

# 镁合金用铸造型砂热物性参数测定与研究

汪敏<sup>1</sup>, 张旭亮<sup>2</sup>, 余国康<sup>2</sup>, 刘越<sup>1</sup>

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

**摘要:** 通过浇注法得到型砂的温度场, 利用反算法求出硅砂、宝珠砂、铬铁矿砂、陶粒砂、钢丸混砂和粘土砂的热导率和比热容, 为镁合金铸造模拟提供了重要数据。利用测得的比热容和热导率得到了这些型砂的蓄热系数, 通过对几种型砂蓄热系数的比较, 得到了常用型砂对铸件激冷能力的大小, 与实际生产相符合。

**关键词:** 型砂; 温度场; 比热; 热导率; 蓄热系数

随着科学技术的发展, 铸造数值模拟越来越多地应用于铸件的生产, 模拟结果对于指导生产具有重要作用, 但铸造模拟的精确性并不能得到保证。对于仿真结果, 除了数值求解本身算法外, 数值模拟过程中材料数据、边界条件、运行参数等输入条件决定模拟仿真结果的准确度<sup>[1]</sup>。影响铸造模拟精度最主要的因素为铸型的热物性和铸件-铸型界面的换热系数。其中郭志鹏<sup>[2]</sup>、殷亚军<sup>[3]</sup>、隋大山<sup>[4]</sup>等都曾进行利用测温曲线反算界面换热系数的研究。但对于热物性参数的研究相对较少, 潘应军<sup>[5]</sup>利用浇注法测量了天然无定形石墨的热物性参数, 测得石墨砂的比热容为 $1.13 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 热导率为 $1.53 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。高德明<sup>[6]</sup>利用反算法求得硅砂比热和热导率随温度的变化规律, 硅砂的比热随温度增大而增大, 温度较低时, 硅砂的比热上升较快, 随着温度的增大, 比热增加缓慢。硅砂热导率随温度增大先减小后增大, 并通过模拟证明了其有效性。闫新飞<sup>[7]</sup>利用数值模拟和实验的方法, 研究了铸造用型砂的热物性参数, 得到型砂的导热系数与温度变化呈“V”形变化趋势, 随温度升高, 先降低后升高。型砂比热随温度增加呈增加趋势, 当温度低于 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 比热急剧增加, 温度高于 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 比热缓慢增加。

镁合金作为一种绿色材料在国内外的发展和应用都非常迅速。与其他金属结构材料相比镁合金具有比强度高、比刚度高, 减振性、电磁屏蔽和抗辐射能力强, 易切削加工, 易回收等一系列的优点, 在航空航天工业、军工领域、汽车工业、飞机工业等领域都具有极其重要的价值和广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。但镁合金铸件的质量和产量的稳定性较差, 数值模拟精度不高。测量镁合金铸造用型砂热物性参数, 为推动镁合金铸造快速发展具有重要意义。

型砂本身属于多孔性非均匀变热物性材料, 在实际生产中, 由于粘结剂的种类、加入量、型砂的粒度、型砂的紧实度的不同, 往往导致实际测量得到的型砂的热物性参数存在差异, 数值模拟精度降低, 与实际过程差别很大<sup>[7]</sup>。随着造型材料的发展, 型砂的种类增多, 有些型砂(如宝珠砂、陶粒砂)数据库不齐全, 导致模拟不准确, 所以需要测量型砂的热物性参数, 在与工厂实际生产相同的树脂种类、树脂加入量、型砂粒度及紧实度的情况下测量镁合金铸造常用几种型砂的热物性参数, 既可为铸造数值模拟提供一定的数据, 也可以提供模拟的精度。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料及装置

测量的原砂种类有硅砂、宝珠砂、铬铁矿砂、陶粒砂、钢丸混砂(钢丸与硅

作者简介:

汪敏(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为镁合金铸造。E-mail: 1757306495@qq.com

中图分类号: TG221<sup>+</sup>.1  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2020)11-1215-06

收稿日期:

2020-04-25 收到初稿,  
2020-07-08 收到修订稿。

砂按照体积比1:1混合)和粘土砂。其中硅砂、宝珠砂、铬铁矿砂、陶粒砂、钢丸混砂均采用兴业酚脲烷作为粘结剂,兴业酚脲烷为两种组分混合使用,其中硅砂、宝珠砂、铬铁矿砂、陶粒砂中酚脲烷两组分的加入量分别为原砂质量的0.5%。钢丸混砂中使用的粘结剂两组分为混合后质量的0.15%。粘土砂为普通粘土和膨润土混合而成,膨润土加入量为1.5%。

浇注的合金为ZM6,其固液相温度分别为525℃和649℃,浇注完成后铸锭的尺寸为 $\Phi 50 \times 100$  mm, ZM6的成分如表1所示。

采用浇注法<sup>[9]</sup>测量型砂的热物性参数,使用如图1所示的装置,将待测型砂紧实装于圆筒的下部,在型砂中距离铸型-砂型界面10 mm、20 mm、30 mm、40 mm处的圆筒中心部位和铸件-铸型界面处安装K型、 $\Phi 1$  mm热电偶测量温度场。圆筒顶部、内部及外部使用耐火纤维隔热,以保证一维传热环境。测出铸件-铸型界面及铸型内部温度场随时间的变化规律,通过温度场可以求得型砂的比热容和热导率<sup>[10]</sup>。将测得的比热容和热导率输入Procast模拟软件进行模拟,将模拟的温度场与试验温度场进行比较。

## 1.2 试验原理

本试验主要利用非稳态热交换理论,非稳态热交换可以用矢量方程考虑固体无内热源一维导热问题<sup>[11]</sup>,方程可以简化为式(1)。

$$\rho C_p (\partial T / \partial t) = \partial / \partial x (\lambda \cdot \partial T / \partial x) \quad (1)$$

试验中,铸件向铸型中传输热量包含两个阶段,第一阶段为铸件由浇注温度降低到凝固温度所释放的热量,第二阶段为铸件凝固所释放的潜热<sup>[12]</sup>。对于第一阶段的传热,铸件冷却到液相线通过单位散热面释放的热量表示为式(2)。

$$Q_1 = C_m \rho_m V (T_{\text{浇}} - T_L) / A \quad (2)$$

式中: $C_m$ 为铸件比热; $\rho_m$ 为铸件密度; $V$ 为铸件体积; $A$ 为散热面面积; $T_{\text{浇}}$ 为浇注温度; $T_L$ 为铸件液相线温度。

对于第二阶段的热量,当铸件凝固到 $t_f$ 时刻,通过单位散热面释放的热量为:

$$Q_2(t_f) = (\rho_m V H \sqrt{t_f}) / (A \sqrt{t_f}) \quad (3)$$

式中: $t_f$ 为铸件完全凝固所需要的时间; $t$ 为金属凝固时间。

而在 $t_i$ 时刻,铸型通过单位散热面吸收的热量为:

$$Q_{\text{in}}(t_i) = \int_0^{\infty} \int_{T_i}^{T_0} C_p(T) \rho_m dT dZ \quad (4)$$

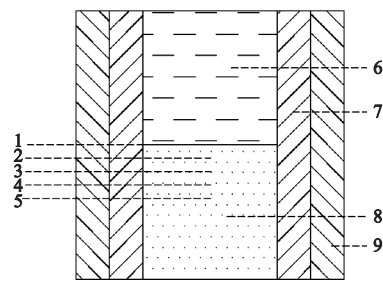
式中: $T_0$ 和 $T_i$ 为距离铸件界面为 $Z$ 处的初始时刻和 $t_i$ 时刻的温度。

把比热看成温度的函数 $C_p(T) = x_1 + x_2 \cdot T + x_3 \cdot T^2$ ,最后,利用能量守恒定律建立方程:

表1 ZM6合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZM6 alloy  $w_B / \%$

