

合金元素对低合金钢铸造性能的影响

卜恒勇 李红梅 郭建政 李萌蘖

(中国第一重型机械股份有限公司能源装备材料科学研究所)

摘要 通过 JMatPro 计算,研究了真空浇注条件下,C、Si、Mn、Cr、Ni 和 Mo 等 6 种合金元素对核电用钢 SA508III 铸造性能的影响。利用正交试验原理设计了 6 因素 3 水平共 150 组试验,通过方差分析和线性回归等手段,确定了与铸造性能相关的两个目标函数的回归方程。计算结果表明,正交试验设计可以用于 SA508III 钢的合金成分优化;降低合金中 C 和 Si 的含量,有利于改善 SA508III 合金的铸造性能,减小合金在凝固过程中产生热裂和缩孔、缩松的倾向。

关键词 SA508III 钢,成分优化,铸造性能,JMatPro

中图分类号 TG142.33⁺1;TG21⁺3

文献标志码 A 文章编号 1001-2249(2014)04-0350-04

Effect of Alloy Elements on Solidification Properties of a Low Alloy Steel

Bu Hengyong, Li Hongmei, Guo Jianzheng, Li Mengnie

(Materials Research Institute for Energy Equipments, China First Heavy Industries)

Abstract: Effects of alloy elements including C, Si, Mn, Cr, Ni, and Mo, on the casting properties of SA508III steel were investigated by the JMatPro calculation. Variance analysis and linear regression were used to evaluate the regression equations for two objective functions by 6 factors, 3 levels with a total of 150 groups, which was related to casting properties of steels. The results show that the orthogonal experiment is an effective way to optimize the composition of SA508III steel. It is demonstrated by calculation that the casting properties of SA508III steel can be improved by decreasing the content of C and Si, and the casting defects such as hot tears and shrinkage porosity can be reduced.

Key Words: SA508III Steel, Composition Optimization, Casting Properties, JMatPro

近年来,数值模拟技术已经广泛地用于铸件缺陷的诊断分析和铸造工艺的优化设计^[1~3]。铸造过程数值模拟需要大量准确并且可靠的材料物性参数,如凝固区间、比热容、导热系数和密度等,这些数据往往都是温度的函数^[4]。实测材料的物性参数面临诸多挑战,首先,有些物性参数数据不易获得^[5];其次,通过试验来获得这些数据,不仅需要耗费大量的精力,而且,测试材料在高温下的物性参数条件苛刻,费用高昂^[6];最后,某些物性参数对材料的微观组织和化学成分比较敏感。

为了进一步拓展材料热物性参数数据库,同时为铸造过程数值模拟提供准确可靠、并且经济的数据来源,采用合理的数学模型计算合金的热物性参数受到越来越多的关注。JMatPro 计算软件,由于采用了合理的物理模型和数值计算方法,不仅可以按照材料的成分计算得到材料的热物性参数,包括密度、导热系数、凝固区间、杨氏模量、泊松比等,也可以给出某一合金相在凝固过程中的物理性质^[7,8]。

本课题采用 Minitab 正交试验分析软件对 SA508III 核电用钢进行成分优化设计,在其额定成分

范围内开展正交试验。利用 JMatPro 计算获得不同成分 SA508III 钢的热物性参数,包括液、固相线温度及对应的密度值,以及不同成分钢对应的凝固曲线,即温度和固相率之间的关系,并根据这些热物性参数得到和凝固性能密切相关的目标函数。通过对目标函数进行整理、回归、分析和响应优化,得到影响目标函数的主要因素,同时得到了凝固性能最优时对应的合金成分。

1 试验方法

SA508III 钢成分见表 1,可以看出,除了微量元素以外,主要含有 C、Si、Mn、Cr、Ni、Mo 和 V 共 7 种元素。由于 V 是强碳化物形成元素,使合金钢中 C 曲线右移,增强奥氏体的稳定性,大幅延长奥氏体均匀化时间,因此在实际操作中,往往尽量降低 V 的含量。由此,在试验设计中,V 的含量取定值 0.005%,并且主要考虑前 6 种合金元素对目标函数的影响,每种元素取 3 个水平。需要注意的是,SA508III 钢成分范围很窄,在如此小的成分范围内开展大量成分不同合金性能的测试难度较大,通过采用 JMatPro 计算得到的热物性参

收稿日期:2013-09-10;修改稿收到日期:2013-11-20

第一作者简介:卜恒勇,男,1983 年出生,研究员,中国第一重型机械股份有限公司能源装备材料科学研究所,天津经济技术开发区宏达街 21 号 B 座 9 层(300457),电话:022-59835568,E-mail: buhengyong@163.com

数数值进行统计分析。

为了便于交互效应的分析,C、Si、Mn、Cr、Ni 和 Mo 分别命名为 A、B、C、D、E 和 F。采用 Minitab 对上述 6 因素 3 水平进行试验设计。目标函数有两个,分别为 $T_{fs=0.9} - T_s$ 和 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$,前者为凝固 90% 对应的温度与固相线之间的温度差,后者为固、液相线之间的密度差值占固相密度的百分数。降低上述两个目标函数有利于改善合金凝固过程中产生热裂的倾向,降低钢液在液固转变过程中的体积收缩,从而提高钢液的铸造性能^[9~12]。影响目标函数的主因素为 A~F,二阶交互效应为 AB、AC、AE、AF、BC、BE、CE 和 CF,三阶交互效应为 ABC、ABE、ACE、ACF 和 BCE。只考虑这些效应而忽略其他交互效应,从所有试验组中选取了 150 组试验,试验次数为全因子试验次数的 20.6%,计算可知功效为 80.7%,因此可以选择 150 组数据对其进行统计分析。

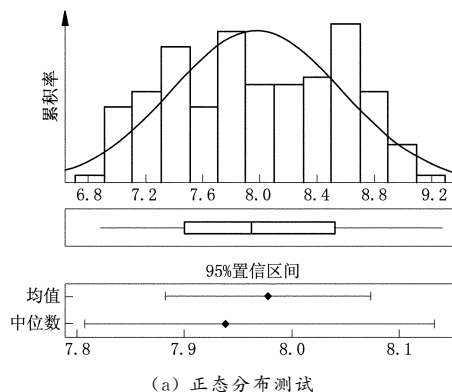
表 1 SA508Ⅲ 钢的额定成分及成分设计

水平	因素($w_B/\%$)					
	A(C)	B(Si)	C(Mn)	D(Cr)	E(Ni)	F(Mo)
规定值	0.16~0.20	0.15~0.30	1.20~1.50	≤0.18	0.60~0.80	0.45~0.55
1(低值)	0.16	0.15	1.20	0.02	0.60	0.45
2(中间值)	0.18	0.225	1.35	0.10	0.70	0.50
3(高值)	0.20	0.30	1.50	0.18	0.80	0.55

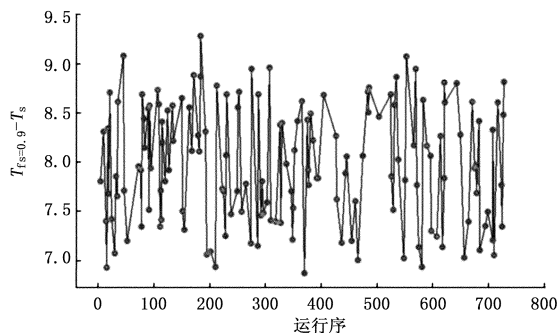
2 结果分析与讨论

采用 JMatPro 对经过优化设计的 150 组成分不同的 SA508Ⅲ 合金进行计算,对得到的热物性参数进行汇总和后续处理,给出了不同成分对应合金的目标函数值。目标函数 $T_{fs=0.9} - T_s$ 和 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 原始数据分析结果见图 1 和图 2,采用 Anderson-Darling 模型对 $T_{fs=0.9} - T_s$ 的正态性测试结果见图 1a,可以看出,其对应的 P 值小于 0.05,不服从正态分布,其均值为 7.98,方差为 0.36。另外,目标函数 $T_{fs=0.9} - T_s$ 对运行序的散点分布见图 1b,所有点都在均值上下无规律地波动,分布均匀,没有发现明显的偏聚或者奇异数据,表明 $T_{fs=0.9} - T_s$ 对应的 150 组数据正常合理,可以进行后续的方差分析和回归处理。对 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 原始数据的分析结果见图 2,其数据分布正常。

根据实践和理论分析,认为影响 $T_{fs=0.9} - T_s$ 和 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 两个目标函数的效应可能包括上述 6 个主效应,8 个二阶交互效应和 5 个三阶交互效应,只考虑这 19 个效应(其他效应视为误差)的情况下,对目标函数进行方差分析,得到各个效应和误差对应的自由度、连续平方和、调整后连续平方和,以及显著性 P 值。当 P 值大于 0.05 时效应不显著,将不显著的效应计入误差,重新进行方差分析以减少回归模型中的项数,从而对模型进行改进。

