

文章编号 1004-924X(2015)01-0165-09

模板法注射成型纳米结构及其疏水特性

周明勇¹, 蒋炳炎¹, 张露¹, 鲁立君², 翁灿^{1*}

- (1. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410083;
2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:以不同形貌和深宽比的阳极氧化铝(AAO)模板为模芯,采用注射成型方法制备了纳米结构,分析了纳注射成型的模具温度、制件的疏水特性和模芯的使用寿命。首先,通过对比 3 种 AAO 模板的结构特征和深宽比,研究了不同模具温度下纳米结构的复制质量。然后,针对纳米阵列结构的疏水特性,分析几何结构特征与模具温度对制件静态接触角的影响,探索 PC 制件不同成型区域内的疏水性能。最后,对 AAO 模板的宏/微观质量和使用寿命进行了分析。研究结果表明:模具温度对纳米结构复制质量影响显著,且主要体现在纳米结构的成型高度上;纳注射成型制件不同区域内的疏水特性略有差异,最大静态接触角可达 108.2°,比平板制件提高了 31.5%;500 余次的注射成型后,低深宽比的 AAO 模板整体质量良好,而高深宽比的模板缺陷明显,使用寿命有限。

关键词:纳米结构;阳极氧化铝模板;纳注射成型;模具温度;疏水特性

中图分类号:TQ320.66;TB383 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0165

Injection molding nanostructures by template method and their hydrophobic properties

ZHOU Ming-yong¹, JIANG Bing-yan¹, ZHANG Lu¹, LU Li-jun², WENG Can^{1*}

- (1. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China;
 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)
- * Corresponding author, E-mail: canweng@csu.edu.cn

Abstract: A method to prepare nanostructures based on injection molding was proposed by taking Anodic Aluminum Oxide (AAO) templates as the mold inserts. Mold temperatures, hydrophobic properties and service life of the mold inserts were studied. Firstly, the replication quality of the nanostructures under different mold temperatures was studied by comparing the morphologies and aspect ratios of three different AAO templates. Then, according to the hydrophobic property of a nano-array structure, the influences of structural characteristics and mold temperatures on the static contact angle were analyzed to explore the hydrophobicity in different regions of PC products. Finally, the macro/micro quality and service life of AAO templates were analyzed after injection molding process. The results indicate that the mold temperatures significantly affect the replication quality of

收稿日期:2014-07-30;修订日期:2014-08-21.

基金项目:国家自然科学基金重大项目(No. 91123012);国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51305465);中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2013zzts035)

nanostructures, which focuses on the molding heights of nanostructures. There are slight hydrophobic differences at different regions of injection molded parts. Compared to the PC products without nanostructures, the maximum contact angle increases by 31.5%, reaching to 108.2°. After 500 molding cycles or more, the AAO templates with low aspect ratios show good quality, while the defects in high aspect ratio AAO templates are quite obvious.

Key words: nanostructure; anodic aluminum oxide template; nano injection molding; mold temperature; hydrophobic property

1 引言

表面含纳米结构的聚合物制品因其结构的特殊性,在生物医药、化学检测、光电技术等领域有着巨大的市场潜力^[1-2]。引入表面纳米结构可使器件的工作性能得到进一步提升。其中,纳米结构的浸润性直接影响器件的固体表面特性。浸润性主要由材料的化学组成和表面几何结构决定^[1-3]。聚合物材料具有较低的自由能,只要对其表面微纳结构定型即可达到疏水甚至超疏水效果。由于聚合物良好的热加工性能,在制备方法上非常简洁和多样化,如应用最为广泛的注射成型、压印成型等模塑方法——聚合物在含特定结构的型腔中固化、定型,最终冷却分离,实现结构的复制^[4-6]。

纳注射成型可采用传统的注射方法制备具有纳米结构或特征功能区的宏观制品。当制品的特征结构尺寸缩小至纳米量级时,其成型技术和模芯制备方法等存在巨大差异。研究表明,在诸多参数中,模具温度的影响最大,需略高于材料的玻璃化转变温度,过低的模温将会导致熔体迅速冷却,形成一定厚度的冷凝层,阻碍纳米结构的有效充填^[7-9]。如今,电子束光刻技术已成为纳结构模芯最主要的加工方法^[9-10],但其成本昂贵,难以实现大面积纳米结构的高效加工,因此迫切需要寻找一种更为廉价、一致性好的纳结构模芯制备方法。

