

基于 MATLAB 分析 C、Si、Mn 元素对风电球铁性能的影响

艾秀兰, 杨 军, 张望贤

(大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 应用MATLAB数学软件对风电球铁QT400-18L铸件的生产数据进行统计拟合。利用拟合后的数据和曲线分析了C、Si、Mn元素对球铁件的抗拉强度、伸长率、屈服强度和冲击功的影响, 确定三种元素对各力学性能影响的程度及较适合的含量。C元素对屈服强度影响最大, 对冲击功影响最小; Si元素对屈服强度的影响最大, 对伸长率的影响最小; Mn含量变化对屈服强度的影响最大, 对抗拉强度影响次之, 对球化率的影响最小。

关键词: MATLAB; 风电球铁; 力学性能

风力发电作为全世界最为重视的可再生清洁能源已经在我国得到了快速发展^[1]。球墨铸铁件早已被大范围地应用于风能发电设备组件的制造, 由于风力发电组件要求能在多变恶劣气候及风力交变载荷的环境下长期保持正常工作状态而不受影响, 所以球铁铸件要同时兼顾抗拉强度和低温冲击韧性^[2-3]。材料发生脆性破坏的必要条件是缺陷和低温, 化学成分是影响其发生的重要因素, 所以如何选取合适的化学成分成为研究的关键^[4]。目前, 工厂生产此类铸件已积累大量生产数据, 但由于未对这些数据进行收集、整理而无法找到相应的规律, 因此选取化学成分时依旧存在着较大的波动性, 针对不同性能要求时无法达到有的放矢。基于此考虑, 本文针对风电球铁QT400-18L铸件展开研究, 应用数学软件MATLAB拟合分析生产中获得的大量数据, 分析C、Si、Mn元素与球化率、抗拉性能、屈服强度和冲击值的关系, 获得三种元素对力学性能的影响程度及最佳含量区间, 从而为实际生产提供有力协助。

1 MATLAB曲线拟合法

实际生产中的数据拟合通常都是根据已有的数据预先画好曲线图, 然后根据曲线图的形状来选择和确定相应的拟合数学公式^[5], 曲线直线化是拟合中较常用的手段。非线性数据可以通过简单变量变换直线化, 利用最小二乘法求变换后的直线方程, 然后利用此直线方程绘制数据资料的标准工作曲线, 同时直线方程还可根据需要还原成曲线方程, 实现曲线拟合。在实际工程及试验中, 确定参数间的关系是很困难的, 所以拟合曲线模型的确定是整个拟合过程中最困难的^[6]。基于最小二乘法的MATLAB仿真环境中提供了多种拟合方法^[7], 包括函数拟合法、图形界面拟合法、工具箱拟合法。工具箱法是将可视化与数值化相结合开发和分析拟合结果和数据, 通过内部数据库或用户自定义方程对变量、插值法对非参量进行数据拟合的方法。本文采用工具箱拟合法处理及分析数据。拟合分析数据前要进行预处理减少人为误差, 提高拟合精确度。预处理即通过观察全部数据的分布走向, 确定拟合方法, 以便提高拟合准确度; 对数据中的异常值进行排除从而减少系统误差的影响。通过对工厂上千数据的观察及不同拟合函数的拟合度计算最终选取的拟合函数关系式如下:

作者简介:

艾秀兰(1971-), 女, 博士, 讲师, 主要从事铸铁、铸钢的强韧化及铸造工艺数值模拟。E-mail: aixl@djtu.edu.cn

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

06-0577-05

收稿日期:

2019-10-12 收到初稿,

2019-11-29 收到修订稿。

$$f(x) = p_1 \times x + p_2 \quad (1)$$

式中: p_1 为数据分布范围的斜率, p_2 为数据分布范围的截距。

2 拟合结果及分析

2.1 碳元素对球铁性能的影响分析

硅元素含量在1.6%~2.2%、锰元素含量在0.1%~0.3%变化时考查碳元素的影响。

图1-4为应用MATLAB软件统计拟合大量生产数据的结果云图, 拟合数据如表1。

由表1可看出, 碳元素含量在3.8%~4.1%变化时, 抗拉强度主要在310~420 MPa之间波动, 屈服强度主要在170~290 MPa之间波动, 伸长率主要在17%~29%之间波动, 冲击功主要在6~19 J之间波动。随碳含量的增加各性能的变化趋势展现在图1-4。由图可见, 随碳元素含量的增加, 抗拉强度、屈服强度和冲击功都逐渐降低, 其变化幅度分别为130.6、161.1和1.917, 而伸长率则随碳含量的增加而逐渐升高, 变化幅度为4.103。从拟合结果可判断出: 碳含量对抗拉强度和屈服强度影响都较大, 对屈服强度影响最大, 对冲击功影响最小。由于风电球铁件QT400-18L的基体组织是铁素体, w_c 的增加使石墨球数量增多有利于形成铁素体基

