特集

脱・VOCに対応した塗装機器・設備の動向を探る

環境対応の塗膜硬化システムの 導入メリット

斎藤 正明*

環境に優しい塗料はエネルギーを必要とし, 生産量のキープ,増産には赤外線加熱ゾーンの 設置が不可欠となっている。

既存設備の多くの熱風炉の燃焼,対流熱伝達 による加熱,乾燥方式は,環境対応型塗料乾燥 の生産性を追従するには限界に達している。

現在,中波長赤外線ヒーターを採用した新規 設備,改造工事が増えている。コンパクトで高 効率,水性,粉体塗料,少量多品種の製品に対 応するフレキシブルな炉が要求されている結果 だと考えられる。

中波長レベル以上の質の高いエネルギーの赤 外線乾燥・硬化は予想以上に速く,生産性,塗 装品質の向上を可能にするため,積極的な設備 の更新をすべきであることは間違いない。

1. 熱風炉,赤外線炉の長所と短所

既存設備で多く採用されている熱風炉は赤外線炉と比べて長所はあるが、環境対応塗料の乾燥炉としては限界がある。赤外線加熱ゾーンと併用することにより、生産効率の高い乾燥炉の設置が可能である。

熱風炉の長所と限界 均等加熱ができる

炉内の雰囲気温度で加熱するシステムで、箱物など三次元形状も均等に加熱しやすい。炉内熱風温度以上にワークの温度が

*さいとう まさあき ヘレウス㈱ ヘレウスノーブルラ イト部 上がることはなく,オーバーベークになることも少ない。制御点数は熱風温度とコンベヤースピードだけで,作業員は操作が簡単にできる。

性能アップの限界

加熱の方式にかかわらず、速く加熱するということは、単位面積当たりの熱流束q (W/cm^2)を大きくすることである。

熱風炉は対流熱伝達であり、その基本式 は

q = hx(t1-t2)

t1: 熱風の雰囲気温度

t2:ワークの温度

h:強制対流熱伝達(W/m²) である。

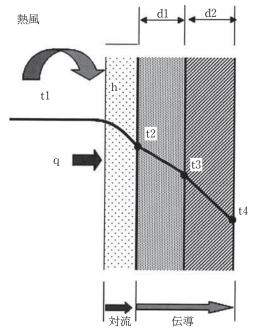
熱風の温度 t1を上げることで、熱流束 qが大きくなる。しかし、50°C、100°Cと 高くすると塗膜表面が高温に接し、かつ母 材との温度差が大きくなるため、スキニング、ワキなどの欠陥が発生しやすい。また、炉外への損失も比例的に増加する。

強制対流熱伝達率(h)は、ワーク表面近傍の熱風の流束に比例して大きくなるが、 塗膜表面の品質、粉体塗装の付着率に影響するため、熱風の流束には限界がある(第 1図参照)。

赤外線加熱の長所と短所 赤外線加熱の長所

① 短時間昇温,設備のコンパクト化 赤外線加熱(放射熱伝達)は媒体を介する

塗装技術



第1図 熱風の流速の限界

② 塗膜品質の向上

塗膜乾燥の場合,塗膜を透過した一部の 赤外線は母材に吸収され,母材温度が上が ることにより,母材表面から塗膜側への熱 伝導と長波長の赤外線を二次的に放射し, 「通過加熱」のメカニズムが熱風加熱と相 違する(第2図参照)。

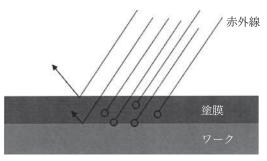
塗膜表面と母材の温度差が小さくなることで、高い投入エネルギー密度(熱流束)でもスキニング、ワキなどの欠陥が少なく、 塗膜品質が向上する。また、短時間乾燥なので、塗膜表面へのゴミの付着が少なくなる。

③ 省エネルギー, すなわち制御性が良好 サイリスタ, SCR などの制御で負荷の コントロールが容易で, 応答が速い。

ワークの重量,形状に応じた制御,また ゾーン制御により昇温プロファイルの制御 ができる。

④ 起動,停止が簡単

立ち上がり時間が速く(中波長;60~120 秒,カーボン中波長:約3秒),必要な時



第2図 通過加熱のメカニズム

だけ通電できる。既設熱風炉にブースター として設置することが容易である。

生産量,製造製品,塗料(水性化,粉体化)の変更,また,冬場の気温低下で既設炉の能力が不足する例は多い。そのような場合,熱風炉の入り口部,またセッティングゾーンに,赤外線ヒーターバンクを容易に追加できる。

