IV. 流動層の装置への応用

IV-a. 乾燥 (冷却) 装置*

桐 栄 良 三**・松 野 隆 一**

流動層を用いる乾燥 (冷却) 装置の対象となる材料は数十 μ 程度の合成樹脂粉末から8mm程度の石炭などの粒径範囲のものであり、材料状態としては比較的さらさらしている状態 (手で握れば形となるがすぐばらばらにできる程度) のものである。水分の多い材料を比較的厚い流動層に供給して、乾燥粉末と混合しながら乾燥する方法もあるが一般的な使用法ではない。

粒粉体材料に対する一般的乾燥器としての使用の他に特に低含水率を希望する材料に対して第2段目の乾燥器として使用でき、また製品含水率の制御も行ないやすい。

1. 特 徴

利点: 1) 装置構造が簡単で可動部分がないこと。2) 材料と熱風の接触がよく熱容量係数が大きいこと。静止時流動層1 m^3 当りの値は1mm程度の粒子で $10^5 \text{kcal/hr} \cdot \text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 、100 μ 程度で 10^4 の値を示す。したがって小規模装置で大量の処理が可能である。3) 処理量の多寡それぞれに対応して装置が安価に製作されること。4) 材料滞留時間の制御が連続式で行ないやすく、さらに製品含水率の制御も行ないやすい。5) 流動層に吹き込まれたガス温度は底板上わずかな距離で著しく低下し、あとほとんど均一の温度になるため比較的高温のガスを吹き込むことができる。酵素法ブドウ糖粉末の乾燥に80 $^\circ\text{C}$ の熱風を用いて安全に操作できるのはこのためである。6) 乾燥 (冷却) 中にある程度の粒子分級が行なわれ、細粉は排気にのせて分離することができる。7) 粒子破壊はほとんどない。8) 乾燥した材料の排出がきわめて容易である。

欠点: 1) 熱風の送風機動力が大きいこと。材料重量を風圧で支えること、および均一流動層の形成のために整流部の圧損がある程度とられるため圧損が大となる。これらのため送風機動力は熱風乾燥器中最も大きな値となる。総合動力ではこの装置は可動部がないため、この欠点はかなり減少される。2) 湿潤材料状態により供給できる含水率に限界がある。流動層を形成させるために

は材料によりある一定の含水率値をこすことができない。底板上の堆積を起こすこととなる。3) 広い粒径分布をもつものでは微小粒子の逸散とか、大粒子が流動せず底板上に堆積を起こす場合がある。4) 表面蒸発期間の乾燥を目的とする材料以外では必ずしも熱効率は高くない。流動層の向流多段化に限界があり、一方、一度利用した熱風を循環使用することは粉末同伴のため一般には行なわれないためである。熱効率は通常30~50%にとどまるが、表面蒸発のみを目的とする場合には70%を越す場合もある。

2. 乾燥 (冷却) 用流動層装置の特性

接触反応装置と異なり乾燥装置の場合には目的とするものが粒粉体の材料であり、ガスは熱媒体である。乾燥に本装置を用いる場合には以降に述べる特性を考慮しなければならない。1) 必要熱量は乾燥に要する熱量から計算せられ、熱風温度は材料の熱的特性で定められる。一方、流動化の速度は材料の粒粉体としての特性から定まる。流動層を通過するガス速度はこれら双互の間の妥当な値をとることとなるが、乾燥の場合には流動層の風速が大きいのが一般である。流動層通過の風速 u は一般に粒子の終端速度 u_t に対して $u=(0.3\sim 0.8)u_t$ 程度にとられ、最低流動化速度 u_{mf} に対しては数十倍の値で操作される。微小粒子に対しては u_t 以上の場合もあり、微粉は系外で捕集されては流動層に返されて、流動層内および上部空間がこれら粒子のある平衡濃度をもった状態で運転される例もある。粒子相互の水分あるいは静電気による凝集も頻々と起こり、簡単に単一粒子の終端速度から流動層風速を定めることは危険である。たとえば代表径120 μ のポリ塩化ビニル粉末 (終端速度50cm/sec) の流動層で線速度を60cm/sec程度にとって系外への粒子の逸出はほとんど見られない。2) 投入直後の材料が水分により凝集している材料では流動層の形成が困難である。底板上での堆積を防止するために堆積をくずす攪拌翼を付設したり、乾燥した材料を一部循環するなどの方法がとられる。3) 工業的には粒径分布のかなり広い材料を扱う場合があり、また主な粒径範囲外の材料が少量混在することもある。流動化速度は幸いにして

