論 文

621.365.46 : 518.4

赤外線加熱における計算図表

正会員 加 藤 信 義*

竹 屋 芳 夫*

Nomographs for Infrared Heating

By N.Kato & Y. Takeya. (Kyoto University)

It is the most important facts in the infrared heating that we decide the radiant energy in heating and drying.

These radiant energy is determined experimentally, but if we can decide theoretical values of them by using nomographs, it is very convenient for checking the values, experimentally obtained.

In this paper, we describe the nomographs used to determine the power of installation, and the radiant energy for infrared heating and drying.

§ 1 序

赤外線加熱は近時急激なる発達を遂げ、塗装に、樹脂加工、乾燥に急速に応用されつつある。ところで赤外線

加熱を行うにあたって最も重要なことは、塗装についていえば一定時間に一定の温度迄上昇させるに要する放射照度あるいは一定温度を保持するに必要な放射照度であ

第 1 図

* 京都大学

り、又乾燥についていえば所要恒率乾燥速度に必要な放射照度である。これらの放射照度は現在種々実験的に求められているのであるが、これらの値を理論的に求めることが出来れば実験により得られた値を比較検討する上において極めて好都合であり、更にそれを計算図表として与えておけば、極めて便利であると思われる。この点に鑑み我々は以下の如く赤外線加熱における所要電力、放射照度の計算図表を作製したので報告する。

§ 2 加熱装置に必要な電力

Q ; 装置に必要な電力 (kW)

M ; 1 時間に処理する重量 (kg/hr)

C ; 処理物の比熱 (kcal/kg°C)

$\Delta\theta$; 所要温度上昇 (°C)

η_1 ; パンク効率

η_2 ; 物体の吸収率

$\eta = \eta_1 \times \eta_2$ = 装置の効率

第 2 図

とすれば放射流等による熱損失を無視すれば、この加熱に要する電力は次式で与えられる。

$$\eta \cdot Q = \frac{1}{860} MC\Delta\theta \quad (1)$$

今本式の対数をとる更に $\eta = \eta_1 \times \eta_2$ において図表に描けば第1図が得られる。例えば

さて本図の使用法は次の如くである。今 $M = 300 \text{ kg/hr}$, $C = 0.15 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$, としてその二者を結び w_1 直線上に a 点をとる。次に $\Delta\theta = 150^\circ\text{C}$ としてこれと a 点を結び Q 尺上に b 点をとる。しかる時には b 点は $MC\Delta\theta$ に相当する点を表わしている。そこで b 点とパンク効率 η_1 尺上の一点例えば 0.5 とを結び w_2 上に交点 c をとる次に吸収率 η_2 尺上例えば 0.4 と c とを結び Q 尺上に所要装置電力 39kW が得られる。勿論本図表については Hall 氏の名著⁽¹⁾にグラフとして示されているものであるが、ここではそれについて計算図表として示し更に能率を η_1 と η_2 において考えたものである。

§ 3 水分蒸発に必要な電力

M_w ; 1 時間に蒸発する水の量 (kg/hr)

w ; 初めの含水率 (%乾量基準)

w_0 ; 最後の含水率 (%乾量基準)

含水率 w の物体を 1 時間に $M(\text{kg})$ 処理するものと考え絶乾材料の比熱を C (kcal/kg°C) とすると実際赤外線乾燥機に必要な電力はこの材料を所要温度(蒸発温度)迄上昇させるに要する電力 $Q_1(\text{kW})$ とその他に $M_w(\text{kg})$ だけ水分を蒸発させるに要する電力 $Q_2(\text{kW})$ のと 2 つにわけて考えることが出来る。前者 Q_1 の方は材料の比熱として

100 $C + w(w_0 + 100)$ を採用すれば (1) 式の表わす図表により与えることが出来る。次に Q_2 については γ (kcal/kg) を蒸発熱とすれば

$$\eta_1 \eta_2 Q_2 = \frac{\gamma}{860} M_w \quad (2)$$

$$M_w = M \frac{w - w_0}{w + 100}$$

により与えられる。今 $\gamma = 540$ (kcal/kg) として (1) 式と同様 (2) 式の対数をとる計算図表に表わせば第2図が得られる。本図表の使用法は次の如くである。即ち $M_w = 25$ (kg/hr) $\eta_1 = 0.7$ $\eta_2 = 0.6$ とすればまづ η_1 , η_2 を同尺上に求めこれを結び w 尺上に交点 a をとり a と M とを結び Q 尺上に 37 (kW) が得られる。第1図、第2図共に (1) 及

(1) J.D.Hall Industrial Applications of Infrared

び(2)式中の1つが未知の時に以上に説明した方法に準じてその未知量をしることが出来る。従って赤外線乾燥装置に必要な電力は第1図において $C=100C+w/w+100$ として得られる加熱電力と第2図において得られる蒸発電力との和として与えられるわけである。