Mg	Nd	Zn	Zr	Cu	Ni
96.237	2.76	0.36	0.46	0.16	0.023



1-5. 热电偶 6. 镁合金 7. 耐火纤维 8. 待测型砂 9. 圆筒

图1 试验装置图

Fig. 1 Experimental device diagram

$$F(X) = \sum_{t_0}^{t_M} \left[ C_m \rho_m V (T_{\text{浇}} - T_L) / A + (\rho_m V H \sqrt{t}) / (A \sqrt{t_f}) - \int_0^{\infty} \int_{T_i}^{T_0} C_p(T) \rho_m dT dZ \right]^2 \quad (5)$$

$F(X)$ 是一个三元非线性函数,通过数学方法求该函数的无约束极小值点,就可得到所求的比热值。

把热导率看成温度的函数 $\lambda(T) = y_1 + y_2 \cdot T + y_3 \cdot T^2$ ,在试验中,满足一维传热条件,利用式(2)求解,由有限差分法得显式差分方程,整理后为:

$$T_p^{t+\Delta t} = T_p^t + \frac{\lambda \cdot \Delta t}{\rho_m C_m \Delta Z^2} [(T_{p-1}^t - T_p^t) + (T_{p+1}^t - T_p^t)] \quad (6)$$

式中: $T$ 为温度值; $P$ 为当前单元; $t$ 表示某时刻; $\Delta t$ 为时间间隔; $\Delta Z$ 为空间间隔; $C_m$ 为已求出的比热。给定初始时刻各点的温度值,根据式(6)可以求出各个点不同时刻的温度值。将数值计算温度值 $T_p^t$ 与测量值 $T_p^{t_i}$ 比较,建立方程:

$$F(X) = \sum_{t=0}^M \sum_{p=1}^k (T_p^t - T_p^{t_i})^2 \quad (7)$$

代入相应的数据,求 $F$ 关于 $T$ 的极小值,可以得到一个关于 $y$ 序列的三元一次方程组,解此方程组便可求出 $y$ 序列,就可以得到所求热导率。

由测量得到的温度场求型砂的比热和热导率的流程图如图2。

## 2 型砂热物性参数测量结果

### 2.1 型砂基本性能参数

将原砂与粘结剂按照比例混合测量体积密度,将

混合好的型砂制作成“8”字形试样块，测量其抗拉强度、透气性、发气性等基本性能，测得的基本性能如表2所示。

### 2.2 型砂的比热

分别使用不同型砂造型浇注ZM6，可以得到不同型砂的温度场，图3、4分别为测量得到的硅砂、粘土砂的温度场。

使用硅砂造型浇注ZM6，经过2 300 s左右，界面温度由650 ℃下降到515 ℃，此时合金全部凝固，型砂中的温度均由室温上升到最大值后保持稳定。当使用粘土砂造型浇注ZM6时，经过3 000 s左右，界面温度由650 ℃下降到515 ℃，型砂中的温度也由室温上升到最大值后保持稳定。

根据测得的温度曲线，结合公式(5)即可求得型砂的比热，求得各种镁合金用铸造型砂比热如下：

- 硅砂： $C_p=0.447\ 5+1.25\times 10^{-3}T-5.86\times 10^{-7}T^2$
- 宝珠砂： $C_p=0.032\ 75+2.816\times 10^{-3}T-1.625\times 10^{-6}T^2$
- 铬铁矿砂： $C_p=0.754\ 2+5.238\times 10^{-4}T-2.853\times 10^{-7}T^2$
- 陶粒砂： $C_p=0.216+9.86\times 10^{-4}T-4.294\times 10^{-7}T^2$
- 钢丸混砂： $C_p=0.397+9.789\times 10^{-4}T-4.219\times 10^{-7}T^2$
- 粘土砂： $C_p=0.977\ 1+5.124\times 10^{-5}T+1.077\times 10^{-7}T^2$

