

基于热探针法的冷冻砂型导热系数测定与分析

梁昊天^{1, 2}, 刘 丰^{1, 2}, 刘丽敏², 张国磊^{1, 2}

(1. 先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100083; 2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083)

摘要: 砂型导热系数对铸件性能有着重要的影响, 本文对冷冻铸造中冷冻砂型的导热系数进行了研究。采用热探针法对不同含水量的冷冻砂型在不同温度下的导热系数进行了测定, 建立冷冻砂型导热系数体积混合法预估模型, 揭示了冷冻砂型导热系数与含水量以及温度的关系。试验结果表明, 含水量越高, 冷冻砂型导热系数越大。在低于0 °C的温度环境下冷冻砂型导热系数随温度升高而增大; 0 °C时冰变水导致导热系数断崖式下降; 0 °C以上导热系数随温度的升高而升高。本文实现了冷冻砂型导热系数的测定分析, 为冷冻砂型铸造更好的应用提供了研究基础。

关键词: 冷冻砂型; 导热系数; 热探针法

砂型铸造应用范围广, 在铸造领域占有较大比重。但其对能源和资源的消耗十分巨大, 且环境污染严重。目前, 绿色铸造、清洁生产已成为铸造行业的重要任务。为实现铸造过程的绿色化, 中国机械科学研究总院无模铸造团队^[1-2]提出了一种数字化无模冷冻铸造成形方法。该技术用水作为砂型粘接剂, 在低温环境下直接铣削成形冷冻砂型, 组合成冷冻铸型后浇注成形金属件。由于以水为粘结剂, 成形过程绿色环保, 助推铸造行业数字化、绿色化发展。

砂型的导热系数对铸件的冷却速率有着重要影响, 直接影响铸件成形质量, 许多学者针对砂型的导热系数做了研究^[3]。中北大学张国伟等人^[4]研究了树脂砂中石墨粉和锆砂的含量对砂型导热系数的影响。闫新飞等人^[5]采用数值模拟与试验结合的方法研究了砂型的热物性参数, 结果表明物性参数受温度影响明显, 浇注过程模拟中砂型预测温升与实际浇注中砂型温升相近。M Siegler^[6]认为含冰太空星壤的导热系数与冰的体积含量成正比, 提出了“体积混合法”用于预测导热系数。然而目前对冷冻砂型各项热物性参数的研究仍不够深入。

热探针法相比于稳态法和瞬态法, 在测量过程中样品温升较低, 不易引起样品自身状态的改变, 测量结果更符合样品真实的自然状态^[7], 在冻土^[8]、土壤^[9]、水泥胶结钙质砂^[10]等材料的导热系数测量上得到了较为成功的应用。Penner^[8]使用单针热探针法测定了冻土的热物性; 西北农林科技大学李民^[9]等人利用单针法, 通过对测得的土壤导热系数的变化进行分析计算, 比较准确地测量了土壤的含水率; 中南大学马纯爱^[11]基于热探针法研究了颗粒多孔材料有效热导率与粒径、孔隙率和含水率之间的关系。以上研究表明, 热探针法可以较为准确的测量低温环境下含水砂土的各项热物性参数。本文采用单针热探针法, 分别对不同温度及含水量的冷冻砂型进行了导热系数测试, 为冷冻砂型更好的应用提供了研究基础。

作者简介:

梁昊天(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为机械制造及其自动化。E-mail: 15632579886@163.com

通讯作者:

刘丰, 男, 博士, 研究员, 博士研究生导师。E-mail: liufengcam@162.com

中图分类号: TG249.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

05-0570-06

基金项目:

冷冻砂型绿色铸造成形工艺研究(2021YFB3401202)。

收稿日期:

2023-01-16 收到初稿,

2023-03-12 收到修订稿。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及设备

本试验选用硅砂为70/140目普通硅砂。试验原理如图1所示, 常温下干砂导热系数的测量仪器为DRX-III型热线法导热系数测试仪, 如图2a所示。温度采集设备选用

