エンブラの溶着

大 山 一*

1. はじめに

自動車部品は軽量化とコストダウンのため、金属から樹脂への材料転換が進められている。また、樹脂化することによりその形状の自由度を活かして複数の部品を一体化したモジュール化の推進が期待されている。一方、電子技術の進展に伴い各種機器の制御回路が部品に封入されることが増えてきている。これらに対応して、複雑形状の中空部品の製造、複数部品の一体化、電子回路等の封入と、溶着技術の重要性は増してきている。さらに、自動車エンジンルーム内等の過酷な使用条件等、エンブラへのニーズが増大してきている。

本稿では、エンブラへの溶着技術の適用について、近年急激に採用が増加し、今後も増加が期待される自動車のインテークマニホールドを中心に述べる。

2. 溶着工法とエンブラへの適用

樹脂成形品の接合方法として、溶着法はポリエチレン、ポリプロピレン、ポリ塩化ビニル等の汎用プラスチックにも広く用いられているが、エンブラの場合は、以下の点で汎用プラスチックよりも高いレベルの溶着技術が必要になる。一つには、融点や固化温度が高いため、融かしにくく、樹脂が十分接合する前に固化してしまう恐れがあるなど、溶着自体が比較的難しいということがあげられる。また、自動車のエンジン廻りなどの機能部品に使用されるため、単に接合してシールされていれば良いのではなく、接合部の強度や過酷な使用環境での耐久性なども求められる。

主な溶着法を表1に示す。溶着ではプラスチックの溶融に用いられる熱源として、外部から与える方法、材料の摩擦発熱を利用する方法、電磁誘導発熱を用いる方法が用いられてきたが、最近、DSI・DRI^{1),2)}といった2段階の射

表1 主な溶着工法

熱 源	溶着法	特 徴	用途例
外部熱源	熱風溶着	熟練が必要・再現性に難 エンブラ向きではない	大型特殊成形品 補修用
	熱板溶着	装置が簡便 エンブラ向きではない	バッテリーケース
	レーザー溶着	精密溶着可能 レーザー透過材/吸収材の溶着	キーレスエントリー ケース
電磁加熱	高周波溶着	溶接面がきれい 誘電体損失大が必要	
電気加熱	熱線溶着	装置が簡便・形状自由度大 熱線が中に残る	パイプインマニ/ フランジ間溶着
摩擦発熱	振動溶着	装置が簡便・材料適用度大 形状自由度大	各種インマニ キャニスタ
	スピン溶着	装置が簡便 円形溶接面に限定	ノズルの溶着等
	超音波溶着	ホーンから離れた部分の溶着可 スポット溶着に適	内部構造部品の溶着
二次射出樹脂 の保有熱	射出溶着 (DSI・DRI)	高い耐圧強度設計が可能 形状自由度大	インマニ等

* Ohyama, Hajime
三菱エンジニアリングプラスチック(株)
技術センター第二開発室
平塚市東八幡 5-6-2 (〒254-0016)
2002.9.4 受理

表2 インテークマニホールドの工法比較

工 法	ロストコア	ブロー + 射出被覆	振動溶着	射出溶着	回転中子
形状自由度	◎	○	△	○～◎	×
耐圧強度	◎	◎	○	○～◎	◎
設備投資	×	○	◎	○	◎
コスト	△	△	◎	○	◎

出成形により、二次射出されるプラスチックの保有熱を利用する方法、いわゆる射出溶着法が進展してきている。これらについては後で詳述する。

また、新しい外部熱源として近赤外領域のダイオードレーザーを用いる溶着方法が提案されている³⁾。この方法の原理は、レーザーを透過する材料と吸収する材料を重ねあわせ、透過する側からレーザー光を照射し、吸収材表面を溶融させ、その熱で接触する透過材を溶融、溶着させる。この方法では、精細な溶着が可能となる。また、溶け代部をあらかじめ作っておく必要がないのでバリが出ない等の特徴がある。レーザーが限られた領域のみ加熱するので電子回路の封入において、電子回路に余分な熱や振動がないので電子回路に損傷を与えずに溶着することができる。キーレスエントリーケース等に採用されたようである。

