紙の誘電加熱による連続乾燥

Continuous Paper Drying by Dielectric Heating

マルコン電子株式会社 石 川 朝 邦

Tomokuni Ishikawa, Marukon Denshi Co., Ltd.

1. は し が き

高周波による誘電加熱は電気の絶縁物自身を電氣的に発熱させる加熱手段であって、この方法によると熱伝導の悪い材料でも全体を均一温度に且つ極めて短時間に加熱することが出来る。これを乾燥操作に利用すると被乾燥体表面の空気境界に全く影響されずに任意の速度で蒸発熱を供給することが可能で、また水分の内部から外部への拡散を助ける作用があって、結局乾燥速度を著しく増大し得る。

誘電加熱による乾燥の概念は決して新しいことではない。ここでは紙のごとき薄物の連続乾燥において、誘電加熱の手段を在来の諸種の乾燥手段と組合わせることにより一層合理的な乾燥方式が見出し得ることについて述べたいと思う。

2. 誘電加熱の特質

金属や電解質溶液などの導電体に2枚の電極を当て電圧を加えると物体内部の自由に動き得る電荷（電子またはイオン）が反対符号の電極に向って走り電流を生ずる。物体を構成する原子とその走る電荷との間の摩擦熱で発熱し、それをジュール熱と呼んでいる。導電体の1ccにつき毎秒発生するジュール熱 q は、

$$q = \sigma \cdot E^2 \text{ (watts/cc)}$$

σ : 直流導電率 (mho/cm), E : 電界の強さ (volt/cm)

紙やプラスチックなどの絶縁体は自由に動き得る電荷を持っていないが極性分子を持つものである。極性分子は分子内に等量の正と負の電荷が一定距離を隔て対立しているもので、酸素、窒素、ハロゲン等の原子を含む分子は大部分が極性分子を形成している。水分子は大きい極性を持っている。極性分子を含む絶縁体に2枚の電極を当て正負が周期的に変る高周波電圧を加えると、有極性分子が電極の正負が交互に変る度に向きを変えて回転振動を起こす。そして周囲の分子との間の摩擦により熱を発生し、これを誘電体損失熱と呼んでいる。この熱は高周波の正負の電圧が変る回数（周波数）が毎秒100万回（＝メガサイクル）以上になると顕著になってくる。絶縁体の1ccにつき毎秒

発生する誘電体損失熱 q は、

$$q = \left(\sigma + \frac{f \cdot \epsilon \cdot \tan \delta}{1.8} \cdot 10^{-12} \right) \cdot E^2 \text{ (watts/cc)}$$

f : 周波数 (cycle/sec), ϵ : 誘電率, $\tan \delta$: 誘電体損正切。第1項は僅かに含む自由電荷によるジュール熱で、第2項は有極性分子による誘電体損失熱である。周波数を大きくすると第2項を如何程でも大きく出来る。この原理による加熱が誘電加熱と呼ばれ、絶縁体自身に発熱させるので、加熱に際し熱伝導に頼る必要がない。従って概して熱伝導の悪い絶縁体を高周波により短時間に全体を均一加熱し得るのである。

誘電加熱はエネルギー効率が非常に高い。その第1の理由は被加熱体その物に直接発熱させ、炉壁など余計なものを加熱せずに済むことで、第2には秒単位あるいは多くとも数分間の短時間加熱が出来るからである。ボイラーによる加熱は効率が10%以下だし、赤外線加熱を上手に用いて20～30%、誘電加熱は30～50%の効率が得られる。

実用上誘電加熱の利点を挙げると、設備として高周波電力発生装置の外に加熱装置としては電極板のみであるから清潔で簡素な設備となる。流れ作業方式が簡単に採り得るし、設備の占める床面積が従来に比較して著しく小さくてよい。また電氣的制御により簡単に加熱速度、加熱温度の調節が可能であり、電極の形とか周波数の選択で希望する部分の局部加熱も必要ならば工夫し得る。

