

ヒートシールに関する文献調査

Literature review on heat sealing

○川崎 裕太(東京電機大学) ◎五味 健二(東京電機大学)

Yuta KAWASAKI, Tokyo Denki University, 5 Senjyu Asahimachi, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

Kenji GOMI, Tokyo Denki University, 5 Senjyu Asahimachi, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

1. はじめに

ヒートシールとは、ポリエチレンやポリプロピレンなどの熱可塑性樹脂製フィルムを接着剤などを使わず、熱により融着することである。ヒートシールには加熱温度・圧力・加熱時間が関わっており、これにより、ヒートシールの強度や品質が違ってくる。本稿では、ヒートシール技術を実用化するために大切な事項についての文献調査結果を報告する。具体的には 2 章で接着力の評価、3 章で品質検査、4 章では接着メカニズムについて紹介する。

2. 接着力の評価

ヒートシール部の接着力は、加熱温度・圧力・加熱時間により変わる。あらゆる条件下における接着力の評価をすることにより、包装袋などの製品に活用する際、より効率的に、必要な接着を得ることができる。非破壊で接着力を評価する方法が、以下のように考案されている。

ヒートシール温度とヒートシール部の接着性の関係を調べるため、山口⁽¹⁾らは、ヒートシール直後の温度分布に注目した。実験で使用した試料は、ナイロン、ポリエチレンの他に、密度が低いポリエチレンである、リニア低密度ポリエチレンの 3 種類の素材を使用して 30℃の水を包装封止した。ヒートシールが不完全な温度(以下、不完全シール温度)、ヒートシールが良好な温度(以下、最適シール温度)、また、ヒートシール部に発泡が生じる温度(以下、発泡シール温度)で、試料をヒートシールし、液体包装袋を作成した。また、フィルムの送り速度は 10, 15, 20 m/min とした。赤外線サーモグラフィを用い、ヒートシール直後の温度分布を確認し、その後マイクロスコプで、最もヒートシールされにくい、水が入った部分とヒートシール部の境界線よりヒートシール側に 1mm 入った位置の断面を観察した。その結果、最適シール温度の時、温度分布はほぼ一様であり、完全に接着されていた。逆に不完全シール温度や、発泡シール温度の時、温度分布に不均一性が確認され、温度が低く接着されていない部分が存在した。また、送り速度が異なっても、ヒートシール温度条件が同じであれば、温度分布の傾向がほぼ同じであった。よって温度分布でヒートシールの接着性の評価ができることが明らかになった。

プラスチック材料の適正なヒートシール性能を発揮させる方法を論ずるため、菱沼ら⁽²⁾は、熱溶着部位の熱ダメージの少ない Peel seal 領域の剥がれ現象における剥離エネルギーに着目した。ヒートシールは加熱温度によって溶着状態が変わり、大きく 2 通りがある。一つは、ヒートシーラント(熱溶着層)の溶着面の界面のみで接着する Peel seal と、ヒートシーラントが高温加熱により完全に溶着接着して溶着面のふち

が破断する Tear seal である。

従来の引張試験法では計測値の最大値を以って溶着強さの評価をしているため、Peel seal よりも Tear seal の方が良好とされているが、Tear seal 加熱領域では、製造工程中や物流中で発生する衝撃や荷重により、包装袋のヒートシール線に破れやピンホールが発生してしまい、不具合の原因になってしまっている。これは、Tear seal 領域では、ヒートシーラントが一体化し、接着界面が存在しなくなることで、接着面の各分子に不均一に応力がかかることにより、部分破断を起こすためである。一方の Peel seal 領域ではヒートシーラントが軟化・半溶解した状態で加圧される。するとヒートシーラントは双方に数 μm 程度の食い込みを起こし、この食い込み部分に摩擦接着が起こる。Peel seal 領域では接着界面が存在し、それにより、外力に発生する破断エネルギーを、剥離エネルギーに変換できることにより、破れの発生を抑制できると考えられる。これにより Tear seal 領域よりも荷重に耐えるのではないかという仮説(剥離エネルギー論)を確認している。