自 Masuda 等^[11]在 1995 年提出阳极氧化铝(Anodic Aluminum Oxide, AAO)的制备方法后,AAO 模板越来越多地被用于制备各种纳米材料和光电器件^[12-13]。AAO 模板是一种自组装的六角纳米孔阵列结构,一致性较好,制备工艺简单且成本极低。同时,其特征尺寸(如形貌、孔径、

孔深以及孔间距等)可通过控制参数进行调整^[14-15]。有研究者对 AAO 模板压印、注射成型中的应用进行了初步探索。Miikkulainen^[16]等采用原子层沉积来控制 AAO 模板的孔径,并以此为模芯进行纳米结构注射成型的初步尝试。Yoo 等^[17]研究了不同模温下 AAO 模板的注射成型复制质量和制品表面的疏水特性,但纳米结构的成型质量一般,不同模温下纳米结构的复制程度差异并不明显。Park 等^[18]研究了半球形 AAO 模板的制备过程,并利用电铸技术实现了纳米结构的复制,探索电铸镍模芯的热压印和注射成型过程。林训良等^[19]以商业化的 AAO 为模板,采用热压-剥离技术制备了超疏水聚丙烯薄膜,进一步证实了采用 AAO 模板压印、注射成型纳米结构的可行性。

本文以 3 种不同形貌和深宽比的 AAO 模板为模芯,采用注射成型方法制备纳米结构,研究了模具温度对纳米柱复制质量的影响规律。针对纳米阵列结构的疏水特性,分析了结构特征和模具温度对制品静态接触角的影响,深入研究了纳注射成型过程中聚碳酸酯(PC)制品不同区域内疏水特性的影响,分析 AAO 模板的质量与使用寿命,为下一步研究提供了基础。

2 实验

2.1 模芯制备

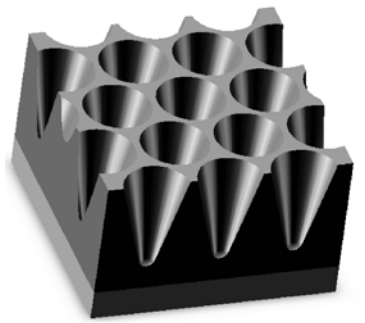
采用 AAO 模板作为纳注射成型的模芯,模芯整体尺寸为 25.0 mm × 25.0 mm × 0.3 mm。模芯背面进行了抛光处理,以保证模芯的平整度,避免注射过程中可能出现的应力集中等问题。选用 3 种不同特征尺寸的 AAO 模板进行注射成型实验,具体特征参数如表 1 所示。

表 1 AAO 模板的特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of AAO template

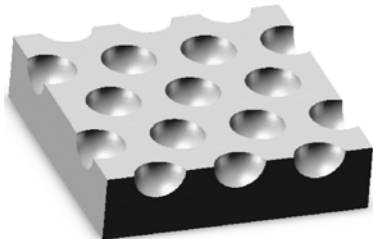
结构特征	(等效) 直径/nm	深宽比	孔间距/nm
模板 a V 形孔	顶端:360 底端:100	1.5 : 1	400~450
模板 b 半球形孔	80	1 : 2	100~120
模板 c 圆柱形孔	80	略大于 3 : 1	100~120

3 种 AAO 模板的几何特征结构如图 1 所示。V 形孔结构和圆柱形孔结构均为二次氧化后的氧化铝层,而半球形孔结构为去除氧化铝层后的铝基层层。



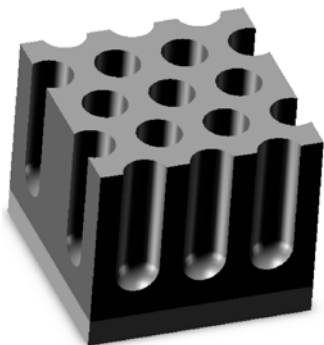
(a) V 形孔结构

(a) V-shaped structure



(b) 半球形孔结构

(b) Hemispherical structure



(c) 圆柱形孔结构

(c) Cylindrical structure

图 1 3 种 AAO 模板的几何结构

Fig. 1 Geometry structures of three different AAO templates

2.2 实验方法

注射机为 Sodick LD05EH2 微型注塑机,柱塞直径为 12 mm,最大注射压力可达 197 MPa,成型参数控制精确。根据成型设备和制件特点,设计制造可实现模具温度动态调节的注射成型模具。实验材料为拜耳的 PC 2865,材料的熔体流动速率(MVR)为 $9.5 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$,玻璃化转变温度(T_g)为 148°C 。