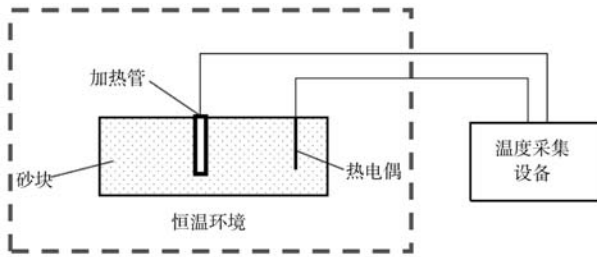
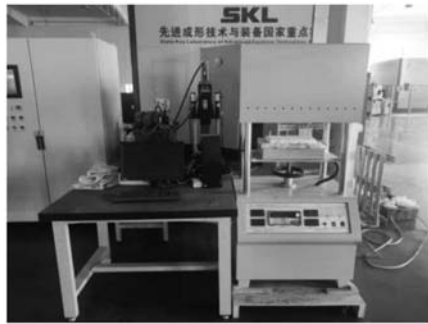


图1 试验原理图
Fig. 1 Experimental principle



(a) DRX-III型热线法导热系数测试仪



(b) EX4000多路温度记录仪

图2 试验所需设备
Fig. 2 Experimental equipment

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{d \ln t}{\Delta T(t)} \quad (1)$$

式中： q 为加热探针的加热功率， t 为加热时间， ΔT 为热探针温升。

由于时间对数 $\ln t$ 与热探针温升 $\Delta T(t)$ 在热探针加热稳定后线性相关，且考虑热探针材质存在的导热系数以及导热系数测试公式中省略的高阶项等因素影响，导热系数测定公式可以简化为公式(2)。

$$\lambda = k \frac{q}{4\pi} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{\Delta T(t_2) - \Delta T(t_1)} \quad (2)$$

表1 不同含水量砂型实验条件参数
Table 1 Measurement parameter table of thermal conductivity of sand mold with different water content

含水量/%	试验温度/℃															
1	-40	-30	-20	-10	-1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	-40	-30	-20	-10	-1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	-40	-30	-20	-10	-1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
15	-40	-30	-20	-10	-1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	-40	-30	-20	-10	-1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

1.3 热探针精度校正

DRX-III型热线法导热系数测试仪可以测量25~1 000℃温度范围内耐火材料的导热系数，以DRX-III型热线法导热系数测试仪在25℃±1℃的环境下测量的干砂导热系数作为标准，对热探针法测得的导热系数进行校准。热探针温升与时间的对数曲线

EX 4000多路温度记录仪如图2b所示。为了降低探针几何效应对导热系数测量的影响，长度与直径(L/d)之比应满足 $L/d > 42$ ，本文取长径比为50，即热探针直径为3 mm，长度为150 mm。冷冻砂型的制备在工业冰箱中进行。

1.2 试验设计

根据导热系数测定公式(1)，可以计算出冷冻砂型的导热系数 λ 。

式中： k 为误差系数。

用经过校准后的热探针对不同温度下以及不同含水量下的冷冻砂型进行导热系数测试。为了保证热探针测量的精度，所有砂块尺寸均为300 mm×300 mm×250 mm。由于干砂在散沙状态时孔隙率约为41.6%，其冷冻状态下的最大含水量约为24.2%（质量分数，下同），因此本文以20%含水量作为最大添加量。试验参数设计如表1所示。

如图3所示，将其代入公式2计算求得其导热系数，与DRX-III型热线法导热系数测试仪测得的导热系数进行对比，如表2所示。

经过多次校准后，热探针测得的导热系数与DRX-III型热线法导热系数测试仪测得的导热系数之间误差在2%以下，可以认为热探针得到准确的导热系数。

表2 导热系数测试仪与热探针法测量数值校准表
Table 2 Thermal conductivity tester and thermal probe calibration table $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

项目	测量次数				
	1	2	3	4	5
导热系数测试仪	0.572	0.575	0.572	0.571	0.570
热探针法	0.567	0.566	0.570	0.569	0.571
误差/%	-0.87	-1.56	-0.34	-0.35	0.18

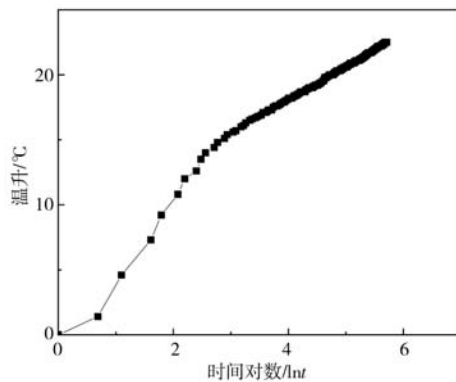


图3 时间对数 & 温升

Fig. 3 Logarithm of time & temperature rise

2 结果和讨论

2.1 温度、含水量对冷冻砂型导热系数影响

分别对1%、5%、10%、15%、20%含水量的冷冻砂型在-40~100℃的温度环境下进行测试，为了保证结果的可信度，每个砂型分别测量5次，取其平均值，所得结果如表3所示。