绘出硅砂、宝珠砂、铬铁矿砂、陶粒砂、钢丸混砂、粘土砂比热在300~1 000 K之间随温度变化的曲线，如图5所示。各类型砂的比热随温度升高而增大。其中陶粒砂的比热最小。粘土砂和铬铁矿砂的比热受温度影响较小，铬铁矿砂略小于粘土砂。铬铁矿砂和硅砂比热较接近，当温度小于250 ℃时，粘土砂比热较大，而当温度高于250 ℃时，硅砂的比热较大。陶粒砂比热最小，铁砂的比热比陶粒砂大，比其他各类型砂较小。

通过试验，测出了镁合金铸造常用型砂的比热，比热都随温度增大而增大。其中以树脂作为粘结剂的型砂在温度低于600 K时增长较快，在温度高于600 K时增长较慢。粘土砂比热在温度较低时增长较慢，在温度较高时增长较快。粘土砂中存在一定水分，水分的蒸发导致了比热的变化，温度低时气化小，比热增加缓慢，温度高时气化增大，比热增加变大。

### 2.3 型砂的热导率

利用上述型砂的比热和测得的温度场，并结合方程(6)，即可得到各种镁合金用铸造型砂的热导率，计算得到型砂的热导率如下：

- 硅砂： $\lambda=1.007-1.029\times 10^{-3}T+7.143\times 10^{-7}T^2$
- 宝珠砂： $\lambda=0.880\ 9-9.762\times 10^{-4}T+6.954\times 10^{-7}T^2$
- 铬铁矿砂： $\lambda=0.877\ 7-6.949\times 10^{-4}T+5.121\times 10^{-7}T^2$

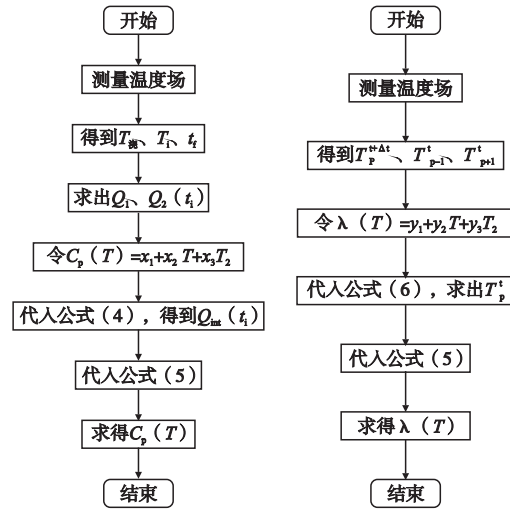


图2 测量型砂比热(左)和热导率(右)流程图  
Fig. 2 Flow chart for measurement of specific heat (left) and thermal conductivity (right) of molding sand

表2 型砂基本性能  
Table 2 Basic performance of several kinds of molding sand

型砂类型	目数	体积密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度 /MPa	透气性 /Pa	发气性/ (g·cm <sup>-3</sup> )
硅砂	50/100	1.52	1.27	140	12.02
宝珠砂	70/140	2.00	1.8	90	10.28
铬铁矿砂	50/100	2.75	0.9	200	11.72
陶粒砂	50/100	1.64	1.2	210	11.98
钢丸混砂	50/100	3.04	1.5	150	11.23
粘土砂	70/140	1.37	0.28	70	12.87