⑤ 赤外線はエネルギー単価が高い? 電気がほかの燃焼エネルギー単価より高 いのは事実である。

しかし、熱風炉の総合加熱効率(ワークの昇温に必要な正味熱量/正味投入エネルギー)、および生産効率(たとえば、単位時間に炉を通過したワーク量)などを比較した場合、赤外線加熱の割合が高い場合が多い。

赤外線加熱の短所

① 複雑なワーク形状の均等加熱が難しい 赤外線加熱は陰になった部分を直接加熱 できないこと、また距離の影響も受ける。 後述するが、このような場合、赤外線は 昇温ゾーン、熱風は保持ゾーンと併用のエ ンジニアリングが望ましい。

2. 赤外線ヒーターの選定

赤外線炉の設計で一番重要なのは赤外線ヒーターの選定である。赤外線ヒーターであれば同じ効果,性能が得られるわけではない。

選定の条件は、「有効エネルギーの大きさ」と、「塗料の吸収特性に対して吸収と透過のバランスがとれた波長特性」の最大公約数となる赤外線ヒーターである。

「有効エネルギーの大きさ」とは

イコール,放射体温度の高さである。加

第1表 代表的な工業用ヒーターの特性

ヒーターの種類	放射体温度(°C)	最大エネルギー波長(µm)
近赤外線	2000~2200	約1.2
中波長カーボン	1000~1200	約2.0
中波長	800~900	約2.6
遠赤外線	400~500	約3.0

 中波長カーボンヒーターは特性が中波長に近く、 ON-OFF が2~3秒と短いタクトなどで、ON-OFF が必要な場合有効である。

熱の場合は、加熱の方法(対流、伝導、放射)にかかわらず、加熱源(高温側)と被加熱物(低温側)の温度差がエネルギーの質である。

赤外線加熱の場合も例外ではなく,赤外線ヒーターが放射源から温度の低いワーク へ熱を移動させることにより,ワークの温度を上昇させる。

媒体を通して熱が移動する伝導、対流と は異なり電磁波の形で熱が伝わるが、熱が 温度のエネルギー差で移動することに変わ りはない。

有効なエネルギーとは利用できるエネルギーであり、エネルギーの質の善し悪しは量(熱量)だけではなく、(熱量)×(温度差)である。

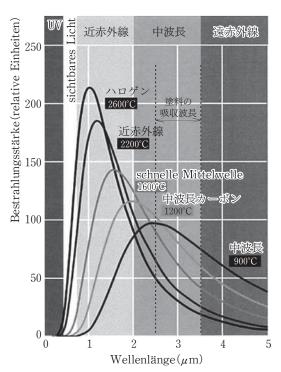
同じ1000 W の赤外線ヒーターでも,放射源温度の高いヒーターと低いヒーター温度とでは同価値にならない。温度の高いヒーターがエネルギーの質が高いことになる。

実際に工業用で使用されている代表的な 近赤外線,中波長カーボン,中赤外線,遠 赤外線ヒーターの特性は,第1表に示す。

「塗料の吸収特性に対して吸収と透過の バランスがとれた波長特性」とは

前記の説明だけでは,放射体温度が高い 近赤外線ヒーターの選択となる。しかし実際,近赤外線ヒーターを塗装乾燥用途に使 用した場合は満足した結果が得られないこ とが多い。塗料の吸収特性にマッチしてい ないからである。

水性,粉体塗料,熱硬化塗料は,例外なく中波長域2.5~3.5 μm に高い吸収特性を持っている。第3図と第1表に各赤外線



第3図 塗料の赤外線吸収範囲

ヒーターの単位出力当たりの放射波長分布を示したが、塗料の赤外線吸収範囲で放射エネルギーが大きい中波長赤外線、中波長カーボンが有効かつ、ワークを加熱する能力もあることがわかる。

一方,遠赤外線ヒーターはワーク加熱能力が低い。

3. 昇温ゾーンは赤外線加熱 キープ は熱風炉

塗膜だけを乾燥,硬化するのが理想であるが,現実はワーク母材の昇温に多くの熱量が必要である。熱風炉の場合,投入エネルギー密度(熱流束)に限界があり,長い昇温ゾーンが必要である。

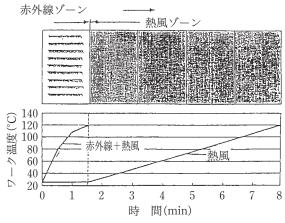
第4図に示す通り、赤外線は大きなエネルギーを投入でき、かつ「通過加熱のメカニズム」で短いゾーンで欠陥なく昇温できる。

