

铸造法制备 U 形孔的抽芯过程设计及改进

曹阳¹, 曲迎东¹, 李广龙¹, 张虹雨霁¹, 唐才宇²

(1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 沈阳鼓风机集团股份有限公司, 辽宁沈阳 110027)

摘要: 为实现利用铸造法制备模具随形冷却水道, 对采用抽芯法制备U形弯孔的过程进行了详细研究, 分析了U形弯孔各部分抽芯力的特点, 并建立了抽芯力模型。分析发现抽芯力为U形弯孔的两个直线部分和弯曲部分与孔壁基体间产生的最大静摩擦力, 抽芯力的大小严重制约着U形弯孔的总长度。为此本文将碳纤维孔芯材料拆分为三部分分别抽出, 实现分段式抽芯制备U形弯孔。利用分段式抽芯法制备的U形孔材料的圆整度和粗糙度较直接抽芯法没有明显变化, 而弯孔长度可以提升1.5倍以上。

关键词: 铸造; 随形冷却水道; U形孔; 抽芯力

在注塑及冲压等领域, 弯孔被广泛用作模具的冷却通道, 其具有改善成形工艺、降低模具温度和缩短冷却时间等优点^[1-3]。随着装备制造业的不断发展, 对模具中冷却水道的形状和位置也提出了更高的要求, 为此随形冷却水道的制备成为了各国学者的关注对象。

近年来随着制备技术的不断发展, 大量制孔新工艺被不断提出。姚荣^[4]通过预埋钢管的方式实现了在铸件中弯孔的制备, 但是该方式制得的孔径较大, 受预埋管的影响, 模具壁厚等无用部分也将增大。Dang等^[5]提出将带有水槽的模具块连接成一体的方式在模具中制备随形弯孔, 但该工艺在使用过程中易引起漏水问题。赵葛霄等^[6]通过控制磁场的强度, 使真空中高速移动的电子束在磁场中发生偏转, 从而使电子束在工件内部形成曲率的轨迹实现细弯孔的制备, 但该加工方式产生的大温度梯度会引起内部较大残余应力的产生。杨军等^[7]利用3D打印技术制备了带有随型冷却水道的模具镶嵌件, 从而解决了电机壳体浇口位置易产生粘模缺陷的问题。虽然, 3D打印是近年来制备高精度随形弯孔最有效的工艺, 但是该种工艺制造模具周期较长, 而且价格较为昂贵, 在经济效益上限制了其在工业上的广泛应用。综上所述, 在现代制孔行业中, 钻孔工艺因加工方式受到限制很难制备出理想的规则弯曲孔结构, 电子束加工、3D打印等加工方式因加工受限、成本过高等问题同样制约着弯曲冷却通道在模具中的应用。

随着科技的不断进步, 碳纤维的出现为铸造法制备随形弯孔提供了新的契机。这种材料具有3.5 GPa以上的强度, 极高的化学稳定性(1 773 K以下几乎不发生化学反应)和与铝、铜、铁等金属润湿性差、不易粘连的特点, 为利用铸造法制备随形弯孔提供了可用的新型孔芯材料。本课题组在前期研究过程中, 不但以碳纤维为孔芯, 利用铸造的方式制备出了长径比可达1 800的单孔, 而且制备出了孔径为2 mm、长为70 mm的半圆弯孔^[8-11]。但是前期研究结果发现, 从U型孔芯的一端进行抽芯制备U形弯孔时, 弯曲部分的孔芯滑动摩擦力相对较大, 当金属型中孔的长度较长的情况下, 难以使孔芯材料顺利被抽出, 易造成孔芯被“抽断”的现象^[12]。为此, 本文将对利用“铸造抽芯法”制备U形孔的工艺过程进行分析, 并建立抽芯阻力模型, 为利用铸造法制备模具随形冷却水路奠定坚实的理论基础。

作者简介:

曹阳(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为大长径比孔加工工艺。E-mail: caoyang0722bryant@163.com

通讯作者:

曲迎东, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 13889375206, E-mail: quyingdong@163.com

中图分类号: TG244

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

02-0190-04

基金项目:

国家自然科学基金(51775353)

收稿日期:

2021-04-08 收到初稿,

2021-05-20 收到修订稿。

1 试验过程及方法

基体材料为Al-12Si合金，孔芯材料为T300型碳纤维、外径为1.5 mm的不锈钢金属管、直径为1 mm的金属软丝。

利用直接抽芯法制备U形孔材料所选用的预制体是将碳纤维均匀缠绕在柔性金属丝外，从而获得直径2 mm的碳纤维孔芯材料，用于铸造过程中直接抽孔。整体抽芯的过程中可能导致抽芯力过大，孔芯无法顺利抽出，通过对孔芯材料的改进，提出利用分段式抽芯法制备U形孔材料，其设计方法如下。

将U形孔芯两个直线部分与弯曲部分拆分开，如图1所示，在竖直区域将碳纤维缠绕在金属管外围，获得外径为2 mm的碳纤维-金属管孔芯材料；在弯曲部分仍采用将碳纤维缠绕在半圆形金属丝外围的方式，获得外径为2 mm的碳纤维-金属丝孔芯材料，而后将金属丝插入到金属管内，获得可分段抽出的孔芯材料，利用此方法制备出的孔芯材料可从基体中分段拔出。

制备过程如图2所示，将碳纤维抽芯孔材料预制体固定于浇注型腔内的预制体架上，以防止因金属液的冲击导致孔芯形状发生改变。在浇注前将预制体及预制体支架放置于金属型模具的型腔里，并通过加热棒对其进行预热，预热温度为300 ℃。待合金进行完除气、除渣，并在775 ℃保温0.5 h后进行浇注。待基体成形冷却后，便可将碳纤维孔芯材料从基体中抽出，实现利用铸造抽芯法制备U形弯孔。

经线切割加工后得到U形孔的纵向截面，利用型号为OLS4100型的3D激光共聚焦电镜对U型孔形貌进行观



图1 分段式碳纤维孔芯材料

Fig. 1 Segmented carbon fiber core material

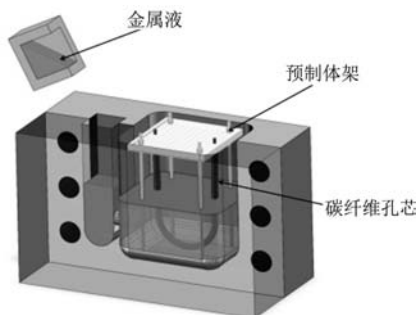


图2 浇注过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the pouring process

测，并进行直径及粗糙度的测量。

2 试验结果与分析

利用碳纤维与铝金属液的浸润性差这一特点，可以保证碳纤维孔芯预制体不会与基体发生反应，从而实现抽芯法U形孔的制备。抽芯过程中碳纤维孔芯材料会与基体发生相对滑动，滑动过程中孔芯材料与孔壁基体间会产生静摩擦力，此时所需的最大静摩擦力被称为抽芯力。抽芯力的大小主要由碳纤维孔芯材料在基体中的长度来决定的，采用原始的直接抽芯法制备U型孔材料，实验发现最长可制备出孔径为2 mm、直径为35 mm，总长为70 mm的半圆弯孔，U形孔的长度受到极大限制，这将对模具内冷却水道的开发应用产生严重制约。

利用直接抽芯法制备U形孔材料，其最大抽芯力为U形孔芯材料的直线部分及弯曲线部分与孔壁之和，分别对其进行研究如下：

对于直线部分来说，抽芯力的大小可依据胡克定律进行计算，如下公式所示：

$$F_L = \mu_m \cdot F_N \quad (1)$$

式中： F_N 为孔芯材料所受的正压力； μ_m 为摩擦系数。对于上式中的摩擦系数主要由孔壁表面的粗糙度决定，根据Lee等^[13]研究发现，粗糙度与摩擦系数之间的关系为：

$$\mu_m = 0.24R^2a - 0.246Ra + 0.252 \quad (2)$$

式中： Ra 为U型孔壁粗糙度。本文通过实际测量获得U形孔壁粗糙度。图3为利用铸造抽芯法制备的U形弯孔材料利用激光共聚焦显微镜观察到的三维形貌图，发现孔壁形貌规整，通过测试不同部位的孔壁粗糙度获得平均粗糙度 Ra 的值为77.324 μm 。