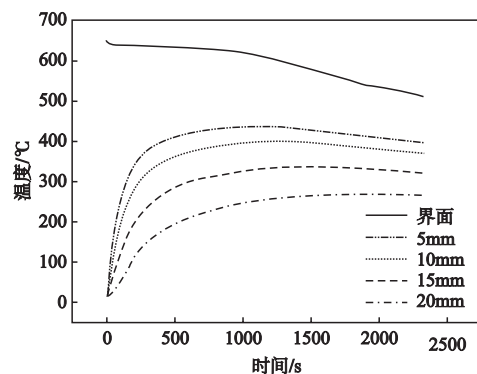


图3 硅砂温度场  
Fig. 3 Temperature field of silica sand

陶粒砂:  $\lambda = 0.7585 - 3.833 \times 10^{-4}T + 2.695 \times 10^{-7}T^2$

钢丸混砂:  $\lambda = 1.845 - 1.029 \times 10^{-3}T + 7.143 \times 10^{-7}T^2$

粘土砂:  $\lambda = 0.5709 + 1.242 \times 10^{-5}T + 1.616 \times 10^{-7}T^2$

绘出硅砂、宝珠砂、铬铁矿砂、陶粒砂、粘土砂、钢丸混砂的热导率在300~1 000 K之间随温度变化的曲线,如图6所示。

通过试验,测出镁合金铸造常用型砂的热导率,其中以树脂作为粘结剂的型砂热导率随温度的增大先减小后增大。硅砂的热导率最大,铬铁矿砂次之,陶粒砂第三,宝珠砂的热导率最小。钢丸混砂的热导率远大于硅砂,说明钢丸热导率较硅砂大。而粘土砂热导率趋势与其他型砂不同,粘土砂热导率随温度增大而增大。主要是由于粘土砂中存在水分,且在一定温度会产生水汽潜热效应,即水蒸气在粘土砂孔隙中迁移促进传热,当粘土处于较高温度时,伴随水汽迁移发生的蒸发和凝结传热作用对粘土砂热传输过程有显著的影响,所以随着温度的升高,粘土砂的热导率会增大<sup>[13]</sup>。而树脂砂中无水分存在,影响热导率的主要为树脂,随着温度的升高,树脂砂中的树脂开始挥发,阻碍了热量的传递,导致树脂砂的导热率越来越小。当温度达到一定值后,树脂挥发完全,热导率上升。所以树脂砂热导率随温度先降低后升高,且存在热导率的最低点。

## 2.4 型砂的蓄热系数

型砂的蓄热系数直接反映其蓄热能力,同时也是铸型吸热能力或者储存热量能力的主要判定因素。蓄热系数越高,铸型的吸热能力越强,则铸件的凝固速度就越大,断面温度场的梯度也就越大。研究表明蓄热系数与型砂的导热系数、比热容以及密度有关。蓄热系数一般用 $b_2$ 表示。且蓄热系数与导热系数、比热容以及密度的关系如式(8)<sup>[14]</sup>:

$$b_2 = \sqrt{\lambda_m \cdot C_m \cdot \rho} \quad (8)$$

式中:  $\lambda_m$ 为导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $C_m$ 为比热容,  $J/(g \cdot K)$ ;  $\rho$ 为密度,  $g/cm^3$ ;  $b_2$ 为蓄热系数,  $J/(m^2 \cdot K^{-1} \cdot s^{-1/2})$ 。由此式可计算出各型砂蓄热系数,并将蓄热系数与温度的关系绘成曲线,如图7所示。

由图7可知,型砂的蓄热系数随温度增大略微变大,蓄热系数受比热容和热导率的影响,温度低于400℃时,比热增加,热导率减小,比热容对于铸件凝固的影响更为显著,导致蓄热系数会增大。温度较高时,比热和热导率都会增大,铸件凝固加快,蓄热系数变大。