§4 加熱に必要な放射照度

本節及び次節において使用する文字は次のものを表わすものとする。

t ; 時 間 (hr)

q ; 放射照度 (W/cm^2)

η ; 吸 収 率

σ ; 密 度 (kg/m^3)

c ; 比 熱 ($kcal/kg^\circ C$)

b ; 厚 さ (m)

θ ; 温 度 ($^\circ C$)

θ_0 ; 周囲温度 ($^\circ C$)

h ; 熱伝達係数 ($kcal/m^2 hr^\circ C$)

θ_0' ; 物体の初めの温度 ($^\circ C$)

A ; 表 面 積

A' ; 受熱面積

今加熱材料として無限広がり薄板をとることとし、その温度は一樣であると仮定すれば、片面照射として次式が成立する。

$$-hA(\theta - \theta_0)dt + q'A'dt = A'C\sigma b d\theta \quad (3)$$

ここに q' は薄板内に放射により吸収されるエネルギーである。(3)式をとき放射照度の単位として上記の如く W/cm^2 を採用すれば次式がえられる。

$$\begin{aligned} 8.60 \times 10^3 \frac{q\eta A'}{hA} \left(1 - \varepsilon \frac{hA}{C\sigma b A'}\right) \\ = (\theta - \theta_0) - (\theta_0' - \theta_0) \varepsilon \frac{hA}{C\sigma b A'} \quad (4) \end{aligned}$$

本式を計算図表とすれば第3図が得られる。即ち第3図において垂直尺を左より a, b, c, d 尺とし、斜の尺を e, f 尺とすれば、 a 尺上には所要温度上昇 $\theta - \theta_0$ 及び炉温と物体の初めの温度との差 $\theta_0 - \theta_0'$ を等分目盛にとり e 尺上に $\varepsilon \frac{hA}{C\sigma b A'}$ と $\frac{hA}{C\sigma b A'}$ によって図の如く目盛る。しかる時には b 尺上に a 尺の $\theta_0 - \theta_0'$ と $\frac{hA}{C\sigma b A'}$ とより(4)式の右边第2項の値をしることが出来る。従って b 尺と a 尺上の $\theta - \theta_0$ とによって C 尺上に(4)式の右边を求むることが出来る。次に同じく C 尺上に $(1 - \varepsilon \frac{hA}{C\sigma b A'}) \times 8.60 \times 8.60 \times 10^3 \frac{hA}{C\sigma b A'}$ によつて目盛り d 尺上に $\frac{hA}{A'}$ を等分目盛にとること図の如くする。更に d 尺上に $q' = \eta q$ なる如く、 q' を等分目盛として目盛る。次に所要放射照度は $q = \frac{q'}{\eta}$ で与えられるわけであるからかかる関係にある q を C 尺上に等分目盛として目盛り f 尺上に q を図の如くとることが出来る。

今本図表の取り扱い方を例をあげて説明しよう。

炉温 $\theta_0 = 70^\circ C$ 加熱温度 $\theta = 190^\circ C$

物体の初めの温度 $\theta_0' = 20^\circ C$

$$\frac{hAt}{C\sigma b A'} = 1 \quad \frac{hA}{A'} = 22 (kcal/m^2 hr^\circ C) \quad \eta = 0.6$$

として放射照度 q を求める方法を第3図に示す。即ちまづ a 尺上に $\theta_0 - \theta_0' = 50$

なる点 A と e 尺上の $\frac{hA}{C\sigma b A'} = 1$ の点と

を結び b 尺上に B 点を求める。次に再び a 尺上に $\theta - \theta_0 = 120$ なる点 A' をとり

$A'B$ を結び C 尺との交点 C をとる。別に

C 尺上に $\frac{hA}{C\sigma b A'} = 1$ なる点 C' をとり d

尺上の $\frac{hA}{A'} = 22$ なる点 D とを結び f 尺と

の交点 F をとる。次に FC を結び d 尺上

に D' をとれば加熱に要するエネルギー

が D' 点で与えられる。そこで D' 点と η

$= 0.5$ とを結び C 尺上に C'' 点を求むれば

これがこの場合の所要放射照度 $q = 0.93$ (W/cm^2) を与えるものである。又 q が与えられている時には同様な操作により逆に

第 3 図

温度上昇或いは他の一つの数値を求めることが出来る。

さて本図表について考えるにただ1枚の薄板が照射されている時には上式通りでよいわけであるが例えば赤外線加熱における最大の用途たる塗装の場合の温度上昇に必要な放射照度は如何というにそれは次の如く考えればよい。即ち塗料も基板も同じ様な温度にあるものと考えれば単なる加熱と異なる点は単位表面当りの熱容量が異なるだけであって(5)式においては熱容量は $C\sigma b$ で与えられるのであるが、このかわりに $C\sigma b + C'\sigma'b'$ を用いられればよいわけである。但し $C'\sigma'b'$ は夫々塗料の比熱、比重及び厚さとする。そしてこの場合の吸収率は塗料を塗布した場合のそれをとる。但し実際の塗装においては塗料の熱容量は殆んど考える必要がない程度である。