熔体在凝固阶段会产生凝固收缩力，当冷却成形后形成了碳纤维孔芯表面与基体之间接触面的正压为 F_N ，其表达式如下：

$$F_N = \sigma_z \cdot S \quad (3)$$

式中： σ_z 为孔芯与基体界面上的正应力； S 为孔芯与孔壁之间接触面的面积。

当高温熔体从接触孔芯表面到冷却成形的过程中，合金的凝固收缩及碳纤维孔芯在温度变化时的膨胀与收缩是导致接触面处存在应力的主要原因，在不同的影响因素下，正应力的计算应满足如下公式：

$$\sigma_z = E_F \cdot \alpha_F \cdot \Delta T \quad (4)$$

式中： E_F 为碳纤维的弹性模量，本文中 E_F 的值为230 GPa； α_F 为碳纤维线膨胀系数，本文中取 α_F 为 $-0.41 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； ΔT 为凝固抽芯时温度 T_0 与浇注温度 T 之差，本试验抽芯在室温下进行，故 T_0 值为20 ℃。本试验中孔芯材料为碳纤维均匀的缠绕金属丝，直线部分的孔轮廓近似于圆柱体，故接触面面积可表示为：

$$S = \pi d_m l \quad (5)$$

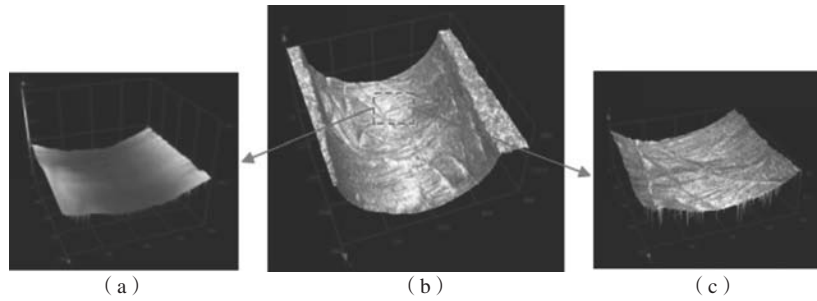


图3 孔壁形貌

Fig. 3 Morphologies of the pore walls

式中： d_m 为碳纤维孔芯材料直径， l 为孔芯材料直线处距离。

综上可知，直线部分的抽芯力大小主要由接触面的摩擦因子、正应力以及接触面积因素影响，故直线部分的抽芯阻力 F_L 表达式为：

$$F_L = \mu_m \cdot E_F \cdot \alpha_F (T_0 - T) \cdot \pi dl \quad (6)$$

对于U型孔材料的弯曲部分，计算抽芯力的方式与直孔不同，孔芯材料在曲面相对运动时，胡克定律不适用于建立抽芯阻力模型，因此需要对弯曲孔部分划分成微区间计算。此外，试验孔芯材料为柔性金属丝，抽芯时使其发生形变的力可以忽略不计，故按照如图4所示对每个区间内的曲线进行分析，通过创建叠加微积分模型可实现弯曲孔芯部分最小抽芯力的计算。