エンブラに適用される溶着方法としては、本来エンブラの用途が、耐熱・高強度を要求される分野なので、比較的容易に強い溶着強度が得られる振動溶着が最も多い。自動車分野ではキャニスターが代表的な用途例である。一方、振動溶着の欠点としてはバリ溜め、振動代が必要なため、溶着部の寸法が大きくなり寸法的余裕のない製品への適用が難しい。このような場合、熱板溶着が用いられることがある。電気自動車・ハイブリッドカーのバッテリーケースにはPP/PPEアロイが熱板溶着されて用いられている。また振動溶着では分割体を一方向に振動させる必要上形状面に制約がある。三次元に複雑な溶着ラインをもたざるを得ない形状では射出溶着が有効になる。射出溶着と熱線溶着を組み合わせた複雑なパイプ型インテークマニホールド（パイプインマニ）が実用化されている。パイプインマニとは、元来は金属製パイプの曲げ加工・溶接により製造されるインテークマニホールドを言い、金属鑄造で製造されるインテークマニホールドより、さらに複雑な三次元形状を有する。また、射出溶着では、溶着部のデザインによって高い耐圧強度を得ることもできる。

自動車分野での新しい溶着製品の応用例としては、プラスチックのデザイン自由度を活かしたオイルストレーナへの展開が発表されている⁴⁾。

3. インテークマニホールドへの適用

3.1 インテークマニホールドの製造工法

自動車のエンジンの吸気分岐管であるインテークマニホールド（以下インマニ）の樹脂化が急速に進んでいる。エンジン周りの大型部品であり、樹脂化による軽量化が期待されている。樹脂インマニは複雑形状の中空部品で、またエンジン周りの過酷な環境に耐えることと、バックファイア等に耐える高溶着強度が要求される。樹脂化当初は金

属と同一形状が作れ、またシームレスな製品が得られることからロストコア法が多かったが、最近では振動溶着の信頼性向上、射出溶着の技術進歩により溶着品が主流となってきている。各工法の簡単な比較を表2に示した。

(1) ロストコア法⁵⁾

低融点合金で射出成形型の中子を作り、これを型にいれて射出成形した後、低融点合金を溶融除去して製品を得る。形状自由度には優れるが、低融点合金のキャスト装置や溶解装置等設備投資が大きく、また射出成形との連動等に手間がかかり、小ロットの生産には不向きである。

(2) ブロー+射出被覆⁶⁾

日本で初めてインテークマニホールドが樹脂化された時の工法である。ブロー成形で中子を作り、それを射出成形型に装着しブロー中子部分の被覆補強と同時にフランジ等インマニ最終形状を作る。形状自由度はあるが生産性の問題から主流にはなっていない。

(3) 振動溶着⁷⁾

インマニを複数の射出成形可能な形状に分割し成形後、振動溶着によりインマニ形状に仕上げる工法である。製造設備が安価であり、生産性にも優れるので、その信頼性の向上とともにロストコア中心に立ち上がった欧米でもインマニ工法の主流になってきている。前述のように振動溶着では形状面に制約があるため最近のロングブランチタイプのように形状が複雑になると分割数が多くなる問題がある。ただし、これからのモジュール化、また可変吸気化等部品組み合わせが増えてくると、ポート部等主要部分に他の工法を用いる場合でも、振動溶着との組み合わせが必須となることが予測され、重要な溶着法であることは間違いない。

(4) 射出溶着^{1), 2)}

射出溶着は、射出成形された分割体（一次成形品）を金型内で突き合わせ、接合部に樹脂（二次成形部材）を射出して溶着させる成形法である。2層の樹脂を積層射出する2色成形と違って、分割された一次成形品を中空状に突き合わせるため、その動かし方によって、可動側金型をスライドするダイスライドインジェクション（DSI）¹⁾や、可動金型を回転させるダイロータリーインジェクション（DRI）²⁾と呼ばれる。

射出溶着では振動溶着に比べて形状的制約は少ないが、二次射出通路設計が大切になる。また一次成形品を金型から取り出すことがないので、成形品のそりの影響が少なくすむことが利点である。この成形法は日本で開発されたので、欧米での実績はないが、日本では振動溶着とならんで重要なインマニ製造法の一つになってきている。