3. 高周波電力の問題

前節で述べた如く誘電加熱は工業上全く優れた加熱手段を提供するものである。しかし実用上専ら問題になるのは高周波電力に関する経済的問題で、誘電加熱の活用を計ることはこれを如何に解決するかに帰着する。

高周波電力は真空管発振器によって発生する。高周波大電力の発生技術はラジオやテレビの大電力放送により非常に発達しているが、真空管発振器の入力に対する高周波出力の割合、発振効率、は原理的に約50%が限度である。高周波発生装置の能力は高周波出力により幾kWと表現している。この意味で高周波電力

は市販電力（50 または 60 サイクル）の 2 倍のコストである。併し高周波電力を加熱に利用する能率は下手でも 60%，上手なら 100% になし得るので，結局誘電加熱のエネルギー能率は 30～50% と高く出来る。従ってここで問題になるのは熱源として石油，石炭に比較して市販電力のエネルギーコストが高いことである。

その他に高周波電力発生装置の設備費は比較的高いが，ボイラを新設することを考えると特に過大とは思われない。また真空管が消耗品となるが，平均寿命は 3,000～4,000 時間で，一度くべたら一年間燃え続ける石炭と考えれば別に問題ない。

誘電加熱に使用する周波数は屢々最適の値があるが，一般には，先に掲げた誘電体損失熱 q の式により必要な発熱量 q を得るために先づ電界の強さ E を極力大きくし，放電が起こる心配が生ずるようならば周波数を高くする，と考えて周波数をなるべく低く選んだ方が発振能率が大きくなり取扱いが簡単になる。通常は電波妨害の見地から誘電加熱に割当てられた周波数——13.56 メガサイクルを最低とし，その 2 倍および 3 倍の周波数——を用いている。これ以外の周波数を用いるときは電波遮蔽を嚴重にして漏洩電波を法定以下にすればよい。

4. 恒率乾燥期間における誘電加熱による紙の乾燥

被乾燥体が乾燥の平衡温度に達するまでの準備乾燥期間は紙の場合は厚さが薄いので殆ど存在しないか非常に短時間で終了する。

乾燥の平衡温度に達すると被乾燥体の外表面は一樣に水層で蔽われ恰も一定温度の自由水面からの水の蒸発と同じく乾燥速度は一定で，この状態が続く限りの時間を恒率乾燥期間と呼んでいる。この期間中の乾燥速度は，

$$-\frac{dw}{dt} = kA(p_w - p) = \text{const.}$$

w : 乾燥試料 1 kg 当りの含水量 (kg), t : 時間 (hr),
 k : 表面蒸発係数 (kg/hr.m².mmHg), A : 蒸発表面積 (m²), p_w : 被乾燥体の表面温度における飽和水蒸気圧 (mmHg), p : 空气中 (風) の水蒸気圧 (mmHg),
 dw/dt : 乾燥速度 (kg/hr.m²) で表わされる。この式から明らかであるように乾燥速度は被乾燥体の種類に無関係で，乾燥の外部条件により著しく左右される。乾燥速度を大きくするために，風の相对湿度 (p) は低いほどよく， k を大きくする意味で風速は大きいほど風の方向は被乾燥面に対し平行に近いほどよい。これ等の条件は容易に適合させ得る。

問題は風の温度である。風の温度を高くすると k と

p_w を大きくし p を小さくするので乾燥速度を大きくするのに基だ効果的である。通常実際には乾燥において被乾燥体に最高許容加熱温度があって風の温度が制限される。熱風乾燥では風より被乾燥体への熱伝達が遅いので，蒸発熱のため被乾燥体の温度は風の温度より下がる故に，この温度低下を見越して風の温度は前述の最高許容加熱温度より高く出来る。併し風速を大きくしたいこともあって，無益に大量の風を温めることになり，風の温度を高くするほど乾燥のエネルギー効率は著しく悪くなる。

