

锡和锑等合金元素对球墨铸铁组织和力学性能的影响解析

张茂仁, 宁吉泉, 宁林祥

(浙江欧冶达机械制造股份有限公司, 浙江湖州 313013)

摘要: 通过对大量不同成分的球墨铸铁拉伸试样的抗拉强度、硬度、伸长率、珠光体面积率、球化率、石墨组织以及化学成分的多变量解析, 得出了强度、硬度、伸长率以及珠光体面积率的回归计算公式、合金元素的影响系数以及强度、硬度、伸长率、珠光体面积率之间相关系数。通过调整Si、Mn、Sn、Sb等元素的添加量可设计出具有不同力学性能的球墨铸铁, 利用力学性能指标之间的相关性, 可通过测量硬度推测其他力学性能指标, 从而在铸造生产中进行材质管理。

关键词: 球墨铸铁; 力学性能; 合金元素; 显微组织; 多变量解析

中图分类号: TG143.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 02-0144-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0021

作者简介:

张茂仁(1963-), 男, 工学博士, 研究方向为铸铁材料、电热合金以及形状记忆合金。E-mail: maozhang555@126.com

收稿日期:

2025-11-17 收到初稿,
2025-12-16 收到修订稿。

引用格式:

张茂仁, 宁吉泉, 宁林祥. 锡和锑等合金元素对球墨铸铁组织和力学性能的影响解析[J]. 铸造, 2026, 75(2): 144-149.
ZHANG Maoren, NING Jiquan, NING Linxiang. Analysis of the influence of alloying elements such as Sn and Sb on the microstructure and mechanical properties of ductile Iron[J]. Foundry, 2026, 75(2): 144-149.

球墨铸铁是20世纪50年代发展起来的一种含有球形石墨的高强度铸铁材料, 具有强度高、韧性好、耐磨、耐热、耐蚀以及减震良好等特点, 已广泛应用于各种动力机械曲轴、凸轮轴、连杆、液压缸体、管道、阀门等零部件。不同强度牌号的球墨铸铁通常是通过添加Cu、Sn、Sb等促进珠光体形成元素, 调整珠光体面积率达到强度和伸长率等指标。迄今为止的研究大多是固定其他元素研究1种或2种元素的影响^[1-9], 缺乏对多元素同时加入量变化影响的研究, 实际上球墨铸铁含有C、Si、Mn、P、S、Cu、Sn、Sb等多种元素, 这些元素的含量变化都可能对组织和力学性能产生影响。本文作者通过选取铸造生产中各种成分的拉伸试验数据, 用JUSE-StatWork软件的多变量解析方法研究了合金元素对球墨铸铁珠光体面积率、石墨面积率、石墨球数、石墨球直径、球化率、抗拉强度、伸长率、硬度的影响系数以及组织和力学性能指标之间的相关性, 为不同强度要求的球墨铸铁的成分设计和力学性能智能预测提供经验计算式, 为铸造生产材质管理提供依据。

1 试验内容和方法

1.1 拉伸试样化学成分

采用2 t中频感应炉熔炼2 000 kg铁液, 用冲入法进行球化处理, 含镁球化剂加入量为1%, 硅钡孕育剂加入量为0.7%。用坩埚勺取5 kg球化处理后的铁液浇入覆膜砂铸型, 浇注成球墨铸铁国标GB/T 1348—2019规定的敲落单铸试块(棒), 并加工成如图1所示的拉伸试样。用SPECTROMAXX光谱仪分析拉伸试样的成分范围如表1所示。

表1 拉伸试样的化学成分(光谱分析值)
Tab. 1 Chemical composition of tensile test specimens

试样号	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Sn	Sb	Mg
1~38	1.8~2.5	0.1~0.7	≤0.03	≤0.02	≤0.05	≤0.03	0~0.06	0~0.06	0.03~0.05