(5) 回転中子法⁸⁾

ポート形状が円弧の一部となる場合のみ用いられる方法

で、中空部を作る中子その弧に沿って回転させて抜く方法である。

3.2 インテークマニホールド用材料

インテークマニホールドは自動車のエンジンに直結される部品であり、高強度、高剛性が要求され、またエンジンルームの高温、振動、ガソリン、オイル等のエンジン周リ薬品に耐えなければならない。そのため、一般にポリアミド6 (PA 6) またはポリアミド66 (PA 66) が用いられる。

PA 6 と PA 66 を比較すると、その物性は大きくは変わらないが、PA 66 が融点が 40°C 程高い。このため、従来エンジンルーム内では PA 66 が使われることが多かった。しかし、近年インマニの工法として振動溶着や射出溶着が多くなるにつれ、PA 6 の方が溶着強度が高く、またそりが小さいことから振動溶着がやりやすいこともあり、PA 6 が主流になりつつある。

4. 振動溶着強度

4.1 工程

振動溶着法においては、溶着される成形品（分割体）を溶着機に装着した後、①衝合・加圧 ②振動・摩擦 ③保圧・冷却 ④取り出しという工程で作られる。

溶着部の典型的な断面形状は図1のようになっており、振動を開始すると溶着ビードと呼ばれる突起が相手材と摩擦して、その摩擦熱によって表面が融解し、溶着面でポリマーの混合がおこるが、同時に加圧力によって溶融したポリマーが溶着部から両脇へバリとして押し出される。振動が終了した後、保圧過程において、混合されたポリマーが冷却固化することによって溶着が完了する。

4.2 溶着部形状の影響

振動溶着でできた中空製品に内圧がかかった場合、図1の内壁に引張り力がかかる。ところが、溶着部断面形状は図1のように引張り力のかかる内壁と溶着ビードがバリ溜めおよびバリ止めのためずれている（オフセット）。そのため、溶着部内側端部には応力集中が生じ、溶着部材料には引き裂き力がかかることになる。この応力集中はオフセット量が大きくなるにつれて大きくなるので、設計にあたってはできるだけオフセットを小さくする必要がある。またオフセット量以外にも応力集中を減らすよう断面形状、

図1 振動溶着部の代表的断面図

材料剛性に注意する必要がある。フランジの厚みを基本肉厚である本体外周部より厚くしたり、フランジが口を開くような変形を防ぐようリブをつけることが有効である。

4.3 振動溶着条件の影響

振動溶着の工程因子としては、加圧力、振動周波数、振幅、溶着時間（振動時間）、溶着深さ、保圧時間等がある。これらのうち、溶着強度への影響が最も大きいのは加圧力である。加圧力が大きいほど溶着強度が低下することは既に知られている⁹⁾。

この原因を調べるため、筆者らは溶着部から超薄切片を切り出し、偏光顕微鏡によって溶着層を観察した。すると加圧力が高い方が溶着層が薄くなることがわかった。これは加圧力が高いと溶融した樹脂が溶着部の外に押し出されやすいためである。さらに溶着部の複屈折の測定から、加圧力の高い場合のほうが溶着層の配向度が高いことがわかった。溶着品の破壊は、溶着に関与していない部分と溶着層との界面から起こると考えられ、溶着層のポリマーの配向度が高い方が界面が弱くなり、強度が下がると考えられる。

ただし、加圧力が小さいと、溶着初期における樹脂の溶融に時間がかかり溶着の進行が遅くなって生産性が低下する。そこで、多段圧力制御装置を導入して、溶着初期は加圧力を高くし、途中で加圧力を下げるなどの工夫がなされている。