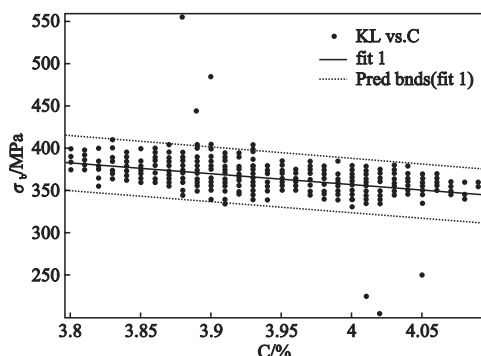


图1 碳元素对抗拉强度的影响

Fig. 1 C element influence on tensile strength

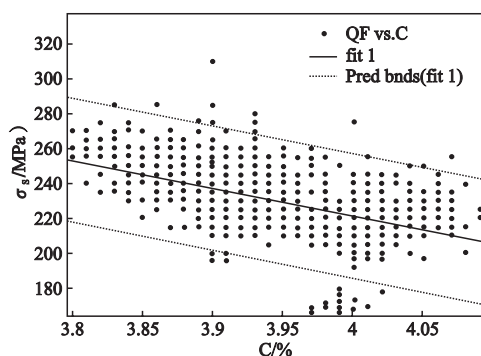


图2 碳元素对屈服强度的影响

Fig. 2 C element influence on yield strength

体, 铁素体含量增加, 塑性提高。考虑C元素对抗拉强度的影响, 所以一般选取 w_c 为3.85%左右。图5显示, 碳元素含量在3.8%~4.1%之间, 球化率值主要在83%~98%之间波动, 幅度为11.3, 球化效果比较好。

2.2 硅元素对球铁性能的影响分析

碳元素含量在3.8%~4.1%区间、锰元素含量在0.1%~0.3%区间, 考查硅元素的影响。拟合结果云图如图6-10, 硅元素含量在1.6%~2.2%时, 球化率主要在82%~98%之间波动(图6), 且随硅含量的增加而增加。图7-10为抗拉强度、伸长率、屈服强度和冲击功随Si含量改变而变化的情况, 从图中可以看出, Si元素含量在1.6%~2.2%之间变化时, 抗拉强度和屈服强度随Si元素含量的增加而增大, 而伸长率和冲击功则降低。表2给出了具体的数值。

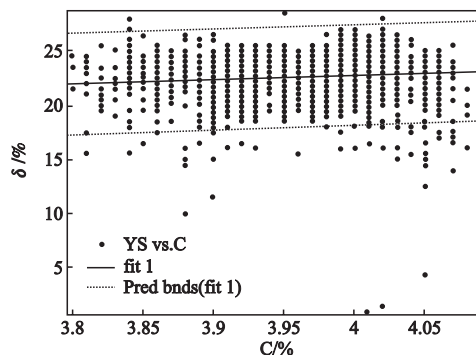


图3 碳元素对伸长率的影响

Fig. 3 C element influence on elongation

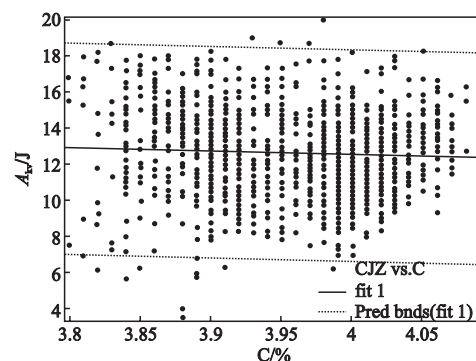


图4 碳元素对冲击功的影响

Fig. 4 C element influence on impact energy

表1 碳含量与各性能的拟合数据

Table1 The fitting data of carbon content and performance of ductile iron

编号	碳含量/%	性能值	斜率值
1	3.8~4.1	抗拉强度310~420 MPa	-130.6
2	3.8~4.1	屈服强度170~290 MPa	-161.1
3	3.8~4.1	伸长率17%~29%	4.103
4	3.8~4.1	冲击功6~19 J	-1.917

