

DOI: 10.7652/xjtuxb201412019

泡沫铜冷却通道对铸造模具冷却的影响

杨德志, 董梦龙, 卢新伟, 周照耀
(华南理工大学机械与汽车工程学院, 510640, 广州)

摘要: 为了在冷却通道内插入泡沫铜强化冷却高温铸造模具,建立了模拟高温铸造模具冷却的实验系统,研究了不同流量下泡沫铜通道和空通道的模具冷却情况。结果表明,当冷却水体积流量分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 m³/h 时,使用泡沫铜通道冷却 80 s 后,模具同一位置的温度比空通道冷却分别低 16.2、19.3、23.5 和 29.4℃,冷却排出热流量较空通道分别高 414、581、659 和 660 W;随着流量增加,使用泡沫铜通道的模具同一位置温度降低、局部温度梯度和热流密度增大,说明冷却通道内插入泡沫铜能够实现铸造模具的快速冷却,并可望用于顺序凝固温度控制。

关键词: 泡沫铜;强化换热;铸造模具;冷却;温度

中图分类号: TG244 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)12-0120-06

Effect of Copper Foam Inserted in Cooling Channel on Casting Mold Cooling

YANG Dezhi, DONG Menglong, LU Xinwei, ZHOU Zhaoyao
(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To enhance cooling of high temperature casting mold by porous copper foam inserted in cooling channel, an experimental system simulating the cooling process of high temperature casting mold was constructed, where porous copper foam was inserted into the cooling channel. Taking four flow rates, 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4 m³/h of cooling water, after 80 s of cooling time, the temperature at the same position of mold with insert gets 16.2, 19.3, 23.5 and 29.4℃ lower than that of mold without insert, and the heat flow rate is 414, 581, 659 and 660 W higher, respectively. When the flow rate increases, the temperature at the same position of the mold with insert decreases while the local temperature gradient and the heat flux increase. It is shown that the copper foam inserted in cooling channel of casting mold facilitates rapid cooling and sequential solidification temperature controlling.

Keywords: copper foam; heat transfer enhancement; casting mold; cooling; temperature

压铸模由于在高温、高压的环境下使用,被压入金属液后吸收铸件显热和凝固潜热,在极短时间内模具温度上升,通常设置有冷却通道冷却大中型模具,以防止模具温度过高而产生粘模、拉伤及粘铝等问题。同时,采用冷却通道冷却模具可以缩短铸件冷却时间,控制模具局部温度,提高铸件质量,有效

延长模具寿命^[1-2]。在生产中,有的铸件局部地方需要快速冷却,然而现有的压铸模具冷却通道一般是通过钻削加工而成的内壁光滑通孔,由于壁面的水、油或空气对流换热系数有限,冷却工质从模具带走的热量有限,冷却效率较低。因此,寻求一种壁面对流换热系数高的强化换热冷却管道是快速高效冷却

收稿日期: 2014-03-27。 作者简介: 杨德志(1985—),男,博士生;周照耀(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家发展改革委员会专项资金资助项目(ChinaGrid2011636);粤港关键领域重点突破资助项目(2009Z001)。

网络出版时间: 2014-10-23 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20141023.1634.007.html>

模具的关键。

铜、铝等多孔金属材料由于骨架本身具有较大的比表面积、高热导率等特点,利用其进行对流换热时,多孔金属骨架可以增大对流换热的接触面积,促进流体的混合,增加流道内部的有效导热系数,进而提高冷却管道壁面的对流换热系数^[3-4]。因此,多孔泡沫金属材料在紧凑型换热器、热机致冷器、微电子器件冷却等方面应用前景广阔^[5-6]。一些学者对流体通过泡沫金属的流动换热性能进行了大量研究。文献[7-8]研究表明泡沫铜可以极大地提高换热器的换热系数。文献[9-10]以水为工质研究了其流过泡沫铝的压降和传热性能,指出泡沫金属热交换器比正在使用的商业热交换器有更好的传热性能。文献[11]指出孔径和孔隙率对填充有高孔隙率开孔泡沫金属管的对流强化换热性能影响很大。文献[12]研究了去离子水在超轻多孔泡沫铜中流动时的流动和换热特性,表明泡沫铜能够显著强化对流换热,能够有效地降低通道的壁面温度,随着流速的增大,其换热效果增大。文献[13]对空气在金属泡沫管内的强制对流换热进行了二维数值模拟及实验验证,得出金属泡沫管的强化换热效果十分明显,但其压降远大于光管的结论。文献[14]研究了空气流过镍、铜材料泡沫金属结构的对流换热性能,相对空槽道,在相同的实验条件下,镍、铜材料的泡沫金属结构分别使空气的对流换热系数增加了 9~11 倍和 10~12 倍。文献[15]表明金属泡沫结构很大程度地增强了对流换热,气体流速的增加有利于强化换热。