恒率乾燥期間中に被乾燥体に水分の蒸発熱を供給することが容易でない事情は抄紙機を考えると容易に分る。そこでは湿紙が圧搾部を通り次に多重円筒乾燥機に入るが，ここで湿紙に蒸発熱を与えるために，乾燥速度を犠牲にして，湿紙を乾燥筒に木綿カンバスで圧着しなければならない。

これに対し誘電加熱の方法を用いると，恒率乾燥期間中は紙が水分（有極性分子）を多量に含むので高周波電界中で発熱し易く，蒸発熱の供給が極めて効果的に行なわれる。そして発生した水蒸気を風で除去すると非常に短時間で乾燥目的を達することが出来る。この際，風の温度が低いと高価な誘電加熱による熱で風を無益に温めることになり，逆に風の温度が高過ぎると被乾燥体を過熱してしまう。従って風の温度は被乾燥体の最高許容加熱温度に保ち，必要な水の蒸発熱にちょうど相当する熱量を誘電加熱で供給するのが合理的であり経済的である。この方式によると低温乾燥でも高温乾燥でも風の温度の調節だけで自由に行なうことが出来る。

5. 減率乾燥期間における誘電加熱による紙の乾燥

恒率乾燥期間で乾燥が進行し，ある含水率に達すると突如として乾燥速度が減少しはじめ減率乾燥期間に入る。これは被乾燥体の表面をおおっていた水層が部分的に消失し（第 1 段），やがて水層が全くなくなる（第 2 段）ことによる。（第 1 図参照）減率乾燥期間の特徴は風の相对湿度，速度および方向などの外部条件に乾燥速度がほとんど影響を受けず，もっぱら被乾燥体内部の水分の拡散速度が支配的なことである。従って乾燥速度を早くするにはその拡散速度を大きくするために被乾燥体の温度を高くすることが唯一の手段となる。

原理的には誘電加熱を用いると水分の拡散速度を大きくするもう 1 つの手段を提供する。誘電加熱によると物体内部で至るところ一様に発熱し外表面から冷却

第1図 乾燥速度曲線の1例

実線：誘電加熱の場合、点線：外部加熱の場合

a) 外部加熱

b) 誘電加熱

第2図 原さ4cmのゴム板を外部加熱および誘電加熱した場合の温度分布の時間的变化

が起こるので物体の中心部が最高温度を示す。外部加熱する場合には物体の中心部が逆に最低温度を示す。それらの1例を第2図に示してある。そこで熱風乾燥の如き外部加熱で乾燥すると被乾燥体の含水率が外表面に近いほど少ないことにより水分の拡散が起こるが、温度勾配から見ると水分の外表面への拡散を妨げるように作用する。誘電加熱の場合は温度勾配も水分の拡散を助ける方向に作用する。

併し紙の場合には厚さが非常に薄いので、その厚さ方向の温度勾配は著しく小さく、誘電加熱により水分を外表面に押出す効果はほとんど期待出来ない。また減率乾燥期間に入ると含水率が小さくなり高周波電界による発熱も少なくなる。従って紙の減率乾燥期間に誘電加熱を採用することは得策でなく、熱風乾燥によることがよいと考えられる。

6. 紙の連続乾燥における誘電加熱装置

帯状に長い紙の連続乾燥において恒率乾燥期間中に水分の蒸発熱を供給する手段として誘電加熱を利用することを前提にして電極装置を考える。

第3図(a) 紙の連続乾燥に用いる電極装置

第3図(b) 格子形電極に紙を波状にのせた状況

帯状に長い紙の如き薄物を連続乾燥するには第3図に示す如き格子形電極を用いるのが普通である。各電極は金属の丸棒で個々に等速で回転させて紙を送る役目を果させる。そして高圧および低圧電極を1つおきに配列する。第3図(a)に示す電極装置においてはガラス隔壁と紙との間の狭い空間に風を送り、下方は排風機で僅かに減圧している。このようにすると第3図(b)に示すように紙が波状になり紙と電極との密着が良く

なり、また紙の片面に何か塗布した場合などに乾燥して紙が反ることによる支障を除くことが出来る。この波状にする工夫は曾て著者が有機フィルムの片面に塗装し塗料の乾燥に応用して好成績を得たことがある。