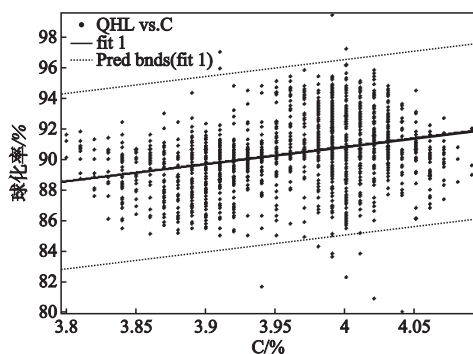


图5 碳元素对球化率的影响

Fig. 5 C element influence on nodularity

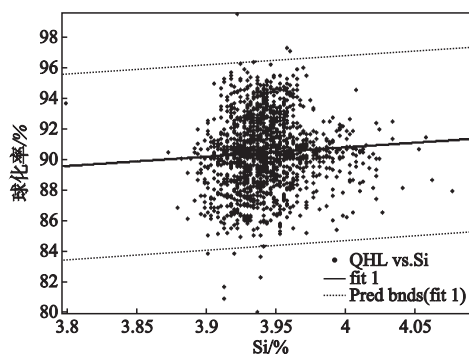


图6 硅元素对球化率的影响

Fig. 6 Si element influence on nodularity

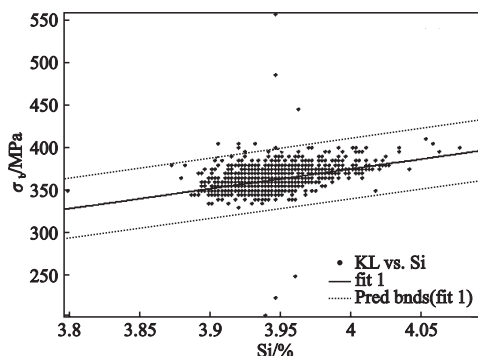


图7 硅元素对抗拉性能的影响

Fig. 7 Si element influence on tensile strength

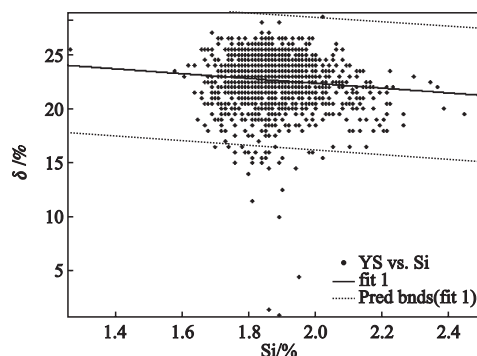


图8 硅元素对伸长率的影响

Fig. 8 Si element influence on elongation

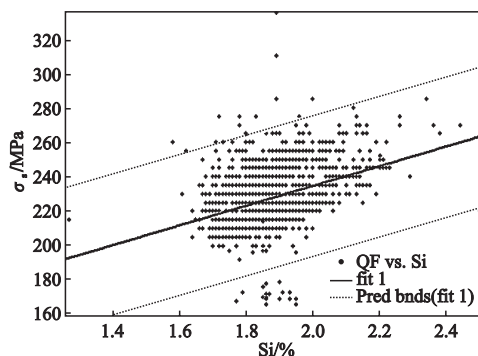


图9 硅元素对屈服强度的影响

Fig. 9 Si element influence on yield strength

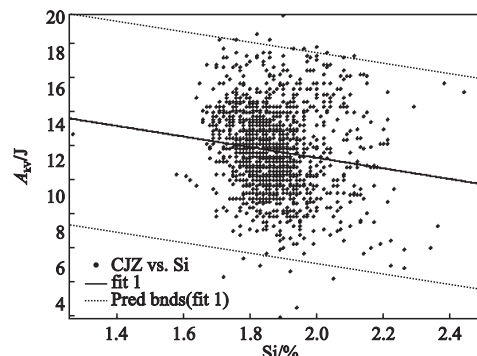


图10 硅元素对冲击功的影响

Fig. 10 Si element influence on impact energy

由表2中可看到,硅元素含量对抗拉强度和屈服强度的影响都较大,对屈服强度的影响最大,对球化率的影响最小。其主要原因:一是Si元素使铸铁的共晶点和共析点向左上方移动,降低了碳在铸铁和固溶体中的溶解度,缩小奥氏体区使石墨容易析出;二是Si元素提高了共晶和共析转变温度,使铸铁在较高的温度下进行共晶和共析转变,有利于石墨结晶核心的稳定和碳原子、铁原子的扩散,促进形成石墨。因此,一定量的Si元素在球墨铸铁中的存在是保证球墨铸铁球化