注: 选取38个不同成分的拉伸试样。

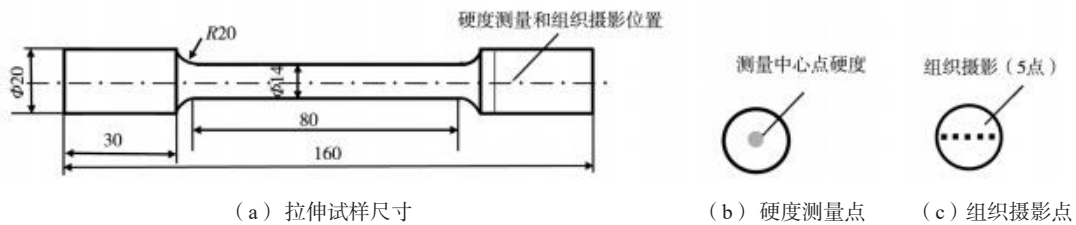


图1 拉伸试样的硬度测量和组织观察位置

Fig. 1 The positions for the hardness measurements and microstructure observations of tensile specimens

1.2 拉伸试验与组织观察

用WEW-300万能试验机进行拉伸试验,用布氏硬度计测量了拉伸试样端部附近的中心位置的硬度,用HDM-300金相显微镜沿径向方向5点进行摄影,并用附带的画像解析软件进行组织分析,得出5点的珠光体面积率、石墨面积率、单位面积石墨球数量、石墨球平均直径以及球化率。使用JUSE-StatWork软件对5点组织数据平均值、成分和力学性能进行了多变量解析,得出回归计算式,可知成分对组织和力学性能的影响系数。

2 试验结果及分析

2.1 锡 (Sn) 对组织和力学性能的影响

拉伸试样的组织如图2所示,在未腐蚀的组织中观察到大小不同的球状石墨,用4%硝酸酒精溶液腐蚀后,石墨球以外的基体变为黑白两部分,黑色部分为珠光体,也就是片状渗碳体 (Fe_3C) 和铁素体的片层间混合物,因晶界容易腐蚀在光学显微镜下呈现黑

色,白色部分为铁素体 (C 在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶体)。随着Sn含量从0.010 7%增加到0.032 0%,球化率和珠光体面积率分别从85%和21%增加到93%和62%。在同时加入0.033 8%Sn和0.036 1%Sb时,球化率和珠光体面积率分别增加到96%和99%。

因为各种元素都可能对组织和力学性能产生影响,因此,为了弄清Sn的影响,尽可能减小其他元素的影响,选取其他元素变化小的一组数据,观察Sn含量变化引起的组织与力学性能的变化。用这些数据作图,如图3所示,从图3 (a)和图3 (b)可知,随着Sn含量的增加,珠光体面积率明显增加,石墨面积率明显减小,相关系数分别为0.963 7和-0.710 6,呈强相关,判定系数 R^2 分别为0.928 7和0.582 4,说明珠光体变化的92.87%可用Sn含量的变化来说明,不能说明的部分可能受其他成分等因素的影响。另外,从图3 (c)、图3 (d)、图3 (e)可知,随着Sn含量的增加,石墨球数和石墨球直径稍微减小,球化率稍微增大。相关系数分别为-0.573 8、-0.417 0、0.488 5,呈中等程度

