クロスジェットミルによる超微粉碎*

宮 地 光 雄**

Grinding by CROSSJET mill

Mitsuo MIYAJI

1. は じ め に

最近の新素材革命の進展に伴って、あらゆる分野で粉体に対する関心がたかまり、微粉体を製造する技術および装置両面での研究、開発が急速に進みつつある。

一般に材料を微細化すればするほど、材料の物理的あるいは化学的性質に変化がおこる。この質的变化を活用して新素材の開発がなされるわけで、粉体粒子の大きさに対する要求も、高機能や新しい機能を材料に付与させようと、シングルミクロンへ、さらにはサブミクロンの領域へと急激に小さくなってきている。

粉碎機や分級機もこれらの要求に対応すべく新しい進歩、発展、改良の動向がみられる。ここに述べる当社の「クロスジェット」ミルは、分類上は超微粉碎機の一つである気流式粉碎機一種で、高圧気流ジェット粉碎機構に加え、遠心分級機「シャープカット」を内蔵した、最近の微粉体製造の要求にマッチした新しい微粉碎・分級機であるといえよう。

2. クロスジェットミルの構造

ジェット粉碎機そのものは、既に戦前から開発され、数十年前から我が国でも一部研究され、当社でも、すでに昭和20年代に水平気流吸込型ジェットミルを商品化していた。ジェット粉碎はジュール・トムソン効果により、粉碎中の温度上昇が押えられるため、低融点物質、弱熱性物質の粉碎や、材料解砕などには、それなりの特徴を発揮する。しかし従来型式のジェットミルは、ジェット気流の中へ粉体を混入し、エジェクタ効果により気流中の粉体を衝突板あるいは粉体同士衝突させて粉碎を行わせるものであり、気流エネルギーを充分利用できないばかりでなく、衝突板やノズルの摩耗が大きなデメリット

の一つであった。これに対し「クロスジェット」ミルは閉回路粉碎系をより完全なものとするとともに、衝突、すいこみ、アトリションなど複数の粉碎作用を組み合わせた複合型ともいえる新しい型式のジェットミルで、性能・効率面で飛躍的に向上したといつてよい。

図1に外形を図2に構造を示す。供給すべき粉体原料は、④フィーダからミル粉碎室に連続定量供給される。

ミル粉碎室には、あらかじめ粉体原料があるレベルまで貯留されており、対向または対心するノズルからの粉碎ジェット気流により、粉体充填層の上部は激しい渦流状を呈し、ジェット流で加速された粒子相互の衝突、摩

①粉碎ノズル、②センタコア、③分級ロータ
④供給フィーダ、⑤製品出口

図-1 クロスジェットミルの外形

* 昭和63年11月16日本会第81回例会において発表

** ㈱栗本鉄工所 住吉工場
昭和63年9月2日受理

図-2 クロスジェットミルの構造

砕が繰り返される。粉砕はミル粉砕室の中央、すなわち気流が衝突交叉するゾーンで主として行われる。

粉砕された原料は発生する上昇気流により、粉砕室上部に設けた④「シャープカット」セパレータへと運ばれる。「シャープカット」セパレータは遠心分級機一種で、③分級ロータは帯板で作られた多数の羽根を放射状に配列した円筒型ロータで、水平方向に高速回転している。高速回転による旋回気流の遠心力と、③分級ロータ中心に向う吸引空気の向心力とのバランスにより分級点が定められる。⑤微粉は向心力が遠心力より大きいので、羽根をよぎって③分級ロータ内部に進み、⑥排気管を通して捕集機（サイクロン、バグフィルタ）で回収される。粗粉は逆に遠心力の方が大きいので、分級室側壁へ押しやられ、壁に沿って下降し、ふたたびジェット流中に巻き込まれ粉砕が促進される。クロスジェットミルの場合は、粉砕室内の原料レベルが粉砕効率に影響を及ぼす因子の一つである。したがって、粉砕ノズルの軸線からの材料充填層高さが常にあるレベルを保つよう、粉体原料層に特殊レベルセンサ³⁾を差し込み、濃度の高い粉体層と渦流ゾーンとの微差圧を検出し、分級ゾーンの濃度変化によるセパレータの負荷電流値とを連動させて、レベルコントロールを行い、かつ④フィーダの供給率と関係づけている。③ロータと固定部分の隙間はリングギャップでシールされて粗粒の飛び込みを防止している。

また、軸受部はダストの侵入を防止するため、エアーパージされている。

3. クロスジェットミルの特長

(1) 他の型式に比較し、粉砕動力が少ない。前述したごとく、材料の供給に気流を使用したノズル内吸い込み式に比較し、クロスジェットの場合は原料層の濃密な粉

体部分に向けてジェット流を吹き込むので、エネルギーのほとんどを粉砕に生かすことができ、分級効率の高いシャープカットセパレータと組み合わせ、理想的閉回路粉砕を行うので動力原単位を大幅に向上させることができる。