采用电加热方式调节注射过程中的模具温度(分别为 80,100,120,140 和 160°C),实现模具温度的动态变化。其余主要成型工艺参数如表 2 所示。

表 2 注射成型的主要工艺参数

Tab. 2 Major processing parameters in injection molding

工艺参数	熔体温度/ $^\circ\text{C}$	注射速率/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	保压压力/MPa	保压时间/s	冷却时间/s
数值	300	159	120	5	40

成型过程中,当制件无明显宏观缺陷,且速度压力波形曲线和最小缓冲量等指标基本一致时,即可认为成型质量达到稳定。待工艺稳定后,取连续三模为样品,进行后续检测分析。

2.3 表面形貌观测和性能分析

将样品先后置于自来水、无水乙醇和蒸馏水中进行超声波清洗,随后放入干燥箱中, 50°C 恒温条件下干燥 10 h。对样品进行喷金处理后,采用 TESCAN MIRA3 型场发射扫描电镜和 Veeco Dimension Icon 原子力显微镜(AFM)观测制件表面的微观形貌,测量结构尺寸。采用 JGW-360 型接触角测定仪观察其表面的疏水特性,并根据静滴法测量制件表面近浇口处(A点)、中心处(B点)和远浇口处(C点)3 个区域内的静态接触角,如图 2 所示。

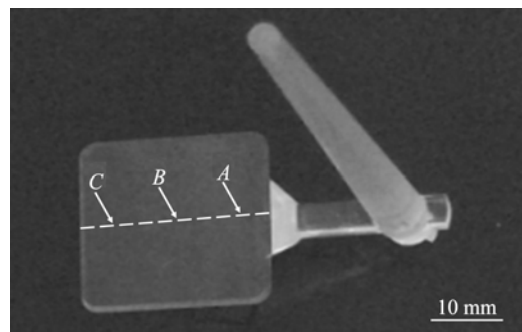


图 2 PC 制件的 3 个测量区域

Fig. 2 Three measurement regions of PC products

3 结果与分析

3.1 模具温度影响

V 形孔结构在不同模具温度下的注射成型复制质量如图 3 所示。随着模温的升高, V 形纳米结构的复制质量逐渐提升。当模具温度偏低 ($T_{\text{mold}} \leq 120^\circ\text{C}$) 时, PC 熔体在接触型腔表面后迅速冷却形成冷凝层, 导致充填受阻, 因此熔体只能充填至 V 形纳米结构的顶端部分。当模具温度为 140°C 时, 已接近 PC 材料的玻璃化转变温度 ($T_g, 148^\circ\text{C}$), 熔体冷却速率减慢, 此时纳米结构之间的间隙明显, 部分区域的纳米结构充填程度较为完好。而当模温为 160°C 时, V 形结构轮廓明显、棱角分明, 绝大部分的顶、底端结构层次清晰, 充填质量较为完整。这是由于在注射过程中熔体能保持在高弹态, 分子链的单键内旋转和链段运动增强, 此时的熔体具有良好的充填性能, 能够实现纳米结构的高质量复制。

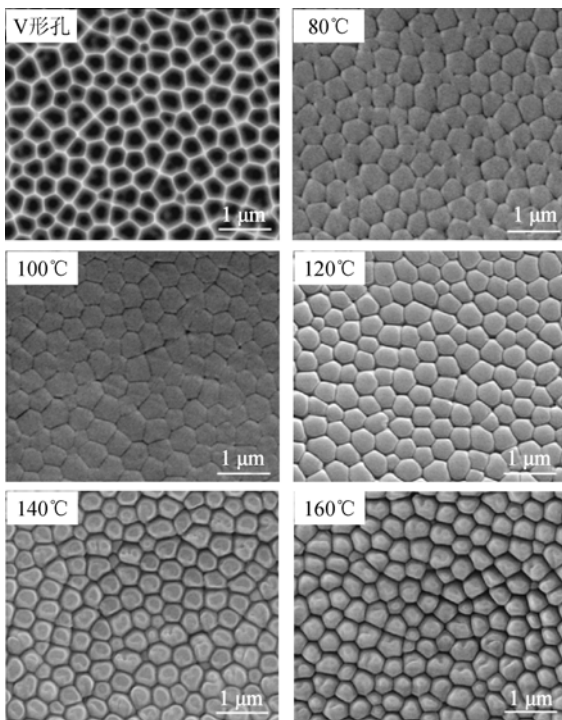


图 3 V 形孔结构及不同模温下注射成型纳米结构 SEM 图

Fig. 3 V-shaped structure and SEM images of injection molded nanostructure at different mold temperatures

