● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.001

孕育增硅对铁素体球铁微观组织及力学性能的影响

全 真[1],徐锦锋[1],赵新武[2],何宝楼[1],翟秋亚[1]
(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048;2. 西峡县内燃机进排气管有限责任公司,河南 西峡 474500)

摘 要:在其它工艺因素不变的条件下,研究了孕育增硅处理对铁素体球铁微观组织和力学性能的影响规律。结果表明:随着孕育硅量的增加,石墨球化率下降,球径增大,球数减少,分布均匀性变差,尤其当 Si 含量大于 4.0%时,容易产生碎块状石墨,且有加剧之倾向;同时,球铁的抗拉强度、屈服强度及硬度趋于增大,而伸长率呈现出先增大而后减小的趋势,冲击韧度则单调下降。

关键词:硅含量;固溶强化;铁素体球铁;微观组织;力学性能
中图分类号:TG243 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)05-0333-04

Effects of Microstructures and Mechanical Properties of Ferritic Ductile Iron by Increasing Inoculation Content

QUAN Zhen[1], XU Jinfeng[1], ZHAO Xinwu[2], HE Baolou[1], ZHAI Qiuya[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xixia Internal Combustion Engine Intake and Exhaust Pipe Co., Ltd., Xixia 474500, China)

Abstract: The effect of inoculation and silicon addition treatment on microstructure and mechanical properties of ferrite ductile iron was studied under the condition of other technological factors unchanged. The results show that with the increase of inoculation amount of silicon, the graphite spheroidization rate decreases, the diameter of the spheroidization increases, the number of the spheroidization decreases, and the distribution uniformity becomes worse. Especially when the Si content is greater than 4.0%, it is easy to produce lumpy graphite and tends to intensify. At the same time, the tensile strength, yield strength and hardness of ductile iron tend to increase, while the elongation first increases and then decreases, and the impact toughness decreases monotonically.

Key words: silicon content; solution strengthening; ferritic ductile iron; microstructure; mechanical properties

自从瑞典 Larker Richard 首次将硅固溶强化铁素体球铁誉为"第二代球铁"材质之后,它已成为世界各国竞相研发及应用的热点材料[1-2]。硅固溶强化铁素体球铁不仅具有良好的综合力学性能,而且在轻量化和节能减排、降低成本等方面存在明显的科技优势,被广泛应用于铸管、汽车、机车等工程领域。当硅含量在 2.4%～6.0%时,硅固溶强化铁素体球铁的基体组织为 100%铁素体,球铁的抗拉强度随硅含量增大而增大,当硅含量为 4.3%时达到最大值,超过此硅含量后,抗拉强度逐渐下降,而屈服强度在硅含量约为 4.6%时开始下降[3]。文献[4]指出,当硅含量在 3.95%～5.63%时,随着硅含量的增大,硅固溶强化铁素体球铁的抗拉强度和屈服强度趋于升高,分别在硅含量为 4.85%和 5.46%处达到最大值,而后球铁的抗拉强度缓慢下降,屈服强度趋于平缓,而伸长率则一直呈现出下降的趋势。文献[5]认为硅含量为 3.11%的硅固溶强化铁素体球铁可以代替牌号为 EN-GJS-400-15 和 EN-GJS-450-10 的常规球墨铸铁。2012 年,欧洲和德国已将性能相当于 QT450-18、QT500-14 及 QT600-10 的球铁牌号增列为 DIN EN 1563 标准牌号,并投入高端球铁件的工业化批量生产[6]。同时,为使合金具备一定的塑韧性,其硅含量上限一般不超过 4.3%。随着硅量的进一步增大,合金的基体组织仍以铁素体为特征,但其塑韧性变差,而热疲劳性能和抗氧化性趋于增强[6-8],合金随以高硅耐热铸铁著称,其硅含量通常在 4%~7%。尽管两类铸铁均利用了硅元素在铁素体基体中的固溶强化作用,但由于硅含量范围不同,合金的物化和力学性能迥异。特别是硅含量对球铁的冲击

收稿日期:2021-03-12
作者简介:全 真(1994—),陕西商洛人,硕士研究生.研究方向:铸造合金组织与性能.Email:quanzhen94@163.com
通讯作者:徐锦锋(1963—),陕西宝鸡人,教授.研究方向:铸造合金组织与性能研究.Email:jinfengxu@xaut.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