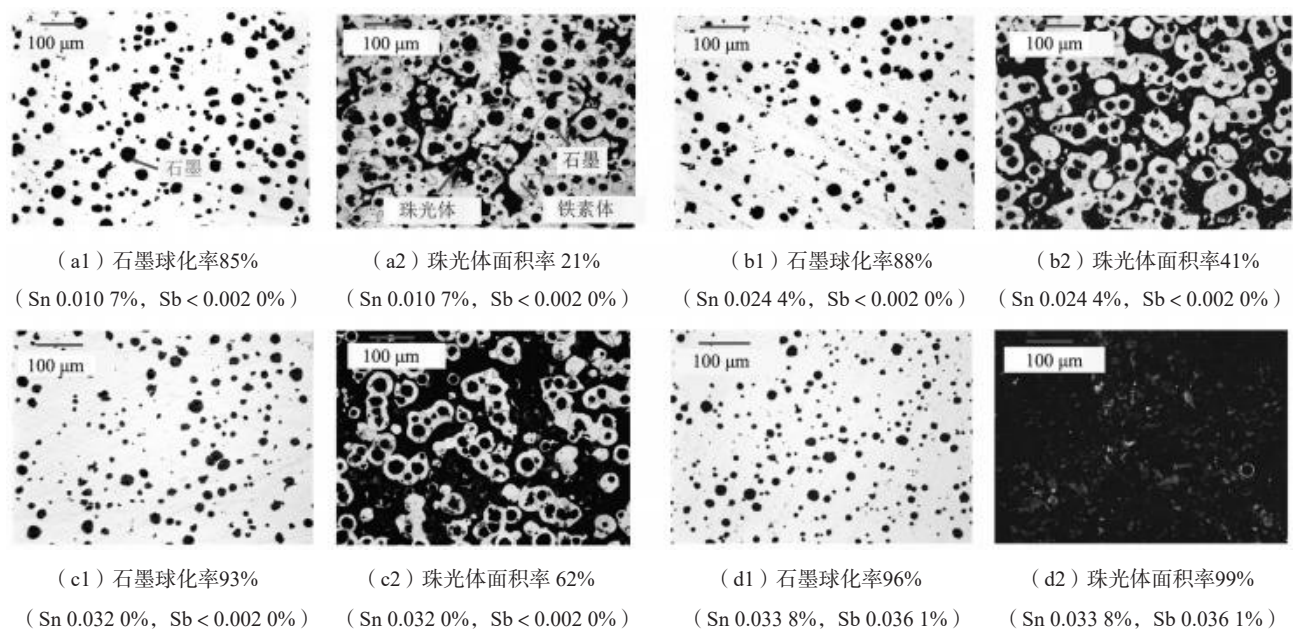


图2 Sn和Sb对球墨铸铁组织的影响

Fig. 2 Effects of Sn and Sb on the microstructures of ductile irons

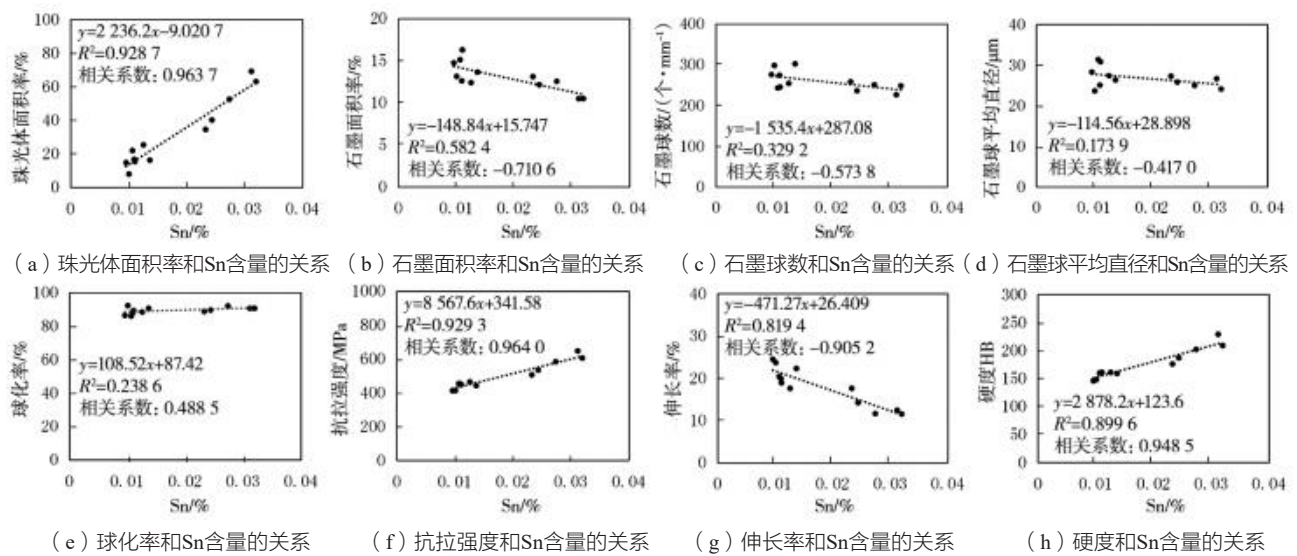


图3 Sn对球墨铸铁组织和力学指标的影响

Fig. 3 Effects of Sn on the microstructures and mechanical properties of ductile irons