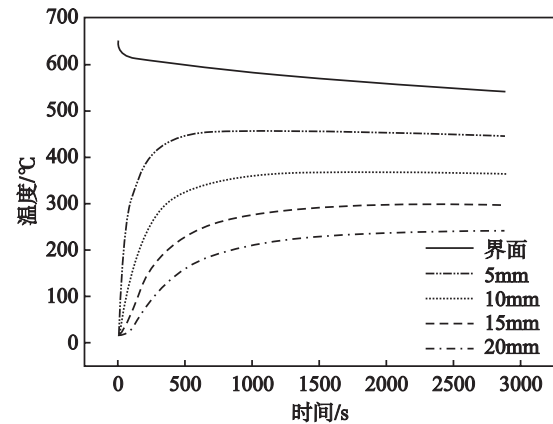


图4 粘土砂温度场

Fig. 4 Temperature field of clay sand

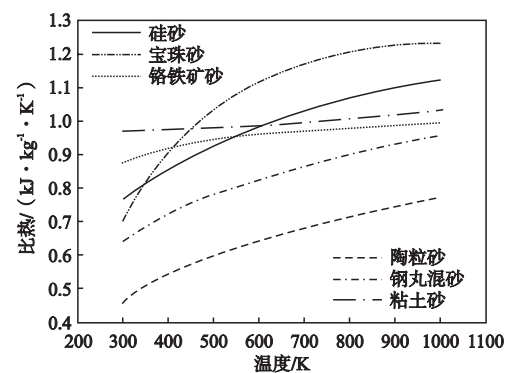


图5 型砂比热随温度变化曲线

Fig. 5 Specific heat of molding sand as a function of temperature

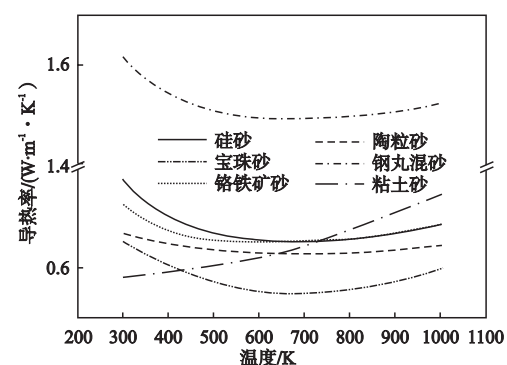


图6 型砂热导率随温度变化曲线

Fig. 6 Thermal conductivity of molding sand as a function of temperature

### 3 热物性测量结果验证

通过上述试验及计算得到了硅砂、宝珠砂、铬铁矿砂、陶粒砂、钢丸混砂、粘土砂的比热和热导率,对于测量结果的准确性需要进一步验证。选择树脂硅砂进行验证,建立与试验相同的三维模型,将测得的硅砂的比热和热导率输入模拟软件中,选择浇注金属为ZM6,设置一定的边界条件和相同的浇注温度,即可得到模拟结果,在后处理中选择与试验相同的位置点的温度曲线,将其与试验曲线进行比较,如图8所示。

图8中,界面处温度先由650℃缓慢下降到固相线温度,此时镁合金潜热释放,温度下降缓慢。一定时间后,界面温度迅速下降,合金开始凝固。在界面处,试验和模拟存在一定差异,主要是由于浇注时存在热量散失,导致试验温度略低于模拟温度。型砂中温度场由室温迅速上升到一定值,经过一段时间后缓慢下降,试验与模拟的温度场趋势相同。由于试验不能完全做到一维传热,存在热量的损失,导致温度场低于模拟温度场。利用相同方式可以得到其他型砂的试验模拟温度场,通过比较,试验温度场与模拟温度场很接近,证明测量得到型砂的热物性参数的有效性。

### 4 结论

(1) 采用浇注通过反算法来测定镁合金用铸造型砂的热物性值是一种切实可行的试验方法,得到的热物性参数为数值模拟提供了可靠的数据。

(2) 通过反算法测量得到了硅砂、宝珠砂、铬铁矿砂、陶粒砂、钢丸混砂和粘土砂的比热和热导率随温度的曲线,通过数值模拟验证了其有效性。

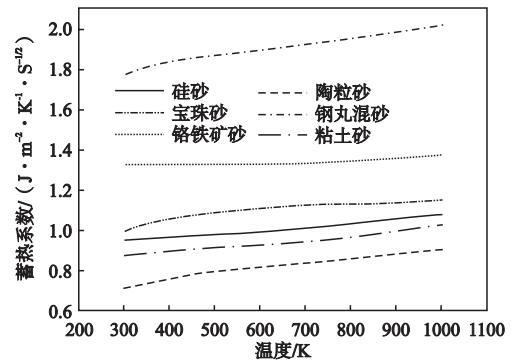


图7 常用型砂的蓄热系数

Fig. 7 Heat storage coefficients of several kinds of common molding sand

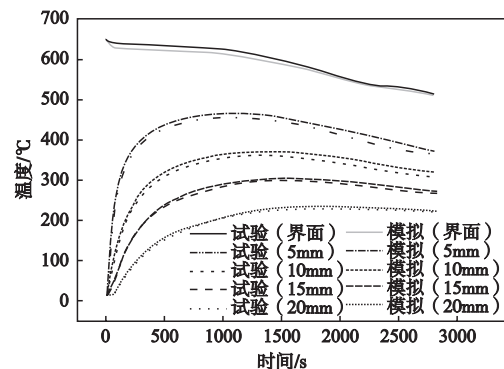


图8 模拟温度场与试验温度场比较

Fig. 8 Comparison of simulated temperature field and experimental temperature field