韧度具有显著影响[9]。因此，深入研究硅含量对铁素体球铁微观组织和力学性能的作用规律具有重要的理论意义。本文作者拟在其它工艺因素不变的条件下，通过孕育增硅的方式，在宽泛的硅含量范围内，探索硅固溶强化铁素体球铁的微观组织演变规律及其与常规力学性能之间的相关性，以期为实际生产提供理论依据。

1 实验方法及条件

在生产条件下，在不冲击实际生产的前提下，对实验过程进行简化：以工业铁素体球铁的球化铁液为母液，通过调整铁液终硅量来获得不同硅含量的硅固溶强化铁素体材质。具体做法是，将硅量增加部分换算成孕育剂加入量，以细颗粒形成，将其置于小包底部，再将球化好的母液倒入小包中，达到既孕育又增硅的技术效果。合金终硅量取4个水平：3.0%、3.5%、4.0%及4.5%。

采用3 t中频感应炉熔制铁液。金属炉料包括优质Q10原生铁、优质废钢、球铁铁屑和球铁回炉料等。炉料配比为23%生铁，70%球铁回炉料，7%废钢和0.35%增碳剂。用SLD-T5连续式钢水测温仪在线检测铁液温度。熔炼温度控制在1 520～1 550 ℃。采用包内冲入法进行球化处理。球化剂选用Mg7RE3合金，其加入量为1.1%~1.2%，球化处理温度为1 490~1 520 ℃，球化处理时间为60~100 s。用75FeSi进行包内孕育和随流孕育。包内孕育剂粒度3~12 mm，随流孕育剂粒度0.3~0.8 mm。用直读光谱仪测试铁液的化学成分。用潮模砂手工造型，一箱两件，试件为壁厚25 mm的Y型单铸试块。浇注温度约1 380~1 420 ℃。用手端漏斗进行随流孕育处理，孕育剂加入量为0.08%。用线切割从Y型试块中切取拉伸试棒和V型缺口冲击试样。用HT-2402-100 kN万能试验机测试合金的抗拉强度和伸长率，每组试验测试至少3根试棒。采用JB-300B型摆锤冲击试验机测试合金的冲击功，每组试验测试3个试样。采用标准金相技术制备金相试样，用带定量金相分析软件的BM-4XA Ⅰ型光学显微镜进行组织观察。用HB-3000型布氏硬度计测试合金的硬度，每个试样测试5个点，取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 球铁铁液的化学成分

表1为实验测定的球铁铁液的化学成分。从表1看出，由于使用了同一包球化铁液，4种合金中除碳、硅元素以外，其它合金元素含量稳定，波动范围较小。硅含量在3.00%~4.43%，基本满足本工作对硅含量的设计要求。随着孕育硅量的增大，铁液碳含量单调减小，而碳当量趋于增大，从4.44%增至4.76%。碳含量减小主要与硅降低铁液中碳的溶解度有关。

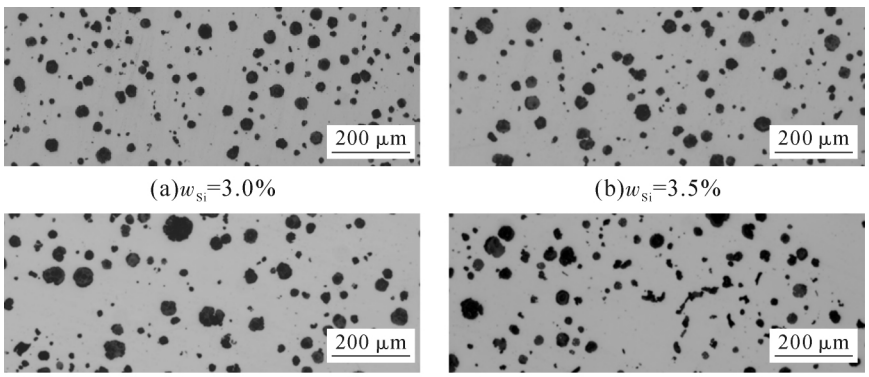
2.2 孕育增硅与石墨形态之间的相关性

图1为不同硅含量铁素体球铁中的石墨形态。当硅含量较低时(w_{Si}=3.0%)，铁液球化效果良好，石墨球圆整，尺寸细小，分布均匀(图1a)；当硅含量增大至w_{Si}=3.5%时，石墨球圆整度略有下降，开始出现为数较多的大的石墨球(图1b)；当w_{Si}=4.0%时，