相关。除Sn的影响外，还受其他成分等因素的影响。随着Sn含量增加，珠光体量增加，在碳含量一定的情况下，生成珠光体的碳量多了，剩余的生成石墨的碳量就少了，生成的石墨球数就会减少。另外Sn在石墨球表面析出，具有阻止石墨生长的作用，会起到减小石墨直径作用。在Mg含量一定的情况下，石墨析出量减少，会使石墨周围的Mg含量增加，使球化率增加。

从图3(f)、图3(g)、图3(h)可知，随着Sn含量的增加，抗拉强度和硬度增加，而伸长率减小。抗拉强度、伸长率、硬度和Sn的相关系数分别为0.9640、-0.9052和0.9485，呈强相关，判定系数 R^2 分别为0.9293、0.8194和0.8996，说明抗拉强度、伸长率和硬度变化的92.93%、81.94%和89.96%可用Sn含量的变化来说明。珠光体是硬而脆的 Fe_3C 和塑性好硬度低的铁素体的片层间混合物，强度和硬度比铁素体高。随着Sn含量的增加，珠光体面积率增加，导致整体的强度和硬度增加而伸长率降低。

Sn在铁液凝固时主要偏析于石墨-基体界面，形成稳定的高Sn富集层，可以有效地减缓或阻止渗碳体中的碳向石墨表面扩散，不但显著增加珠光体数量，还可以细化共晶团和珠光体，显著提高珠光体稳定性。Sn在奥氏体组织中有一定的溶解度，尤其是在大断面球铁中能够增强包围球状石墨奥氏体晕轮的作用，防止球状石墨蜕变为块状石墨。Sn加入量超过许可值时，会导致球铁出现石墨畸变甚至不球化现象，添加量超过0.07%，在镁球墨铸铁中会出现蠕虫状石墨或者片状石墨，稀土元素可用来中和Sn的不良影响，不但可以防止Sn阻碍石墨球化，还可以扩大Sn的使用范围。

Sb是较强的促进液态和共晶转变石墨化的元素，在一次结晶过程中，Sb溶于铁碳合金中，降低碳的溶解度，使共晶点左移，使石墨易于析出。少量Sb不但可以稳定珠光体，还可以与稀土形成高熔点化合物，提供大量的结晶核心，增加石墨球数，Sb吸附在结晶界面上，可抑制石墨的长大，细化石墨球，改善石墨形态，有抑制大壁厚铸件碎块石墨的作用。球铁中加入一定量的Sb后，可使石墨球变得更加圆整，更细小，提高了石墨的球化级别，但是当Sb加入超过一定量后，石墨球的形状开始恶化，团状石墨开始增多，进一步增加加入量，则出现开花状石墨，球化剂中的稀土元素可以起到中和作用。国内外普遍采用添加质量分数为0.002%~0.005%Sb的方法，来改善大壁厚球墨铸铁件心部的石墨形态，避免破碎状石墨出现^[10-12]。文献[13]认为在球铁中添加0.02%~0.05% Sb，球化效果良好，石墨球细小且圆整度高，珠光体含量可达到75%以上。

堀江皓对Sb的干扰作用进行了研究，认为Sb和Sn的反球化机理一样，凝固过程中在奥氏体晶界偏析，使石墨以不规则形状析出^[14]。石墨球与基体晶界上的Sn和Sb含量要远高于石墨球中心的含量，说明Sn或Sb在凝固过程中被吸附在石墨与奥氏体的相界面上，形成如同隔膜般的障碍层，对碳原子穿过界面向石墨晶体扩散产生阻碍作用，使得石墨球径变小^[15]。