表2 硅含量与各性能的拟合数据

Table 2 The fitting data of Si content and performance of ductile iron

编号	硅含量/%	性能值	斜率值
1	1.6~2.2	抗拉强度290~370 MPa	54.88
2	1.6~2.2	屈服强度160~300 MPa	57.32
3	1.6~2.2	球化率82%~98%	1.438
4	1.6~2.2	伸长率15%~30%	-2.247
5	1.6~2.2	冲击功6~20 J	-2.921

效果的前提^[8]。要获得较高的球化率则必须增加球铁中Si元素的含量。石墨数量增多使铸铁中铁素体含量增多, Si元素溶入铁素体基体中, 使其晶格常数减小, 引起晶格畸变, 进而表现出球铁的抗拉强度和屈服强度增加, 伸长率和冲击功下降的状况。有资料表明^[9], Si元素的含量是影响风电球铁件低温性能的主要因素, Si固溶于铁素体基体中形成了微裂纹源。所以, 在保证足够的抗拉强度前提下, 应尽量减少Si元素的含量。因而综合考虑抗拉强度和低温冲击性, Si元素的含量为1.8%较为适宜。

2.3 Mn元素对球铁性能的影响分析

碳元素含量在3.8%~4.1%区间、硅元素含量在1.6%~2.2%区间变化时, 从锰元素对各力学性能拟合结果云图(图11-14)看出, 锰元素含量在0.1%~0.3%变化时, 抗拉强度值主要分布在300~450 MPa之间, 且随锰含量的增加而增加, 增加幅度为200; 屈服强度值主要分布在180~280 MPa之间, 变化趋势与抗拉强度相同, 增加幅度为272.8; 伸长率集中在15%~30%之间, 且随锰含量的增加而降低, 降低幅度为10.95。冲击功集中在6~18 J之间, 增加幅度为16.02。表3列出了风电球铁铸件各性能的具体拟合数据, 由斜率值可看出锰含量的变化对屈服强度的影响最大, 对抗拉强度影响次之, 对球化率的影响最小。

在生产过程中对Mn元素含量的选取时, 需综合考虑其影响。由于在凝固过程中, 锰具有很大偏析倾向从而富集于晶界, 易于促进碳化物的形成, 形成的碳化物一般呈网状分散在共晶团的边界, 对力学性能具有极其不利影响。再者, 锰元素本身就有很大的白口倾向也会使球铁的白口倾向增加。因此, 应尽可能把球铁的含锰量降低到最低水平, 尤其是对于薄壁铸件。考虑到在铁素体球铁中, 加入少量的锰又可起到强化铁素体的作用, 因而本文利用MATLAB软件对生产数据进行统计拟合分析得出Mn元素的含量为0.15%较为适合。

