

铸造金属型模具水冷快速设计方法

陈思源 赵国平

(江苏大学材料科学与工程学院)

摘要 通过水冷过程的热力学计算分析,借助 ProCAST 软件对实际铸造金属型模具温度进行多道次热循环模拟分析,提出了一种模具冷却水量的快捷计算方法。该水冷设计方法可为使用金属型模具的铸造工艺快速达到热平衡温度场提供参考。

关键词 金属型模具;热平衡计算;模具冷却;数值模拟

中图分类号 TP311;TG76

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quick Design of Permanent Mold Water Cooling

Chen Siyuan, Zhao Guoping

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University)

Abstract: A quick calculation equation of permanent mold cooling water volume was proposed through thermodynamic calculation and a casting simulation software for multiple cycle simulation analysis on temperature of the casting mold. The water-cooling design method can provide a theoretical reference for fast reaching heat balanced temperature field of casting process by permanent mold.

Key Words: Permanent Mold, Heat Balance Calculation, Mold Cooling, Numerical Simulation

金属型铸造具有快速冷却、缩短生产周期等特点,特别适用于大批量自动化生产。在实际生产中,多道次循环铸造生产过程会使金属模具温度不断升高,导致铸件凝固冷却时间越来越长,最后影响铸件品质和生产周期。因此,在满足产品品质和工艺出品率基础上,设计合理高效的水冷系统、缩短铸件凝固时间具有重要意义。

目前,有关模具冷却及其设计方法的研究报道较少。尚桂凡等^[1]研究了低压铸造发动机缸体的水冷工艺,通过数值模拟与实际生产相结合,发现在确保铸件品质的情况下最佳的水冷工艺比自然冷却缩短 160 s,生产效率提高 38%。赵岩等^[2]基于数值模拟结果确定水冷通道的位置与大小和开启水冷的时间,使铸件生

产周期缩短了约 60 s。孙东恩等^[3]利用 ProCAST 软件分析低压铸造铝合金轮毂充型凝固温度场分布规律后,在轮毂模具对应热节部位加设了水冷管道,并确定 60 s 开启冷却水能有效消除铸件缺陷,改善铸件力学性能。刘金保^[4]分析了压铸模的水冷控制,总结了一套模具水冷通道的计算公式,以简单压铸件为例计算了其水冷通道的参数。杨宪章^[5]根据经验公式推算压铸模的工作温度后给出了冷却热量的计算公式,并提出模具水冷通道设计的注意事项。上述研究对于模具水冷的设计主要还是试错法,且多依赖经验公式或生产经验。总之,模具的水冷参数仍缺乏简单实用的设计方法。

本课题结合传热学和传统金属型模具冷却通道设计的基础理论,推导出冷却水量与铸件、模具模数之间

收稿日期:2021-08-17;修改稿收到日期:2021-10-13

第一作者简介:陈思源,男,1996 年出生,硕士研究生,江苏镇江(212013),E-mail:csy_akatwosee@163.com

通信作者:赵国平,男,1968 年出生,副教授,江苏镇江(212013),E-mail:guoping.zhao@ujs.edu.cn

引用格式:陈思源,赵国平. 铸造金属型模具水冷快速设计方法[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(4):424-427.

CHEN S Y, ZHAO G P. Quick design of permanent mold water cooling[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):424-427.

- [57] 张军伟,杨正海,孙乐民,等. 梯度铜碳复合材料的载流摩擦磨损性能[J]. 材料热处理学报,2020,41(7):33-40.
- [58] 李博雅,曹志强. 金属基固体自润滑复合涂层及其制备技术研究进展[J]. 表面技术,2017,46(9):32-38.
- [59] 简学全,李继文,谢敬佩,等. 高导电弥散铜-MoS₂复合材料的载流摩擦磨损性能[J]. 材料热处理学报,2013,34(6):11-17.
- [60] 祝志祥,丁一,徐若愚,等. 碳纤维增强铜基复合材料制备方法研究进展[J]. 功能材料,2021,52(3):3 060-3 066.
- [61] 黎炳前,张福勤,杨昭,等. 碳纤维增强铜基自润滑复合材料的摩

擦磨损性能研究[J]. 矿冶工程,2016,36(5):107-109.

- [62] 杨浩,朱明明,李卫. 短碳纤维增强铜基复合材料的载流摩擦磨损行为[J]. 特种铸造及有色合金,2013,33(8):765-768.