半球形孔模板和圆柱形孔模板的结构更为微

小, 孔径尺寸仅为 80 nm 左右, 注射成型难度增大。不同模温下的纳米结构注射成型复制质量如图 4、5 所示。当模温为 80°C 时, PC 板表面的纳米结构依稀可见; 部分区域表面相对平坦, 未成型出纳米结构。对于半球形模板, 由于其深宽比较小 ($D/W=1:2$), 熔体充填难度相对较低。模温为 100°C 时, 复制质量有所提高, 但也基本停留在顶端结构的复制。当模温达到 120°C 时, 能基本充填满半球形纳米结构, 此后模具温度的升高对半球形纳米结构的复制质量的影响不明显, 纳米结构轮廓变化不大。

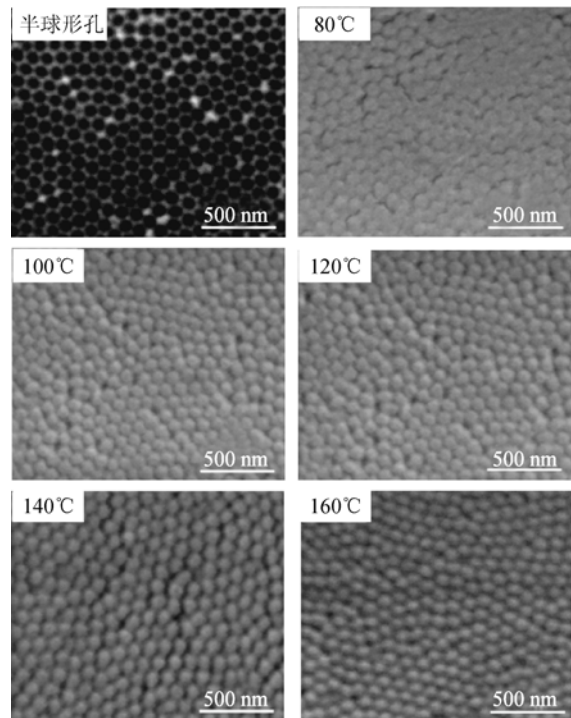


图 4 半球形孔结构及不同模温下注射成型纳米结构 SEM 图

Fig. 4 Hemispherical structure and SEM images of injection molded nanostructure at different mold temperatures

对于深宽比大于 $3:1$ 的纳米圆柱孔模板, 熔体充填难度显著增加。在模具温度低于 T_g 点时, 熔体急速冷却, 在纳米结构顶端便开始固化, 几乎无法充填至纳米圆柱孔深处。而当模具温度为 160°C 时, 纳米圆柱结构清晰可见, 圆柱的整体高度明显大于其余模温下成型的高度。随着成型结构复制程度的提高, 开模过程中模具的轻微晃动和脱模过程中纳米结构与多孔氧化铝层的摩擦

会使少量结构出现一定程度的倾斜、弯曲和缺失等现象,如图 5 所示。

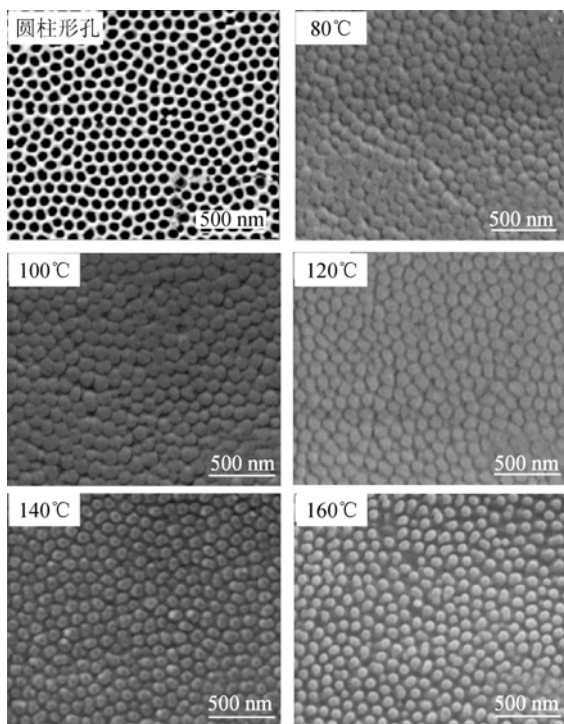


图 5 圆柱孔结构及不同模温下注射成型纳米结构 SEM 图

Fig. 5 Cylindrical structure and SEM images of injection molded nanostructure at different mold temperatures

为进一步验证模具温度对纳米结构复制质量的影响,采用 AFM 对成型的纳米结构高度逐一测量。对于 V 形孔模板,不同模温下注射成型纳米结构的成型高度如图 6 所示。