2.2 成分、组织和力学性能的多变量解析

球墨铸铁的添加元素有多种，因化学反应烧损等原因，最终成分也并非按配料计算的那样准确，而是在一定范围内变动，而各个元素对组织和力学性能的

影响效果是不同的,为了弄清各种元素的影响效果,选取各元素含量有变动的不同拉伸试棒进行拉伸试验和组织解析,用JUSE-StatWork软件进行多变量解析。

2.2.1 成分对珠光体面积率的影响

以珠光体面积率为因变量,以C、Si、Mn、P、S、Mg、Cu、Sn、Sb为自变量进行了多变量解析,得到如下计算式。

$$\begin{aligned} \text{珠光体面积率}(\%) = & 67.483 - 33.465\text{Si}(\%) \\ & + 26.137\text{Mn}(\%) + 2132.84\text{Sn}(\%) + 501.577\text{Sb}(\%) \end{aligned} \quad (1)$$

由式(1)可知,随着Si含量增加,珠光体面积率减少,随着Mn、Sn和Sb含量增加,珠光体面积率增加。复相关系数为0.977,调整判定系数 R^2 为0.943,说明珠光体变化的94.3%可用Si、Mn、Sn和Sb含量变化来说明。Si是强烈的石墨化元素,Si增加会导致珠光体面积率减少,Mn、Sn和Sb是促进珠光体形成元素,这些元素的增加,会增加珠光体面积率,从式(1)可知道各合金元素回归系数(以下称为影响系数或影响效果)的大小,对珠光体面积率增加影响最大的元素为Sn,其次为Sb,最小为Mn。Sn和Sb在许多资料中的影响效果有很大差别,可能是含有微量元素的材料组成和试验条件差异引起,实际应用时要确认在使用成分和生产条件下对珠光体的影响效果。通过这些元素的组合设计,可调整珠光体面积率,从而达到强度和伸长率的指标值。Cu也是促进珠光体形成元素,在取样数据中,材料中没有特意添加Cu,Cu残留量约为0.05%以下,因Cu含量的波动变化小,影响太小,因此在计算式中没有出现。

2.2.2 组织对抗拉强度的影响

以抗拉强度为因变量,以球化率、珠光体面积率、石墨面积率、石墨球数、石墨球平均直径为自变量进行了多变量解析,得到如下计算式。

$$\begin{aligned} \text{抗拉强度}(\text{MPa}) = & -25.765 + 4.404\text{球化率}(\%) + \\ & 3.875\text{珠光体面积率}(\%) \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可知,随着球化率和珠光体面积率增加,抗拉强度增加,复相关系数为0.991,调整判定系数 R^2 为0.980,说明抗拉强度变化的98.0%可用球化率和珠光体面积率变化来说明。石墨面积率、石墨球数、石墨球平均直径没有出现在公式中,说明在本试验条件下这些参数的变动量对抗拉强度没有显著影响,在数理统计分析上可视为无影响,影响系数视为零。球墨铸铁通常是通过添加合金元素改变珠光体面积率调整强度,达到规定的强度指标。球化率代表了材料中的各种石墨形状的组合情况,球化率降低说明球状石墨的圆整度降低,出现团状、团絮状和蠕虫状石墨的

比例增多,石墨尖端对基体的割裂程度增大,拉伸时应力集中增加,导致强度下降。球化率会因球化剂添加量、铁液出炉温度和球化方法以及铸件重量大小产生变化,通常控制在80%以上。

2.2.3 组织对硬度的影响

以硬度为因变量,以球化率、珠光体面积率、石墨面积率、石墨球数、石墨球平均直径为自变量进行了多变量解析,得到如下计算式。

$$\begin{aligned} \text{硬度}(\text{HB}) = & 111.701 + 0.538\text{球化率}(\%) + 1.261 \\ & \text{珠光体面积率}(\%) - 1.04\text{石墨球平均直径}(\mu\text{m}) \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可知,随着球化率和珠光体面积率增加,硬度增加。而随着石墨球平均直径的增加,硬度减小。复相关系数为0.985,调整判定系数 R^2 为0.965,说明硬度变化的96.5%可用球化率和珠光体面积率以及石墨球平均直径变化来说明。石墨面积率、石墨球数没有出现在公式中,说明在本试验条件下这些参数的变动量对硬度没有显著影响,在数理统计上可视为无影响,影响系数视为零。