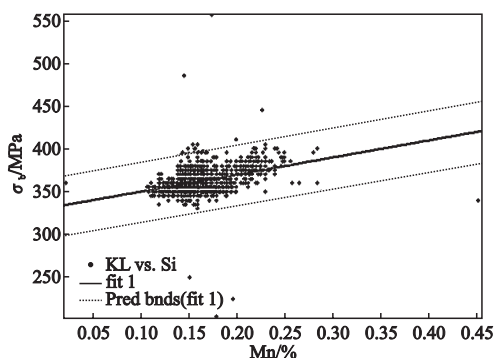


图11 锰元素对抗拉性能的影响

Fig. 11 Mn element influence on tensile strength

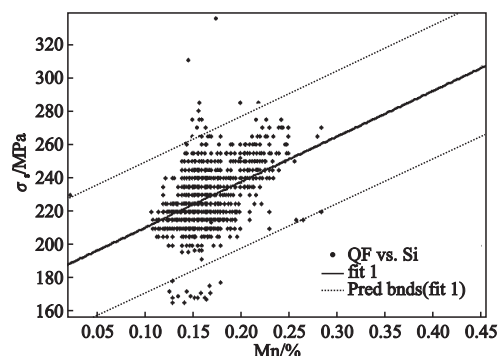


图12 锰元素对屈服强度的影响

Fig. 12 Mn element influence on yield strength

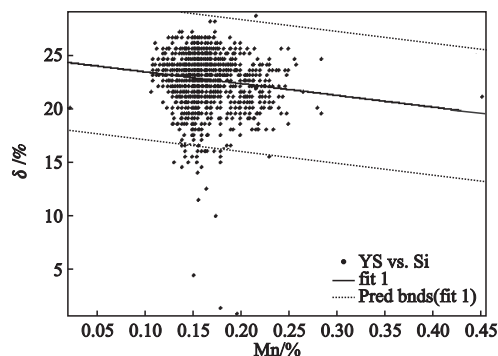


图13 锰元素对伸长率的影响

Fig. 13 Mn element influence on elongation

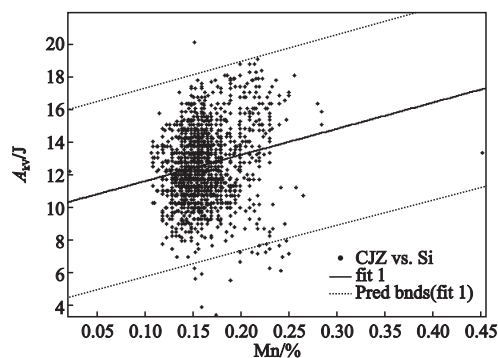


图14 锰元素对冲击功的影响

Fig. 14 Mn element influence on impact energy

表3 锰含量与球铁各性能的拟合数据
Table 3 The fitting data of Mn content and performance of ductile iron

编号	锰含量/%	性能值	斜率值
1	0.1~0.3	抗拉强度 300~450 MPa	200
2	0.1~0.3	屈服强度 180~280 MPa	272.8
3	0.1~0.3	球化率84%~96%	-3.835
4	0.1~0.3	伸长率15%~30%	-10.95
5	0.1~0.3	冲击功6~18 J	16.02

3 结论

(1) C元素含量在3.8%~4.1%变化时, 随C含量的增加, 球化率、伸长率都提高, 抗拉强度、屈服强度和冲击功都降低; 碳元素含量变化对屈服强度的影响最大, 而对冲击功的影响最小。

(2) Si元素含量在1.6%~2.2%变化时, 随Si含量的增加, 球化率、抗拉强度和屈服强度都提高, 伸长率和冲击功都下降; Si元素含量变化对屈服强度的影响最大, 对球化率的影响最小。

(3) Mn元素含量在0.1%~0.3%变化时, 随Mn含量的增加, 抗拉强度和屈服强度、冲击功都提高, 伸长率和球化率都下降; Mn元素含量变化对屈服强度的影响最大, 对球化率影响最小。

(4) C、Si、Mn三种元素含量的较适宜值分别为3.85%, 1.8%和0.15%。

参考文献:

- [1] 前瞻产业研究院. 2018-2023年中国风电运维市场前景与商业模式创新分析报告 [R]. 2018
- [2] WWEA. World wind energy report 2008 [C] //8th World Wind Energy Conference& Exhibition Wind Power for Islands-Offshore and Onshore. Jeju Island, Korea, 2009: 23-25.
- [3] 李宏兴. 风电球铁件的质量控制 [C] //2012中国铸造活动周论文集, 2012.
- [4] 俞旭如, 李川度, 蔡佳佳. 风电球墨铸铁件生产技术与最新发展 [J]. 现代铸铁, 2011 (3): 21-26.
- [5] 张志伟, 胡伍生, 黄晓明. 回归拟合模型的神经网络方法 [J]. 测绘科学, 2010, S1: 39-41.
- [6] 陈良波, 郑亚青. 基于最小二乘法的曲线拟合研究 [J]. 无锡职业技术学院学报, 2012 (5): 52-55.
- [7] 汪禹. MATLAB在曲线拟合中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2012 (18): 8-9.
- [8] 孙玉福, 于广文, 崔金鹏, 等. 硅对铸态厚断面高韧性球墨铸铁组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2008, 57 (2): 114.
- [9] 李荣德, 姜珂, 曲迎东, 等. Si、Ni元素对兆瓦级风电球铁件低温性能的影响 [J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33 (5): 491-495.

Analysis on Effect of C, Si, Mn Elements on Mechanical Properties of Ductile Iron for Wind Power Based on MATLAB

AI Xiu-lan, YANG Jun, ZHANG Wang-xian

(School of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract:

In the study, the production data of QT400-18L were collected and fitted by using MATLAB software. The effects of C, Si and Mn elements on tensile strength, yield strength and impact energy were analyzed, and the influence degrees of three elements and optimal content in ductile iron were determined. Results show that C element has the biggest effect on the yield strength and the smallest effect on the impact energy; Si element has the biggest effect on the yield strength and the smallest effect on the elongation; Mn element has the biggest effect on the yield strength and the smallest effect on the nodularity.

Key words:

MATLAB; wind power ductile iron; mechanical properties
