515 ミニチュア金型による熱流束制御

Temporally controlling heat flux for micro feature reproduction using Miniature injection mold

○ 布川健太郎 正 土屋 健介
正 中尾 政之

Kentaro NUNOKAWA, Tokyo University, Hongou 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo
Kensuke TSUCHIYA, Tokyo University
Masayuki NAKAO, Tokyo University

This paper introduces a miniature injection mold with diameter 30mm and length 38.5mm, which allows rapid heating and cooling, to optimize the solidification timing by controlling heat flux not spatially but temporally. On the surface of a box shape cavity, sub-micron grooves were machined using Focused Ion Beam. Using this mold we raised the mold temperature upon injection from 100 to 250°C and time controlled the heat flux. This method allowed us to produce micro features of 300nm.

Key Words : a miniature injection , heat flux control , sub-micron grooves , rapid heating and cooling.

1 序論

射出成形は生産性の高い技術であるため、回折格子やマイクロフレネルレンズのような光学素子や、液晶ディスプレイ用の導光板、遺伝子解析や免疫分析用のマイクロチップなどの、表面に微細な凹凸形状を持つ製品の生産技術として注目されている。これらは、高さや長さがサブミクロンの微細構造の転写が求められる。

しかし、微細な凹凸には樹脂が充填される前に固化して、形状が転写されないという問題が生じる。樹脂の充填性を高めるに、金型の温度を上げて樹脂の流動性を良くすると、逆に、固化までの時間が長くなって生産性が落ちる。

そこで、樹脂が充填されるときには、抜熱を小さくして樹脂の流動性を高く保ち、充填が完了してから抜熱を大きくしたい。つまり、熱流束を時間的に制御すれば良い。

しかし、これまでの射出成形の研究では、金型内部の圧力制御に注目した研究が多く[1][2]、金型温度、それも抜熱量に当たる熱流束に注目した研究は少ない[3]。

また、金型は一般的に、射出サイクルごとの金型温度の変動を小さくするために、熱容量を大きくしている。したがって、熱慣性も大きいので局所的な熱制御が空間的にも時間的にも鈍感である。

このような現状から、本論文では、熱容量の小さいミニチュア金型を開発し、熱流束を時間的に制御することによって、サブミクロンオーダーの形状転写精度の向上を目指す。

2 金型の設計

本論文に用いた金型と成形品形状を図1に示す。成形品は箱形状で、外形は10×10×3mm、肉厚は0.5mmであり、これらの側面内側の抜き勾配は2度、外側の抜き勾配は3度である。箱の表面にはサブミクロンオーダーの微細構造が付与してある。

熱流束を時間的に制御するためには、金型を急加熱・急冷却する必要がある。そのためには、1)金型の熱容量が小さいことと、2)金型の熱伝導率が良いこと、が求められる。したがって、金型の熱容量を小さくするために、寸法をφ30mm×38mmと小さく設計した。材質は、熱伝導率が高く精密鑄造性に優れたベリリウム銅を用いた。

キャビティ間の成形条件ばらつきを避けるために、成形品は1個取りとした。また、キャビティ内の温度分布を対称にするために、成形品は金型中央に配置した。樹脂はピンゲートで導入して、金型は3プレート方式を採用した。

キャビティ表面（成形品の箱底面に当たる部分）に、集束イオンビ

ーム装置を用いて、図2に示すように微細な溝を加工した。溝の寸法は、深さ1μm、幅がそれぞれ10μm、5μm、3μm、1μm、500nm、300nmである。

金型には、図1-(a)に示すように、固定型に3個の温度センサが取り付けられてある。また金型全体の温度分布を測定するために、サーモグラフィを設置した。

加熱には、出力が大きく、時間応答が早い、ハロゲンスポットヒータを用いた。ヒータは、直径60mm、出力150W、作動距離15mmで、固定型と可動型の加熱にそれぞれ1つずつ用いる。冷却は空冷で行った。

Figure 1: The mold and product shape. (a) miniature injection mold, (b) box shape product with sub-micron shape features on its surface.

Figure 2: SIM (Scanning Ion Microscope) view of the micro grooves machined using Focused Ion Beam.

