

高锰钢热物理性质的热分析

常宝璇¹, 朱可¹, 杨宇诗¹, 何奥平¹, 赵四勇², 曾建民^{1*}

¹广西大学资源环境与材料学院, 广西 南宁

²广西长城机械有限公司, 广西 贺州

Email: ac121696@163.com, *zjmg@gxu.edu.cn

收稿日期: 2021年1月31日; 录用日期: 2021年2月25日; 发布日期: 2021年3月12日

摘要

铸造高锰钢是一种在冶金、矿山、建材行业广泛使用的抗磨材料。采用数值模拟技术进行高锰钢的铸造和热处理工艺分析有利于提高生产效率降低生产成本, 但模拟所需的热物理性能是材料数据中空白点。本研究采用综合热分析方法, 测量了三种最常用的铸造高锰钢的热物理系数(热膨胀系数, 热扩散系数, 比热容和导热系数)。实验结果表明: 三种材料的热膨胀系数随温度升高而增加, 增加锰含量会提高热膨胀系数; ZGMn18的热膨胀系数在三种材料中最大, 材料的热容的绝对值在500℃前与温度成正比, 500℃后与温度成反比, 锰含量越高, 热容的绝对值越大; 材料的热扩散系数随温度升高而增大, 且锰含量增加, 热扩散系数增大; 材料的导热系数随温度升高而增大, 锰含量越高, 导热系数越大。

关键词

高锰钢, 热物理系数, 热分析

Measurement of Thermophysical Properties of High Manganese Steel

Baoxuan Chang¹, Ke Zhu¹, Yushi Yang¹, Aoping He¹, Siyong Zhao², Jianmin Zeng^{1*}

¹College of Resource, Environmental and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

²Guangxi Changcheng Mechanical Co., Ltd., Hezhou Guangxi

Email: ac121696@163.com, *zjmg@gxu.edu.cn

Received: Jan. 31st, 2021; accepted: Feb. 25th, 2021; published: Mar. 12th, 2021

Abstract

Cast high manganese steel is a kind of wear-resistant material widely used in metallurgy, mining

*通讯作者。

文章引用: 常宝璇, 朱可, 杨宇诗, 何奥平, 赵四勇, 曾建民. 高锰钢热物理性质的热分析[J]. 材料科学, 2021, 11(3): 178-184. DOI: 10.12677/ms.2021.113023

and building materials industry. Using numerical simulation technology to analyze the casting and heat treatment process of high manganese steel is beneficial to improve production efficiency and reduce production cost, but the thermophysical properties needed for simulation are blank points in material data. In this study, the thermophysical coefficients (thermal expansion coefficient, thermal diffusion coefficient, specific heat capacity and thermal conductivity coefficient) of the three most commonly used cast high manganese steels were measured by comprehensive thermal analysis method. The experimental results show that the thermal expansion coefficient of the three materials increases with the increase of temperature, and the thermal expansion coefficient will increase with the increase of manganese content. The thermal expansion coefficient of ZGMn18 is the largest among the three materials. The absolute value of heat capacity of the material is proportional to temperature before 500°C and inversely proportional to temperature after 500°C. The higher the manganese content, the greater the absolute value of heat capacity. The thermal diffusion coefficient of the material increases with the increase of temperature, and the thermal diffusion coefficient increases with the increase of manganese content. The thermal conductivity of the material increases with the increase of temperature, and the higher the manganese content, the greater the thermal conductivity.

Keywords

High Manganese Steel, Thermophysical Properties, Thermal Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高锰钢又叫哈德斯菲尔德钢,是一种历史悠久的耐磨材料[1][2]。这种材料在受到高压、强冲击作用下表面会迅速加工硬化,形成马氏体加工硬化层,因此耐磨效果好,在冶金、矿山、机械和建材加工行业应用量大面广,通常作为大型铸件,服役于抗冲击磨损工件中[3]。为了提高铸件质量,正确地进行铸件设计和铸造、热处理工艺参数设计,通常要用数值模拟的方法对铸件凝固过程进行模拟,检验工艺参数设计是否合适。铸件的凝固和热处理过程数值模拟是不可缺少的有力工具。数值模拟的准确与否除了数学模型的算法之外,最重要的就是材料的热物理系数和边界条件的设置。然而,目前对于高锰钢的热物理数据非常少,各种商用模拟软件均没有高锰钢的热物理数据。因此通过实验方法获得高锰钢的热物理数据是准确地模拟铸件凝固和热处理过程的重要工作。本工作将采用热分析的方法,分别测试用途最为广泛的 ZGMn13、ZGMn18 和 ZGMn21 的热物理系数,为高锰钢数值模拟提供准确的热物理数据。

2. 试验方法

2.1. 试验材料

实验所用的为贺州长城机械有限公司出产的三种铸钢 ZGMn13、ZGMn18、ZGMn21,其化学组成如表 1 所示。

2.2. 实验设备及仪器

- 1) 样品加工: 线切割机、M2 型预磨机、PG2 型金相试样抛光机。

Table 1. Composition of high manganese steel for experiment**表 1.** 实验用铸态高锰钢化学成分

牌号	化学成分/% (质量分数)						
	Fe	Mn	Cr	Si	Ni	V	Mo
ZGMn13	83.99	13.52	1.91	0.44	0.10	0.033	-
ZGMn18	79.04	18.58	1.74	0.54	0.08	0.026	-
ZGMn21	77.16	20.30	1.84	0.61	0.06	0.026	0.013

2) 热膨胀系数测试: 热膨胀仪(型号耐驰 DIL-402 Expedis Classic)。

3) 热扩散系数测试: 激光法导热仪(型号耐驰 LFA-467)。

4) 热容测试: 差式扫描量热仪(型号耐驰 DSC-404-Classic)。

2.3. 实验原理与过程

2.3.1. 试样准备

1) 切样: 对试样进行线切割加工, 根据规定的尺寸, 热膨胀测试的样品尺寸为 $\Phi 25 \times 6$ mm; 热扩散系数测试尺寸为 $\Phi 12.7 \times 2.5$ mm。

2) 清洗: 通过超声波的高频振荡, 使得无水乙醇不断产生微米尺寸的气泡来冲击油污, 使得样品表面的清洁度提高。在样品完成打磨后, 也采用超声波清洗来洗去表面去除氧化层时掉落的氧化物颗粒或砂纸的砂粒, 防止对测试结果产生影响。

3) 打磨: 对清洗后的样品进行磨制, 由于试样切割时表面已被氧化, 并且具有加工后的毛刺部分, 况且氧化层与基体的导热系数与热膨胀系数不一样也会影响测试结果。磨光的目的是为了去除线切割加工后薄片表面的毛刺以及除去已经发生氧化部分。

2.3.2. 热膨胀测试

取一定长度的样品, 放入炉腔内, 通过一定的升温或者降温速率, 样品的长度随着温度的变化而变化, 在这种条件下, 样品的变化量会通过顶杆传送到左边的运动传感器, 此传感器会自动记录数据的变化, 并在测试结束后, 通过与标准样的校核自动计算出热膨胀率, 热膨胀率与热膨胀系数的关系可以用公式 1) 表示:

$$\alpha = \frac{dL}{L_0 \cdot dT} \quad (1)$$

α : 材料的线性热膨胀系数, dL/L_0 : 材料的热膨胀率, dT : 温度的变化量

2.3.3. 热容测试

热容测试的是测试空坩埚的 DSC 曲线、蓝宝石标准参比样的 DSC 曲线、样品的 DSC 曲线, 然后根据公式 2) 可以测得样品的热容:

$$C_2 = \frac{(Y_2 - Y_0) \cdot m_1}{(Y_1 - Y_0) \cdot m_2} \cdot C_1 \quad (2)$$

其中公式中个符号表示的物理量如下:

m_1 : 蓝宝石参比标准样质量, mg;

m_2 : 待测样品质量, mg;

Y_0 : T1 时基线的 DSC 值;

Y_1 : T1 时参比样的 DSC 值;

Y_2 : T1 时待测样的 DSC 值;

C_1 : 参比样比热容, $J/mg^{-1} \cdot K^{-1}$;

C_2 : 待测样比热容, $J/mg^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

差热分析仪开机、预热 24 小时后, 先放入空的 Al_2O_3 坩埚, 抽炉体内至真空, 通入氮气, 在室温下保温一段时间, 以 $10 K/min$ 的加热速率, 从室温升温到预定温度, 然后等待冷却至室温, 接着以相同的方式分别测试放入蓝宝石、三种样品的曲线, 经过上述公式(2)计算后, 得到样品的热容。

2.3.4. 热扩散系数测试

热扩散系数表示物体在受到加热或冷却的时候, 温度趋于均匀一致的能力。本实验采用激光闪射法, 其测试原理是向试样辐照一束垂直于试样表面的激光脉冲, 试样被单面加热, 测出在一维热流条件下试样背面的温升曲线, 通过傅里叶传热公式(3)对数据进行修正计算后获得材料的热扩散系数。

$$\alpha = \frac{1.38L^2}{t_{1/2}\pi^2} \quad (3)$$

α 代表材料的热扩散系数, L 样品的厚度, $t_{1/2}$ 样品升温到一半测试温度的时间

3. 实验结果与分析

3.1. 热膨胀系数分析

三种样品的热膨胀率随温度的变化如图 1 所示。从图中可以清楚的看到, 三种高锰钢的热膨胀率都随温度变化的曲线呈线性增加, 曲线的斜率随温度的增加而增大, 表明热膨胀系数随温度增加而增加。此外, 这三种锰钢的热膨胀率与锰含量有关, 锰含量越高, 热膨胀率越大。但这种由于锰含量不同而导致的热膨胀率不同的差异很小。例如在 $700^\circ C$ 以下时, ZGMn13 与 ZGMn18 的曲线基本上重合, 并且 ZGMn21 也仅仅比 ZGMn18 高出百分之零点零几。

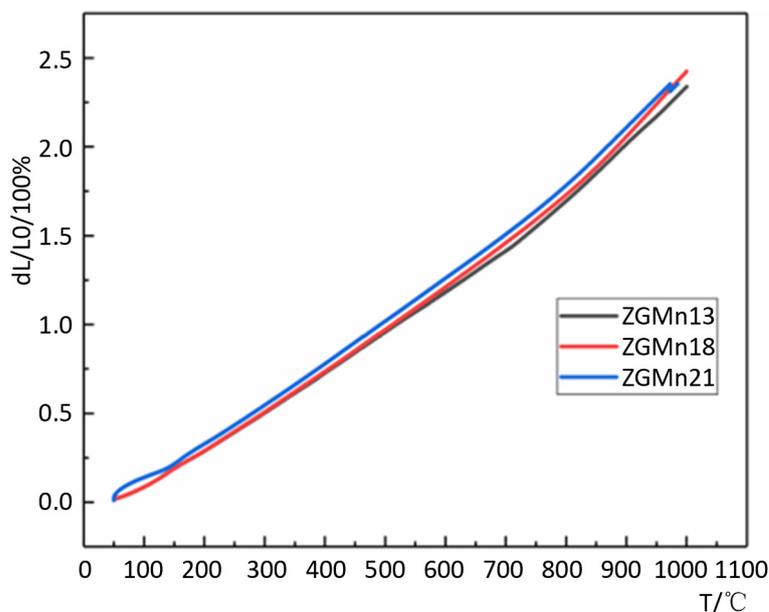


Figure 1. Curve of thermal expansion rate with temperature

图 1. 热膨胀率随温度变化曲线

三种样品的热膨胀系数随温度的变化如图 2 所示。如图可知，在 50℃至 200℃的温度区间内，高锰钢的热膨胀系数随温度变化的速率大，200℃以后，热膨胀系数增大的速率减小，但热膨胀系数还是继续随温度增大而增大，800℃以后，热膨胀系数增加的速率再次加快。

在三种材料中，ZGMn18 的热膨胀系数始终是最大的，ZGMn21 的热膨胀系数一开始是最小的，但由于热膨胀系数增速快，ZGMn21 在 400℃接近 ZGMn13 的热膨胀系数，600℃以后超过 ZGMn13，并且在 800℃时 ZGMn21 的速率增加的最多。

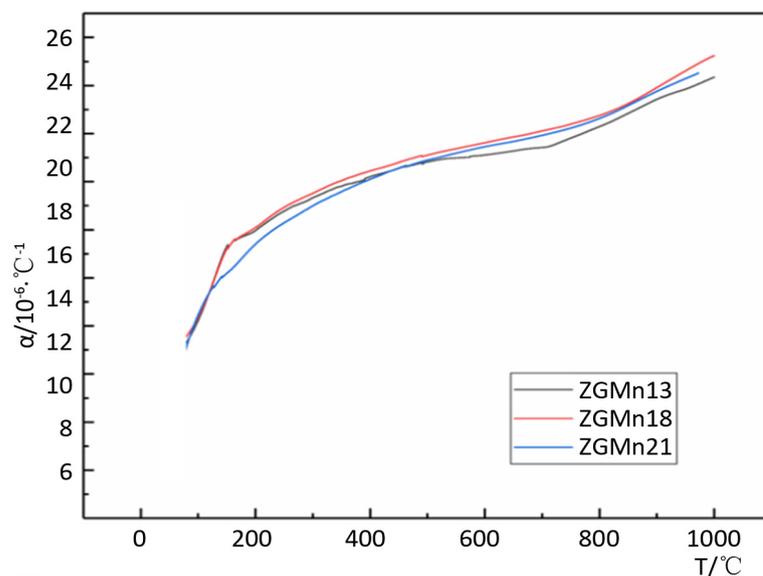


Figure 2. Curve of thermal expansion coefficient with temperature

图 2. 热膨胀系数随温度变化曲线

3.2. 热扩散系数分析

三种样品的热扩散系数的测试结果见图 3。

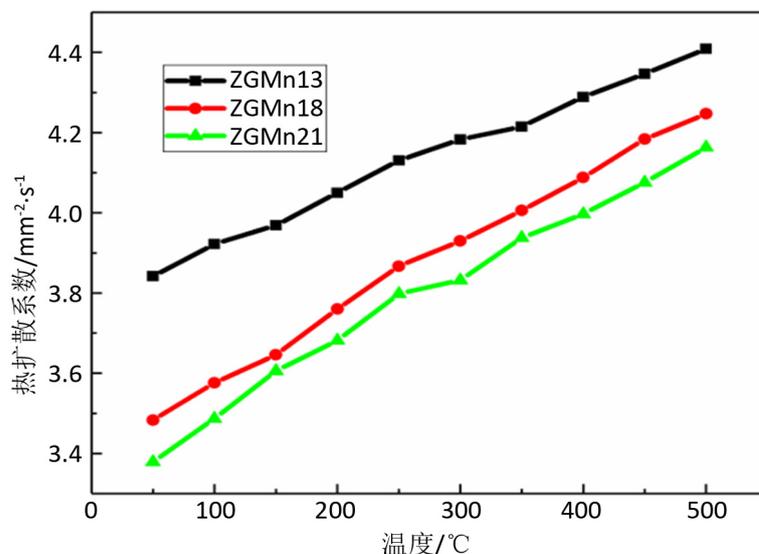


Figure 3. Curve of thermal diffusion coefficient with temperature

图 3. 热扩散系数随温度变化曲线

可以清楚地看到, 试样的热扩散系数随着温度的增加而增加。同时, 随着锰含量的增加, 三种高锰钢的热扩散系数逐渐降低, ZGMn21 的热扩散系数最低, 并且热扩散系数的极差随着锰含量增加而增加。三种样品在相同温度下的热扩散系数的差值也与温度增加成反比。

3.3. 热容分析

测试所用的样品碎屑取得后, 在电子天平上三次测量后取平均值来减小偶然误差。通过公式(2)计算, 拟合得到热容变化的曲线如图 4 所示。

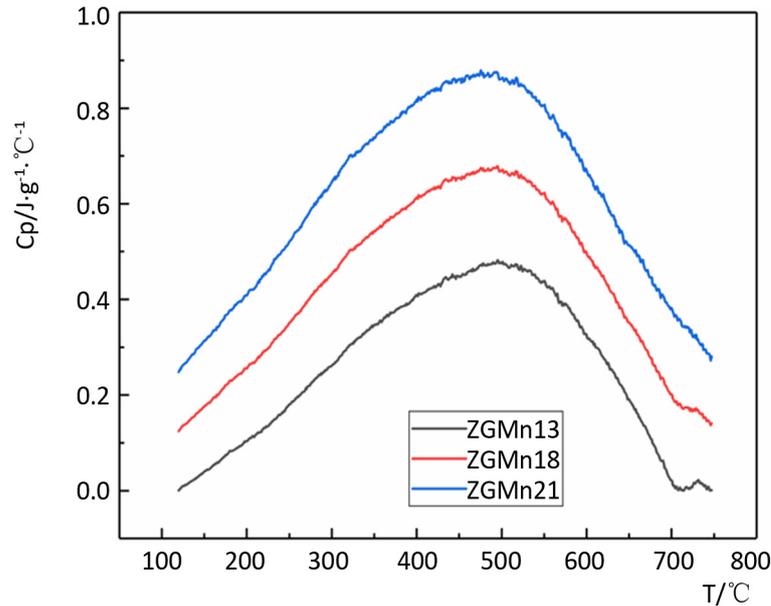


Figure 4. Curve of heat capacity with temperature
图 4. 热容随温度变化曲线

通过图 4 可知, 随着温度的增加, 材料的质量热容先逐渐增加, 在 500°C 左右达到顶点, 此后热容又逐渐减少。三种材料的热容随着锰含量的增加而增加, 可以说在质量热容与锰含量成正比。

3.4. 导热系数计算与分析

金属的导热系数 λ 就是比热容 C_p 与热扩散系数 α 以及密度 ρ 的乘积, 如公式(4)所示。

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (4)$$

导热系数随温度变化曲线, 曲线如图 5 所示。由曲线可知, 三种样品的导热系数都与温度成正比, 但是随着温度的升高, 导热系数增大的速率降低, 曲线逐渐平缓。同时, 三种高锰钢的导热系数也随着锰含量增加而增加。

4. 应用

热物理系数的应用, 有两种形式。一种是采用平均值, 一种是温度的函数值。对于前者, 可采用下式计算热物理系数的平均值:

$$g = \frac{\int_{T_s}^{T_p} g(T) dT}{T_p - T_s} \quad (5)$$

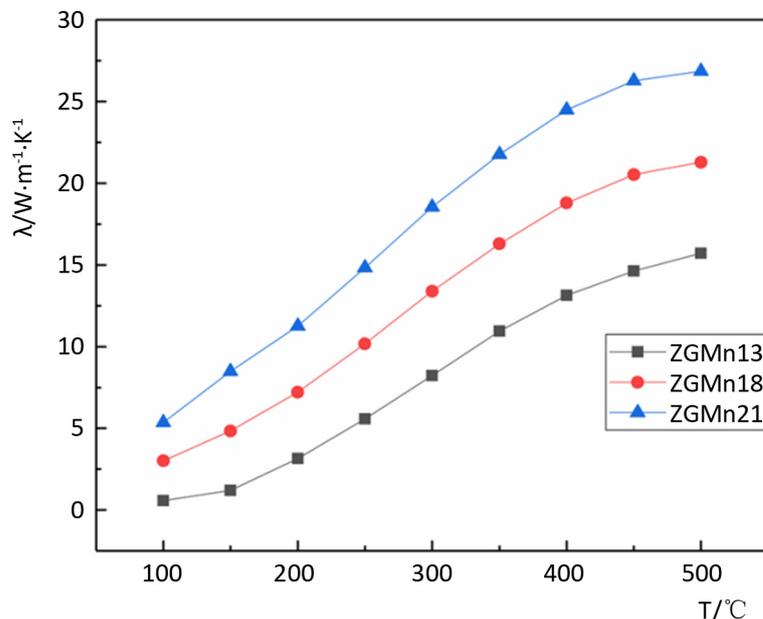


Figure 5. Curve of thermal conductivity with temperature

图 5. 导热系数随温度变化曲线

式中： g 代表热物理系数的平均值； T_p 、 T_s 是研究区间的温度上限和下限； $g(T)$ 是和温度相关的热物理系数，例如，在做高锰钢水淬过程热模拟的时候，如果加热温度为 1000°C ，水温为 25°C ，则 T_p 为 1000 ， T_s 为 25 。这种方法，热物理系数是当作常数来使用的，可以提高运算速度。

对于后者，可以把 $g = g(T)$ 函数直接输入模拟软件的数据库供模拟软件调用。这种方法，计算精度要高于前者，在工作站运行的大型分析软件通常采用这样的数据形式。

5. 结论

本文以 ZGMn13、ZGMn18、ZGMn21 三种高锰钢为实验材料，分别测试了三种材料的热膨胀系数、热扩散系数、热容、计算出导热系数，并建议了数据的应用方式。得出以下结论：

- 1) 三种材料的热膨胀系数随温度升高而增加，增加锰含量会提高热膨胀系数。ZGMn18 的热膨胀系数在三种材料中最大，ZGMn21 的热膨胀系数在高温阶段会超过 ZGMn13。
- 2) 材料的热容的绝对值在 500°C 前与温度成正比， 500°C 后与温度成反比，锰含量越高，热容的绝对值越大。
- 3) 材料的热扩散系数随温度升高而增大，且锰含量增加，热扩散系数增大。
- 4) 材料的导热系数随温度升高而增大，锰含量越高，导热系数越大。

基金项目

广西重大科技专项(桂科 AA18242001)。

参考文献

- [1] Dasic, P. (2003) International Standardization and Organizations in the Field of Tribology. *Industrial Lubrication and Tribology*, **55**, 287-291. <https://doi.org/10.1108/00368790310496437>
- [2] Jost, H.P. (2005) Tribology Micro and Macro Economics: A Road to Economic Savings. *World Tribology Congress III*. Washington DC, 13 September 2005, 18-22.
- [3] 朱可, 李强, 赵四勇, 等. 耐磨高锰钢热处理工艺研究现状[J]. 材料科学, 2020, 10(7), 554-561.