如上所述,铜、铝等多孔金属材料可以极大地强化对流换热。目前,尚未见铸造模具冷却通道内插入泡沫铜通以冷却水强化冷却模具的报道。本文搭建了模拟高温铸造模具冷却的实验系统,通以不同流量冷却水冷却高温模具,以对比分析不同流量下插入泡沫铜的冷却通道和不插入泡沫铜的空通道对模具冷却和热传递的影响。

1 实验装置、实验方法和数据处理

1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示,由模具加热部分、模具冷却部分和温度数据采集部分构成。模具加热部分由电压电流表监控的稳压器输出 220 V 恒压电源,提供给远红外线加热管加热模具,加热控制开关用于控制加热管瞬间通断。模具冷却部分中的进水为 17℃ 左右自来水,手动阀调节流量,LWY-15 智能型涡轮数显流量计监控水的体积流量,用电磁阀控

制进入模具冷却通断内水的瞬间通断,冷却水通过模具冷却通道后排放至外界环境中。布置在模具位置 1 到位置 4 上的 K 型热电偶采集温度数据,并连接到 NI USB9162 温度数据采集卡上,计算机与数据采集卡连接,该部分用于监控和记录温度数据。Cr12 材质的模具如图 2 所示,其总体尺寸为 125 mm×90 mm×50 mm。模具上方钻有两个直径为 15 mm 的加热孔,每个孔内安装外径为 12 mm、功率为 400 W 的远红外线加热管。模具底部中间位置钻有直径为 10 mm 的冷却孔,进出口通过卡套式铜接头和外部的铜管连接。模具对称面上钻有 4 个外径为 2 mm 的热电偶孔,位置 1 和冷却通道最上端壁面 Z 方向距离为 10 mm,位置 1 到位置 4 从下到上以 10 mm 间距排列。每个热电偶孔内安装外径为 2 mm、最高可耐 1 000℃ 的 K 型铠装热电偶,用以监测模具局部温度。整个模具用耐高温保温棉包裹隔热保温。采用线切割加工而成的圆柱状开孔性泡沫铜用于插入模具冷却通道内强化换热,其几何尺寸为 $\Phi 10\text{ mm}\times 115\text{ mm}$,孔隙率为 0.95,孔径平均值为 2.27 mm,泡沫铜微观照片如图 3 所示。

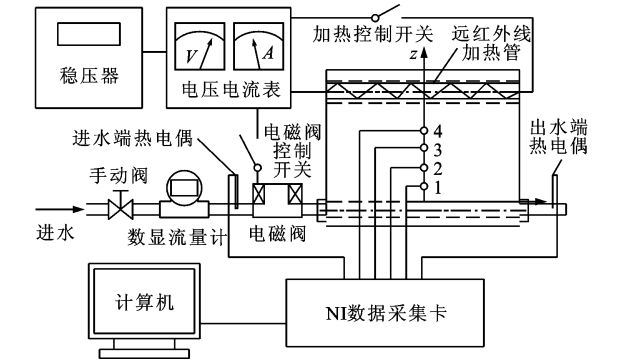


图 1 实验系统图

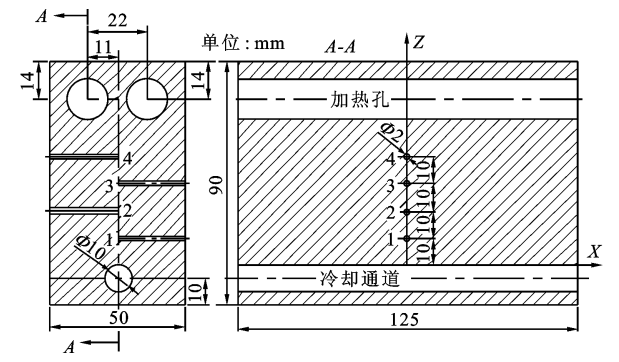


图 2 模具剖面图

1.2 实验方法和数据处理

实验中将体积流量分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 m³/h 的冷却水瞬间通入泡沫铜冷却通道或空通道的高温模具中,以分析不同流量下泡沫铜冷却

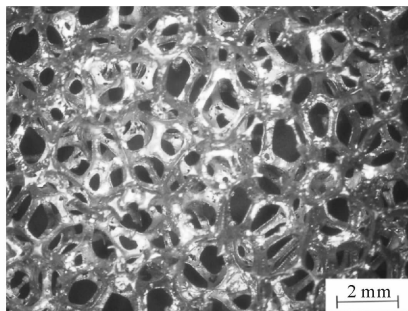


图3 泡沫铜微观照片

通道相对于空通道对模具冷却的影响。每组实验模具的初始温度均为室温下的状态。先将稳压器电压调节到 220 V, 加热模具, 待模具位置 1 加热到 514 °C 时, 关闭加热控制开关, 同时打开冷却水道的电磁阀控制开关, 使得预先调节好流量的冷却水流入模具冷却通道内冷却高温模具。

温度数据采集部分每隔 1 s 采集数据, 对采集的模具监测点温度和模具进出口水温度进行数据处理。 T_1 、 T_2 分别表示位置 1、位置 2 上热电偶采集的温度数据, 位置 1 和位置 2 Z 方向上温度梯度为

$$\text{grad}T_{21} = (T_2 - T_1)/\Delta z_{21}$$

式中: Δz_{21} 为 Z 方向上位置 2 和位置 1 之间的距离, 为 0.01 m。

利用傅里叶定律可以计算位置 1 和位置 2 在 Z 方向上局部热流密度

$$q''_{21} = -k \text{grad}T_{21} = -k \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta z_{21}} \quad (1)$$

式中: q''_{21} 为 Z 方向的热流密度, W/m^2 ; 负号表示热能温度高的位置向温度低的位置传输; k 为 Cr12 模具材料的热导率, 为 31 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。由式(1)可见, q''_{21} 是正比于 $\text{grad}T_{21}$ 的函数。

出水带走热流量为

$$q_{\text{out}}(t) = \dot{m}c(T_{\text{out}}(t) - T_{\text{in}}(t)) = \rho \dot{V}c(T_{\text{out}}(t) - T_{\text{in}}(t)) \quad (2)$$

式中: $q_{\text{out}}(t)$ 为 t 时刻出水带走热流量, W ; $\dot{m}$ 为冷却水质量流量, kg/s ; c 为水的比热容, 其值为 $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; $\dot{V}$ 为冷却水体积流量, m^3/h ; ρ 为水的密度, 其值为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$; $T_{\text{out}}(t)$ 为模具冷却通道出口端温度, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{in}}(t)$ 为模具冷却通道进口端温度, $^\circ\text{C}$ 。由式(2)可知, 当体积流量一定时, $q_{\text{out}}(t)$ 是正比于进出口温度差值的函数。

2 实验结果与分析

2.1 泡沫铜冷却通道对模具局部温度的影响

当体积流量为 0.4 m^3/h 时, 模具位置 1 到位置

4 的温度随时间变化见图 4。由于模具的加热源在上端, 热量向模具底部传输, 在 0 时刻, 位置 4 到位置 1 温度逐渐减低。各位置的温度随着时间的增加而降低, 位置 1 到位置 4 温度下降速度沿着 Z 方向减小。同一时刻, 冷却通道内有泡沫铜时同一位置的温度低于空通道时的温度, 这种温度差值沿着 Z 方向减小, 位置 1 的差值最大, 位置 4 差值最小, 在第 80 s 时, 位置 1 到位置 4 的温度差值分别为 29.4、18.5、10.2 和 4.1 $^\circ\text{C}$ 。

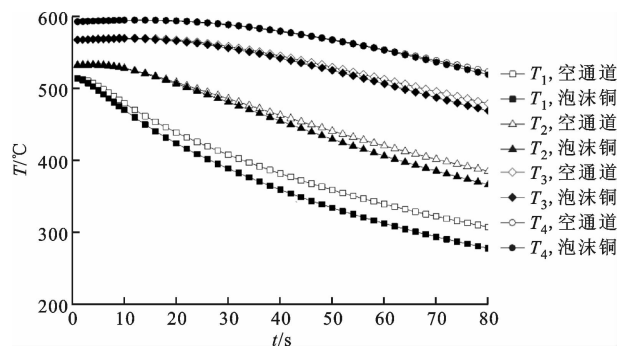
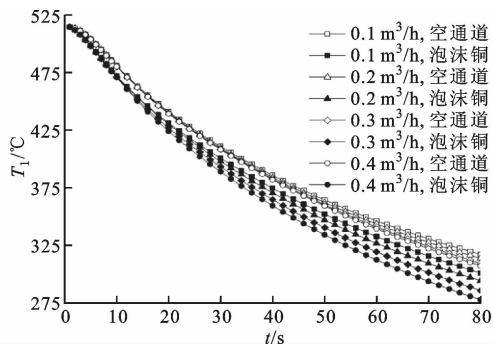
图4 体积流量为 0.4 m^3/h 时 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 随时间的变化情况

图 5 为各体积流量下模具位置 1 的温度 T_1 随时间变化情况。每条曲线随着时间的增加而下降, 初始阶段下降较快, 随后下降减缓。无论是泡沫铜冷却通道还是空通道时, 随着流量增加, 冷却通道内水流速越快, 通道内湍流越激烈, 水对流换热越强, 带走的热量速率越快, 故同一时刻 T_1 越低。由于泡沫铜具有高的热导率, 能迅速从接触的高温模具传导热量至其骨架中, 同时其有序的骨架结构具有大的孔隙率以及较大的比表面积, 有利于破坏或者减薄对流过程中的热边界层, 增大和水的对流换热面积, 促使核心区域的流体与边界层流体的混合。所以, 同一流量下, 泡沫铜冷却通道内管壁的对流换热系数强于空通道管壁的对流换热系数, 即泡沫铜冷却通道冷却模具时 T_1 低于空通道冷却模具时的值。从图 5 中亦可以看到, 同一时刻, 泡沫铜冷却通

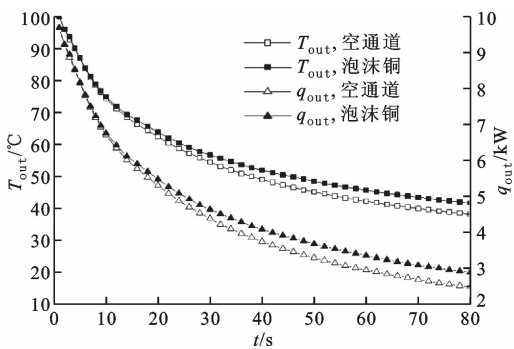
图5 不同体积流量下 T_1 随时间的变化情况

道冷却模具与空通道冷却模具的 T_1 差值随着流量的增加而增大;在同一流量下,泡沫铜冷却通道冷却模具与空通道冷却模具的 T_1 差值随着时间的增加而增大。第 80 s 且体积流量分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 m^3/h 时,泡沫铜冷却通道冷却模具时的 T_1 比空通道冷却时分别低 16.2、19.3、23.5 和 29.4 $^{\circ}\text{C}$ 。