赤外線 - 熱風併用炉のメリット赤外線加熱で昇温ゾーンを短く

水性,粉体塗料に必要な熱量,およびワーク母材を短いゾーンで,短時間に昇温。

熱風ゾーンでキープ,ワーク温度を均等 に

熱風ゾーンの役割は,ワーク全体を均等



第4図 赤外線加熱の昇温効果

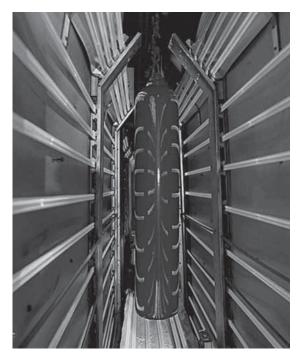


写真 1 長物ラインの導入例

温度にキープすることである。よって熱風 温度を必要以上に高くする必要がない。

写真 1~5 は中波長赤外線ヒーターを 導入した塗装ラインの事例である。

4. なぜ赤外線加熱のエネルギー密度 熱流束)は高い?

対流熱伝達と放射熱伝達は基本式が違い,両者の式から一目に比較するのが難しい。ここで,比較のために対流熱伝達の対流熱伝達率hcに相当する放射熱伝達のhradを導くと対流熱伝達,



写真 2 自動車塗装ラインへの導入例



写真 3 スラットコンベヤーラインへの設置例

 $\operatorname{qcon}(kW/m^2) = \operatorname{hc}(t1-t2)$

hc:対流熱伝達率

t1:熱風温度

t2:ワーク温度

放射熱伝達,

 $\operatorname{qrad} = \varepsilon \sigma (\operatorname{T}1^4 - \operatorname{T}2^4)$

ε:放射率

 σ :ステファン,ボルツマン定数

T1:放射体温度

T2:ワーク温度

上の式を分解すると

 $\operatorname{qrad} = \varepsilon \sigma (\operatorname{T}1^4 - \operatorname{T}2^4)$

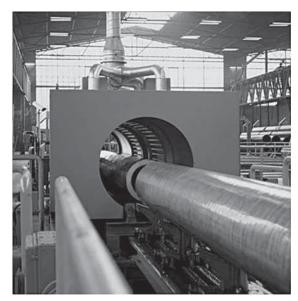


写真 4 鋼板ラインへの導入例

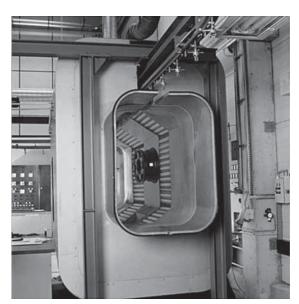


写真 5 ホイールラインへの導入例

 $= \varepsilon \sigma (T1^2 - T1^2) (T1^2 + T2^2)$

 $= \varepsilon \sigma (T1 - T2) (T1 + T2) (T1^2 + T2^2)$

ここで

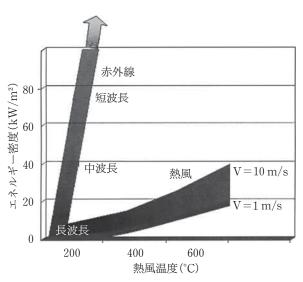
qrad = hrad(T1 - T2)

hrad:放射の熱伝達率

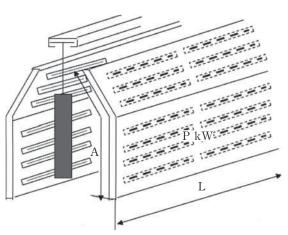
hrad = $\varepsilon \sigma (T1 + T2) (T1^2 + T2^2)$

となる。

放射熱伝達の、対流熱伝達率 hc に相当する hrad は放射体温度 T1 が大きなファクターで、第5 図に示すような大きなエネルギー密度(熱流束)となる。



第5図 熱風温度とエネルギー密度 (熱流束)の相 関性



第6図 試験用赤外線炉の構造 注 E(kW/m²)=P/(A×L)-(1 side)

5. 赤外線ゾーンの設計指針

赤外線ゾーン設計の試験方法

照射面積の小さな赤外線ヒーターユニット,または試験用赤外線炉で試験片,実ワークに各種塗料を塗布し,乾燥,硬化させ,炉設計の基礎データを得る場合の基本的な評価方法を説明する(第6図参照)。