次に問題となるのは熱伝達率 h である。これは物体の形状、温度、風速等の函数であるのみならず、板と風向きの角にも関係するものであって自然対流の場合には主として温度に、風速の大なる時には主として風速の函数として表わされる。参考のために第4図に垂直壁に対する h の値を与える。

又表面積 A と受熱面積 A' との関係は熱伝達率 h が両面

第 4 図

同一ならば片面照射で $A = 2A'$ とおき、両面照射では両面の照度の和が片面照射の場合と同一になる様にすれ

ばよいから片面照射として求めて適当に両面に照度をわければよい。又両面の熱伝達率が異なり夫々 $h'h''$ で与えられる時には片面照射において hA/A' のかわりに $h' + h''$ を採用すればよい。

更に物体の初めの温度が炉温と同一である場合には勿論同一の操作により放射照度を求めうるが C 尺上の q の尺度の単位は温度上昇の尺度の単位の 100 倍になっている故所要温度上昇を直接 C 尺上にとることにより操作を簡単にすることが出来る。

§ 5 乾燥速度と放射照度

u = 恒率乾燥速度 (kg/m²·hr)

θ = 物体の表面温度 (°C)

θ_0 = 周囲の大气即ち炉温 (°C)

A' = 受熱面積

A = 乾燥面積又は表面積

γ = 水の蒸発熱 (kcal/kg) = 540kcal/kg

その他の係数はすべて § 4 と同一とする。

又材料として無限枚がりの薄板をとるものとし片面照射とする。今恒率乾燥速度を u (kg/m²·hr) とすればこの期間中は水分蒸発も温度も一定と見做しうるから次式が成立する。

$$8.60 \times 10^3 \eta q A' = 8.60 \times 10^3 q' A' \\ = \gamma u A + h A (\theta - \theta_0) \quad (6)$$

(6) 式を書きかえと

$$8.60 \times 10^3 q' A' - h A (\theta - \theta_0) = \gamma u A \quad (6')$$

所で恒率乾燥期間における表面温度と乾燥速度とに関しては次式の成立が認められている。

$$u = 0.029 v_0^{0.8} p_0^{0.8} (p_m - \frac{\gamma}{100} p_0) \quad (7)$$

ここに V_0 : 風速 (m/sec)

ρ : 空気の質量 (kg/m³)

p_m : θ °C における飽和水蒸気圧 (mmHg)

p_0 : θ_0 °C における飽和水蒸気圧 (mmHg)

γ : 関係湿度 (%)

この(6')及び(7)式より所要恒率乾燥速度に対する放射照度の図表を描けば第5図が得られる。本図を第6図によって説明すると次の如くである。

まづこの場合乾燥速度が与えられ放射照度を求める様に考える。しかる時には(7)式によって q_m 即ち物体の表面温度をしり(6')式の左辺第2項に相当する値をすることが必要で、まづ(7)式を図表に表わして $u, v_0, \rho, p_m, \gamma, p_0$ の関係をしらねばならぬ。この関係を表わす図表が第6図のa, b, c, d, e, f, g, i の8個の函数尺である。まづ a 尺上に乾燥速度を等分目盛に b 尺上に風速, d 尺上に空気の密度を炉温によって, e 尺上に関係湿度 γ を等分目盛に, g 尺上に飽和水蒸気圧を炉温により,

第 5 図

第 6 図

又 i 尺上には物体の飽和水蒸気圧を物体の表面温度で目盛る。次に a 尺より右へは(6')及び(6)式に対する函数尺を目盛る。即ち再び a 尺上に物体表面と大気との温度差を等分目盛にとり、 h 尺上に熱伝導率を又 k 尺上には吸収率を、図の如く目盛り l 尺上には所要放射照度を qA'/A の形式で等分目盛とする。