2.2.4 组织对伸长率的影响

以伸长率为因变量,以球化率、珠光体面积率、石墨面积率、石墨球数、石墨球平均直径为自变量进行了多变量解析,得到如下计算式。

$$\begin{aligned} \text{伸长率}(\%) = & 12.738 + 0.127\text{球化率}(\%) - \\ & 0.193\text{珠光体面积率}(\%) \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知,随着球化率增加,伸长率增加,而随着珠光体面积率增加,伸长率减小。复相关系数为0.974,调整判定系数 R^2 为0.942,说明伸长率变化的94.2%可用球化率和珠光体面积率变化来说明。石墨面积率、石墨球数、石墨球平均直径没有出现在公式中,说明在本试验条件下这些参数的变动量对伸长率没有显著影响,在数理统计分析上可视为无影响,影响系数视为零。

2.2.5 成分对抗拉强度的影响

以抗拉强度为因变量,以C、Si、Mn、P、S、Mg、Cu、Sn、Sb为自变量进行了多变量解析,得到如下计算式。

$$\begin{aligned} \text{抗拉强度}(\text{MPa}) = & 433.034 - 48.391\text{Si}(\%) \\ & + 106.682\text{Mn}(\%) + 8770.418\text{Sn}(\%) + 2217.707\text{Sb}(\%) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,随着Si含量增加,抗拉强度降低,随着Mn、Sn和Sb含量增加,抗拉强度增加。复相关系数为0.976,调整判定系数 R^2 为0.942,说明抗拉强度变化的94.2%可用Si、Mn、Sn和Sb含量变化来说明。

材料中存在Mn、Sn和Sb等促进珠光体形成元素，即使是微量存在，在凝固过程中这些元素偏析，在最后凝固铁液中浓度升高，会促进珠光体形成。不同合金元素的影响效果是不同的，Mn、Sn和Sb的影响系数分别是106.682、8 770.418和2 217.707，意味着每增加0.01%的Mn、Sn和Sb，其强度分别增加1.07 MPa、87.70 MPa和22.17 MPa，Sn的影响系数最大，其次是Sb，最小是Mn，因Cu含量的的变化小，影响太小，在计算式中没有出现。

球墨铸铁的Si原子固溶于铁素体基体中，使 α -Fe晶格发生畸变，起到固溶强化作用，提高基体强度。而Si又是强烈的石墨化元素，可减少珠光体面积率，降低强度。在此综合作用下，减少珠光体面积率降低强度的效果大于固溶强化效果，所以Si的综合效果就是降低强度，影响系数是-48.391。

2.2.6 成分对硬度的影响

以硬度为因变量，以C、Si、Mn、P、S、Mg、Cu、Sn和Sb为自变量进行了多变量解析，得到如下计算式。

$$\text{硬度 (HB)} = 163.330 - 21.052\text{Si} (\%) + 42.921\text{Mn} (\%) + 2 806.837\text{Sn} (\%) + 757.329\text{Sb} (\%) \quad (6)$$

由式(6)可知，随着Si含量增加，硬度降低，而随着Mn、Sn、Sb含量增加，硬度增加。复相关系数为0.980，调整判定系数 R^2 为0.950，说明硬度变化的95.0%可用Si、Mn、Sn和Sb含量的变化来说明。

硬度和强度具有相关性，合金元素的作用机理也

一样，主要是通过改变珠光体面积率来影响硬度。

2.2.7 成分对伸长率的影响

以伸长率为因变量，以C、Si、Mn、P、S、Mg、Cu、Sn和Sb为自变量进行了多变量解析，得到如下计算式。

$$\text{伸长率} (\%) = 34.126 - 6.964\text{C} (\%) + 7.870\text{Si} (\%) - 9.850\text{Mn} (\%) - 402.838\text{Sn} (\%) - 79.655\text{Sb} (\%) \quad (7)$$