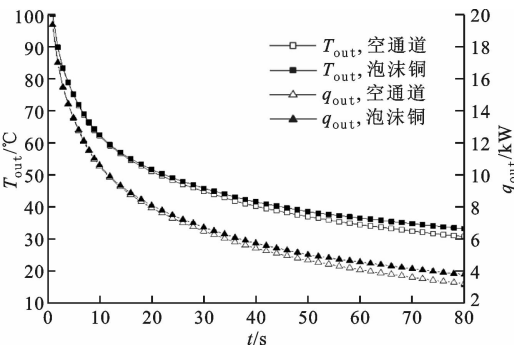
2.2 泡沫铜冷却通道对出水温度和出水带走热量的影响

图 6 为各流量下出水温度和出水带走热量图。随着时间的增加,各组图中温度曲线和出水带走的热量曲线下降,初始阶段下降迅速,之后下降趋势变缓。这是因为初始阶段模具温度较高,冷却通道壁与冷却水的温差大,壁面热量能迅速传递到水中,随着时间增加,模具温度降低,冷却通道壁与冷却水的温差变小,壁面传递到水中的热量速度减慢。在同一流量下,泡沫铜冷却通道与空通道冷却模具时的出水温度差值随着时间的增加而增大,与之对应,出水带走热量的差值也随时间增加增大。在不同流量下,随着流量增加,同一时刻,泡沫铜冷却通道与空通道冷却模具的出水温度差值减小,而出水带走的热量差值增加。表 1 为各流量下,第 80 s 时出水温度和带走热量速率。其中, T 为各流量下出水温度; ΔT 为各流量下泡沫铜冷却通道与空通道冷却模具的出水温度差值。 q_{out} 表示各流量下出水带走热量; Δq_{out} 为各流量下泡沫铜冷却通道与空通道冷却模具的出水带走热量差值。由表 1 可知,冷却后第 80 s,体积流量分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.4 m^3/h 时,对应各流量的泡沫铜冷却通道的出水温度比空通道分别低 3.5、2.5、1.9 和 1.4 $^{\circ}\text{C}$,而泡沫铜冷却通道带走热流量比空通道分别要高 414、581、659 和 660 W。由此可见,随着流量增加,泡沫铜通道比空通道可以带走更多的热量。

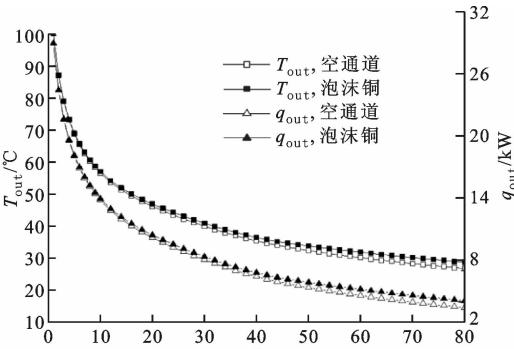
图 7 为泡沫铜冷却通道冷却时各流量下出水温度和带走热流量随时间的变化情况。图 7 变化趋势和文献[16]不同流量下空通道冷却铸造模具的相应图变化趋势比较类似。由图 7a 可知,冷却初始阶段每条曲线下降很快,流量越大,下降就越快,随后下降趋势减缓,同一时刻,流量越低,出水温度就越高。由图 7b 可知,冷却初始阶段每条曲线也是下降很快,流量越大,下降就越快,随后下降趋势减缓,而同一时刻,流量越低,出水带走的热量就越少,特别在冷却初始阶段,同一时刻各流量下出水带走的热流量差值非常大。



