< 綜 説 >

(受理:平成15年9月1日)

真空可塑化と飢餓供給による未乾燥樹脂の射出成形 For Undried Resin Pellets Injection Molding Method with Vacuum Plasticating and Starve Fed

浅野 強^{*}
Tsuyoshi ASANO

1. はじめに

プラスチック成形加工における不良のうち、ガスが原因と考えられる不良(充填不足、空洞・気泡、銀条、焼け、光沢不良、離型不良、ウェルド等々)が非常に多い。特にこの種の不良は、製品形状が複雑で薄肉が要求される精密金型を使うエンブラ製品に多発する傾向がある。成形工程の重要な基本操作である乾燥(drying)は材料が含む水、溶剤等の揮発分を気化して除去する工程である。分子構造中にエステル結合をもつ材料樹脂は、一定以上の水分を含んで加熱溶融すると加水分解による物性(分子量)の低下を招く。加水分解しない樹脂でも水分の蒸発により、気泡・シルバー等の外観不良を生じる。そのため、成形加工の前処理として乾燥工程は必須であるとされる。乾燥機もオープン、ホップドライヤ、除湿ドライヤや真空乾燥機等々、必要に応じ使い分けている。しかし、樹脂の乾燥には長い時間(例えば、ナイロン6の場合、除湿型で90℃、5時間)を要する。成形加工工程においては、成形機が油圧機から電動機に置き換わり、消費電力は減少する傾向(例えば、同クラスの射出成形機では1/3~1/5)であるが、成形品へのより高い精度要求のため、予備乾燥に要する電力の比率が大きくなっている。特に、樹脂の低沸成分は乾燥工程では除去され難く、ショートショット(樹脂が流れない)の一因がガスベントの閉塞(材料に含まれる低沸ガス成分が金型のガスベントに再凝縮)による場合が多く、より高い乾燥

の度合いを求め、乾燥時間を長くする傾向にある。

最近、ベント式射出成形機(図1)の変種とでも言えるような、成形方法(システム)が2,3話題をよんでいる(例えば、IPF国際プラスチックフェア2002, 幕張11月)。これらは、成形機の加熱シリンダからガスを抜くのではなく、ホッパ下からガスを抜く方式であり、真空可塑化によりシリンダ内でガス脱気を行っている。通常の射出成形機を用いてガスに起因する不良を低減した、射出成形システムと言える。

図1 ベント付成形機

浅野 強

略歴: 姫路工業大学大学院・工学研究科
機械系工学専攻・生産プロセス工学部門助教授
1965 姫路工業大学応用化学科卒業
1965 姫路工業大学産業機械科助手
1994 工学博士(姫路工業大学)
1995 ~現職
専門: 化学工学・移動現象
趣味: 電子おもちゃの製作・温泉湯治

^{*} 姫路工業大学・大学院・工学研究科
機械系工学専攻・生産プロセス工学部門
兵庫県姫路市書写 2167 〒671-2201
Himeji Institute of Technology, Graduate School of
Engineering, Department of Mechanical Engineering
2167 Shosya, Himeji, 671-2201, Japan

2. 真空可塑化射出成形

従来から、乾燥工程を省く目的で真空ベント付の成形機(図1)が使われていた。第一ステージで圧縮溶解した後、圧力解放部を設けガス化成分を排出するベントをこの位置に設置した成形機である。しかし、このベント付の成形機は押出機(extruder)が主で、射出機では

図2 AGE社の押出成形機の方法

極稀である。インラインスクリュ方式射出成形機はスクリュが回転・後退と停止さらには前進を繰り返す。そのため、スクリュの前進・後退に伴いベントとスクリュとの相対位置が随時変化する。金型の交換を前提にしている(ワークサイズと樹脂種が変わる)汎用成形機では、その前進・後退量も変化するもので、ベント付射出成形機的设计は甚だ困難である。

そこで、ベント位置を可塑化筒以外の場所(ホッパやホッパ下に設けた方式)が幾つか上市されている。AGE社の、バルブによってパッチ式に行う真空ホッパ(図2)。連続式では、住友重機械工業(株)のアルフィン(Airless-Feeding-Injection-Molding)(図3)、(株)ハルナのエコマック(Ecology-Molding-Airless-Kit)(図4)、や(株)アイベックのVCS(Vacuum-Cylinder-System)(図5)などがある。アルフィンとVCSは成形機後部に

図3 住友重機械工業(株)のアルフィン方式

図4 ハルナ社のエコマック(エコマックカタログから転載)