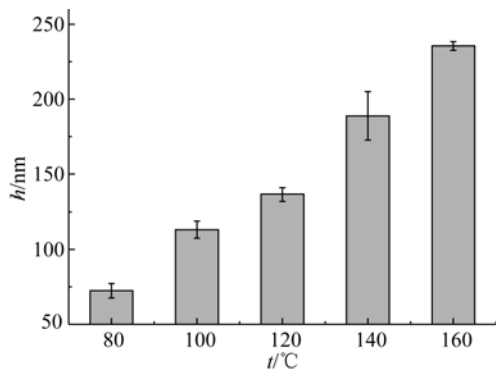


图 6 不同模温下纳米结构的成型高度

Fig. 6 Height of nanostructures at different mold temperatures

当模具温度为 80°C 时,纳米结构的平均高度仅为 72.4 nm,深宽比约为 1 : 5。随着模具温度的升高,纳米结构的高度呈现出逐步上升的趋势。当模具温度为 160°C 时,纳米结构高度达到了 235.5 nm,深宽比接近 2 : 3,但该高度仍低于纳米孔的深度。通过观察该温度下的纳米结构三维形貌(如图 7 所示),发现该结构较为规整、一致性好,顶端部分呈圆锥状,熔体已充填至纳米孔底端。由此表明,在 160°C 模温下,纳米结构已基本充填完毕,但由于纳米结构排布紧密,AFM 探针难以深入底部,从而导致测量的高度比实际值偏小。

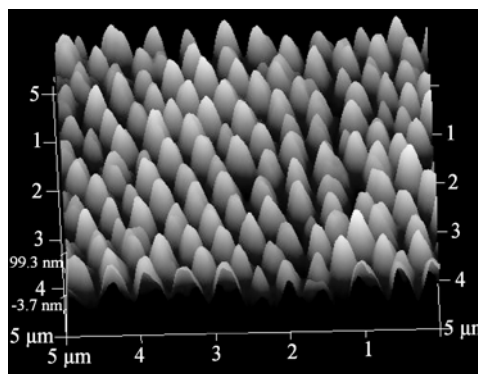


图 7 V 形纳米结构三维图

Fig. 7 Three dimensional image of V-shaped nanostructure

采用 AFM 测量其余两种结构高度特征时发现,由于纳米结构尺寸更小(80 nm 左右),结构排布更为紧密、间隙仅在 30 nm 左右,探针无法深入间隙深处。此外,高深宽比的纳米圆柱阵列结构在成型后存在一定程度的倾斜与弯曲。因此采用 AFM 测量的结构高度与实际情况有较大的偏差,难以表征测出不同温度下纳米结构的成型高度差异。

3.2 疏水特性分析

采用接触角测定仪分析制件表面的浸润特性。当微型注射器中的蒸馏水超过 6.5 μL 时,水滴会自然下落,难以真实反映固液分子间的相互作用,因此每次水滴体积定为 5 μL。待水滴接触制件 15 s 左右时,固液两相基本达到稳定,即可进行静态接触角的测量。

不同 AAO 模板下,注射成型制件表面的静态接触角如图 8 所示。表面无纳结构的 PC 平板呈亲水性,通过多次测量,制件表面的平均静态接触角为 82.3°。采用 AAO 模板注射成型的制件,

由于表面含纳米阵列结构,均呈现出一定的疏水特性。不同模板下,制件表面的静态接触角增长幅度不同,最大接触角可达 108.2° ,比平板制件提高了 31.5% 。静态接触角的提高,与表面几何结构相关。以 V 形结构为例,随着纳米结构的高宽比增大(从 $1:5 \sim 2:3$),制件表面的结构更为显著突出,从而导致液滴接触角变大。此外,结构的大小也会对接触角产生一定影响。