4.4 材料特性の影響

4.4.1 PA 6 と PA 66 の比較

溶着品の耐圧強度について、PA 6 が PA 66 に対して優れていることは既に知られている（図2）。この理由を2つの面から考察してみる。

第一に、PA 6 と PA 66 の抗引き裂き力の違いがある。前述のように、溶着された容器では、内圧によって内壁に引張り力が生じるが、溶着部では、内壁による負荷力線と溶着部にオフセットがあり、力は溶着部のポリマーには引き裂き力として働く。PA 6 と PA 66 の引張り強度に大きな差はないが、試験片にノッチをいれた時の強度を調べると PA 6 のほうが高い値を示す。PA 6 の靱性が高いことがこのノッチ感度の差になっていると考えられ、この差が振動溶着品の耐圧強度の差となってあらわれてくる。この考えをさらに進め、PA 6 の靱性を高めるような改質を行うと、抗引き裂き力の改良が図れ、耐圧強度を改良するこ

図2 PA 6 と PA 66 の振動溶着強度の比較

とができる。ただし、この改質は、オフセットをもつことが前提であるので、突き合わせ溶着では何ら改良されない。

次に溶着強度そのものの違いについて考える。前項と同様な手法によって、PA 6 (GF 35%) と PA 66 (GF 35%) の溶着部を観察した。同条件で溶着した場合、PA 66 のほうが溶着層が薄いことが確認された。この理由としては、PA 66 の融点の高さが考えられる。振動溶着では、溶着部からの伝熱により温度が融点を越えた部分のみが融解するので、融点の高い PA 66 は溶着層が薄くなるものと考えられる。

4.4.2 分子量の影響

振動溶着による容器の耐圧強度はポリマー分子量依存性が最も大きい。この理由としてはいくつか考えられる。分子量の大きなポリマーは靱性が高く、抗引き裂き力が高いことがまず挙げられる。また、分子量の大きなポリマーは溶着時にも分子同士のからみあい密度が高くなると考えられる。さらに、分子量が高い材料は、溶着時に熔融ポリマーが外に押し出されにくく、溶着層の厚みが大きくなることも挙げられる。

ただし、実用的には分子量を大きくすることは、成形時の流動性を悪くするので、目的物の大きさ、形状、要求耐圧強度等を考慮して適切に設計する必要がある。

4.4.3 耐圧強度予測

振動溶着品を設計する場合、設計段階で耐圧強度予測が CAE によりなされ、必要に応じて、溶着点の追加、溶着フランジの補強、本体全体の剛性向上による全体変形低減による溶着部への応力低減等が図られる。ただし、振動溶着部の強度は前述のように応力集中部であり、また、オフセット量、ポリマーの性状、溶着条件に大きく左右され、また溶着条件も実際の製品では全溶着部で均一にはならないので、正確な予測は難しい。類似形状による経験、実績の蓄積が重要になる。

5. 射出溶着強度

5.1 工程

射出溶着法による中空品の製造は、①分割体（一次成形品）の成形 ②金型のスライド等による一次成形品の衝合 ③二次成形材の射出と一次成形品との溶着 ④冷却・取り出しという工程で行われる。

溶着は二次成形材の熱により一次成形品の表面が融解し、再冷却固化した時点で終了する。振動によって十分なエネルギーが与えられる振動溶着と異なり、射出溶着ではエネルギー源に限りがあるので、熱的条件（成形条件）と材料の熱的性質が溶着強度に大きく影響する。

5.2 成形条件の影響と溶着強度予測

二次成形材のうち、特に溶着強度への影響が大きいものは、樹脂温度、射出速度および保圧力である。また、成形条件ではないが、二次成形の流動距離の影響も大きい。いずれも、溶着部における樹脂温度および樹脂圧力が高くなる方向で溶着強度は向上する。

これらの要因は複合的に影響するため、定性的な傾向はつかめても、そのままでは実製品の溶着強度の予測に役立てることができない。そこで、単純形状のテストピースを用い、二次成形時の型内樹脂温度・樹脂圧力をモニターし

図3 DSI 溶着強度と二次成形材固化までの最大樹脂圧力

図4 射出溶着時の樹脂温度模式図

ながら種々成形条件をかえて DSI 成形を行い、各部位の溶着強度と対比する実験を行った。得られた結果から、各条件、各部位における溶着強度は、二次成形材の表面が固化温度に達するまでの最大樹脂圧で整理できることがわかった（図3）。

このマスターカーブを用いることにより、二次射出の流動解析から、溶着強度の予測が可能となる。実際の製品形状では、溶着線（二次射出経路）の分岐、太さの変化等がでてくるが、その経路に沿った二次射出時の流動解析により予め問題点を予測、改良することができる。