* 昭和40年7月1日 受理

** Ryozy Toei-Ryuichi Matsuno 京都大学工学部 化学工学科

範囲がきわめて広いため、広い粒径範囲の材料も均一な流動層を形成し、これが本装置の大きな特徴でもあるが過大な粒子は堆積を起し、連続法の場合の技術上の大きな問題点である。このためあらかじめ篩分するとか、その他種々の考案がなされているがまだ十分解決されていない。4)、3)と関連して粒径分布の広い材料に対する連続法の適用の場合には、むしろ積極的に大粒子と小粒子を流動中に分離して、分級の操作を併せて行なう方法もある。すなわち、1次の流動層で大粒子の流動層乾燥を行ない、小粒子は別の2次流動層にかけるとか、気流乾燥法によるとかの方法も行なわれる。5) 冷却装置として用いる場合には粒子の分散はきわめてよく、材料の顕熱降下のみを考慮すればよいので乾燥にくらべて風量も少なくてもよい。1)、2)の点は問題にならず、小容積の装置で冷却用吹込空気温度 $+3^{\circ}\text{C}$ 程度まで容易に冷却することができる。

3. 流動層乾燥(冷却)装置の展開

最初、回分式の装置が製作されたが、次第に半連続さ

図1 半連続2段流動層乾燥装置

図2 連続1段流動層乾燥装置

らに連続の装置に移行してきた。

a) 回分および半連続方式

回分式のもの少量処理に使用され、特に医薬などで非常に低くしかも均一な含水率を希望する場合に用いられる。

半連続式には各種のものがあるがその一例を図1にあげる。図1は2段の流動層で熱風は下段の下から吹き込まれて、下段および上段で乾燥を行ない排気される。上下両段の流動床底板はある時間間隔で交互に材料を下に落下させるように作動する。

b) 連続方式

i) 1段連続方式: 連続式が当然考えられ1段連続方式が開発された。これを図2に示す。この場合粒子の混合状態は完全混合に近いと考えられるので、未乾燥粒子のとびだしの確率を低くするためには滞留時間を十分長くとる必要がある。文献 4)、6)によれば未乾燥物のとびだしを0.1%以下に抑えるためには、完全混合の場合1個の粒子の乾燥時間の250倍の平均滞留時間を必要とし、1%でも25倍を要する。したがって流動層が厚くなり(静止時層厚み1mを越すものも少なくない)圧力損失が大きくなる。経済的な運転を考える場合には吹込風量を少なくして熱風の温度をあげることとなる。材料の表面蒸発期間の乾燥を考えるならば材料温度は吹込熱風の湿球温度に留まるから(600°C の熱風で湿球温度は 60°C 近辺にある)、この方法は表面蒸発期間の乾燥を主とする場合に適用して有利である。幸い非吸着性材料では流動層のように粒子が分散して運動する場合にはその限界含水率が1.5~2%程度にあるのでかなり低含水率までの乾燥に用いられる。表面蒸発期間の材料の乾燥に大量処理の装置として用いられており、1時間に1基で100~400tの処理が行なわれる。現在、世界最大の処理量をもつ乾燥器はこの型式で、Agarwalら¹⁾によれば1/4in以下100#以上の粉炭を1時間に375t処理してその付着水9~14%を乾燥するのに直径4.2mの装置を用いている。1時間の水分蒸発量は37~70tに及んでいる。吹込熱風は $500\sim 680^{\circ}\text{C}$ 、排気は $63\sim 70^{\circ}\text{C}$ でほとんど飽和でありきわめて熱効率も高い。

また過熱蒸気による重合樹脂の乾燥にも本装置が用いられている。(後述)