(2) 粉砕ノズルの中を気流のみが通るので、フィーダサイズに制約がない。原料はフィーダにて粉砕室へ供給される。解砕などの目的でジェットミルを使用する場合は、数ミリオードの供給サイズを取扱わなければならない。また薄片状の原料の場合などではベンチュリやエジェクタなどのノズル内吸い込み型ではノズルの閉塞、詰まり、供給量の変動などで、おのずとフィーダサイズに制約がでてくる。

(3) フィードサイズの大きな場合センタコアをミル中心に設けることによって吹き飛ばされた塊状の原料はセンタコア²⁾に衝突して、細かく碎かれるので、予備粉砕機が不要であると同時に能力が増大する。

(4) 摩耗が少なくコンタミがほとんどない。原料が衝突する衝突板などがなく、ノズルは圧縮空気流しか通過しない。また粉砕が行われるゾーンは渦流状の粉体により覆われているため、粉砕室側壁の摩耗も皆無となる。

わずかに回転する分級ロータの羽根の摩耗が問題になるが、これも PPM オーダで粉砕原料によってはセラミックロータを使用することによりコンタミへの配慮を行っている。

(5) 希望する製品粒径を自由に選定することができる。

これまでのジェットミルは分級機構のないものが、ほとんどで、あっても粒子の慣性力を利用した固定式のものの外部に別に分級機を設ける必要があった。クロスジェットミルは基本的には粉砕部分と「シャープカット」セパレータの分級部とが個別に構成されているため粉砕条件とは無関係に分級点の設定を行うことができ、シャープでキレイのよい粉体製品を得ることができる。

(6) 粒子に表面処理を施すことができる。粉砕ノズルの吹き付け角を粉砕材料、粉砕目的により自由に設定できる。材料の比重によって水平 0° から下向き数度までのノズル吹角を選定すれば粉砕効率を一段と向上させることができる。またノズル軸線を粉砕室内に旋回渦流を生じせしめるように平面角度（すなわち、気流がクロスするように）を設けて取付ければ、粒形の改善、コーティングなどにも使用することができ、広範囲な用途を有している。

4. クロスジェットミルの基本特性

(1) ノズルのど径とノズル間距離の関係

ノズルのど径とノズル間距離、換言すれば粒子加速距離³⁾はジェットミルでの粉砕エネルギーが気体の速度エネ

図-3 ノズル先端からの距離とジェット流速との関係

ルギであることから気体の流量と噴出速度により決まる。

ノズルのど径を大きくして大流量の気体を流し、しかもノズル元圧を高くて噴出速度を大きくすれば、最大の粉碎能力を得ることができるはずである。クロスジェットミルの場合ノズルはミル本体の外周部に配置され、ジェット噴出流はミル中心の一点に集中する。ミル中心での速度が十分でないと粉碎は進行しない。ノズルの先端において最大速度である噴出流はノズルから遠ざかるに従い小さくなる。

図3にノズル元圧が4.5～6 kg/cm²Gにおけるノズル先端より距離 X の点におけるノズルの噴出流速 V_x がどう変化するかを、ピトー管による動圧より求めた実測例を示す。

文献⁴⁾等によれば $X_{max}/d=10\sim20$ といわれているが、筆者らの経験によると、石灰石、タルク、コークスなどの粉碎では20～25が良好な結果を得ている。サブミ

クロン域での粉碎においては流量を少なくし、ノズルのど径を小さくし、ノズル間距離 X を小さくして使用する。(例えばホワイトカーボンなどでは10)

(2) ノズルの拡大角度と処理量の関係

ノズル拡大角度 θ を $0^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 18^\circ$ にして処理量に及ぼす影響を調べた。ノズル元圧が $5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 拡大角度 0° の場合を基準として表示すれば図4のごとくなる。すなわち、ここでは $\theta=12^\circ$ の場合が最も処理量増加が大きい。

この現象はノズル先端でのジェット流の速度が、それぞれ異なるためと考えられる。 $\theta=0^\circ$ のときは気体の断熱膨脹が十分に行われず速度が小さく逆に 18° のときには余りにも広がりすぎて気流とノズル壁との間に渦流が生じ速度を低下させるのであろうと思われる。

図-4 ノズル角度が処理量に与える影響

図-5 粉面高さによる処理比率の変化

図-6 セパレータ回転比による分級点の変化

図-7 分級点と処理比率の関係

(3) ミル内原料保有量と処理量の関係

クロスジェットミルの場合ミル内の原料レベルが粉砕効率に影響を及ぼす因子の一つである。したがって粉砕ノズルの軸線からの充填層の高さが常にあるレベルを保つようレベルコントロールを行う必要がある。図5はミル内充填層高さを種々変化させて処理量を調べたものである。ミル内保有量が少ないと粒子と粒子の衝突や摩擦のおこる確率が少なく当然処理量も少ない。逆に保有量が多いと頻繁に行われるので処理量は多くなる。但し、多すぎると粒子が運動する空間がせまくなり気流の速度エネルギーを有効に粒子に付与できない。少なくともノズル中心よりも上に粉面はあるべきで高すぎてもよくない。