図5 アイベック社の VCS 方式

真空漏れ止めシールが設置加工される必要があるので、市販機にそのまま設置できるハルナのエコマックを例に真空可塑化の利点について述べたい。

真空（減圧下）で可塑化することにより、沸点降下をもたらし、樹脂材料の可塑化過程でコンタミである低沸成分（水分、未重合成分、オリゴマー等）は、常圧時に比べてより速く、より多く蒸発気化する。材料の可塑化過程で気化成分を除去できるとすると、成形金型内に挿入されるガス成分が相対的に減少する。そのため、成形時の金型の汚れ（ガスのデポジットしたもの）は低下すると思われる。ただし、蒸発気化したガス成分を、いかに材料に再付着させずに排出するかが問題である。

3. 飢餓供給

一般に、成形機はホッパに十分な量の材料ペレットを貯めてあり、成形機が射出または押出た量の材料はスクリューの回転による噛込みで自動的にシリンダ内に供給される。そのため、シリンダ内は常に材料で満杯状態である。これに比べてホッパと成形機の間にフィードスクリューなどを設け、シリンダへの材料の供給を意図的に少なくし、シリンダ内を材料不足状態にして成形する方法を飢餓供給、前者を満杯供給と定義する。Dow Chemical 社の Steven ら²⁾は、押出機（extruder）について、飢餓供給方式（Stave-fed mode）の利点として、動力の低減、急速溶融、ガス成分のホッパ側へのベント効果の増進、溶融材料内のバブルの除去、ソッドベットのブレー

写真1 通常成形のパレル内写真

写真2 エコマック成形パレル内写真

クアップ減少等を報告している。著者も東洋機械金属（株）（兵庫県明石市）の可視化加熱筒を備える 40 トン射出成形機で観察した結果、飢餓率を大きくすると、材料ペレットは瞬時溶融に近い速さで溶融するのを目視した。無着色透明 PC（ポリカーボネイト）ペレットでの通常の成形とエコマック成形の違いを、作動中のパレル内の状況を高速ビデオで観察した。写真1は通常成形のとき、写真2は飢餓率 10%での成形計量中の観察写真である。写真は高速ビデオのモニタ画面を間接的にデジタルカメラで撮影したもので、解像度が極端に悪い（申し訳ありません）。写真中のスケールは成形機ホッパ口からの距離を示し、写真中上半に 340mm～400mm まで、下半に 190mm～260mm までを示す。スケール直下がスクリューである。エコマック成形では、溶融位置はスクリューの前方に移動する。写真1（通常成形）では、250mm で完全溶融しているが、写真2（エコマック成形）では、溶融位置が 320mm まで前進移動している（矢印）。射出成形機での飢餓率の定義は、Steven らの

ものに倣って次式を用いる。

$$S = (1 - G_s / G_0)$$

ただし、 G_0 は満杯供給時の最大送り量、 G_s は飢餓供給時の供給量である。すなわち、成形機スクリュウの回転速度が同じ場合、 G_s / G_0 は供給領域（圧縮領域を一部含む溶融するまでの領域）で成形機内にある材料ペレットの量の比である。このことは、飢餓率が大きくなれば、成形機の可塑化能を十分使えない。すなわち、成形機と成形条件によっては、飢餓供給が出来ない場合も生じる。成形機の最大可塑化量に較べて一度の射出量が多い場合やハイサイクル成形など、条件によっては計量時間内に材料供給が追いつかず、計量時間が延びる場合は、飢餓率が成形条件を変更する必要性が生じてくる。

4. 飢餓供給と真空可塑化との組み合わせ

飢餓供給のためには、ホッパと成形機との間に供給量を制御する装置が必要である。飢餓供給装置が付随した成形機や周辺機器としての飢餓供給装置が上市されている。しかし、飢餓供給装置と真空可塑化装置を組み合わせた周辺機器としての装置は現在、(株)ハルナのエコマックだけである。エコマックを用い JIS7162-1A ダンベル試験片を成形し、引張試験した結果を図6～9に示す。図中に示した水分率はカールフィッシャー水分計で測定した。いずれの材料も同一成形条件、飢餓率は15%で成形した。いずれの材料（PA66, ABS, PC, PBT）についても、可塑化の真空度を増すと最大降伏強度の増加がみられる。これは、降伏強度の減少がコンタミ（ガス化成分）の残留によるものと仮定すると、可塑化真空度を増すとコンタミの残留が減少している。乾燥工程でオリゴマー等のコンタミ（ガス化成分）は除去されず、乾燥材料についても可塑化真空度を増すとコンタミの残留が減少している。また、飢餓供給条件での成形では、コンタミの除去が不完全を意味する。降伏強度だけで推論すると、乾燥工程を経た材料を用いる代わりに、未乾燥材料を供給しても適当な飢餓条件と減圧真空で成形が可能である。冒頭に指摘したように、成形加工工程で占める予備乾燥工程のエネルギー消費比率は相当大きい。この乾燥工程が割愛できるとすると、エネルギーの節約のみならず、樹脂管理の煩雑さからの解放、乾燥時間の省略等有効な工程システムが組める。その上、通常の乾燥では除去し得ないコンタミ（オリゴマーを含むガス化成分）を除去する可能性がある（乾燥温度 80～120℃ではガス化しない成分が可塑化温度 200～300℃ではガス化し易い）。副次的に金型の汚れが低減し、ガスベントの狭窄や閉塞の確率が低減し、ガスに起因する不良成形の