照射エネルギー密度の設定 (熱風炉の熱 流束に相当)

赤外線ヒーターの発熱放射面積を基準として,データを評価することは困難である。

ある面積に取り付けられた赤外線ヒーターの全出力(kW)を,その面積 (m^2) で割っ

た,照射エネルギー密度(kW/m²)でデータを整理することが有効である。

中波長赤外線ヒーターの塗料による照射エネルギー密度の目安は次のようになる。

水性塗料: \sim 最大 15 kW/m^2 。 溶剤系塗料: \sim 最大 25 kW/m^2 。

粉体塗料:~最大35 kW/m²。

赤外線照射面 (赤外線ヒーター)とワークの距離

実炉では、赤外線照射面とワークの距離を 300 mm 前後に設計するのが一般的である。

ワークの表面が受けるエネルギー密度は 距離に反比例して小さくなる。これは赤外 線照射面で照射角度の広がりがあるからで ある。

小さい照射面積の赤外線ユニット(500 mm×500 mm以下)で試験する場合は,ワークまでの距離100~150 mmの結果が,大体,実炉の300 mmと等価となる。

セッティング時間の計測

塗料を塗ってから赤外線を照射するまで の時間をセッティング時間として計測して おく必要がある。熱風に比べるとかなり短 い時間となるからである。

加熱時間の計測

前述のエネルギー密度,距離の条件を変え,塗膜が速く,欠陥なく硬化する時間を 計測する。実際のコンベヤースピード,炉 長を決定するデータを得ることができる。

実際の炉では雰囲気温度も高く,壁面からの2次放射により,試験より効率が高くなるのが普通である。

赤外線加熱に影響するワーク側のファク ター

ワークの厚さと熱伝導率

ワークが金属で薄い(数 mm 程度)場合は,塗膜と母材金属がほぼ同時に上昇する。複雑な形状でなければ,陰の部分も熱伝導により昇温できる。

ワークが厚く,形状が単純な場合は,赤 外線加熱のほうが熱風加熱よりエネルギー を節約できる。これは,表面近傍温度が, 熱伝導により温度が上昇する前に,乾燥, 硬化温度まで上昇するからである。

ワークの形状

ワークの形状は乾燥, 硬化時間の設定に 影響する。

平板の場合は熱分布,塗膜の厚さが均等で,高いエネルギー密度の赤外線照射ができ,非常に速い炉の設計が可能である。

三次元形状の箱物などは、平板の約50%程度のエネルギー密度に設定する必要がある。つまり、赤外線ヒーターと最短距離にある部分のオーバーベーク、角部の厚塗り部のフキを防ぐためである。この場合、昇温ゾーンに赤外線、キープゾーンに熱風を使用するシステムが有効である。

塗膜の厚さと色

塗膜が厚い場合,赤外線照射エネルギー密度を $10\sim15~\mathrm{kW/m^2}$ と小さめに設計し, ワキなどの防止を考慮する。

また、塗料の色は赤外線の吸収に影響する。たとえば、黒を100%とすると近赤外線の場合は、ほかの色も黒から白までほぼ比例的に吸収率が低下するが、中波長、遠赤外線では、例外的なメタリックシルバーの低下を除き、ほかの色の吸収率低下は約20%以下と考えられる。

炉の構造によっては対流の影響があり、 時間の差は理論値ほどは大きくないが、塗 料の色によって加熱時間が変わることを考 慮する必要がある。

6. 塗料による照射エネルギー密度の 目安

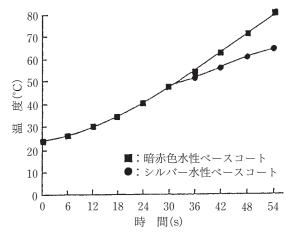
水性塗料

水性塗料は低温で乾燥する。赤外線加熱で注意する点は、水の局部沸騰によるワキなどの塗膜欠陥を避けるため、エネルギー密度を $10\sim15~\rm kW/m^2$ と低くし、ワークの温度も $60\sim80^\circ\rm C$ 以内に抑え、低温で乾燥させることである。ワークからの距離も $300~\rm mm$ 以上に離したほうが良い結果が得られる。

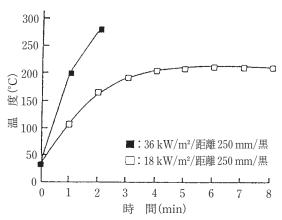
また, 炉内の湿度が上がらないように蒸 発水分をブローオフ, 換気する必要があ る。