U型孔弯曲部分每个微区内抽芯力 ΔF 可以表示为：

$$\Delta F = f = \mu_m F_N \cos \theta + F_N \sin \theta \quad (7)$$

式中： f 为摩擦力， μ_m 为弯孔孔壁的摩擦因数， θ 为弯曲区间对应的角度。其中，每个微区间内的抽芯阻力可以表示为：

$$df = \pi \sigma_z R d (\mu \cos \theta + \sin \theta) d\theta \quad (8)$$

式中： σ_z 为孔芯与基体界面上的正应力， R 为弯曲部分对应的半径。

将整个半圆范围内的微区间的抽芯阻力累加，即可得到弯曲孔芯部分的最小抽芯力，其表达式如下：

$$F_c = \int_0^\pi \pi E a R d (T_0 - T) (\mu \cos \theta + \sin \theta) d\theta \quad (9)$$

由上可知，利用直接抽芯法制备U形孔材料，在抽芯过程中抽芯力由三部分组成，分别为两个直线部分的抽芯阻力 F_L 与弯曲部分的抽芯阻力 F_c 。虽然在前期实验中可利用铸造抽芯法实现U形孔材料的制备，但是若孔的距离过长很难将孔芯材料全部顺利拔出，甚至出现孔芯材料被抽断的现象。

通过前文对抽芯过程的分析发现，若要减小抽芯阻力将降低孔芯材料不能被顺利抽出的风险。为此，本文将孔芯材料直线部分和弯曲部分采用分段式的方式从基体中抽出，具体方式如实验部分所介绍，利用分段式抽芯法制备出的U形孔，如图5所示。利用分段式抽芯法可制备出孔径为2 mm，直径为20 mm，总长为180 mm的U形孔，较直接抽芯法制备的U形孔的总长

度提升了1.5倍。

从图5中可以看到，利用分段式抽芯法制备出的U形孔孔径依然十分均匀，通过对直线部分和弯曲部分的进一步观察也可发现孔壁十分均匀，并没有因为分段式抽芯方法的采用导致孔壁形貌发生改变。此外，粗糙度是影响制孔质量的又一关键因素，本研究对直线区域及弯孔区域进行粗糙度测试发现各部分孔壁粗糙度并没有明显不同，同时与直接抽芯法制备的U形孔

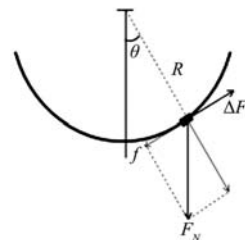


图4 U型孔弯曲部分微区内受力分析

Fig. 4 Analysis of the force in the micro zone of the curved part of the U-shaped hole

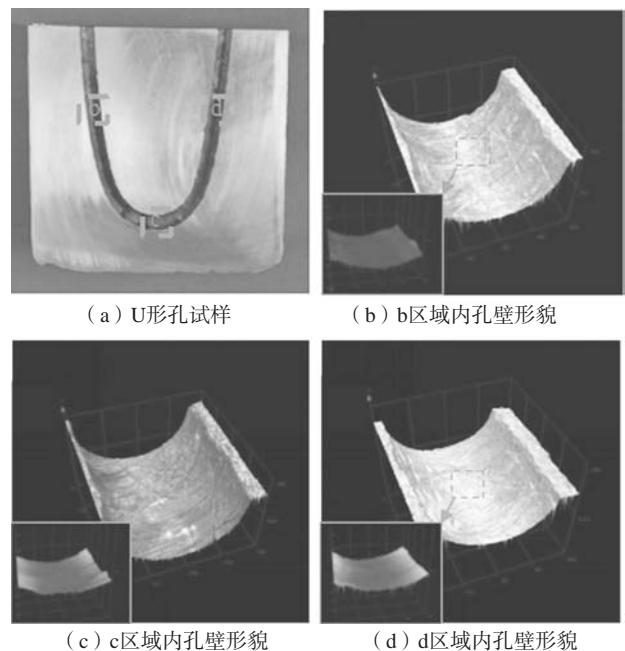


图5 分段式抽芯法制备U形孔材料的形貌

Fig. 5 Morphologies of the U-shaped hole prepared by the segmented core-pulling

材料的粗糙度相近。因此,通过分段式抽芯法的改进可实现铸造法制孔长度的提升,本研究将为利用铸造法制备模具随型冷却水道的研发与应用提供重要的理论基础与技术实践。

3 结论

(1) 通过将孔芯结构优化为分段式U形孔芯,在铸造抽芯工艺下成功制备出孔径为2 mm,直径为20 mm,

总长为180 mm的U形孔。

(2) 对抽芯过程中孔芯材料的受力进行分析,在抽芯过程中抽芯力由三部分组成,分别为两个直线部分的抽芯阻力与弯曲部分的抽芯阻力,并分别对U型孔的直线及曲线部分建立了抽芯力模型。