- [63] WANG P, WANG L, KANG K J, et al. Microstructural, mechanical and tribological performances of carbon fiber reinforced copper/carbon composites[J]. Composites, 2021, A142: 106-247.

(编辑:刘卫)

的关系式,并利用 ProCAST 软件对实际铸件的冷却水量进行模拟验证^[6]。该关系式可以为使用金属型模具的铸造工艺的水冷快捷设计提供参考。

1 冷却水量与铸件、模具模数求解方程

CHVORINOV N^[6]首次提出了简单铸件的凝固时间与铸件模数的关系式:

$$t = BM^n \quad (1)$$

式中, t 为凝固时间,s; M 为铸件模数; n 为常数,通常取 $1.2 \sim 2$ ^[7,8]; B 为铸模常数,与铸件和模具材质有关:

$$B = \left[\frac{\rho_c L}{(T_m - T_0)} \right]^2 \left[\frac{\pi}{4k\rho_c} \right] \left[1 + \left(\frac{c_m \Delta T_{\text{液}}}{L} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, T_m 、 T_0 分别为合金开始凝固的温度和模具初始温度,K; ρ_c 为金属液密度, kg/m^3 ; L 为单位质量熔化潜热, J/kg ; k 为模具的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c 、 c_m 分别为模具和金属的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\Delta T_{\text{液}}$ 为浇注温度和凝固温度的差值,K; ρ 为模具的密度, kg/m^3 。从式(1)和式(2)可见,凝固时间 t 不仅与铸件模数有关,还与模具初始温度 T_0 有关。在大批量生产过程中,要想保证铸件品质的稳定性,就必须保证每个铸件的生产初始条件和凝固状态是一致的,即模具的初始温度与铸件的凝固时间应相等。影响凝固时间的主要因素是热节,因此需要研究铸件热节处模数与冷却水量之间的关系。

铸件的充型、凝固和冷却过程均伴随着热量的转移,其热量数值可以借助传热原理进行计算。充型过程中金属液释放的总热量表述如下:

$$Q_c = Q_{\text{液}} + Q_{\text{固}} + Q_{\text{潜}} = \rho_c V_c (c_{\text{液}} \Delta T_{\text{液}} + c_{\text{固}} \Delta T_{\text{固}} + L) \quad (3)$$

式中, V_c 为铸件体积, m^3 ; L 为单位质量熔化潜热, J/kg ; $c_{\text{液}}$ 、 $c_{\text{固}}$ 分别为液态合金和固态合金的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\Delta T_{\text{固}}$ 为凝固温度到铸件出型的温度差,K。对于铝合金,其液态和固态的定压比热容数值相差不大,故取其平均值简化式(3),即:

$$Q_c = \rho_c V_c (c_c \Delta T_c + L) \quad (4)$$

式中, c_c 为液态合金和固态合金定压比热容的平均值, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ΔT_c 为浇注温度和成型温度之差,K。

合金液释放的大部分热量均被模具吸收,则可以通过铸型的温度变化来计算转移到模具的热量,即:

$$Q_m = c_m \rho_m V_m \Delta T_m \quad (5)$$

式中, Q_m 为金属型模具吸收的总热量,J; c_m 为模具钢的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ΔT_m 为模具型壁的最高温度和初始温度之差,K; ρ_m 为模具钢的密度, kg/m^3 ; V_m 为模具体积, m^3 。

模具所吸收的热量就是需要被冷却水带走的热量,这样才能保持模具温度场的稳定,则:

$$Q_{\text{cw}} = c_{\text{cw}} \rho_{\text{cw}} V_{\text{cw}} \Delta T_{\text{cw}} \quad (6)$$

式中, Q_{cw} 为冷却水带走的总热量,J; c_{cw} 为冷却水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_{cw} 为冷却水的密度, kg/m^3 ; V_{cw} 为所需冷却水的体积, m^3 ; ΔT_{cw} 为出水口和入水口的温差,K。

由于模具在吸收合金液释放的热量的同时,会有部分热量向外界自然散发,这部分损失的热量用经验系数 k_1 来修正,经修正后的总热量等于模具吸收的热量,也就是需要水冷却的热量。即:

$$k_1 Q_c = Q_m = Q_{\text{cw}} \quad (7)$$

将式(4)~式(6)代入式(7)中得:

$$V_{\text{cw}} = \frac{k_1 \rho_c (c_c \Delta T_c + L)}{c_{\text{cw}} \rho_{\text{cw}} \Delta T_{\text{cw}}} \frac{M_c}{M_m} V_m \quad (8)$$