アルミラミネーションの包装材料を使用し、Peel seal 帯から Tear seal 帯の熱溶着サンプルを 2~10℃の熱溶着温度間隔で試験片を作成した。試験片を引張試験により荷重試験を行うと、Tear seal 帯で作成した試験片は破れの発生と共にヒートシール強さが下降し、Peel seal 帯で作成した試験片では剥がれ範囲で加熱温度に応じたほぼ一定の強さを維持し、Tear seal 帯の時よりも、Peel seal 帯がより荷重に耐えた。この結果から熱溶着における剥離エネルギー論の有効性が確認でき、Peel seal 領域の剥がれ現象における、剥離エネルギーを使用する、Peel seal 溶着の有用性を明らかにした。

ヒートシールの接着力を非破壊で評価するため、井上ら⁽³⁾は、瞬時振動数に着目した。アルミニウムの基材層にポリエチレンテレフタレート(PE)の表層とポリエチレンの接着面の 3 層構造のフィルムと、紙の基材層にポリエチレンの接着面がコーティングされた 2 層構造のフィルムを加熱、加圧して接着した。ヒートシールは接着時の加熱温度が高く、加熱時間が長く、また、圧力が大きいほど接着力が大きくなると著者は主張している。そのため、加熱温度は 130℃, 150℃, 170℃を用い、それぞれ加熱時間 1.0s, 1.5s, 2.0s, でサンプルを製作し、超音波パルス透過させ、透過した超音波の周波数分析を行ったのち 180° 剥離試験により接着力を評価した。

ヒートシールを透過した超音波パルスは、接着境界面を通過・反射する際の振幅が接着力によって変化すると考えられているため、超音波パルスが重なり互いに干渉した際の波形や瞬時振動数の変化により、接着

力が評価できると考えられる。しかし、干渉した波形からわかる振幅では、干渉波の波形の変化が明確でなく、接着力との関係を見出すのが難しい。そこで、瞬時振動数に注目すると、入射波の時間遅れの違いによって、瞬時振動数の極値の深さが大きく変化しており、瞬間振動数の時間遅れおよび極値深さによって接着力の評価ができるようになった。試験の結果より、接着力が大きくなるにつれ極値が遅れていることから、瞬時振動数の極値が現れる時間が有意に変化し、接着力の評価ができることが可能であることが明らかになった。

3. 品質検査

異物混入などが起こると、企業の信頼を損なう。そこで、ヒートシールの品質検査を評価する方法が考案されている。

ヒートシールの密閉性が損なわれる原因となる、ピンホールや瑕疵を検出するため、森ら⁽⁴⁾は、空中超音波に着目した。現在ピンホールや瑕疵などを検出するために使われている技術は、簡便性や精度、衛生面が損なわれる方法である。そこで容易に扱え、精度が高く、特殊な条件下に置かなくても適用できる空中超音波を用いた瑕疵検出法を提案する。実験のため、人工的にピンホールをフィルム状のヒートシールに作成し、コインシデンス効果と呼ばれる、空中超音波が特定の角度で板状の物体に入射する場合にその物体の曲げ振動が著しく増幅する現象を、検査物に十分な振動を与える手段として利用し、増大した曲げ振動の位相が、ピンホールの有無で変わるかを調べている。

その結果 50 μm 径の大きなピンホールが空中超音波の間であれば、受信波の位相に明確な遅れが生じた。しかし、30 μm 径のピンホールでは、現時点では精度が足りないことがわかった。そのためコインシデンス効果に影響がある温度や平面度等を考慮した測定系をシミュレーション構築している。また、瑕疵部でヒートシールの剛性が低下すると仮定し、試験片をモデル化、シミュレーションすると、剛性低下率が小さいほど位相の遅れが大きくなった。これは実験の結果と一致し、空中超音波により、ピンホールや瑕疵の検出ができることを裏付けた。また、高い周波数の超音波を投射するとより位相遅れが拡大するということがシミュレーション結果から読み取れる。このことから実験では検出が難しかった 30 μm 程度の小型ピンホールでも検出可能になると期待できる。