乾燥時間は1~2分である。

《水性塗装された鋼板の昇温試験(第7図



第7図 水性ベースコートの昇温カーブ



第8図 粉体塗料のエネルギー密度と昇温カーブ

参照)》

ワーク:鋼板 250×250×1.2 mm

塗料:自動車用水性ベースコート,シ

および暗赤色メタリック

赤外線ヒーター:ヘレウス,中波長赤外 線ヒーター

ワークからの距離:450 mm

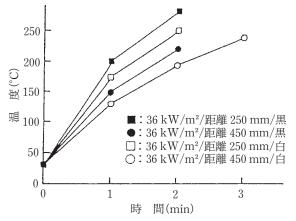
エネルギー密度:12 kW/m²

粉体塗料

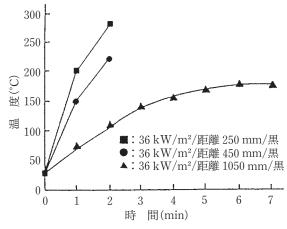
粉体塗料は焼き付け温度が 180~200℃ と高いため、エネルギー密度が高くとれる 赤外線加熱が適している。

硬化時間を短縮させるだけではなく,速く溶融,硬化させることにより,滑らかで艶(つや)のある仕上がりが得られる。

ほかの塗料との違いは,昇温スピードが 遅いと溶融と硬化が同時に部分的に起こ



第9図 粉体塗料の色と昇温カーブ



第 10図 粉体塗料の距離と昇温カーブ

り,目的の塗膜品質を得ることができない 点である。

炉の排気損失が少なく熱風の流れが少ないため,粉体が飛び散り,ワークから離脱することもない。

一般的に赤外線加熱での硬化時間はエポキシ,エポキシポリエステル系で2~10分である。昇温ゾーンと保持ゾーンの二つのゾーンで構成され,ワークは保持ゾーンで2~5分保持することで硬度が増し,付着力を強めることができる。

《粉体塗装された鋼板の昇温試験(第8~第10図参照)》

ワーク:鋼板 250×250×t1.5 mm 片面 塗 料:ポリエステル Interpon RAL 600, 黒および白, キュア温度 160~180°C

赤外線ヒーター:ヘレウス,中波長赤外

線ヒーター

加熱方法:片側加熱

mm, 1040 mm

エネルギー密度:18 kW/m², 36 kW/

日本市場に塗装乾燥用の中波長赤外線ヒータ ーを紹介してから 20 年になる。

ユーザー,設備メーカーの協力で,自動車の 塗装をはじめ, 多くの塗装乾燥炉に納入してき ワ-2 からの距離:250 mm, 450 た。特に,ここ数年は,環境対応塗料への切り 替えの増加で赤外線炉の採用が増えている。

> しかし, 最新鋭の工場設備も加熱, 乾燥工程 がブレーキになっている例がまだ多くある。中 波長レベルの赤外線ヒーターの採用, または熱 風炉との併用で予想以上の生産効率が改善でき る余地がまだあると思われる。

●図書案内● -

付着障害の原因究明を試みた野心作

塗膜の付着 そのメカニズムの理論と解説 佐藤弘三著 定価3150円(税込)

- ◆主要目次◆ -

1. 緒 論

2. 付着の理論

序論・分子間力と付着・ぬれと付着・固体の臨界表面張力・付着の最適条件・ 界面化学の理論の適合性・SP理論と付着・付着速度理論・付着破壊のレオロ ジー・付着破壊の様式・まとめ

3. 塗膜の内部応力

序論・内部応力の発生・塗膜の内部応力に影響する因子・内部応力の経時変化 ・内部応力と付着・内部応力と割れ

4. 塗膜の付着試験法

序論・ゴバン目試験・アドヘロメーター・ヘジオメーター・はく離試験・引っ 張りまたはせん断付着試験・超遠心付着試験・その他の付着試験

5. 塗料組成と付着

序論・ポリマーの化学構造・ポリマーの分子量と分子量分布・塗料の組成・顔 料効果

6. 付着と表面処理

序論・金属の種類と付着・金属の表面状態と付着・付着と金属表面処理・金属 表面のあらさ・プラスチック表面の特徴・プラスチックの表面処理

7. 付着の劣化

序論・被塗物表面の汚れ・温度の影響・水分の影響・暴露の影響・塗り重ねに よる付着の低下・層間はく離・塗膜のはく離

株式会社 理工出版社

お申し込みは巻末の振替用紙又はE-mailにてお願いいたします。

2007年8月号 69