模具的壁厚是根据合金液对型腔的热影响区范围确定的,当模具壁厚增大到与铸件热节的热影响区范围的最大值后,即使再增加壁厚也不会再改变铸件的凝固状态。故采用一个比例系数 k_2 计算铸件热节处体积和对应经济壁厚的模具体积。即:

$$V_m = k_2 V_c \quad (9)$$

$$V_{\text{cw}} = \frac{k_1 k_2 \rho_c (c_c \Delta T_c + L)}{c_{\text{cw}} \rho_{\text{cw}} \Delta T_{\text{cw}}} \frac{M_c}{M_m} V_c \quad (10)$$

式中, M_m 为铸型的模数。上式表明,冷却水的体积与铸件模数以及冷却水作用的铸件热节区体积成正比,与模具模数成反比。铸件热节越大,需要的冷却水量越大;模具越厚,对应的冷却水量越小。为方便计算表示,采用一个总的系数 k 来表征

$\frac{k_1 k_2 \rho_c (c_c \Delta T_c + L)}{c_{\text{cw}} \rho_{\text{cw}} \Delta T_{\text{cw}}}$ 部分。即:

$$V_{\text{cw}} = k \frac{M_c}{M_m} V_c \quad (11)$$

铸件材质为 A356 合金,模具材质为 H13 钢。设定铸件的浇注温度为 720°C ,成型温度稳定为 350°C ,模具初始温度为 250°C ,取件后模具温度要求控制在 300°C 。已知 A356 铝合金密度 $\rho_c = 2\,660 \text{ kg}/\text{m}^3$,平均比热容 $c_c = 1\,100 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,熔化潜热 $L = 4.31 \times 10^5 \text{ J}/\text{kg}$;冷却水平均比热容 $c_{\text{cw}} = 4\,200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,密度 $\rho_{\text{cw}} = 1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$,出入口温差 $\Delta T_{\text{cw}} = 60 \text{ K}$ 。 k_1 为热交换过程中经验误差系数,取 $0.75 \sim 0.80$ 。采用简单形状的铸件(立方体、平板、内切球、圆柱等)为模型,利用 ProCAST 软件模拟了不同壁厚条件下铸件凝固状态的变化。发现对于铝合金金属型铸造来说,模具经济壁厚取铸件壁厚的 2 倍,结合模数计算方法^[9], k_2 值取 18,故 k 值可取 $58 \sim 62$ 。

2 多循环模拟验证与分析

2.1 铸件分析

图 1 为 A356 铝合金扭力杆支架铸件的 UG 三维图及热节区域示意图。扭力杆支架外轮廓尺寸为 195 mm×182 mm×159 mm,中间圆孔直径均为 60 mm。通过分析铸件的结构,发现铸件存在 4 处热节,见图 1b。

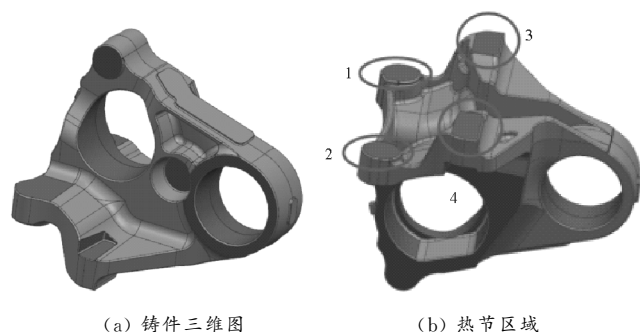


图 1 铸件三维模型
Fig.1 3D model of casting

采用金属型重力铸造模拟该件的充型凝固过程,以 4 处热节为例,选取平面的中心处作为测温点,先监测未加设冷却系统时多循环铸造过程下热节中心处铸件与模具的温度场变化,循环周期见表 1。