(3) 利用测得的热物性参数得到型砂的蓄热系数,通过比较型砂的蓄热系数,得到不同型砂对于镁合金铸件的冷却能力,与工厂实际情况相符合。

#### 参考文献:

- [1] JALURIA Y. Challenges in the accurate numerical simulation of practical thermal processes and systems [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2013, 23: 158-175.
- [2] 郭志鹏,熊守美,曹尚炫,等.热传导反算模型的建立及其在求解界面热流过程中的应用[J].金属学报,2007,43(6):607-611.
- [3] 殷亚军,涂志新,田桥,等.基于反热传导法的消失模铸件/铸型界面传热系数研究[J].特种铸造及有色合金,2018,38(4):391-394.
- [4] 随大山.铸造凝固过程热传导方向问题参数辨识技术研究[D].上海:上海交通大学,2008:1-8.
- [5] 潘应军,林汉同,魏伯康,等.天然无定形石墨砂热物性参数的测定[J].铸造技术,1994,13(4):12-16.

- [6] 李德恩, 徐志峰, 赵燕燕, 等. 基于SLS覆膜砂型(芯)的镁合金砂型铸造的阻燃机理分析[J]. 铸造, 2015, 64(2): 140-141
- [7] 高德明, 邵华, 吕志军. 凝固模拟所用砂型热物性参数的测定和研究[J]. 铸造技术, 2002, 23(5): 311-313.
- [8] 闫新飞, 李少雨, 马飞治, 等. 砂型铸造用型砂热物性参数的研究[J]. 铸造, 2015, 64(11): 1113-1115.
- [9] 厉松春, 周建国, 于敞, 等. 造型材料表观热物性的测定[J]. 现代铸铁, 1988, 3(7): 25-29.
- [10] 罗爱华, 王文清. 铸型热物性值及金属-铸型界面换热系数的测试理论及方法[J]. 热加工工艺学, 1988, 4(12): 39-42.
- [11] 涂明武, 谭昊, 王文清. 型砂热物性测试装置的研究及应用[J]. 中国铸机, 1995, 6(3): 45-46.
- [12] 杨迎东. 铸件凝固过程仿真研究[D]. 西安, 西安理工大学, 2007: 32-38.
- [13] 徐云山, 曾召田, 吕海波, 等. 高温下红黏土热导率的变化规律试验研究[J]. 地质工程学报, 2017, 25(6): 1467-1468.
- [14] 刘丽敏, 单忠德, 刘丰, 等. 基于多材质复合铸型的铸铁件铸造工艺数值模拟与试验研究[J]. 铸造, 2018, 67(11): 955-957.

---

## Determination and Study on Thermophysical Parameters of Molding Sand for Magnesium Alloy Casting

WANG Min<sup>1</sup>, ZHANG Xu-liang<sup>2</sup>, YU Guo-kang<sup>2</sup>, LIU Yue<sup>1</sup>

( 1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shengyang 110819, Liaoning, China; 2. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China )

### Abstract:

The temperature field of molding sand was obtained using the pouring method, and the thermal conductivity and specific heat capacity of silica sand, ceramsite sand, chromite sand, Taoli sand, steel pellet mixed sand and clay sand were calculated by using inverse algorithm, which could provide important data for simulation of magnesium alloy casting. The heat storage coefficient of the molding sand was obtained by using the measured specific heat capacity and thermal conductivity, and by the comparison of the heat storage coefficients between several kinds of molding sand, the cooling capacity of the common molding sand to the castings was obtained, which was consistent with the actual production.

### Key words:

molding sand; temperature field; specific heat; thermal conductivity; heat storage coefficient