温度与导热系数关系如图4所示，冷冻砂型导热系数变化趋势相近，在温度低于0℃时，冷冻砂型导热系数随着温度的升高而升高。在0℃时，随着冰融化变成水，冷冻砂型导热系数出现了断崖式下降，并且含水量越高，下降幅度越大。在温度高于0℃的情况下，砂型导热系数随温度的变化幅度极小，呈略微上升趋势。在含水量1%的情况下，0~90℃的导热系数变化仅在7.1%以内，含水量在20%的情况下，砂型的导热系数在0~90℃的环境下变化也在13.8%以内。

在温度恰好等于0℃时，冷冻砂型的粘结桥可以有冰和水两种状态，导热系数受硅砂砂粒、冰晶和水的共同影响。由于水的导热系数与硅砂相近，且远小于冰的导热系数，导致冷冻砂型的导热系数在0℃出现了断崖式下降。为了更直观表示在0℃环境下温升情况，以20%含水量的冷冻砂型为例，测得温升随时间的变化曲线如图5所示。0℃时，加热探针的温升会导致冰晶粘结桥融化成水，温度基本保持0℃不变，靠近热探针的冷冻砂型冰晶粘结桥基本融化完毕后，温度开始正常上升，待其温升稳定后，可以测得冰晶粘结桥完全

表3 不同温度下不同含水量冷冻砂型的导热系数
Table 3 Thermal conductivity of chilled sand mold at different temperatures $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

温度/℃	含水量/%				
	1	5	10	15	20
-40	0.502	0.595	0.723	0.875	1.036
-30	0.531	0.621	0.739	0.882	1.046
-20	0.542	0.626	0.75	0.889	1.059
-10	0.559	0.639	0.764	0.894	1.076
-1	0.568	0.645	0.771	0.907	1.083
0	0.555	0.575	0.603	0.634	0.669
10	0.575	0.595	0.623	0.654	0.689
20	0.575	0.596	0.624	0.656	0.691
30	0.585	0.606	0.635	0.667	0.703
40	0.585	0.606	0.636	0.669	0.706
50	0.595	0.617	0.647	0.680	0.718
60	0.595	0.618	0.649	0.683	0.722
70	0.605	0.628	0.660	0.695	0.734
80	0.606	0.629	0.661	0.696	0.737
90	0.616	0.642	0.677	0.716	0.761
100	0.625	0.628	0.621	0.619	0.622

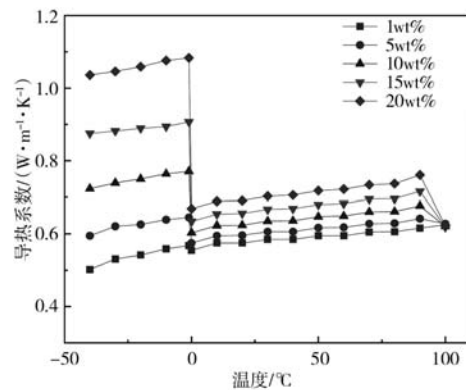


图4 温度与导热系数关系

Fig. 4 Relationship between temperature and thermal conductivity

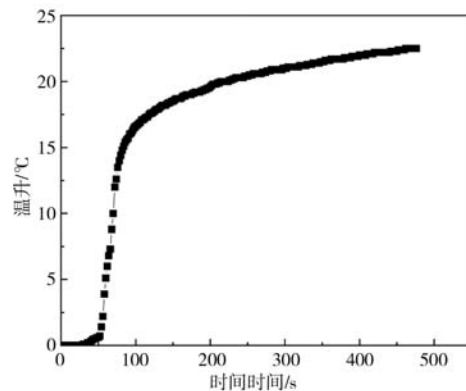


图5 20%冷冻砂型0℃时温升

Fig. 5 20% frozen sand mold temperature rise at 0℃

融化后0℃时湿砂的导热系数。

含水量与导热系数关系如图6所示,在-1℃、-20℃以及-40℃的温度下,不同含水量下的导热系数变化趋势基本一致。含水量越高,导热系数越大,含水量高达20%的冷冻砂型导热系数接近1%含水量冷冻砂型的2倍。