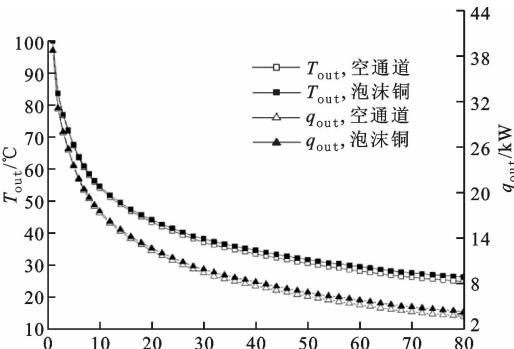
(a) 流量为 0.1 m^3/h



(b) 流量为 0.2 m^3/h



(c) 流量为 0.3 m^3/h

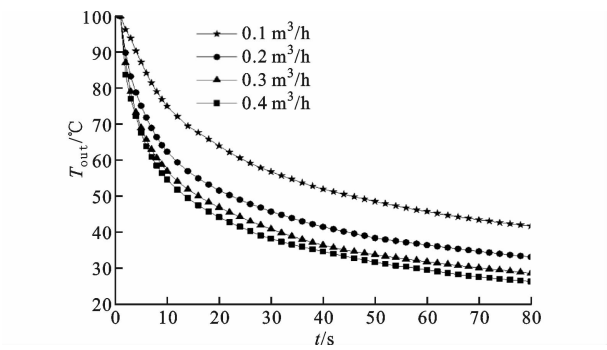


(d) 流量为 0.4 m^3/h

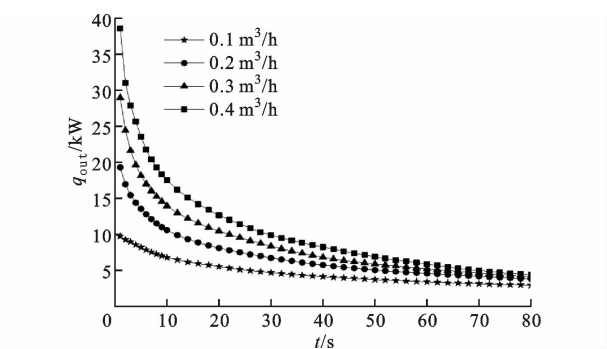
图 6 不同流量下出水温度和带走热量速率随时间的变化情况

表 1 各流量下第 80 s 时的出水温度和带走的热流量

体积流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$T_{\text{out}} / ^\circ\text{C}$		$\Delta T_{\text{out}} / ^\circ\text{C}$	$q_{\text{out}} / \text{W}$		$\Delta q_{\text{out}} / \text{W}$
	有泡	无泡		有泡	无泡	
	沫铜	沫铜		沫铜	沫铜	
0.1	41.7	38.2	3.5	2 883	2 469	414
0.2	33.1	30.6	2.5	3 758	3 177	581
0.3	28.6	26.8	1.9	4 073	3 414	659
0.4	26.3	24.9	1.4	4 345	3 684	660



(a)出水温度随时间的变化



(b)带走热流量随时间的变化

图 7 不同流量下出水温度和带走热流量随时间的变化
(泡沫铜冷却通道)

2.3 泡沫铜冷却通道对模具局部温度梯度和局部热流密度的影响

当流量为 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,位置 1 和位置 2 温度梯度及 Z 方向上热流密度随时间变化见图 8。流量为 $0.1、0.2、0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,位置 1 和位置 2 温度梯度及 Z 方向上热流密度随时间的变化和 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的趋势一致,此处不再赘述。在各流量下,位置 1 和位置 2 温度梯度及 Z 方向上热流密度随着时间的增加而迅速增加,增加到一定程度后开始缓慢下降。在各流量下的同一时刻,泡沫铜通道冷却模具时位置 1 和位置 2 温度梯度大于空通道冷却时的值,与之对应, Z 方向上热流密度也是泡沫铜通道冷却模具时大。图 9 为泡沫铜冷却通道时各流量下位置 1

和位置 2 在 Z 方向上热流密度随时间的变化。在同一时刻下,流量越大,热流密度也越大,这是因为各流量冷却初始时,模具的温度场基本一样,而流量越大,冷却通道内湍流越剧烈,冷却通道壁的对流换热系数越大,冷却水从壁面带走的热量越多,故位置 1 和位置 2 热流密度越大。

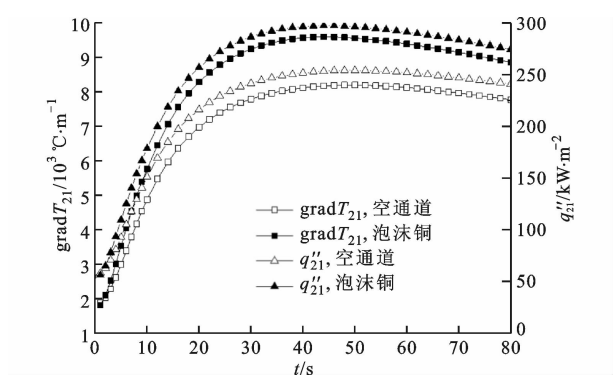


图 8 位置 1 和位置 2 温度梯度及 Z 方向上热流密度随时间的变化(体积流量为 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$)

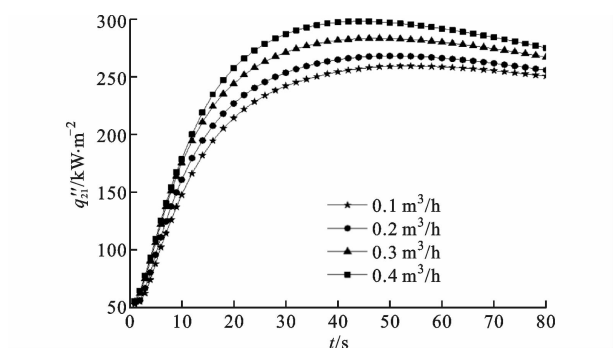


图 9 不同流量下位置 1 和位置 2 在 Z 方向上热流密度随时间的变化

3 结 论

本文对高温模具冷却通道内插入泡沫铜和不插入泡沫铜进行了不同流量下水冷却实验,结论如下。
(1)泡沫铜冷却通道相对空通道可以显著地降低冷却通道附近的温度,当体积流量为 $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 、开启冷却后第 80 s 时,泡沫铜冷却通道冷却模具相对空通道冷却位置 1 温度低 $29.4 ^\circ\text{C}$ 。在相同流量下的同一时刻,离冷却通道越远,泡沫铜冷却通道与空通道冷却模具在同一位置的温差越小。
(2)在相同体积流量下的同一时刻,泡沫铜冷却通道比空通道出水温度、出水带走热流量更大,模具上同一位置的温度更低,模具局部温度梯度和热流密度更大。
(3)在不同流量下的同一时刻,泡沫铜冷却通道