さて本図表において所要放射照度 qA'/A をうる方法を第6図により説明する。まず恒乾燥速度 u と風速、炉温等が与えられている場合につき考える。

温度を与える。

- ① a 尺上に乾燥速度 A 点を取り風速 B 点とを結び C 尺との交点 C をとる。
- ② C 点と d 尺上の密度の点(炉温による) D 点とを結び e 尺上に E 点をとる。
- ③ 次に e 尺上に関係湿度 E' 点を取り E' 点と g 尺上の飽和水蒸気圧(炉温による) G 点とを結び f 尺上に一点 F をとる。
- ④ E, F 点を結びそれと i 尺との交点 I 点はこの場合の物体の表面温度を与える。
- ⑤ かくて物体の表面温度がえられるからこれと炉温との差を計算し、これを a 尺上の A' 点にとる。 A' 点と h 尺上の熱伝導率 H とを結び、 l 尺との交点をとる。
- ⑥ L' 点と乾燥速度 A 点と結び j 尺との交点 J を求める。
- ⑦ J 点と k 尺上の吸収率 K とを結び l 尺との交点 L を求めれば所要の放射照度 qA'/A を知ることが出来る。

又逆にある放射照度及びその他の灼の条件が与えられた時恒率乾燥速度 u を求めるには次の如くする。この場合は表面温度が未知であるからまず表面の温度差による損失はないもの即ち $h=0$ として作図を進める。即ち第6図において

I L,K. を結び j 尺上に J. をとる。

II J と h 尺の原点を結び a 尺上に A_1 をとる。

この A_1 点が温度差による損失がない場合の乾燥速度を与える。

III 以下前と同様に直線 IIIIV により結局 i 尺上に物体の表面温度の第1近似として θ を求めうる。

IV 次にこの θ を基準として $\theta-\theta_0$ を温度差として同一操作を繰返す。

この操作を2~3回繰返せば放射照度を与えた時の恒率乾燥速度をすることが出来る。

又与えられる物体に温度制限がありそれ以上に温度を上昇させることが出来ず、且つ乾燥速度を相当大にとりたい様な場合には許容温度上昇と所要乾燥速度とに対して風速が未知になってくる。したがってこの場合には次の様になる。

① E',G,F. を結ぶ。

② FI を結び e 尺との交点Eをとる (Iは所要の物体温度をとる)

③ E,D,C. を結ぶ。

④ C と A を結び b 尺との交点として風速 v_0 を求める。

⑤ 次にこの v_0 に対する熱伝達率を求める。

(第4図(垂直壁)参照)

⑥ 以下前と同様にして所要放射照度を求めることが出来る。

但し本図表においては如何なる放射照度においても恒率乾燥速度はあるものとし、且つその場合には物体表面は完全に湿潤状態であると仮定した。所で実際の赤外線

乾燥においては放射照度がある程度以上大になると水分の拡散による表面への水分の供給が蒸発水分より小になって恒率乾燥を示さない様になる。ということは表面に乾燥せる所が現われてきたと見てよいわけで、その温度は昇り熱損失が増加しているということを示すものに他ならない。即ち本図表によって得られた恒率乾燥速度は最大の乾燥効率の場合であって放射照度が大になるに従ってこれの示す乾燥速度より低下してくる筈である。いいかえれば実際の場合に必要な放射照度は本図表に示す値より大なるものを必要とすることになる。即ち蒸発以外のものにより失われるエネルギーが増加し効率が悪くなることになり結局水分の表面への拡散を考慮せずにただ無暗に放射照度を大にすることは熱経済の点からいってあまり得策でないということになるわけである。

§6 結 び

以上記してきた所要を要約すれば次の如くである。

1. 赤外線加熱及び乾燥における設備電力の計算図表を求めた。
2. 赤外線加熱及び乾燥において所要温度上昇及び恒率乾燥速度に対し必要な放射照度の計算図表を求めた。

以上の図表はすべて理論的に若干の仮定を設けて描いたものであって殊に後者にあっては外見上は再放射による放射には考慮が払われてはならないわけであるがもし再放射が影響する場合にはそれだけ本図表で求められる放射照度に加えておけばよいわけである。又実際の場合には§5で記した如く若干の相違をきたす場合もある。これらの実験結果については今後の研究に待ちたいと考える。

最後に本研究は文部省科学研究費の援助をうけて行ったものであり、一部の計算を担当された西 半之丞君に深甚の謝意を表わす次第である。

(27-6-27 受付)

文 献 紹 介

1. 光源器具および材料

621.327.032.43

1-7 瞬時起動スリムラインランプ

R. N. Thayer and A.C.Borr:

Instant-Start Slimline Lamps

G. E. Rev. 55-2 (1952) 34-39

スリムライン蛍光ランプは、瞬時点燈、口金が一本ビ

ンで強い。長さが長い、広範囲の電流で点燈出来る。点燈のための部品が少ない等の特別な利点をもっている。電極構造—電極はランプの寿命と黒化を決定する重要な要素で、瞬時点燈型に対しては予熱型よりも一層の吟味が必要である。種々研究の結果、現在では二重コイルフィラメントの上に更に細い (0.7mil) タングステン線をゆるく巻いた電極が用いられている。これを使用する第1