高速、高精度、低コストを満した品質検査を実現するため、Shuangyan ら⁽⁵⁾はマシンビジョンによる品質検査に注目した。現在ヒートシールラント部の品質検査は、サンプルをあらかじめ検査したり、包装を手作業で検査している。これでは時間がかかり、生産コストが下がる。そこでヒートシールラント部のシール線の状態を数値により評価している。適切なヒートシールラント部には平行なシール線が連続しており、逆に不適切なヒートシールラント部には線が途切れていたり、平行でないという特徴がある。この線の状態を判定する相関数を作成し、画像処理に組み込み、一定の値以下は不良品として排除するシステムを構築している。20回検査を回し、精度を確認すると、93.6%と高い成功率となった。このことより、コンピュータを使用したマシンビジョンによる品質検査が実現可能であることが

示された。

4. 接着メカニズム

ヒートシールは工業的なノウハウにより発展した技術のため、微視的な接着メカニズムの詳細が理解されていない。そこで接着メカニズムを確認する方法が以下のように考案されている。

ヒートシール時の微視的なスケールでの結合メカニズムの詳細を知るため、檜山⁽⁶⁾らは、分子鎖相互作用および分子量、分子鎖長に着目し、分子動力学シミュレーションを用いた分子鎖の緩和挙動解析と、フィルム試料に平均分子量が異なるポリエスチレン(以下、PS)を用い、シール温度 110~180 $^{\circ}\text{C}$ 、シール時間 0.5~4.0sec、シール圧力 0.2MPa で試験片を作成した。試験片を剥離試験により接着力を評価すると、分子量の高い試料のほうが、ヒートシール強度が高かった。しかし、分子が十分に結合する時間である、最長緩和時間の短い分子量の低い試料より、高い試料のほうが、短い時間で十分に結合するといった、矛盾した結果が出てしまった。そのため、実験で使用した試料に微量に含まれる短時間緩和成分が影響し、分子量が高い試料が短い時間で十分に結合したと考えられた。

5. おわりに

これまで、ヒートシールの評価には、破壊での検査が必要であり、量産した個体一つ一つを調べられなかったが、これらの方法を活用すると非破壊で、一つ一つの製品に対し調べられ、安全性や精密性が格段に上がることとなる。

6. 参考文献

1. 山口秀樹, 梅崎栄作, 二瀬克規, 青木博之, 鎌田幸彦. 赤外線サーモグラフィによるプラスチックフィルム製液体包装袋のヒートシール時における温度分布の測定. 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集. No. (2000-10.6~9). pp. 1~2.
2. 菱沼一夫, 熱溶着(ヒートシール)の溶着面における剥離エネルギーの測定と評価法の提案. 日本接着学会誌. Vol. 42, No. 4(2006), pp. 1~7.
3. 井上卓見, 門脇廉, 森健太. 超音波パルスの瞬時振動数を用いたヒートシールの非破壊接着力評価. The Japan Society of Mechanical Engineers, (2016), pp. 1~13.
4. 森健太, 井上卓見, 門脇廉, 空中超音波のコインシデンス効果を利用するヒートシール瑕疵の非接触検出. The Japan Society of Mechanical Engineers. (2020). pp. 1~13.
5. Zheng Shuangyang, Fast inspection of food packing seals using machine vision. (2023)
6. 檜山敏之, 宮田剣, 西岡昭博, 香田智則. 分子動力学法及びレオロジー測定によるヒートシール強度の分子量依存性評価, (2012), pp1~2.