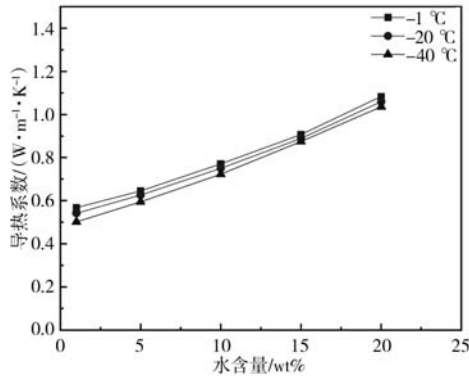
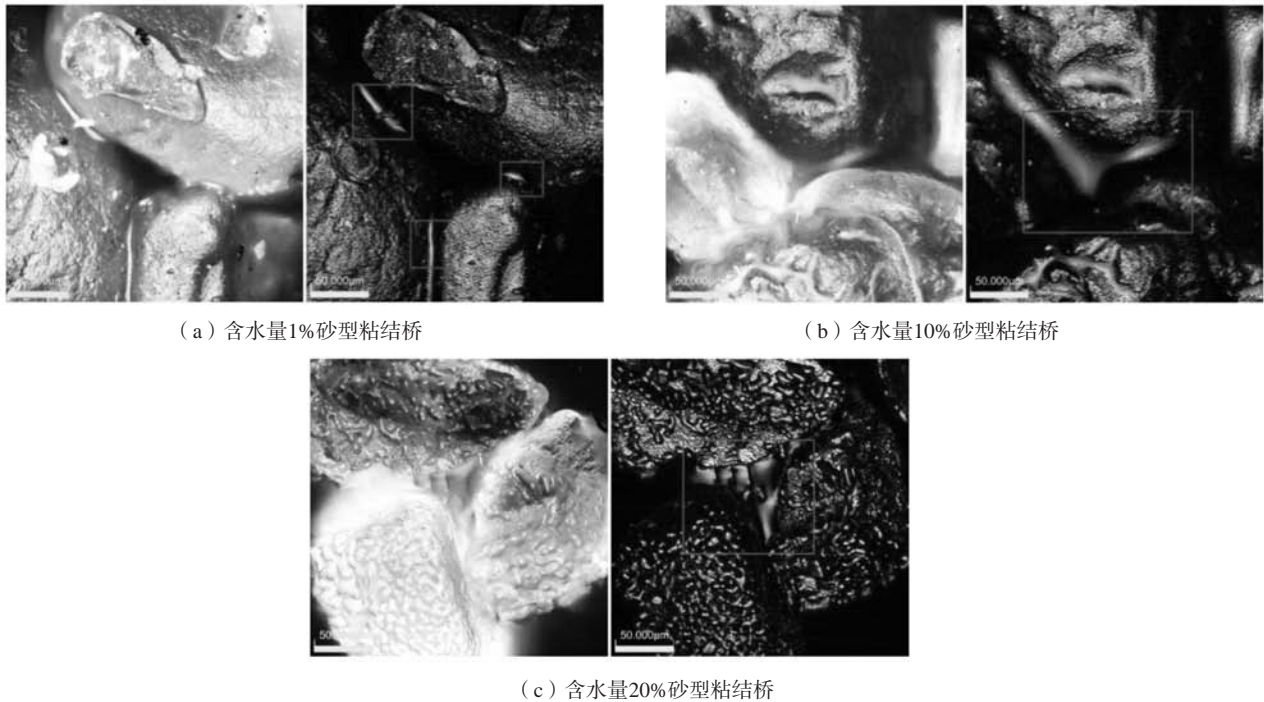