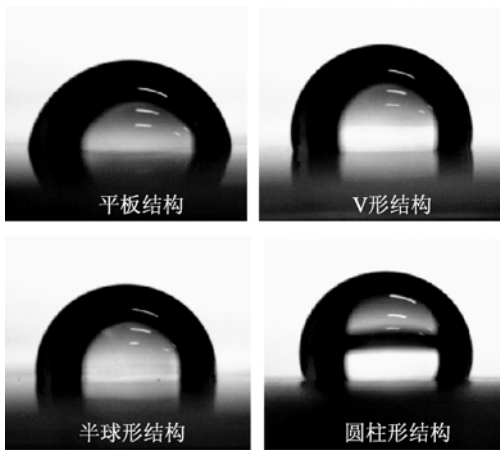


图 8 不同纳米结构下 PC 制件的接触角

Fig. 8 Contact angles of PC surface by different nano structures

3 种纳米结构在不同模温下 PC 制件的接触角如图 9 所示。V 形孔、圆柱形孔模板的注射成型制件随着模具温度提高,接触角逐渐增大。对于 V 形孔结构,当模温偏低时,接触角随模具温度稳步提高;当模具温度接近甚至超过材料的 T_g 温度时,部分区域的纳米结构充填程度较为完好,接触角明显增大至 98.7° ,并最终在 160°C 的模温下达到最大值(99.4°)。对于圆柱形孔结构而言,当模具温度低于 T_g 时,制件接触角均低于 V 形孔模板注射成型制件的接触角。这是因为熔体在低模温下几乎无法充填至纳米圆柱孔深处,导致成型的纳米圆柱结构高度过低。当模温为 160°C 时,纳米圆柱的整体成型高度明显增大,深宽比的提高使得接触角急剧增大至 106.6° 。而半球形孔结构由于其深宽比仅为 $1:2$,不同模温下纳米结构的注射成型复制质量差异不大,因此,其接触角始终在 $92.0 \sim 94.9^\circ$ 之间小幅度波动,模具温度对接触角的影响无明显变化趋势。

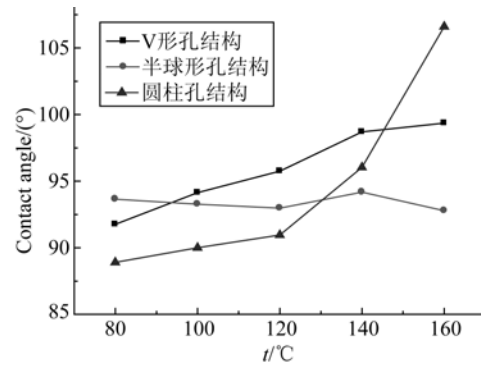


图 9 不同模温下 PC 制件的接触角

Fig. 9 Contact angles of PC parts under different mold temperatures

由上可知,模具温度对静态接触角的变化规律与模具温度对纳米结构复制质量的影响规律基本一致。可以采用测定静态接触角的方式间接表征纳米结构的复制程度。

V 形孔结构注射成型制件在近浇口处(A 点)、中心处(B 点)和远浇口处(C 点)3 个区域内的静态接触角随模具温度的变化趋势如图 10 所示。制件在不同区域内的接触角差异较小,最大差值仅有 3.2° ,表明纳米结构的复制程度较为一致,整体质量良好。除 160°C 模温下的中心处接触角之外,PC 制件的静态接触角均随着模具温度的升高而增大。制件在近浇口处的接触角略大于中心处和远浇口处,表明在注射成型过程中,优先实现近浇口处纳米结构的充填。究其原因,可能与熔体充填过程中的温度压力分布有关;且在保压阶段,近浇口处的纳结构更易实现二次充填。

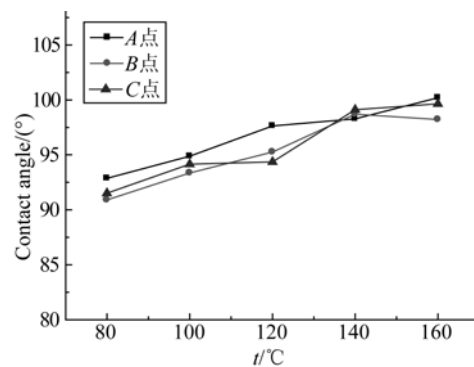


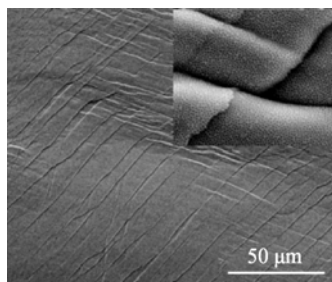
图 10 PC 制件不同区域内的接触角

Fig. 10 Contact angles of PC parts at different regions

3.3 模芯使用寿命

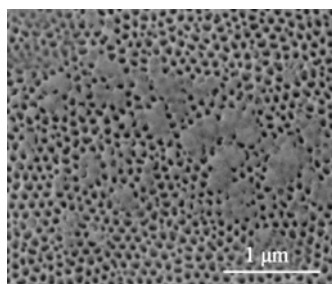
经过 500 余次的注射成型周期后,卸下 AAO 模板,观测其宏观质量。经过多次锁模、高速高压注射的冲击作用后,模芯中心区域表面平整,无明显划痕、裂纹等宏观缺陷,但模芯外侧存在一定程度的压延现象。这是由于铝的硬度相对偏低,且 AAO 模板厚度仅有 0.3 mm,在受到外力冲击下,极易出现压延、碾薄等。