(3) 采用分段式抽芯法制备U型孔材料,在圆整度和粗糙度较直接抽芯法未降低的前提下,孔长度提升1.5倍以上。

参考文献:

- [1] EKMEKCI B, SAYAR A, TECELLI ÖPÖZ T, et al. Characteristics of surface damage in micro electric discharge machining of micro holes [J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 83-86: 688-695.
- [2] RAJURKAR K P, LEVY G, MALSHE A, et al. Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2006, 55 (2): 643-666.
- [3] BHATTACHARYYA B, MUNDA J, MALAPATI M. Advancement in electrochemical micro-machining [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44 (15): 1577-1589.
- [4] 姚荣. 铸钢件细长弯孔和细长多孔的铸造 [J]. *现代机械*, 1998 (2): 56-57.
- [5] DANG X P, PARK H S. Design of U-shape milled groove conformal cooling channels for plastic injection mold [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2011, 12 (1): 73-84.
- [6] 赵葛霄, 黄玉辉. 电子束加工技术在微细弯孔加工中的应用研究 [J]. *电加工与模具*, 2000 (6): 28-29.
- [7] 杨军, 张正来, 凌支援, 等. 3D打印在新能源汽车电机壳体预防粘模上的应用 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41 (1): 127-129.
- [8] QU Y D, JIN M L, QIN G, et al. Ultra-long pore fabrication process by pulling-casting in aluminum alloy [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, 29 (10): 1205-1209.
- [9] QIN G, QU Y D, JIN M L, et al. Preparation of ultra-high aspect ratio micro holes by casting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 217: 144-147.
- [10] QU Y D, JIN M L, LI R D, et al. Casting of micro- to macroholes in Al components [J]. *Materials Science & Technology*, 2014, 30 (7): 827-831.
- [11] QIN G, QU Y D, JIN M L, et al. Preparation of U-shaped curved holes by a casting method [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86 (1): 129-132.
- [12] 金美玲, 曲迎东, 李荣德, 等. 纯铝中铸造大长径比阵列细孔孔芯抽芯力的研究 [J]. *铸造*, 2018, 67 (5): 377-381.
- [13] LEE B H, KEUM Y T, WAGONER R H. Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 130 (2): 60-63.

Design and Improvement of Core-Pulling Process of U-Shaped Hole Prepared by Casting Method

CAO Yang¹, QU Ying-dong¹, LI Guang-long¹, ZHANG Hong-yu-ji¹, TANG Cai-yu²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China; 2. Shenyang Blower Works Group Corporation, Shenyang 110027, Liaoning, China)

Abstract:

In order to realize the use of casting method to prepare follow-up cooling channel, this paper has carried out a detailed study on the process of preparing U-shaped curved hole by casting core-pulling method, analyzed the characteristics of the core-pulling force of each part of the U-shaped curved hole, and established the core-pulling force model. The analysis found that the core pulling force was the maximum static friction between the two straight part and the curved part of the U-shaped curved hole and the hole wall matrix, and the size of the core pulling force seriously restricted the total length of the U-shaped curved hole. For this reason, this paper split the carbon fiber core material into three parts and extracted them separately to realize the segmented core pulling to prepare the U-shaped curved hole. The roundness and roughness of the U-shaped hole material prepared by the segmented core-pulling method had no significant change compared with those of the direct core-pulling method, and the length of the curved hole was increased by more than 1.5 times.

Key words:

casting; follow-type cooling water channel; U-shaped hole; core-pulling force