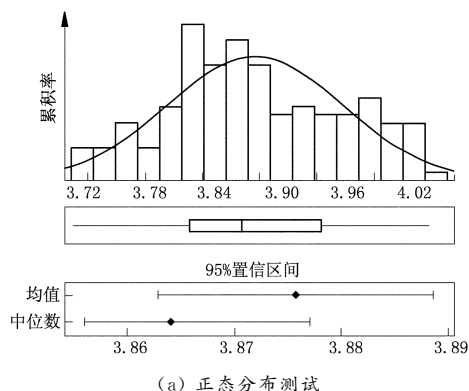


(a) 正态分布测试

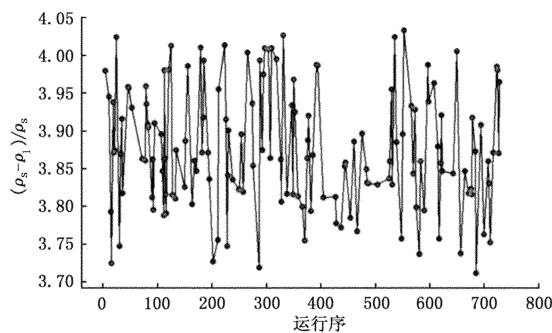


(b) 运行分布

图 1 $T_{fs=0.9} - T_s$ 原始数据分析



(a) 正态分布测试



(b) 运行分布

图 2 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 原始数据分析

改进模型后目标函数 $T_{fs=0.9} - T_s$ 关于各个效应的方差分析结果见表 2。可以看出 6 个主效应中,除了 Ni 以外,其余 5 个全部显著,而 2 个二阶交互相应 Si×Ni 和 Si×Mo,其 P 值均小于 0.05,对目标函数的影响也显著。另外,从复相关系数和残差平方和来看(见表 3),模型改进前后,相关系数都非常接近于 1,表明采用线性模型和表 2 中所列出的效应可以很好地描述目标

函数的数值。模型改进后 $R-S_q$ 降低,与此同时 $R-S_q$ (调整)有所增加,模型中去掉不显著的项之后, $R-S_q$ 和 $R-S_q$ (调整)之间的差异更小,表明回归效果更加显著。而从残差平方和的平均值来看,模型改进后其数值从 0.01461 降低到 0.0141,也从侧面说明回归方程有所改进。

表 2 模型改进后 $T_{fs=0.9} - T_s$ 方差分析结果

来源	自由度	$S_{eq}SS$	$A_{dj}SS$	$A_{dj}MS$	F	P
A(C)	2	44.980 1	44.175	22.087 5	1 562.81	0
B(Si)	2	3.516 2	3.609 2	1.804 6	127.69	0
C(Mn)	2	0.904 3	0.782 4	0.391 2	27.68	0
D(Cr)	2	0.368 1	0.388 5	0.194 2	13.74	0
E(Ni)	2	0.041 3	0.0410	0.020 5	1.45	0.238
F(Mo)	2	0.740 9	0.835 9	0.418 0	29.57	0
Si×Ni	4	0.572 7	0.543 1	0.135 8	9.61	0
Si×Mo	4	0.186 6	0.186 6	0.046 6	3.3	0.013
误差	129	1.823 2	1.823 2	0.014 1		
合计	149	53.133 4				

表 3 模型改进前后 $T_{fs=0.9} - T_s$ 方差分析相关系数结果

	S	$R-S_q$	$R-S_q$ (调整)	MSE
改进前	0.120 887	97.66%	95.90%	0.014 61
改进后	0.118 883	96.57%	96.04%	0.014 1

采用表 2 中所列出的 6 个主效应和 2 个二阶交互效应对目标函数 $T_{fs=0.9} - T_s$ 进行线性回归,得到目标函数 $T_{fs=0.9} - T_s$ 的回归方程为(元素符号代表每种元素的质量分数):

$$T_{fs=0.9} - T_s = -1.14 + 33.5C + 5.95Si + 0.613Mn - 0.883Cr + 1.85Ni + 0.97Mo - 7.29Si \times Ni + 3.41Si \times Mo \quad (1)$$