通过扫描电镜观测 AAO 模板的微观质量。对于 V 形孔和半球形孔模板,由于深宽比小($D/W \leq 1:1.5$),氧化铝层和铝基底强度相对较高,在注射成型熔体的充填过程中,其纳米结构保持完好,极少存在聚合物残留等现象。而对于 80 nm 的圆柱孔模板,由于多孔氧化铝层与铝基底(高纯铝)的热导率相差较大倍,且纳米孔的深宽比大($D/W > 3:1$),多孔的氧化铝层强度较差,在数次注射后,模芯边缘部分出现氧化铝层位错、断层等现象,如图 11(a)所示。



(a) 位错和断层

(b) Dislocations and faults



(b) 聚合物黏模

(b) Polymer adhesion

图 11 AAO 模板的微观缺陷 SEM 图

Fig. 11 SEM images of microscopic defects in AAO template

由于高深宽比纳米孔结构的接触面积大,部分高分子聚合物在注射过程中会黏附在纳米孔内无法正常脱模,如图 11(b)所示。为保证模芯正

常工作,必须对其采取超声清洗、加热熔融剥离等措施,以确保纳米孔不被堵塞。

将 AAO 模板折弯呈 180° ,分析多孔氧化铝层的抗弯强度。通过观察折弯处的微观结构,发现由于铝有良好的延展性,铝基底未出现裂纹。基底表面的氧化铝层仍依附在铝基底上,但在折弯处出现了严重的断裂现象,氧化铝层沿着折弯方向存在许多裂纹,如图 12 所示。

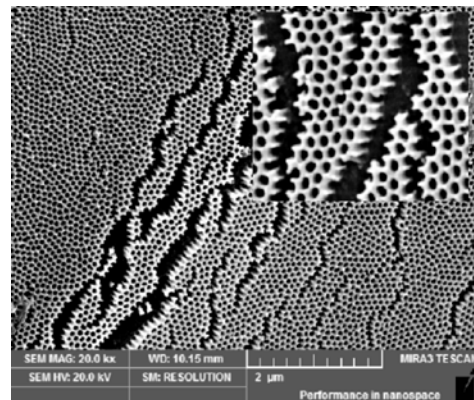


图 12 AAO 模板折弯处的 SEM 图

Fig. 12 SEM image in bending area of AAO template

上述缺陷都会大大降低模板的注射成型寿命。由此可见,AAO 模板可以作为纳注射成型的模芯,但其强度相对较低,使用寿命有限。尤其针对深宽比大于 $3:1$ 的模板,难以满足长时间的注射成型要求。因此,对于高深宽比的 AAO 模板,可以考虑采用电铸等方法实现高质量的纳米结构金属化转移,同时满足模芯的注射成型的高强度要求。

4 结 论

针对 AAO 制备简单、成本低廉且可大面积成型等优点,以 AAO 模板为模芯,采用注射成型方法对纳米结构的制备进行了研究。通过对比 3 种不同特征尺寸的 AAO 模板,研究了模具温度、几何结构对纳米柱复制质量和制件静态接触角的影响规律,并对 AAO 模板的使用寿命和质量进行了分析。研究表明:(1)AAO 模板结合注射成型可以实现表面纳米结构制件的批量化制备,其结构的疏水特性具有广阔的应用前景。(2)模具温度对纳米结构的注射成型复制质量有显著影

响,且主要体现在纳米结构的成型高度上。对于低深宽比的纳米结构,模具温度需接近材料的 T_g 点;对于深宽比大于 3:1 的纳米结构,模具温度需略高于 T_g 点。(3)表面纳米结构制件的疏水特性与表面几何结构有关。几何结构的深宽比越

大,疏水效果越好,最大静态接触角可达 108.2° ;静态接触角可间接表征纳米结构的复制程度。(4)多次注射后,低深宽比的 AAO 整体质量好,高深宽比的 AAO 模板使用寿命有限。下一步研究将围绕 AAO 模板的电铸过程进行开展。

参考文献:

- [1] FENG L, LI S, LI Y, *et al.*. Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial [J]. *Advanced Materials*, 2002, 14(24): 1857-1860.
- [2] 王景明, 王轲, 郑咏梅, 等. 荷叶表面纳米结构与浸润性的关系 [J]. *高等学校化学学报*, 2010, 31(8): 1596-1599.
WANG J M, WANG K, ZHENG Y M, *et al.*. Effects of chemical composition and nano-structures on the wetting behaviour of lotus leaves [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2010, 31(8): 1596-1599. (in Chinese)
- [3] YEO J, RYU J, LEE B K, *et al.*. Theoretical and experimental characterization of wettability of various nanolens arrayed polymer surfaces replicated with nanodimpled aluminum mold insert [J]. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(8-9): 1425-1430.
- [4] 蒋炳炎, 申瑞霞, 沈龙江, 等. 注射成型工艺参数对微结构零件复制度的影响 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2): 248-256.
JIANG B Y, SHEN R X, SHEN L J, *et al.*. Influence of processing parameters in injection molding on replication fidelity of microstructure parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 248-256. (in Chinese)
- [5] SCHIFT H. Nanoimprint lithography: an old story in modern times A review [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2008, 26(2): 458-480.
- [6] 徐征, 王继章, 吕治斌, 等. 工艺参数对平板微小器件注塑翘曲的影响 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1825-1830.
XU B, WANG J ZH, LV ZH B, *et al.*. Effect of processing parameters on warpage of flat micro-mini parts in injection molding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1825-1830. (in Chinese)
- [7] LIN H Y, CHANG C H, YOUNG W B. Experimental and analytical study on filling of nano structures in micro injection molding [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, 37(10): 1477-1486.
- [8] HATTORI S, NAGATO K, HAMAGUCHI T, *et al.*. Rapid injection molding of high-aspect-ratio nanostructures [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87(5): 1546-1549.
- [9] MATSCHUK M, LARSEN N B. Injection molding of high aspect ratio sub-100 nm nanostructures [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(2): 025003.
- [10] MIKKELSEN M B, LETAILLEUR A A, SONDERGARD E, *et al.*. All-silica nanofluidic devices for DNA-analysis fabricated by imprint of sol-gel silica with silicon stamp [J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(2): 262-267.
- [11] MASUDA H, FUKUDA K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina [J]. *Science*, 1995, 268(5216): 1466-1468.
- [12] 张铮, 徐智谋, 孙堂友, 等. 纳米压印多孔硅模板的研究 [J]. *物理学报*, 2014, 63(1): 18102-1-8.
ZHANG ZH, XU ZH M, SUN T Y, *et al.*. Study on porous silicon template for nanoimprint lithography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 18102-1-8. (in Chinese)
- [13] CHOI M K, YOON H, LEE K, *et al.*. Simple fabrication of asymmetric high-aspect-ratio polymer nanopillars by reusable AAO templates [J]. *Langmuir*, 2011, 27(6): 2132-2137.
- [14] HE T, ZHANG L, DENG W. Designing polystyrene honeycomb-like microstructure with high water adhesion [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 131(1): 23-26.
- [15] WANG J, ZHOU W, ZHANG J, *et al.*. High-fidelity replica molding for large-area PMMA 3D nanostructures with high performance surface-enhanced Raman scattering and hydrophobicity [J]. *Microelectronic Engineering*, 2014, 115: 2-5.
- [16] MIKKULAINEN V, RASILAINEN T, PUUKILAINEN E, *et al.*. Atomic layer deposition as pore diameter adjustment tool for nanoporous aluminum oxide injection molding masks [J]. *Langmuir*, 2008, 24(9): 4473-4477.

- [17] YOO Y E, KIM T H, CHOI D S, *et al.*. Injection molding of a nanostructured plate and measurement of its surface properties [J]. *Current Applied Physics*, 2009, 9(2): 12-18.
- [18] PARK J M. Fabrication of various nano-structured nickel stamps using anodic aluminum oxide [J]. *Microsystem Technologies*, 2014: 1-7.
- [19] 林训良, 庞易川, 冯杰. 微模塑技术制备聚丙烯超疏水表面 [J]. *广州化工*, 2013, 41(12): 112-113.
- LIN X L, PANG Y CH, FENG J. Fabricating Polypropylene Superhydrophobic Surface by Thermal Microreplica Molding [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2013, 41(12): 112-113. (in Chinese)

作者简介:



周明勇(1989—),男,湖南郴州人,博士研究生,2011年于中南大学获得学士学位,主要从事聚合物微纳注射成型方面的研究。E-mail: zmy_csu@163.com

通讯作者:



翁 灿(1982—),女,湖南长沙人,副教授,硕士生导师,2003年、2006年于中南大学获得学士、硕士学位,2010年于香港理工大学获得博士学位,主要从事高聚物微纳零件成型、光学零件精密加工等方面的研究, E-mail: canweng@csu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)