比較的粗な乾燥の大量処理方式としての本装置の発展は将来大いに期待される。

ii) 向流多段方式: 減率乾燥を必要とする材料に対しては流動層からの排気の温度が高くなり、一方材料は温度上昇を起こすので吹込熱風温度には制限があり、また材料の持出す顕熱量も大きく熱効率が低くなる。これらの点を考慮すると流動層の向流多段化が当然考慮せ

られるべきであろう。未乾燥粒子のとび出しに着目すると、3段にすると0.1%のとび出しなら1粒の乾燥時間の5倍の滞留時間でよく、流動層の圧損は飛躍的に減少する。さらに材料と熱風が向流に接触するため熱効率は著しく向上する。

流動層の多段化に関して最大の難点は材料と熱風を向流に接触させ、各段上で流動層を形成させながら材料を一定量ずつ下段に送る機構である。これに関しては実に多くの考案がなされたが、結局この方式のとれるのは材料粒径が比較的揃った1~6mm程度の材料に限られると考えてよい。下段に送る機構としてはa)溢流管を付設する方式とb)流動床底板を多孔板として、その多孔板の開孔(10~20mmφ)を通して粒子を落下させる方式²⁾がある。a)の例としては溢流管中にコーン・バルブに備えた石灰石(3mm以下)の乾燥装置があり、また別に焙焼をもこの形式で行なっている例もある。b)を図3に示した。図3は孔径10~20mm、開口比30~40%の多孔板を段間隔15~30cmに配置して各多孔板上で流動層を形成させ、熱風と粒子はこの孔を通して上昇および落下するものである。図では上塔が乾燥流動段塔、下塔が冷却流動段塔で、材料は上部から供給され、上塔で流動層乾燥を受けて乾燥された粒子は下塔で冷却され、排出される。下落で熱交換された空気は加熱用重油炉で温度をあげ上塔の下部に吹き込まれ乾燥を行なう。この装置は小麦の焙焼および冷却、スラグの乾燥に用いられている。

iii) 多室方式： 流動層の向流多段化の困難さのため、向流を止めて多室化への展開がはかられた、今日および将来主体をなすものはこの方向であろう。先に述べたように多室化によって滞留時間を短くしても未乾燥粒子のとび出し率の低下は十分はかることができ、流動層の圧損を小さくすることができる。ただ熱効率の面では向流多段には及ばない。この多室化を行なう場合に図4に示したように各流動層を上下に重ねることも行なわれる。図4は一見すると多段のように見えるが、熱風は各段に別々に送入されているので、熱風と材料の向流操作ではなく、完全混合された1段の流動層を上下に2室接続した多室形式である。堅型多段に見える装置のほとんどはこの形式で本質的に向流多段のものではないことに注意を要する。この型式は装置の複雑化、材料移動の関係などから室数は2室までに限られている。材料移動の容易さを考えると横に長い連続流動層が考えられ、材料流れの方向に多室化を考えるべきである。これらの装置の数例を図5、図6に示した。図5は流動層底板は共通していて各室の吹込熱風温度が変えられる形式のもので、第1室の流動層形成を容易にするため簡単な形の攪拌翼が付設されており第1室のみは円筒形である。図6は図5と同じく共通の底板であり、長さ方向に必要な枚

数の仕切板が底板から3~6cm離して吊されており各仕切板間が各1室となっている。この装置における材料の混合特性は各室(図では4室)の完全混合の場合よりさらに幾分ピストン流れに近い状態である⁹⁾。

普通静止時流動層厚さは5~20cm(多くは10cm近辺)

図3 向流多段連続流動層乾燥装置

図4 堅型2室連続流動層乾燥装置
(Keller カタログ)

図5 横型連続流動層乾燥装置(H. Orth カタログ)

にとられる。したがって整流板の圧損をも含めて全圧損は水柱 100~150mm までである。なおこの装置は熱風の送入排出に別々の送風機を使用するので材料は大気開放のまま供給排出されて粉塵はまったくない。横型連続流動層を多室化する方法は、この他にも数多くある。