図6 PA66 引張試験結果

図7 ABS 引張試験結果

減少が期待できる。特に、極度のコンタミを嫌う光学部品や PPS (poly phenylene sulfide) など、可塑化温度が高く、ガス放出量が多い樹脂の成形では本法が有効である。ただ、本法では成形機可塑化筒内で発生したガス成分が順次供給されるペレットに再凝縮しない工夫が必要である。エコマックは排気ガスを含むバルク流れと供給ペレットが接触し、再付着しない工夫がされている。ホッパ口を2重管構造にしてあり、内側にペレットを通し、外側をガス通路に分離（図10）してある。ガスの拡散係数は 10^{-5} オーダーであり全圧に反比例する⁴⁾。減圧下での拡散移動量は期待できない。成形機可塑化筒内で発生したガスを後方に輸送する場合、濃度拡散での輸送量は甚だ微量である。排気路にバルク流れを生じさせ、この流れに乗せてガス成分を輸送しなければならない。

図8 PC引張試験結果

図9 PBT引張試験結果

成形機可塑化筒でガスの発生場所に近い位置に細孔などを設け、外気（不活性気体など）を導入してバルク流れを作るとガス成分の排気量は多くなるが、はなはだ困難な課題である。今後、成形機メーカーのこの課題への取り組みを期待する。

5. ナノ成形への展開

情報機器、バイオ・医療分野、などからの要望が強いマイクロシステムはナノ・マイクロメートルサイズの3次元構造の成形品を要求している。この微細加工技術として、LIGA（リソグラフィ Lithographie, 電鍍 Galvanoformung, 成形 Abformung の頭文字からの略語）プロセスが有望視されている。著者も放射光を用いたディープ X 線リソグラフによる微細パターン形

図10 再付着防止2重管機構（ハルナ社カタログより転載）

成後、電鍍によりニッケルスタンプを試作し、射出成形用金型を試作した。200×200 μm、深さ 100 μm の矩形穴を多数 100 μm 毎に並べた金型にはガスベントを設けることが不可能で、エコマック成形を利用することにした。

その射出成形品の1例（PA66、成形条件全て同一に設定）、をSEM写真3、4に示す。写真3は通常成形で転写性が悪く、エッジの崩れが観られる。写真4はエコマック成形で転写性の改良が見られる。今後、要求が強くなる極微細成形加工に真空可塑化射出成形が有望だと考える。

写真3 通常成形SEM写真

写真4 エコマック成形 SEM 写真

6. 終わりに

幾つかの成形工場を見学させて頂いたが、独特の樹脂臭があった。もちろん本学成形室も樹脂臭に悩まされる毎日です。『奪われし未来』⁵⁾に触発され、成形室内ガスの分析を試みた。その結果の例を表1に示す。成形中の成形室、特に、成形機の直近で各種樹脂材を成形中の採取空気には臭気成分だけでなく、環境ホルモンや発ガン物質等が含まれている⁶⁾。大方の成形工場は空調されており、換気も併用されている。成形機からのガス放散が皆無になれば、換気を減らすことができ、換気による空調動力は削減されるだろう。真空(減圧)可塑化成形では、ガスは真空ポンプに集約され、排気される。このガ

表1 成形機近傍のガス分析結果

Resin	chemical species	amount(ng/L)
ABS	Styrene monomer	5.7
	Styrene dimer, trimer	0.089
	Toluene	5.4
	Ethylbenzene	2.17
PS	Styrene monomer	10.52
	Styrene dimer, trimer	105.6
POM	Formaldehyde	6.85
PC	BisphenolA	1.30
	Phthalate(ester)	4.87
	4-t-butylphenol	13.39
	Nonylphenol	38.8

スを室内放散するのではなく、室外廃棄?焼却?等の処理で空調動力は改善される。しかし、このガスを分解(無害化物質に)して廃棄する必要に迫られる時期が近い将来必ず来る。

参 考 文 献

- 1) 龍野道宏ほか, 成形加工, Vol. 14, No. 12 (2002)
- 2) Sterven R. S et al, Plastics Engineering, July (1992)
- 3) 浅野他, 成形加工エシソジア 199,227 (1999)
- 4) J.O.Hirschfelder, C.F.Curtiss and R.B.Bird: Molecular Theory of Gases and Liquids, (1954), John Wiley & Sons
- 5) Theo Colborn, et al, Our Stolen Future の翻訳『奪われし未来』(1997), 翔泳社
- 6) 浅野他, 環境ホルモン学会要旨集, 233 (1999)