随着流量增加,出水温度减小,出水带走的热流量增加,模具同一位置温度降低,模具局部温度梯度和热流密度增大。

(4)模具局部温度梯度与局部热流密度先随时间的增加而迅速增加,增加到一定程度后开始缓慢下降。

参考文献:

- [1] 张琦,陈余秋,方建儒. 盒形件压铸模具冷却流道排布的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 38-44.
ZHANG Qi, CHEN Yuqiu, FANG Jianru. Study on cooling channel arrangement of high-pressure casting die for box-like workpieces [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(7): 38-44.
- [2] 周玉辉,林荣川,董志颖. 模具冷却系统对压铸模具温度场的影响分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(4): 345-349.
ZHOU Yuhui, LIN Rongchuan, DONG Zhiying. Effects of cooling system on temperature field in die casting dies [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(4): 345-349.
- [3] XU Huijin, QU Zhiguo, TAO Wenquan. Analytical solution of forced convective heat transfer in tubes partially filled with metallic foam using the two-equation model [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 3846-3855.
- [4] ZHAO Changying. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55: 3618-3632.
- [5] ZHAO Changying, KIM T, LU Tianjian, et al. Thermal transport in high porosity cellular metal foams [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18(3): 309-317.
- [6] 程俊伟,许思传,沈云飞,等. 泡沫金属用于紧凑型热交换器的研究进展 [J]. 化工进展, 2011, 30: 637-641.
CHENG Junwei, XU Sichuan, SHEN Yunfei, et al. Research progress of metal foams used in compact heat exchanger [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30: 637-641.
- [7] DING Xinrui, LU Longsheng, CHEN Chuan, et al. Heat transfer enhancement by using four kinds of porous structures in a heat exchanger [J]. Appl Mech Mater, 2011, 52/53/54: 1632-1637.
- [8] BAI M, CHUNG J N. Analytical and numerical prediction of heat transfer and pressure drop in open-cell metal foams [J]. Int J Therm Sci, 2011, 50 (6): 869-880.
- [9] BOOMSMA K, POULIKAKOS D. The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams [J]. ASME J Fluids Eng, 2001, 124: 263-272.
- [10] BOOMSMA K. Metal foams as novel compact high performance heat exchangers for the cooling of electronics [D]. Zurich, Swiss: Swiss Federal Institute of Technology, 2002.
- [11] LU Wei, ZHAO Changying, TASSOU S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers: part I metal-foam filled pipes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 2751-2761.
- [12] 纪献兵,徐进良. 流体在超轻多孔金属泡沫中的流动和换热特性 [J]. 化工学报, 2009, 60(1): 22-27.
JI Xianbing, XU Jinliang. Fluid flow and heat transfer characteristics in ultra-light porous metal foam [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2009, 60(1): 22-27.
- [13] 李盈海,陶文铨,孙东亮,等. 金属泡沫管内强制对流换热的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (3): 261-264.
LI Yinghai, TAO Wenquan, SUN Dongliang, et al. Numerical simulation of convective heat transfer in metal foam filled pipes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(3): 261-264.
- [14] 王晓鲁,姜培学,单彧垚. 泡沫金属与板翅结构强化换热研究 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 121-123.
WANG Xiaolu, JIANG Peixue, SHAN Yurao. Investigation of convection heat transfer in metal foams and mini-fin structures [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(1): 121-123.
- [15] 刘晓丹,冯妍卉,杨雪飞,等. 泡沫金属矩形通道中对流换热的实验和模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(14): 56-60.
LIU Xiaodan, FENG Yanhui, YANG Xuefei, et al. Experimental and numerical simulation of the convective heat transfer in a metal-foam filled rectangular channel [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(14): 56-60.
- [16] HU Henry, CHEN Fang, CHEN Xiang, et al. Effect of cooling water flow rates on local temperatures and heat transfer of casting dies [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1): 57-67.

(编辑 杜秀杰)