さらに熱風必要量の少ない場合には、流動層底板を振動させて材料移送を助ける方式もある。

iv) 過熱蒸気による溶剤を含む材料の乾燥： 流動層の適用の例として注目すべきものに溶剤を含む材料からの過熱蒸気による乾燥がある。在来、多くの重合樹脂は溶剤中で重合され、水処理

後、気流乾燥で第1段の乾燥を行ない、連続横型多室または1段流動層で最終乾燥を行なった例が多い。近年溶剤を含む材料を直接その過熱蒸気で乾燥して溶剤を回収する方法が開発され、次第に多用されるにいたっている。多くはその最終含溶剤率を0.1%以下とするため前述のような2段乾燥法によるが、その第2段乾燥器として流動層が使用される。ここでは連続1

段の流動層によりポリプロピレン粉末の乾燥を過熱蒸気法で行なった例をあげる²⁾。図7にこのフローシートと物質収支を示してある。0.2%の溶剤を含有するポリプロピレン粉末 2810kg/hr を得る装置で湿りケーキは溶剤を40 wt % (湿量基準) 含有しており、溶剤は80 wt % ヘキサンと20 wt % イソプロピルアルコールの混合物で61.6°C に沸点を持つ共沸物である。この装置系はきわめて安定した運転であり製品も他の種々の乾燥器による場合よりもよくかつ均一に乾燥される。今後この方面での使用が増加するであろう。

v) 冷却装置： 流動層を冷却装置として使用して優れた結果をえており、運転もきわめて容易である。Schreiber⁸⁾ は横型連続流動層および他の5種類のクーラー各6~20t/hr 処理の工業装置を対称として化学肥料を冷却した場合の能力比較を行なった。これについては本号 V-c-5 に表をあげてある。粒粉体冷却装置としては1段連続または横型多室方式の装置が最も優れたものと考えられ、今後の発展が大いに期待される。

vi) スパウテッド・ベッド乾燥器： 流動層に幾分類似したスパウテッド・ベッド乾燥器が報告されている。これは図8に示したように円筒下部に円錐を付設しその中心部から風を吹き上げる方式で、その流れによって粒子の循環流を起こして乾燥する方法である。粒度の揃った1~8mmの粒子に対して用いられる。層厚みの薄い場合は圧損が比較的少ないが、工業的に使用するよ

① 多孔板 ② 仕切板 ③ 加熱器
④ サイクロン ⑤ 送風ブロー ⑥ 排気ブロー

(栗本鉄工所カタログ)
図6 横型多室連続流動層乾燥装置

図7 ポリプロピレン粉末乾燥装置系フローシート

図8
スパウテッド・
ベッド原理図

うな層の高い場合には単位面積当りの材料重量の80%程度の圧損を示す。吹出孔径と塔径および粒子径の關係で最高材料層高さが決められ、また吹出孔径も決定せられる。これらに関しては文献5)で与えられる。直径2ft、高さ7ftの本装置を用い、その後に充填層形式のクーラーを付設して、1時間に2tの豆を処理し、含水率31.0%から22.2%まで乾燥した例⁷⁾がある。装置が簡単であり、比較的大粒で内部水分の除去を目的とする場合の乾燥法として用いられるが、むしろ乾燥以外の操作に応用面をもつと考える。

4. 装置設計

設計の基礎となるのは1. 流動床底面積の計算、2. ホールド・アップの決定であり、構造上最も大切なのは最低の圧力損失をもって均一流動層を形成させるような流動層底板の構造である。1. に関しては流動層における粒子・ガス間の伝熱の問題であるが、現在までこの数値が研究者によりバラバラであるので、乾燥の実験に基づいて得た数値あるいは実験式による他ない。多段向流型式(図3)および横型多室連続式(図6)に関しては、文献^{2,9)}に詳細な設計法と設計例があげられている。

装置の大型化にともない均一流動層の形成の問題はきわめて重要である。整流板の圧損を大きくすれば良好になるが送風機動力が大きくなる。現在、経験的に50~

70mm 程度の圧損のものを用いている例が多い。将来、解明せられるべき大きな問題である。

製品含水率の制御方法として排出口から流出する材料温度を連続して計測すると、これと乾燥熱風の条件から材料含水率が計算される¹⁰⁾。低含水率では0.1%の含水率変動で3~5°C材料温度の変化することに着目して、