5.3 材料の影響

5.3.1 融解・固化挙動

前述のように、射出溶着は二次成形材の熱により一次成形品の表面が融解し、再冷却・固化した時点で終了する（成形過程の模式図を図4に示す）。

従って融解しやすく、固化しにくい材料がポリマー同士が溶着できる時間帯が長くなるので、溶着強度が高くなる。言い換えると、二次成形樹脂温度と融点・固化温度との差が大きい材料のほうがいいと言える。

インテークマニホールドの候補材である PA 6 と PA 66 とを比べると、適正成形温度の上限には大差がないが、融点、結晶化温度ともに PA 66 が約 40°C 高い。従って PA 66 の溶着強度は PA 6 に比べると大幅に低くなる。さらに、PA 66 では一次成形品の結晶化度が高く、結晶潜熱が大きい

いことが、一次成形品の溶融に不利となっている⁹⁾。

また、ポリマーの改質により融点や結晶化温度を低くすれば、射出溶着強度を高くすることができる。ただし、融点を下げれば、製品の耐熱性に、結晶化温度を下げれば射出成形の生産性に悪影響があるので、適当な範囲で設計する必要がある。

5.3.2 分子量・流動特性

二次成形用の材料は、分子量の低いほうが溶着強度が高い。分子量が低い方が流動性がよく、射出速度を速くすることも一因であるが、フィードバック制御を行い、同じ射出速度で比較した場合でも同様な傾向がみられた。これは、射出溶着においては、絡み合い形成支配ではなく、分子拡散支配であることを示唆している。

また、分子量が同じでも、溶融流動時の粘度（せん断速度）の程度を変えることでも溶着強度に差がでる結果も得られている。射出時の速度プロファイルに違いがでるため、壁面すなわち一次成形品の表面における二次材の流動時挙動の差によるものと推定される。

6. おわりに

急激に市場が伸びつつある樹脂インテークマニホールドを中心にエンブラの溶着について述べてきた。自動車分野においては、はじめに述べたように、CO₂削減要求からま

すます燃費向上、それに伴う軽量化が求められており、樹脂化の役割は増大していくものと期待される。さらに、コスト削減を含め、モジュール化の波がこうとしている。複数部品を一体化し、共通部分を作っていくために溶着も一つの大きなキーテクノロジーとなろう。

さらに、電子回路の封入といった部品の増加が予測され、精密溶着といった新たな要求もでてくると予測される。これらの諸要求に対して、各溶着法のメカニズムをしっかりと考えて、工法、材料の開発採用をしていくことがますます重要となろう。

参 考 文 献

- 1) 小屋松他：プラスチックエージ，(5)，105 (2000) 他
- 2) 日経メカニカル，**518** (11)，54 (1997) 他
- 3) HEIDRUNPUETZ et al. : *Modern Plastics*, 1997 (9)
- 4) 日経メカニカル，**549** (6)，51 (2000)
- 5) 井沢：これからの自動車材料・技術—プラスチック材料編，82 (1998)，大成社
- 6) 務川：プラスチック成形技術，**11** (12)，22 (1994)
- 7) 田嶋：プラスチックエージ，(2)，87 (1990)
- 8) 日経ニューマテリアル，96 (12/7 1992)
- 9) Yamaguchi, SAE 2000-01-0041 (2000)

〔関連行事案内〕

KAST 終了プロジェクト研究報告会

1. 日 時：2003 年 3 月 24 日(月)
2. 会 場：KSP ホール (川崎市)
3. 主 催：神奈川科学技術アカデミー
4. 内 容：研究報告
(第 1 部) 次世代化学領域を開くマイクロ・ナノ化学チップ技術の構築
(第 2 部) 光誘起協力現象が生み出す新しい物質像
5. 参加費：無料
6. 申込・問い合わせ先
 (財)神奈川科学技術アカデミー
 研究部研究調整課橘田(たちばなだ)，山本
 TEL. (044)819-2034 FAX. (044)819-2026
 http://home.ksp.or.jp/kast/
 E-mail: yamamoto@kast.or.jp