第4図 格子形電極で帯状紙を乾燥する場合の電極結線とその等価回路

ここで用いた格子形電極についての基本的事項を第4図の等価回路について考察する。まず格子形電極においては電極間隔を合理的に選ばないと紙の加熱が満足に行なわれない。2本の平行棒間の静電容量(第4図(b)の等価回路における C_1 に相当する。)は次式で与えられる。

$$C_1 = \frac{0.121}{\log_{10}(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})} \quad (\text{pF/cm})$$

$$\alpha = \frac{\text{電極棒の中心間距離}}{\text{電極棒の直径}}$$

この式を検討すると紙に高周波電流を極力集中するには α の値を約10に選ぶことが最も良いことが分る。 α が10より大きいと C_1 が小さくなり、格子形電極と大地もしくは外箱壁との間の静電容量と同程度になって、高周波電流を無益に大地や外箱壁に流すことになる。また α が10より小さいと C_1 が急速に

著しく増大し、後述の $\tan \delta$ の式から分るように、無効電流を増大させて不都合になる。従って電極棒の太さを機械的に耐える限度まで細くし、 α が凡そ10になるように電極間隔を選べばよい。

次に格子形電極に湿紙をのせた場合に電極間の $\tan \delta$ (前述の誘電体損失熱 q の式参照) が大きいことが望ましい。第4図(b)の等価回路につき一組の電極間の $\tan \delta$ は次式で与えられる。同図において G は電極間において湿紙が示す高周波導電率、 C_2 は電極と湿紙との間に生ずる静電容量、 ω は高周波電源の周波数 ($\omega = 2\pi f$) を意味している。

$$\tan \delta = \frac{\omega C_2 / 2G}{1 + 2(C_1 / C_2) \{1 + (\omega C_2 / 2G)^2\}}$$

この式で計算した $\tan \delta$ の値が0.01以下ならば紙の加熱は有効に行われず、0.1の値に近ければ極めて容易に加熱し得る。電極の太さおよび間隔を選ぶことで $\tan \delta$ をある程度大きく出来る。紙の乾燥において恒率乾燥期間には $\tan \delta$ が相当に大きくなり、減率乾燥期間に入ると $\tan \delta$ が小さくなって誘電加熱が不適当になる。

7. 結 言

誘電加熱による乾燥方法には他の乾燥方法では実現出来ない独特な特徴がある。併し石炭や石油に比して電力はエネルギー源として比較的成本高であるため、誘電加熱を利用するにはその特徴を十分に活用する工夫が必要である。またその特徴を十分に活かし得る場合に利用すべきであろう。

紙の連続乾燥においては恒率乾燥期間において水分の蒸発熱を供給するのに誘電加熱を用い最大許容加熱温度に温めた風を併用し、減率乾燥期間は熱風のみによる、という組み合わせが有効である。この方法によると簡単な設備で短時間乾燥が可能になる。

(原稿受付 昭45.8.6)

新 刊 紹 介

ポリマー辞典 大成社 出版部

当代の一流の学者、実務家を動員して、誰もが知りたい語、6500を収録したもので、その出現は高分子工業関係の仕事にたずさわる人だけでなく、一般の人にも非常に役立つものである。

用語は高分子物理・化学、プラスチック、ゴム、繊維、接着剤、接着、塗料、塗装、顔料、合成紙、合成木材、製造機械、製造法・製品、試験機器、試験法などの関係の語を含んでいる。

文章だけでわかりにくいものは、なるべく原理図・

構造図(約300点)などを収録した。

構成はポリマー用語(日英対訳解説付) 約6,500

約420頁

英文索引・略号記号約70頁

商 品 名 約4500語 約80頁

デ ー タ 約30頁

体裁 携帯用〈コンサイス判〉 図書館用〈デスク判〉

寸法 15×8×1.2cm 21×12.6×3.5cm

用紙 インデアペーパー 上 質 紙

価格 1,500円 4,200円

P54 へつづく