表 1 扭力杆支架的循环周期

Tab.1 Cycle of casting torsion bar bracket

时间/s			
开模	取件	闭模	循环结束
215	225	235	245

利用 ProCast 软件的 Evolution/Profile Curves 功能得到的 10 次铸造循环中测温点的温度场变化,见图 2。可以看出,在自然冷却状态下,测温点铸件出型温度和模具温度都持续上升,10 次循环结束后测温点处铸件出型温度高达 446 ℃,模具温度高达 434 ℃。这是由于模具局部的热量都聚集在铸件的热节处,导致该处温度高于其他部位,且从合金液中吸收的热量仅通过自然

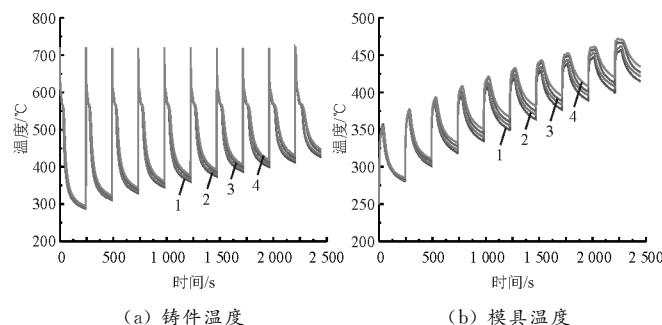


图 2 未加设冷却系统的测温点温度曲线图
Fig.2 Temperature curves for measuring point without cooling channel

散热的方式不能使铸件和模具在多循环铸造的过程中达到热平衡状态。致使每次循环模具的初始温度都高于上一次,对于工业批量生产来说,达不到铸件质量稳定性的要求。

图 3 为 4 处热节中心在 10 次循环中冷却到 548 ℃ (即铸件完全凝固)的时间。可以明显看出,其凝固时间在 10 次循环中均保持延长的趋势,在第 10 个循环结束后,1 和 2 区域处铸件凝固时间延长 37 s 左右,而 3 和 4 处凝固时间延长了 50 s 左右。这是由于没有加设模具冷却系统,模具温度不断升高,导致铸件的凝固时间越来越长。故必须在模具热节处设置强制冷却,加快模具热量的散发就成了控制铸件凝固时间和质量稳定的关键。

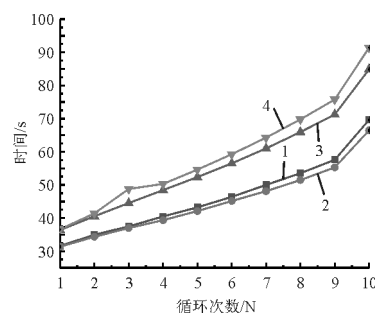


图 3 未加设水冷系统测温点区域的凝固时间
Fig.3 Solidification time of the temperature measuring point without water cooling channel

2.2 冷却系统改进及验证

铸件 4 处热节总体积 $V_c = 7.32 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $M \approx 2.4 \times 10^{-2} \text{ m}$, $M_m \approx 5.16 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。代入式(11)计算得到冷却水量 $V_{cw} = 2.12 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。一般水冷通道的直径为 $\phi 8 \text{ mm} \sim \phi 25 \text{ mm}$,根据水冷通道位置与型腔的距离关系,在距离铸件热节处下方 10 mm 处各加设一条 $\phi 10 \text{ mm}$ 的水冷通道^[10],进而计算出通冷却水的时间为 20 s。

在铸件热节下方对应的模具内加设水冷通道后,模具与铸件之间的传热系数取 $1\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,模具与冷却水之间的传热系数取 $2\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[11]。模拟后 4 处测温点的温度变化见图 4。可以发现,铸件的出型温度和模具温度均得到了有效控制。和未设置强制冷却时相比,前一个循环结束后测温点温度与后一个循环的相比,温度变化较小,铸件与模具的温度曲线在第 6 个循环后基本保持稳定。对于铸件的出型温度来说,4 个测温点温度均稳定在 350 ℃ 以下,与预设的温度数值基本一致,故可以认为,前 5 个循环过程,热节处的模具内外在形成适合冷却的温度梯度,根据理论设计的冷却工艺参数带走了模具无法自然散发的热量,第 6 个循环后,模具处于热平衡状态,保证了铸件出型温度