これを熱風温度の制御に結び精度の高い制御を行なうことができる。

なお、本号 V-c の部に、半連続方式の図 1、1 段連続方式の図 2、向流多段方式図 3、横型多室方式図 6 についてそれぞれ工業装置の運転例をあげてあるので、あわせて参照されることを希望する。

引用文献

- 1) Agarwal, J. C., W. L. Davis, D. J. King: *Chem. Eng. Prog.*, 58, No. 11, 85 (1962)
- 2) 赤尾: 化学機械技術, No. 12, p. 168 (1960)
- 3) Basel, L., E. Gray: *Chem. Eng. Prog.*, 58, No. 6, 67 (1962)
- 4) 神谷: 化学工学, 19, 412 (1955)
- 5) Malek, M. A., Benjamin, C-Y. Lu: *Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop.*, 4, 123 (1965)
- 6) 大島: 化学工学, 17, 396 (1953)
- 7) Peterson, W. S.: *Canad. J. Chem. Eng.*, 226, Oct. (1962)
- 8) Schreiber, H.: *Brit. Chem. Eng.*, 7, 587 (1962)
- 9) 桐栄: 化学機械技術, No. 15, p. 28 (1963)
- 10) 桐栄: 化学工学, 28, 69, Eq. (8) (1964)

IV-b. 吸着・イオン交換装置*

河 添 邦 太 朗**

吸着・イオン交換は現在固定層あるいは攪拌槽によるバッチ的あるいは半連続的操作が主として行なわれているが、大規模の場合には移動層あるいは流動層による連続装置の使用が増えてきており、今後ますますその傾向は強まるであろう。しかし流動層の使用はどちらかというときまだ特定の場合に限られている。

吸着・イオン交換に流動層を使用すると、固定層に比較しその利点として（これは連続化による一般的な利点でもあるが）つぎのようなことがあげられる。

- ① 被処理ガスあるいは液の品質が一定。
- ② 再生剤が有効に利用される。
- ③ 装置が小さくなり吸着剤・イオン交換体の所要量が少ない。
- ④ 吸着部と再生部を別々に最も有効に操作できるよう設計できる。

その他気相吸着の場合大量処理に適しており、処理量大で圧損失が少なく、層の温度の調節が容易である。また結晶の析出を伴う場合や被処理液が固型物を含む場合にも使用できるなどの利点もある。

その反面装置が複雑となり小規模では向かないこと、吸着剤・イオン交換体の摩損があることその他、流体および粒子のチャネリングなどの問題もあり、また液の場合比重差が少なく流速を大きくとれない点、あるいは

接触効率があまりよくない点なども具合の悪いことである。

これまでの研究例、工業化例を表 1~表 3 にまとめてみた。次にその中の工業的規模で行なわれているものについて述べてみる。

1. ビスコース工場の廃気中の CS₂ 回収^{1,22)}

溶剤回収は通常造粒活性炭の固定層で行なわれるが、図 1 に示した Landmark と呼ばれる装置は、椰子殻炭を用い、5 段の流動層でビスコース工場の廃気中の CS₂ の回収を行なう。一般に CS₂ 回収では CS₂ 濃度の高い廃気のみを処理するが、この場合は希薄なものまで吸引して、吸着系における回収率よりも捕集系も含めた総括の回収率を上げるようにしている。その結果風量が多くなり、もし固定層であると塔断面積として約 540 m² が必要であるが、この装置ではその約 1/5 で、流動層によってのみこのような回収法が可能となる。

活性炭は各段で堰を溢流し降下管を経て、つぎの段に入る。活性炭の塔内における滞留時間は 45 min で、最下段から溢流した活性炭は 2 つのロータリ・シール・バルブを通してストリッパードライヤに入るが、2 つのバルブの間は不活性ガスでバージし爆発その他を防止している。

* 昭和 40 年 8 月 9 日 受理

** Kunitaro Kawazoe 東京大学 生産技術研究所