(4) ロータ回転数と分級点と処理量の関係

「シャープカット」セパレータにおいてはエヤパージ

が正常になされているかぎり、ロータ回転数と分級点の関係はほぼ理論式に近い変化をする。図6はタルクの粉砕においてロータ回転比と粉砕製品粒子径 (d_{50}) の関係を示す。粉砕製品粒子径 (d_{50}) は分級機の回転速度に追従して、ほぼ定量的に変化する。図7は粉砕製品粒子径と処理比率の関係を示す。 $d_{50}=0.6\mu\text{m}$ から $1.4\mu\text{m}$ まではほぼ直線的に処理比率は変化している。 $0.6\mu\text{m}$ 近辺以下には分級機の性能もあって粉砕はほとんど進行しない。

図8にこのときのタルクの粉砕製品粒度分布曲線を示す。

(5) センタコアと処理量の関係

図9はセンタコアを設けた場合の処理量増加率を示す。 5m/m 以下のシリカ (1m/m 以下63%) を $d_{50}=$

図-8 タルクの粉砕例

図-9 センタコアの効果(1)

10~5 μm に粉砕した場合を示す。図9で明らかなごとく40 m/mのコアを挿入した場合でも処理量の増加を示すが16 m/mのコアの方が、その効果は顕著である。能力増加の要因として考えられるのは粒子の衝突確率に起因することが挙げられる。一般に二つの粒子が幾何学的に直線的な衝突をする確率⁵⁾は10%程度であるといわれていることから考えると偏心的衝突や斜め衝突をも効率よく粉砕エネルギーに利用する方法の一つとしてセンタコア⁶⁾効果があると考えられる。製品中位径が小さくなると増加率が小さくなるのは粒子が小さくなれば衝突よりも粒子相互の摩擦による粉砕が支配的となるためである。したがって供給粒度が十分に小さい場合にはセンタコアを設けても、あまり、その効果がないといってよい。さらにもう一つの要因としてはジェット流による

粒子飛翔距離があげられる。16 m/m コアが 40 m/m コアより増加率が大きくなるのは粒子が最大速度に到達する飛翔距離が 40 m/m コアでは短かすぎると考えられる。図10はシリカ以外の材料を粉砕したものである。コークス (A) の場合原料粒度が粗いと増加率が非常に大きく予備粉砕したコークス (B) では増加率は小さい。ホワイトカーボンのごとく原料粒度がもともと細かく嵩密度も小さい場合はセンタコアの効果はほとんど認められない。

(6) ミル材質とコンタミの関係

クロスジェットミルは一番コンタミの少ないジェットミルである。おもなコンタミ源は回転する分級ロータである。ステンレス製ロータの羽根にアルミナ板を接着した分級ロータを内蔵するジェットミルにおいて全ての接粉部をステンレスで作り球状化したホワイトカーボンを

写真-1 ジルコニヤ製一体成形分級ロータ (KA50)

図-10 センタコアの効果(2)

写真-2 アルミナ製一体成形分級ロータ (KA250)

写真-3 コンタミレスの KJ50 型ミルの外観

0.5 m/m 以下100%の原料から $d_{50}=2.9\mu\text{m}$ の製品に粉砕した場合コンタミ合計 (Fe, Ni, Cr, Al) の増加は約 1PPM であった。またアルミナ板を接着した分級ロータ

を内蔵するジェットミルにおいて、すべての接粉部をウレタンゴムでライニングして歯科用シリカを 100 メッシュ以下42%の原料から $d_{50}=7.5\mu\text{m}$ の製品に粉砕した場合コンタミ合計 (Fe, Ni, Cr) の増加は約 4PPM であった。コンタミ混入防止策としては摩耗部をセラミックス熔射する方法やゴムライニングする方法が一般的である。センタコアもコンタミを嫌う原料においてはセラミックス製にする必要がある。写真1は直径 50 m/m のジルコニヤ製一体成形⁷⁾ の分級ロータを、写真2は直径 250m/m のアルミナ製一体成形⁸⁾ の分級ロータを示す。写真3はコンタミ対策を施した KJ-50 型ミルの外観を示す。

5. お わ り に

クロスジェットミルは乾式連続で比較的容易にシングルミクロン級の微粉がえられるが他の型式の粉砕機とくらべると、まだまだ動力原単位が大きくエネルギー効率が悪いので改善する余地がある。今後、構造面も含めて、さらに一層の性能向上を図りたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 宮地：特願昭62-45480
- 2) 辻：産業機械, No 438 (1987), p 34
- 3) 田中：粉体と工業, Vol. 19, No 9 (1987), p 30
- 4) 田中：粉体と工業, Vol. 19, No 9 (1987), p 31
- 5) 田中：粉体と工業, Vol. 19, No 9 (1987), p 29
- 6) 宮地：特願昭63-150977
- 7) 宮地：意願昭63-21673
- 8) 宮地：意願昭63-21672