表1 球铁铁液的化学成分 w(%)

Tab.1 The measured chemical composition of the ductile iron

组号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ti	Cu	Ni	$Mg_{残}$	$RE_{残}$
1	3.44	3.00	0.13	0.010	0.024	0.044	0.043	0.016	0.023	0.043	0.035	0.024
2	3.42	3.47	0.13	0.008	0.020	0.041	0.043	0.016	0.022	0.041	0.038	0.023
3	3.32	4.05	0.12	0.013	0.020	0.042	0.043	0.016	0.023	0.043	0.036	0.024
4	3.28	4.43	0.12	0.013	0.021	0.041	0.043	0.015	0.022	0.043	0.037	0.026



(a)w_{Si}=3.0%　(b)w_{Si}=3.5%

(c)w_{Si}=4.0%　(d)w_{Si}=4.5%

图1 球铁中的石墨形态(未腐蚀)

Fig.1 Graphite morphology in ductile iron(No etched)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

产生一定量的畸变石墨和碎块状石墨(图 1c)；当硅含量进一步增大至 w_{Si}=4.5%时，碎块状石墨数量明显增多，出现了局部偏聚分布的细小碎块状石墨(图 1d)。表 2 为不同硅含量球铁中石墨相定量分析结果。可知，硅含量对铸态铁素体球铁中的石墨形态、分布及球化率有着显著的影响。随着孕育硅量的增大，石墨球化率降低，球数减少，球径增大，分布均匀性变差。尤其是，当 w_{Si}>4.0%时，合金中开始出现碎块状石墨。这说明在孕育增硅的条件下，较高的硅含量及其引发的高的碳当量容易导致铁素体球铁中畸变石墨的形成，并且随着孕育硅量的增大，碎块状石墨数量趋于增多。

表 2 石墨球定量分析结果

Tab.2 Graphite sphere quantitative analysis results

Si(%)	3.0	3.5	4.0	4.5
球化级别	2	3	3	3
球化率(%)	91~92	87~89	86	84
球数 /(个 /mm²)	483	421	335	301
球径级别	8	8	7	7

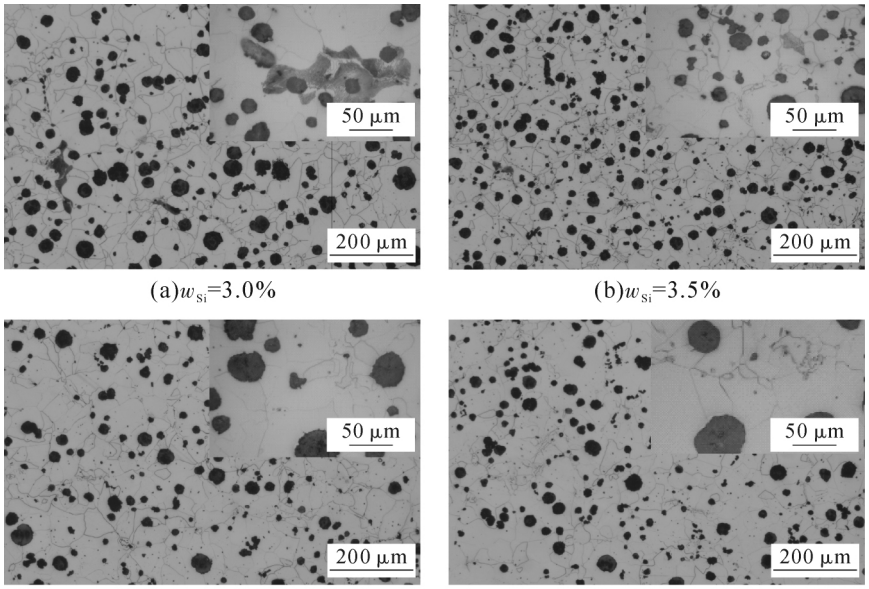
注：球径小于 10 μm 石墨球未计入球数。

2.3　孕育增硅对铁素体球铁基体组织的影响

图 2 为不同硅含量铸态铁素体球铁的基体组织形貌。从图中可以看出，当 w_{Si}=3.0%时，基体组织以铁素体为主，存在约 5%的珠光体组织；当硅含量增至 w_{Si}=3.5%时，珠光体数量降至约 2%；当 w_{Si}=4.0%时，基体组织由全部的铁素体组成。另外，在基体组织中，未能观察到晶界碳化物、磷共晶及硫共晶等物相的存在。可知，随着孕育硅量的增大，珠光体数量减少。高的硅含量不仅能够抑制碳化物的形成，还有利于获得铸态铁素体球铁材质。