该方程的适用范围对应的合金成分为 SA508III 钢的额定成分(见表 1),同时,由该回归方程得到的 SSR(回归平方和)为 50.67, SSE(残差平方和)为 2.47,方程整体显著,表明该方程可以用于 $T_{fs=0.9} - T_s$ 的预测和估计。而对该目标函数影响程度从大到小依次为: C、Si、Mo、Mn、Cr、Si×Ni、Si×Mo 和 Ni。

模型改进前后目标函数 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 对于各个效应的方差分析结果的方法和 $T_{fs=0.9} - T_s$ 方差分析一致。模型改进前后其复相关系数和残差平方和见表 4。可以看出将不显著的主效应和交互效应的作用放入误差后, $R-S_q$ 没有显著降低,而残差平方和的平均值有所减小,都表明回归的效果更好。

表 4 模型改进前后 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 方差分析相关系数结果

	S	$R-S_q$	$R-S_q$ (调整)	MSE
改进前	0.035	91.53%	80.59%	0.001 230
改进后	0.034	87.95%	80.69%	0.001 224

对目标函数 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 方差分析结果中各个显著项进行回归分析,得到 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 的回归方程为(元素符号代表每种元素的质量分数):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_s} = & 45.2C + 15.0Si + 0.99Mn - 4.00Ni - \\ & 185C \times Si - 22.5C \times Mn - 12.1C \times Ni - \\ & 4.08Si \times Mn + 18.6Si \times Ni + 4.39Mn \times Ni + \\ & 97.3C \times Si \times Mn + 41.7C \times Si \times Ni - \\ & 18.9Si \times Mn \times Ni \end{aligned} \quad (2)$$

该方程的适用范围与前述 $T_{fs=0.9} - T_s$ 方程一致,由该回归方程得到影响目标函数 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 的 SSR 为 2 253.45, SSE 为 0.69,方程整体显著。对 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 影响程度最显著的几个效应顺序依次为: C×Si、C×Si×Mn、C、Si、C×Mn、Ni、C×Ni 和 Mn。

目标函数 $T_{fs=0.9} - T_s$ 和 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 的回归方程整体显著,复相关系数较高,可以用于数值的分析和预测。在 SA508III 合金成分范围内(见表 1),通过对各个回归方程进行响应优化,可以分别得到 $T_{fs=0.9} - T_s$ 和 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 的最小值及其 95% 置信区间和预测区间。将其最小值对应的合金成分重新进行试验,得到两个目标函数对应的实测值(计算所得),其比较结果见表 5。可以看出,预测值(拟合值)和实测值(计算所得)非常接近,它们之间的差值在预测值的标准误差以内,同时计算所得的实测值在预测值的 95% 置信区间和 95% 预测区间内,也从侧面证实了回归方程的显著性和可预测性。

表 5 模型预测值与计算实测值对比

	拟合值	拟合值 标准误差	95% 置 信区间	95% 预 测区间	实测值 (JMatPro 计算)
$T_{fs=0.9} - T_s$	6.87	0.04	6.79~6.95	6.60~7.15	6.85
$(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$	3.75	0.03	3.69~3.81	3.59~3.90	3.78

从两个目标函数的回归方程可以看出,为了降低 $T_{fs=0.9} - T_s$ 和 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 的数值,提高合金的铸造性能,可以通过适当降低合金中的 C 和 Si 的含量来达到,当 C 和 Si 的含量分别从 0.2% 和 0.3% 降低到 0.16% 和 0.15% 时, $T_{fs=0.9} - T_s$ 的数值从最大值 9.29 降低至 6.87, $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 的值从最大值 4.03% 降低至 3.75%。

3 结 论

(1)通过计算发现降低 SA508III 合金钢中的 C 和 Si 的含量,有助于改善合金的铸造性能,降低钢在凝固过程中产生热裂和缩孔、缩松的可能性。

(2)采用正交试验得到目标函数 $T_{fs=0.9} - T_s$ 和 $(\rho_s - \rho_l)/\rho_s$ 的响应极值和回归方程预测得到的极值符合较好,同时计算的实测极值位于预测的置信区间内,证实了回归方程的显著性及合理性。

参 考 文 献

- [1] 李振彦,安红萍,陈慧琴. 大型锻造用钢锭凝固疏松缺陷的数值模拟[J]. 太原科技大学学报, 2012, 33(4): 306-310.
- [2] HU H, CHU Y, CHENG P. Die design and process optimization of die cast V6 engine block[J]. China Foundry, 2005, 2(1): 21-27.