3 実験

まず、実際に射出実験を行った。射出成形機は型閉め力が50kNのサーボモータ制御射出成形機(FANUC製 Roboshot 5- α)を用いた。樹脂はポリスチレンである。射出時の金型を250℃、230℃、210℃、190℃、170℃まで加熱して、110℃まで冷却してから、金型を開いて製品を取り出すという実験を行った。

射出時の金型温度を変化させるに従い、ショートや脆弱等の成型不良を生じたため、それら成型不良を解消するため射出条件を随時変化した。250℃の時の射出条件は、ノズル温度260℃、射出圧力120MPa、射出速度は140mm/s、保圧圧力は60Mpa、保圧時間は20sであり、170℃の時の射出条件はノズル温度260℃、射出圧力130MPa、射出速度は200mm/s、保圧圧力は80Mpa、保圧時間は10sである。

図3に成型サイクル中の金型の温度変化を示す。グラフから110℃から210℃まで加熱するのに50秒かかり、冷却時間は40秒であることがわかる。また、サイクルタイムは射出時金型温度によるが、210℃のとき160秒であることがわかる。

Figure 3: The mold temperature measurement during the actual injection molding.

図4に、金型温度190℃と210℃のときの成型品の光学顕微鏡画像を示す。図から、金型温度210℃のとき、樹脂の流動方向に関わらず、最も狭い300nmの溝が成型品に転写されていることがわかる。逆に金型温度190℃のとき、樹脂の流動方向による違いはあるが、共に1μm以下の溝は転写されていない。

Figure 4: The optical microscopic images of the products molded at mold temperature of (a) 210°C, and (b) 190°C

図5に上記の2つの成型品のAFMにより計測された表面形状を示す。ここからも、金型温度190℃の時は1μm以下の溝形状は転写されないことがわかる。

表1に射出時金型温度の違いによる溝構造の転写の可否を示す。表より300nmの溝を転写するには、金型温度を少なくとも210℃以上にしなければならないことが分かる。

また、溝の寸法を小さくすればするほど、射出時の金型温度を高くしなければならない傾向も見えてくる。従来の金型では、金型温度は

常に100℃程度であるため、転写されうる微細構造の寸法は限られる。

このことから、射出時に金型温度を上げることで、従来ではできなかったサブミクロンオーダの形状転写が実現できたとと言える。すなわち、金型温度を変化させて熱流束を時間的に制御することの有効性を示した。

Figure 5: AFM images of the products molded at mold temperature of (a) 210°C, and (b) 190°C

		Groove width						
		10μm	5μm	3μm	1μm	800nm	500nm	300nm
Mold temperature	~150°C	×	×	×	×	×	×	×
	170°C	○	○	○	○	×	×	×
	190°C	○	○	○	○	×	×	×
	210°C	○	○	○	○	○	○	○
	230°C	○	○	○	○	○	○	○
	250°C	○	○	○	○	○	○	○

○ : The grooves are reproduced
× : The grooves are not reproduced

Table 1: Injection results of the micro-grooves reproduction at various mold temperature.

今後の課題は、さらにサイクルタイムを短くすることである。そのためには加熱・冷却の時間を短くすることが必要となり、よりハイパワーのヒータ（たとえば1kW以上）や、液冷などの積極的な冷却方法が求められる。

4 結論

表面にサブミクロンオーダの微細形状を持つ射出成形品を実現するために、時間的に熱流束を制御した。まず金型の熱容量を小さくするために、寸法をφ30×38mmと小さく設計して、キャビティ表面にFIBを用いて10μm～300nmの微細な溝を加丁した。この金型を用いて、射出時の金型温度を210℃に上げ、型開き時110℃まで冷却し、熱流束を時間的に制御した結果、従来の金型では実現できなかった300nmの微細形状の転写を実現できた。

5 参考文献

- [1] K. Yamazaki, et. al., *Annals of the CIRP*, Vol. 43/1, pp. 275-278, 1994.
- [2] K. Wang, et. al., *Annals of the CIRP*, Vol. 49/1, pp. 379-382, 2000.
- [3] M. Yoda, et. al., *Proc. ASPE 2002*, Vol. 27, pp. 24-27, 2002.
- [4] M. Nakao, et. al., *Annals of the CIRP*, Vol. 52/1, pp. 451-454, 2003.