由式(7)可知，随着Si含量增加，伸长率增加，而随着C、Mn、Sn和Sb增加，伸长率降低。复相关系数为0.964，调整判定系数 R^2 为0.908，说明伸长率变化的90.8%可用C、Si、Mn、Sn和Sb含量的变化来说明。伸长率和强度是呈反比关系的，强度越高，对变形的阻碍就越大，伸长率就越低。

2.2.8 抗拉强度、硬度、伸长率、珠光体面积率之间的相关性

抗拉强度、硬度、伸长率和珠光体面积率的相关性如图4所示。抗拉强度、硬度、伸长率和珠光体面积率的相关系数分别是0.983 9、0.977 0和-0.970 6，抗拉强度、硬度和伸长率的相关系数分别是-0.949 2，-0.945 2，抗拉强度和硬度的相关系数是0.991 5，都是高度相关。利用珠光体面积率和各性能指标值的相关性，知道一个性能指标值就能推测其他性能指标值。设计者就可利用强度和伸长率的设计值设定珠光体面积率和硬度的管理范围，通过观察珠光体面积率或测量硬度推测抗拉强度和伸长率，在铸造生产现场通过非破坏性检查测量硬度进行材质管理。

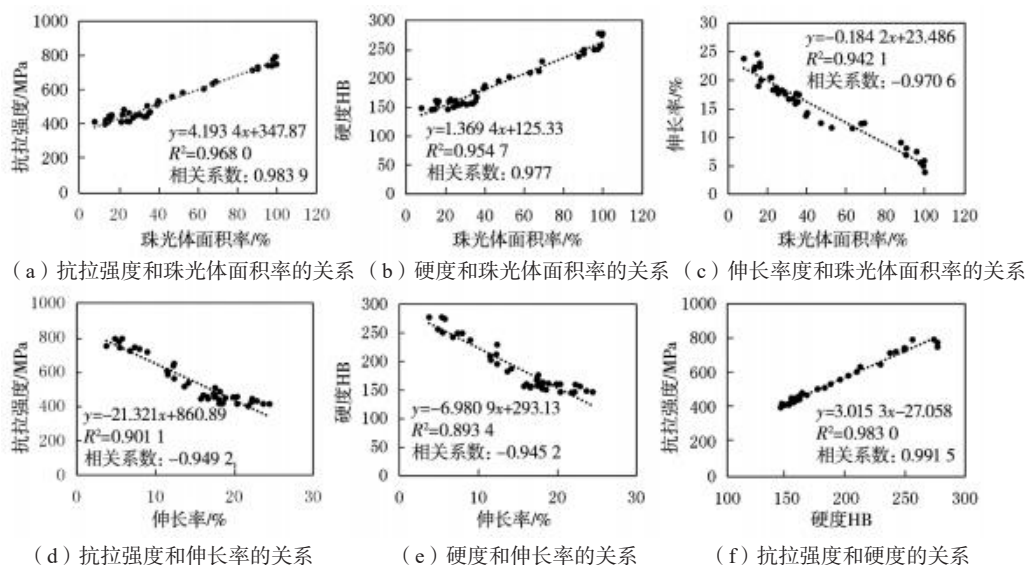


图4 强度、硬度、伸长率、珠光体面积率之间的相关性

Fig. 4 Correlations between strength, hardness, elongation and pearlite area ratio