2.4　孕育增硅对铁素体球铁力学性能的影响

图 3(a)为铸态铁素体球铁的拉伸性能随硅含量的变化。可以看出，随着孕育硅量的增大，合金的抗拉强度先增大而后减小，而屈服强度则单调增大。同时，伸长率呈现出先增大而后急剧减小的趋势。其原因在于，随着孕育硅量的增大，对铁液的孕育作用增强，珠光体数量减少，硅元素对铁素体固溶强化作用增强，因而强度指标大致呈增大趋势。但是，当 w_{Si}≥4.0%时，畸变石墨和碎块状石墨增多，石墨球化率

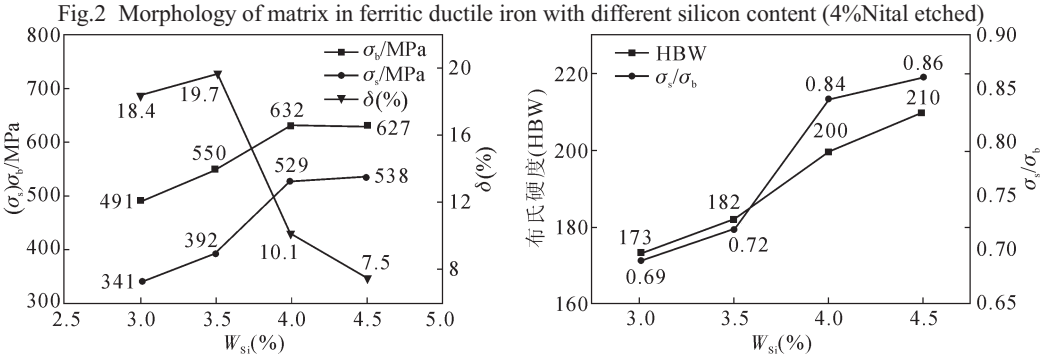


(a)w_{Si}=3.0%　(b)w_{Si}=3.5%

(c)w_{Si}=4.0%　(d)w_{Si}=4.5%

图 2 不同硅含量铁素体球铁中基体组织形貌(4%硝酸酒精腐蚀)

Fig.2 Morphology of matrix in ferritic ductile iron with different silicon content (4%Nital etched)



(a)拉伸性能　(b)屈强比和硬度

图 3 硅含量对铁素体球铁力学性能的影响

Fig.3 Effect of silicon content on mechanical properties of ferritic ductile iron

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

降低，在一定程度上消弱了强度指标的进一步增大，因而曲线变得比较平缓。需要说明的是，曲线中 w_{Si}=3.0%对应的伸长率之所以低于 w_{Si}=3.5%，主要与 3.0%Si 材质中珠光体含量略高有关。这说明，合金的伸长率对珠光体数量比较敏感，并且，当 $w_{Si}\leqslant$ 3.5%时，珠光体数量是影响铁素体球铁伸长率的主要因素。有文献指出[10]，当 $w_{Si}\geqslant$4.3%时，断后伸长率将急剧下降，其与本文存在差异，这主要与实验条件各不相同有关。文献[10]的实验结果同时显示，当在合金中单一添加 0.3%~0.6%的 Cr 元素时，4.3%Si 合金对应的伸长率会显著降低。而在本实验中，铁液含有多种微合金化元素，如 Cr、Mo、Ni、Cu、Ti 等，这些元素总量较高，对合金具有一定的低合金化作用，从而导致 4.0%Si 合金对应的的伸长率偏低。

图 3(b)为硅含量对铁素体球铁屈强比和硬度的影响。由图中可以看出，合金的屈强比在 0.69~0.86。随着硅含量的增大，屈强比呈单调增大的趋势。这主要与孕育硅量增大，固溶强化作用增强，屈服强度增长幅度较大有关。因此，高硅固溶强化铁素体球铁屈强比要高于低硅固溶强化铁素体球铁。这说明在一定的范围内，硅含量越高，铁素体球铁件的可靠性越高，材料利用率越好。

铸态铁素体球铁的硬度在 173~210 HB。随着孕育硅量的增大，合金硬度呈现出单调增大的趋势。很显然，在基体中珠光体含量很低的情况下，球铁的硬度由基体中珠光体的数量和硅对铁素体的固溶强化作用共同决定。当硅含量相近时，球铁的硬度随珠光体的含量增大而增大，反之，球铁硬度值减小。当珠光体含量相差较小时，硅在铁素体中固溶度的越大，对基体的固溶强化作用越强，合金的硬度越高，反之，硬度越低。球铁中硅含量在 3.0%~4.5%，组织中铁素体含量均大于 95%，因此，合金硬度主要取决于硅在铁素体中的固溶度。

图 4 为硅含量对铸态铁素体球铁室温冲击功的影响。可知，铸态铁素体球铁室温冲击功在 2~8 J。随着孕育硅量的增大，室温冲击功呈现出先急剧减小，而后变化平缓的趋势。这说明，尽管伴随着孕育剂加入量的增大，对合金的孕育作用增强，有利于改善合金的力学性能，但由于较高的硅含量所引发的畸变石墨的增多及硅元素在铁素体基体中大量固溶，会严重恶化铁素体球铁的塑韧性。

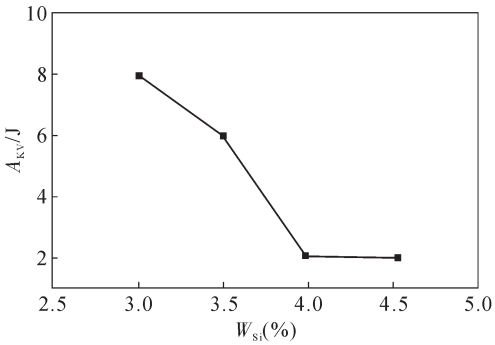


图 4 硅含量对铁素体球铁冲击功的影响

Fig.4 Effect of silicon content on impact energy of ferritic ductile iron

3 结论

在其它工艺因素不变的条件下，孕育增硅处理对铸态铁素体球铁的微观组织和力学性能具有显著的影响。随着孕育硅量的增大，一方面，球化率降低，球数减少，碎块状石墨增多，基体中为数不多的珠光体数量急剧减小，并且，在铁素体基体中，未观察到晶界碳化物、磷共晶和硫共晶的存在；另一方面，合金的指标如强度、屈服强度、屈强比和硬度增大，而塑韧性指标如伸长率和冲击韧度则趋于下降。

参考文献：

[1] Larker Richard. 固溶强化铁素体球墨铸铁[J]. 铸造, 2010, 59(6): 622-627.

[2] ALHUSSEIN, RISBET M, BASTIEN A, et al. Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferriticductile cast iron [J].Materials Science＆Engineering A, 2014, 605: 222-228.

[3] STETS W, LÖBLICH H, GASSNER G, et al. Solution Strengthened Ferritic Ductile Cast Iron Properties, Production and Application[J]. International Journal of Metalcasting, 2014, 8(2):35-40.

[4] Philipp Weiß, Anže Tekavčič, Andreas Bührig-Polaczek. Mechanistic approach to new design concepts for high siliconductile iron [J]. Materials Science & Engineering A, 2018(713):67-74.

[5] GLAVAS Z, STRKALJ A, STOJAKOVIC A, The Properties of Silicon alloyed ferritic ductile irons, Metallurgija, 2016, 55 (3): 293-296.

[6] Herbert Loeblich. Grundlagen der Herstellung and Anwendung von Hochsiliziumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit [J]. Vortrag in Giessereitagung Deutschland, 2012(11):23.

[7] 许帅领，王谦谦，靳存文，等. 硅对固溶强化球墨铸铁组织及性能的影响[J]. 铸造, 2018, 67(8):712-715.

[8] YANG Y L, CAO Z Y, LIAN Z S, et al. Thermal Fatigue Behavior and Cracking Characteristics of High Si-Mo Nodular Cast Iron for Exhaust Manifolds [J]. Journal of Iron and Steel Research,International, 2013, 20(6):52-57.

[9] TOKTAS G, TAYANC M, TOKTAS A. Effect of matrix structure on the impact properties of an alloyed ductile iron [J]. Materials Characterization, 2006, 57:290-299.

[10] 张伯明，王继祥.高 Si 球铁的新发展[J]. 现代铸铁, 2013, 33(5): 49-58.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net