图6 含水量与导热系数关系

Fig. 6 Relation between water content and thermal conductivity

其原因是砂粒之间存在大量孔隙,而冰晶粘结桥作为热传导介质,其含量影响着冷冻砂型的导热系数。在含水量仅有1%的情况下,冰晶粘结桥虽然将砂粒粘结成形,但由于含水量过少,冰晶粘结桥无法对砂粒形成完全的覆盖,如图7a所示。在激光共聚焦下可以观察到,砂粒与砂粒之间存在着大量粘结桥无法覆盖的孔隙,阻碍砂型对热量进行有效的传导,因此,导热系数与干砂相接近。而在含水量达到10%的情况下,砂粒表面覆盖了大量冰晶,如图7b所示,大量的冰晶将砂粒粘结在一起,砂粒之间的部分孔隙被冰晶所填充,使热量可以很好的在冷冻砂型中进行传导,导热系数由硅砂砂粒和冰晶共同影响,并且由于冰的导热系数在低温环境下远大于硅砂,因此导热系数大于干砂的导热。在含水量超过20%之后,砂粒之间的孔隙大部分被冰填满,形成一个完整的整体,如图7c所示。因此含水量越高,导热系数越大,冷冻砂型的导热性能就越好。



(a) 含水量1%砂型粘结桥

(b) 含水量10%砂型粘结桥

(c) 含水量20%砂型粘结桥

图7 不同含水量砂型粘结桥

Fig. 7 Sand bridges with different moisture content

2.2 冷冻砂型导热系数预估模型建立

基于冰(水)的含量占砂型整体体积的比例,冷冻砂型的导热系数可以简化为冰(水)导热系数与散砂导热系数按一定比例累加,体积混合方法^[6]可以作为预测冷冻砂型热导率的依据,真空环境下体积混合方法公式如公式(3)所示:

$$\lambda = \lambda_{\text{dry}} + \varepsilon_0 (\lambda_{\text{ice}}) \frac{w(1-\varepsilon_0) \rho_{\text{dry}}}{(1-w) \varepsilon_0 \rho_{\text{ice}}} \quad (3)$$

考虑到非真空环境下冷冻砂型孔隙中空气对其导热系数的影响,体积混合方法估算的冷冻砂型热导率计算公式修正如下:

$$\lambda = \lambda_{\text{dry}} + \varepsilon_0 (\lambda_{\text{ice}} - \lambda_{\text{air}}) \frac{w(1-\varepsilon_0) \rho_{\text{dry}}}{(1-w) \varepsilon_0 \rho_{\text{ice}}} \quad (4)$$

式中： ε_0 为干砂的孔隙率； w 为纯冰质量分数； ρ_{dry} 为干砂的密度 kg/m^3 ； ρ_{ice} 为冰的密度 kg/m^3 ； λ 为估算冷冻砂型热导率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； λ_{dry} 为含孔隙干砂的热导率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； λ_{ice} 为纯冰的热导率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； λ_{air} 为空气的热导率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

由于空气导热系数随温度变化极小，取固定值0.027。含孔隙干砂热导率、纯冰（水）热导率如表4所示。

表4 含孔隙干砂热导率、纯冰（水）热导率
Table 4 Thermal conductivity of dry sand with pores and of pure ice (water) $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

温度/ $^{\circ}\text{C}$	硅砂	纯水（冰）
-40	0.516	2.315
-30	0.526	2.292
-20	0.533	2.268
-10	0.542	2.247
-1	0.554	2.222
0	0.555	0.545
10	0.567	0.563
20	0.569	0.576
30	0.572	0.589
40	0.580	0.597
50	0.583	0.612
60	0.583	0.623
70	0.596	0.639
80	0.602	0.642
90	0.615	0.653

根据公式4得到冷冻砂型导热系数与砂型温度和砂型含水量的关系如图8所示。热探针法测得的冷冻砂型导热系数与体积混合法导热系数计算值趋势基本一致，且两者间绝对误差较小，最大误差为11.35%。因为水的导热系数仅为冰的导热系数的1/4，与硅砂的导热系数相近，因此砂型温度在 0°C 时，冷冻砂型导热系

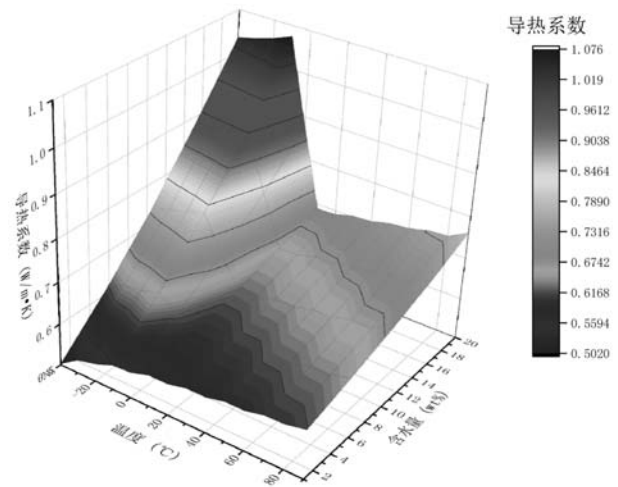


图8 冷冻砂型理论导热系数与砂型温度和砂型含水量的关系
Fig. 8 Relation between theoretical thermal conductivity of frozen sand mold and sand temperature and water content