和模具温度的一致性。

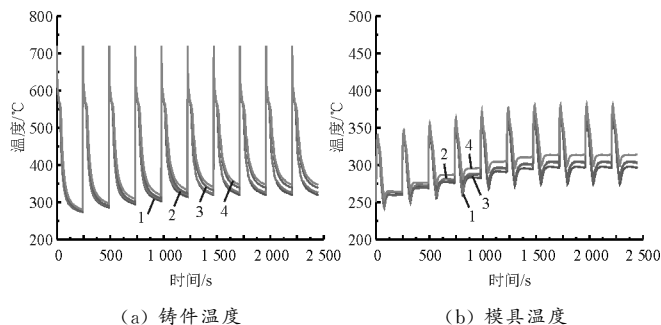


图4 添加水冷系统后的测温点温度曲线图

Fig.4 Temperature curves for measuring point after adding water cooling

图5为加设水冷系统后所选铸件热节区域到达固相线温度(548℃)所用的时间。对比图3可以发现,添加冷却水后铸件凝固时间得到明显控制,在铸件-铸型第6个循环达到热平衡后,4处热节区域冷却到548℃的时间不再随铸件循环次数的增加而上升,而是稳定在一个数值,相邻两次循环间的时间差值在1s左右。测温点3对应铸件部分凝固所需的时间最长,稳定在41.31s,但相比起未加设水冷系统时已经缩短了50s左右,说明在第6个循环后,冷却水带走的热量正好等于模具无法自然散发的热量。在铸件出型后模具温度冷却到了预设温度并为下次浇注做准备,进而保证每个铸件的凝固时间一致,即铸件品质一致。说明此水冷系统达到了研究预期的目标,验证了此水冷系统的准确性。

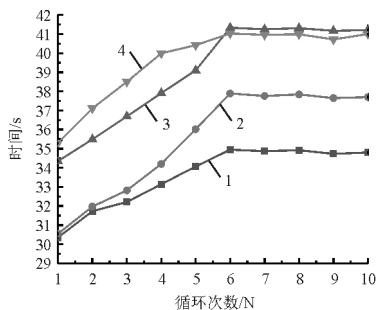


图5 加设水冷系统后测温区域的凝固时间

Fig.5 Solidification time of the temperature measuring point after adding water cooling

3 结 论

(1)通过理论计算和数值模拟分析得出了冷却水量与铸件、铸型模数、铸件热节体积的求解方程,可快速计算出热节处需要设置的冷却工艺参数。其中模具模数计算时仅取经济壁厚范围内的体积。

(2)对于 A356 铝合金为铸件材料,以 H13 模具钢为模具的金属型铸造来说,总系数 k 值为 58~62。

(3)加设运用该方法计算后的水冷工艺参数后,所选铸件热节处的出型温度、模具温度显著降低并保持稳定,铸件凝固速度加快,相邻循环之间凝固时间一致,趋于预设的数值,达到了设计的目的。

(4)通过该设计方法,结合铸件实际生产条件和模具形状,模拟了铸件主要热节温度场情况,快速计算水冷参数,可以减少模拟试探法所花费的时间,提高效率。

参 考 文 献

- [1] 尚桂凡, 乐虎, 彭宝斌, 等. 发动机缸体低压铸造水冷工艺研究[A]. 2016 重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆: 2016.
- [2] 赵岩, 李秀荣, 臧勇, 等. 低压铸造大型铝合金轮毂数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(10): 1 063-1 066.
- [3] 孙冬恩, 程和法, 周宏伟, 等. 低压铸造铝合金轮毂的数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(7): 763-767.
- [4] 刘金保. 水冷控制压铸模模温的研究与应用[J]. 特种铸造及有色合金, 1998(S1): 7-10.
- [5] 杨宪章. 压铸模加热与冷却系统设计[J]. 金属加工(热加工), 2015(1): 70-72.
- [6] CHVORINOV N. Theory of the Solidification of Castings[M]. Germany: Giesserei, 1940.
- [7] ASKELAND D R, WRIGHT W J. Essentials of Materials Science and Engineering[M]. Ontario, Canada: Thomson, 2004.
- [8] BLACK J T, KOHSER R A, KOHSER R A. Materials and Processes in Manufacturing (9th ed.)[M]. America: Wiley, 2003.
- [9] 李新亚. 铸造手册(第5卷)·铸造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [10] 唐庆瑞. 低压铸造模具温度控制方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [11] 赵信毅, 许建辉, 潘美艳, 等. 曲轴箱体模具温度场循环模拟与热平衡分析[J]. 铸造, 2014, 63(6): 571-574.

(编辑:刘晨辉)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |