、米国 Pulverizing Machinery 社のバルベライザー S 型、日本細川鉄工所のスーパーミクロンミル²²⁾、日本ターボ工業社のターボミル²¹⁾、米国 Raymond 社のインパクトミル²⁾、米国 P. M. C. 社のマイクロアトマイザー²²⁾、フランスのウルトラフィオン社（早川鉄工）のミクロシタロマット²²⁾などがある。

バルマンミルは円錐状の溝付ランナ（互に逆方向に回転している二枚の粉碎板）の間で高速せん断をうけた砕製物は出口付近にあるファンに吸引され、機内が冷却されると同時にこの旋回気流により分級し、粗粒はふたたび原料とともに粉碎部に投入される。スーパーミクロンミル²²⁾においては一つの室に 2 段のランナーがあり、とくに一段目のランナー羽根は送り方向にひねりがあるので、これによってつくられた風圧によって粉碎室内で気流の循環がおこり、これに乗った碎料の強力なせん断および衝撃が粉碎に効果的であると思われる。バルベライザー S 型はロータは数多くののこぎり刃を有しており、また各円板刃のあいだにはファン効果をもつ羽根車がはさまれており、せん断と気流によって樹脂や弱熱性物質の粉碎が有効に行なわれるようになっている。またターボミルでは円筒状のローターのまわりに多数の室があり、この室での激しい渦流が粉碎に有効であると考えられ、とくに樹脂の粉碎に効力を発揮する²⁴⁾。

同じエア・スエプト型でも原料粒子を空気とともに回転円板の上に落し、回転円板によって円周方向に放射した粒子を衝突板に打ち当て、衝撃粉碎する型のものにアメリカレイモンド社のたて型インパクトミル²⁾、Ming 社の Strato ミル²⁾、Vortec 社のインパクトミル^{2, 23)}などがある。粒子は高速で衝突板に衝突して瞬間的に破壊され、また、空気流を同伴するので、温度上昇が少なく、粉碎エネルギーの大部分はほとんど粒子を加速するのに用いられ、エネルギー効率が高いといわれている。

文 献

- 1) Andrews, N.H.: 米国特許 2,812,827 (1956)
- 2) Behres, D.: VDI Zeitschrift, Ser. 3, Nr. 5 (1964)
- 3) Behres, D.: Aufbereitungs-Technik, Nr. 5, 259 (1964)
- 4) Croft, C.M., L.D. Bechtel: Iron and Steel Engrs., 28, 10, 61 (1952)
- 5) Dotson, J.M.: Ind. Eng. Chem., 54, 62 (1962)
- 6) Hendry, R.: Dechema Monograph, Bd. 57, Verlag Chemie, 695 (1967)
- 7) 神保元二: 粉体工学研究会誌, 8, 438 (1969)
- 8) 河内達郎: 特許出願公告第 10044 号 (昭和 31 年)
- 9) Kuerten, H., H. Rumpf: Chem.-Ing.-Tech., 38, 331 (1966)
- 10) Muscheknaus, E., G. Giersiepen, N. Rink: Chem.-Ing.-Tech., 42, 6 (1970)
- 11) 森 芳郎, 神保元二: 粉砕, No. 2, 4 (1958)
- 12) 森 芳郎, 神保元二: 化学工学, 28, 477 (1961)
- 13) 中山仁郎: 粉体工学研究会誌, 447 (1969)
- 14) 永松 敏, 神保元二, 榎井幸夫: 粉体工学研究会誌, 8, 424 (1969)
- 15) 奥田 聡: ケミカル・エンジニアリング, 17 (1969, 2 月)
- 16) 奥田 聡, 松本壽孝, 土田知一: 化学工学協会第 33 年会要旨集第 2 分冊, 279 (1968)
- 17) 奥田 聡, 中山仁郎: 化学工学協会第 33 年会要旨集第 2 分冊, 276 (1968)
- 18) 奥田 聡, 今村洋光: 化学工学第 1 回秋季大会要旨集, 137 (1967)
- 19) 奥田 聡, 今村洋光, 浅田重直: 化学工学第 34 年会要旨集第 2 分冊, 292 (1969)
- 20) 奥田 聡, 藤岡道右, 樋口政義: 材料, 14, 730 (1965)
- 21) 奥田 聡: 粉体工学研究会誌, 8, 454 (1969)
- 22) Priemer, J.: VDI Zeitschrift, Ser. 3, Nr. 7 (1965)
- 23) Rumpf, H.: Chem.-Ing.-Techn., 32, 129 (1960)
- 24) Rumpf, H.: Chem.-Ing.-Techn., 31, 323 (1959)

- 25) Rungt, H.: *Chem.-Ing.-Techn.*, 32, 335 (1960)
 26) Ramanujam, M., D. Venkateswarlu: *Powder Tech.*, 3, 92 (1969/70)
 27) Ridgway, K., C.A. Walton: *J. Pharm. Pharmac.*, 20, 176S (1968)
 28) Stephaneff, N.N.: 米国特許 2,237,091 (Apr. 1, 1942)
 29) Segraves, W.B.: 米国特許 2,332,545 (Apr. 29, 1953)
 30) 住友化学工業 (株): 特許出願公告第 5036 号 (昭和 31 年)
 31) Wilson, W.M.: 米国特許 3,158,331 (1964) Trost: 米国特許 2,735,626 (1956)
 32) 横山藤平: 改訂 粉砕, 75 (化学工業社, 1969)
 33) 米国特許 3,149,790

(iv) 特 殊 ミ ル *

奥 田 聡**

特殊な粉砕原理による粉砕操作について最近の進歩を展望する。

液体のジェット流による粉砕

これは水力採鉱法としてソ連あたりでは相当に実用化されている方法で、水の有する運動エネルギーによって石炭また鉱石を粉砕しようとするものである。液体の速度は 1200 m/sec の高速にまで高め、この衝撃によって固体試料を変形または破壊する基礎研究がなされている^{1,2)}。英国の Kolswa 社は金属合金を水銀の細いジェット流で粉砕する特許を出している¹⁰⁾。

また液体のジェット流ではなく圧縮空気ジェット噴流中に研削剤の微粒を混入して脆硬材料に衝突させて脆硬材料を粉砕し、加工する方法は古くから一つの材料の加工法として用いられている¹¹⁾。同様にサンドブラストもこの種の粉砕操作とみてよい。

電気水力的衝撃粉砕

電気水力的衝撃粉砕 (Electrohydraulic crushing) は最近かなり注目されている破砕方法である。これは 1950 年代にソヴェトでその研究がはじめられ、1962 年頃英国のハーウェル原子力研究所できわめて硬い核燃料物質のセラミックペレットの再処理のための粉砕を行う粉砕機として研究され、ついでロンドン大学インペリアルカレッジで研究され、第 2 回欧州粉砕シンポジウムに発表されている¹¹⁾。

この方法は水中でスパークをとばして、その衝撃波で岩石を破砕しようとするもので、Carley-Macaulay^{4,5)} および Maroudas^{11,12)} によると、特殊な物質たとえば超硬質物質や極端に金属摩耗を嫌うものの粉砕に利用して有利である。さらに最近の研究によると、Maroudas

ら¹³⁾はこの方法を用いて選択粉砕 (ないし優先粉砕) をし、鉱石中よりある特定成分の分離する研究をおこなった。その結果、電気水力的衝撃破砕は物質の混合物のあいだの表面特性の差によって選択的にスパークの通路ができ顕著な選択性を示すことがあきらかになり、他の粉砕方法ではこのような選択的粉砕は仲々起こしえないので、方法の一つの特長といえる。この方法はまた他の粉砕方法にくらべて異常なほど立方形の、きれいな、微粉を含まない粉砕生成物ができることも興味深いことである。

水中放電と同様に水中爆発による衝撃力を粉砕に利用することができる。木村⁹⁾は粉砕原料をアルミ製などの薄い金属容器に入れ、その容器を水に浸漬し、水中で火薬を爆発させ、その衝撃力でアルミ容器中の粒子の粉砕、固結の研究をおこなっている。

Pannier¹⁴⁾は pyro-jet-grinder といって、管の中に原料の粒体試料と燃料を入れて、燃料の爆発燃焼によって試料に衝撃をあたえ、粉砕しようとするものである。

マイクロウェーブ破砕機

カッターを用いての機械的破砕による堀削機のかわりに、波長 12~32 cm (915~2,450 MHz) 程度の強力な電磁波エネルギーを岩盤に照射し、岩石の誘電体損失に起因する内部加熱を急激におこなうことによって岩石を破壊するか、破砕が容易になるようにするものである。

マイクロウェーブ発振機としてはマグネトロンが用いられる¹³⁾。

加熱による粉砕

試料を加熱することによって、水分が減少し、石炭などでは粉砕しやすくなるが、さらに熱応力や熱衝撃、試料の構造上の熱的物性の局部的差違によって結晶粒界などにそってクラックが増加する。一般に岩石は破砕前に

* 昭和45年10月24日受理

** Satoshi Okuda 同志社大学工学部化学工学教室