Al-15Pb 合金高压下凝固及热处理后的组织与耐磨性

王振玲¹ 于玉城¹ 霍树斌² 尹冬松¹ 魏尊杰³

(1. 黑龙江科技大学材料科学与工程学院; 2. 哈尔滨焊接研究所; 3. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院)

摘要 采用高压六面顶在 4 GPa 下制备了 Al-15Pb 合金并在该压力下进行了热处理。通过扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDX)、X 射线衍射仪(XRD)、摩擦磨损试验机对制备的 Al-15Pb 合金进行了微观组织和耐磨性能的研究。结果表明,常压和高压下,Al-15Pb 合金均由 α -Al 相和 Pb 粒子相组成,但是常压凝固时大量 Pb 粒子分布于 Al 基体上,而高压凝固后,Pb 粒子数量减少,尺寸减小;高压热处理时,分布于 Al 基体上的 Pb 粒子相数量极少,且尺寸很大。常压凝固时,Pb 在 α -Al 相中固溶度为 0,高压凝固和高压热处理时,Pb 在 α -Al 相中均有一定的固溶度。高压凝固 Al-15Pb 合金中 α -Al 相的硬度比常压时大很多,增大 39%,高压热处理态时 α -Al 相硬度也增大,增大了 19%。高压条件制备的 Al-15Pb 合金的抗磨性能改善,但减摩性能变差。

关键词 Al-15Pb 合金;高压凝固;高压热处理;显微组织

中图分类号 TG292;TG146.21

文献标志码 A

文章编号 1001-2249(2014)04-0353-04

Microstructure and Wear-Resistance of Al-15Pb Alloy with High Pressure Solidification and High Pressure Heat Treatment

Wang Zhenling¹, Yu Yucheng¹, Huo Shubing², Yin Dongsong¹, Wei Zunjie³

(1. School of Materials Science and Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology; 2. Harbin Welding Institute; 3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology)

Abstract: Al-15Pb alloys were prepared with hexahedral anvil at high pressure solidification(4GPa) and high pressure heat treatment(4GPa). Microstructure and wear-resistance of the alloy prepared at normal pressure and at high pressure were analyzed comparatively by SEM (scanning electron microscope), EDX, XRD, Microhardness tester and friction-wear tester. The results reveal that Al-15Pb alloys consist of α -Al phase and Pb phase with the morphology of the particle under normal pressure and high pressure, and a great amount of Pb particles are distributed in Al matrix under normal pressure, while Pb phase is decreased with size refinement under high pressure solidification conditions. Moreover, the trace Pb phase with large size can be observed under high pressure heat treatment condition. The solid solubility of Pb in α -Al phase is zero under normal pressure, while Pb has a slight solution in α -Al phase

收稿日期:2013-12-12;修改稿收到日期:2014-01-10

基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目(12523042)

第一作者简介:王振玲,女,1975 年出生,博士,黑龙江科技大学材料科学与工程学院,哈尔滨(150022),电话:0451-88036495,E-mail:wzlh@163.com

- [3] KANG C G, SON Y I, YOUN S W. Experimental investigation of semi-solid casting and die design by thermal fluid-solidification analysis[J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 113: 251-256.
- [4] 赵艳红,高建军,王欢.数值模拟在大钢锭制造中的应用[J].大型铸锻件,2012(2):12-16.
- [5] SAUNDERS N, MIODOWNIK A P, SCHILLE J PH. Modelling the Material Properties and behavior of multicomponent alloys[A]. 22nd CAD-FEM Users' Meeting 2004[C].
- [6] TRZASKA J, JAGIELLO A, DOBRZANSKI L A. The calculation of CCT diagrams for engineering steels[J]. Archives of Materials Science and Engineering, 2009, 39(1):13-20.
- [7] SAUNDERS N. Phase diagram calculations for commercial Al-alloys[J]. Materials Science Forum, 1996, 217-222:667-672.
- [8] GUO Z, SAUNDERS N, MIODOWNIK A P, et al. Modelling phase transformation and material properties of commercial titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(1):108-111.
- [9] 张红松,张希俊,张方.铸造过程计算机数值模拟的国内外研究概况[J].昆明理工大学学报,2003,28(2):55-58.
- [10] 丁浩,傅恒志.浇注温度对定向凝固 Al-Cu 合金热裂的影响[J].材料工程,1996(4):32-33.
- [11] 胡庚祥,蔡珣,戎咏华.材料科学与工程[M].上海:上海交通大学出版社,2010.
- [12] 杨弋涛.金属凝固过程数值模拟及应用[M].北京:化学工业出版社,2009.

(编辑:张正贺)