3 结论

(1) 随着Sn含量的增加, 珠光体面积率增加, 石墨面积率减少, 球化率增加, 石墨球数和石墨球平均直径稍微减小, 抗拉强度和硬度增加, 伸长率减小。

(2) Si可减小珠光体面积率, 而Mn、Sn和Sb可增加珠光体面积率。

(3) 随着珠光体面积率增加, 抗拉强度和硬度增加, 伸长率减小; 随着球化率增加, 抗拉强度、硬度

和伸长率增加; 随着石墨直径增加, 硬度减小。

(4) Si可降低抗拉强度和硬度, 而Mn、Sn和Sb可增加抗拉强度和硬度。Si可增加伸长率, 而C、Mn、Sn和Sb可减小伸长率。

(5) 抗拉强度、硬度、伸长率和珠光体面积率四者之间呈强相关, 知道一个数值可推测出其他数值, 因此铸造生产中可通过观察铸件产品组织和测量硬度等非破坏检查进行材质管理。

参考文献:

- [1] 淡路佳孝, 平塚贞人, 小绵利宪. 添加Cu和Sn对蠕墨铸铁石墨形态的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (12): 1639-1646.
- [2] 张伯明. Sb对球墨铸铁形核过程的影响 [J]. 铸造工程, 2022, 46 (5): 27-33
- [3] 李仁强, 潘昊亮, 孟丽娜. Sb微合金化大断面球墨铸铁组织和性能的研究 [J]. 精密成形工程 [J]. 2021, 13 (5): 147-154.
- [4] 刘国锋, 郭亮. Sb对厚大断面球墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2020, 40 (1): 17-22.
- [5] 宋良. Cu对球墨铸铁组织和力学性能的影响 [J]. 黑龙江大学学报, 2017, 36 (6): 674-678.
- [6] 邓丽霞, 高生祥. 铜微合金化对QT600球墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41 (4): 38-41.
- [7] MINNEBO P, NILSSON K F, BLAGOEVAL D. Tensile compression and fracture properties of thick-walled ductile cast iron components [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16 (9): 35-35.
- [8] 片冈义博. 加Sn对球墨铸铁的影响 [J]. 铸物, 1987, 59 (2): 74-78.
- [9] 曹建, 高文理. Sb对大壁厚铁素体球墨铸铁件组织和力学性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2012, 36 (2): 40-87.
- [10] ZERILLIFJ, ARMSTRONG R W. Dislocation-mechanics-based constitutive for material dynamics calculations [J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61 (5): 1816-1825.
- [11] FOLLANSBEE P S, KOCKS U F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable [J]. Acta Metall, 1988, 36 (1): 81-93.
- [12] BODNER S R, PARTOM Y. A large deformation elastic-vis-coplastic analysis of a thick-walled spherical shell [J]. Journal of Applied Mechanics, 1972, 39 (9): 751-757.
- [13] 夏丽娟. 含铈球墨铸铁的研制 [J]. 一重技术, 2008 (4): 58-59.
- [14] 掘江皓. 铸石石墨球化干扰元素的分类 [J]. 铸物, 1977 (7): 393-399.
- [15] SERKHOVETS, PETRICHENKO S I, MOZHAROV A M, et al. Homogenizing the pearlitic structure in high-duty iron castings with antimony micro-additions [J]. Russ Cast Prod, 1975 (8): 319-321.

Analysis of the Influence of Alloying Elements such as Sn and Sb on the Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Iron

ZHANG Mao-ren, NING Ji-quan, NING Lin-xiang

(Zhejiang Ouyeda Machinery Manufacturing Co., Ltd., Huzhou 313013, Zhejiang, China)

Abstract:

Through multivariate analysis of the tensile strength, hardness, elongation, pearlite area ratio, spheroidization ratio, graphite structure, and chemical composition of a large number of ductile iron tensile specimens with different compositions, the regression calculation equations for the strength, hardness, elongation and pearlite area ratio, and the influence coefficients of alloy elements, and the correlation coefficients between the strength, hardness, elongation and pearlite area ratio were obtained. By adjusting the additive amounts of elements such as Si, Mn, Sn, Sb and so on, the ductile irons with different mechanical properties can be developed. Taking advantage of the correlations between mechanical property values, other mechanical property values can be inferred by measuring hardnesses, sequentially, the material management can be carried out in the casting production.

Key words:

ductile iron; mechanical property; alloying element; microstructure; multivariate analysis