数出现断崖式下降，且水作为冰的状态对砂型的导热系数影响更大。

3 结论

(1) 冷冻砂型的导热系数受含水量的影响较大，含水量越高冷冻砂型的导热系数越大。在温度低于 0°C 时，含水量20%的冷冻砂型在 -40°C 的环境下的导热系数接近含水量1%的冷冻砂型导热系数的2倍；温度为 90°C 时，含水量20%的冷冻砂型的导热系数超过含水量1%的冷冻砂型导热系数的23.5%。

(2) 在 $-40\sim-1^{\circ}\text{C}$ 的环境下，冷冻砂型导热系数随温度升高而升高； 0°C 时，随着冰变水冷冻砂型导热系数出现断崖式下降；在 $0\sim100^{\circ}\text{C}$ 的环境下，砂型导热系数也随温度的升高而升高。

(3) 建立了冷冻砂型体积混合法导热系数预估模型，其理论计算值与热探针法测得导热系数误差较小，可以作为冷冻砂型导热系数预估模型。

参考文献:

- [1] 单忠德, 杨浩秦, 刘丰, 等. 数字化无模冷冻铸造成形方法研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (12): 4321-4328.
- [2] SHAN Zhongde, YANG Haoqin, LIU Feng, et al. Performance of digital patternless freeze-casting sand mould [J]. China Foundry, 2020, 17 (4): 308-313.
- [3] 胡瑞霞, 袁训锋, 杨燕, 等. 铸型对镁合金铸造过程温度分布的影响 [J]. 中国铸造装备与技术, 2015 (4): 50-53.
- [4] 张国伟, 赵高瞻, 王明杰, 等. 梯度化铸型导热系数的实验研究 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (2): 161-164.
- [5] 闫新飞, 李少雨, 马文治, 等. 砂型铸造用型砂热物性参数的研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (11): 1113-1115.

- [6] SIEGLER M, AHARONSON O, CAREY E, et al. Measurements of thermal properties of icy mars regolith analogs [J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2012, 117 (E3): 1–24.
- [7] 李毅, 邵明安. 热脉冲法测定土壤热性质的研究进展 [J]. *土壤学报*, 2005 (1): 134–139.
- [8] PENNERE. Thermal conductivity of frozen soils [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1970 (7): 982–987.
- [9] MIN, BING, CHENG, et al. Single-probe heat pulse method for soil water content determination: comparison of methods [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15 (7): 1–13.
- [10] 曾召田, 梁珍, 孙凌云, 等. 水泥胶结钙质砂导热系数的影响因素试验研究 [J]. *岩土力学*, 2022, 43 (S1): 88–96.
- [11] 马爱纯, 蔡澄汉, 周天, 等. 热探针法测试颗粒多孔材料有效热导率的研究 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2021, 52 (1): 259–266.

Determination and Analysis of Thermal Conductivity of Frozen Sand Mold Based on Thermal Probe Method

LIANG Hao-tian^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, LIU Li-min², ZHANG Guo-lei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing 100083, China; 2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract:

The thermal conductivity of sand mold has an important effect on the performance of castings. The thermal conductivity of sand mold in frozen casting was studied in this paper. The thermal conductivity of frozen sand mold with different water content at different temperatures was measured by thermal probe method, and the prediction model of thermal conductivity of frozen sand mold with volume mixing method was established. The relationship between thermal conductivity of frozen sand mold and water content and temperature was revealed. The experimental results showed that the higher the water content was, the higher the thermal conductivity of the frozen sand was. When the temperature was below 0 °C, the thermal conductivity of the frozen sand type increased with the increase of temperature. When the temperature was 0 °C, the thermal conductivity dropped precipitously due to the change of ice and water. In this paper, the thermal conductivity of frozen sand mold was determined and analyzed, which provided the research basis for the better application of frozen sand mold casting.

Key words:

frozen sand mold; thermal conductivity; thermal probe method
