

钛对球墨铸铁显微组织与低温性能的影响

姜少宁^{1, 2, 3}, 朱晓宇^{2, 3}, 林江海^{2, 3}, 孙中恒⁴, 夏玉海^{2, 3},
杨 帅^{2, 3}, 刘文俊^{2, 3}, 王朝峰^{2, 3}, 王雪松⁵

(1. 山推工程机械股份有限公司, 山东济宁 272073; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 机械工程学院, 山东济南 250353;
3. 山东省机械设计研究院, 山东济南 250031; 4. 枣庄市胜达精密铸造有限公司, 山东枣庄 277400;
5. 泰安万川电器设备有限公司, 山东泰安 271200)

摘要: 球墨铸铁具有加工性好、成本低廉等优点, 但其强度和韧性不能共存, 严重限制了其低温应用。本研究采用树脂砂铸造工艺, 通过添加合金元素Ti在球墨铸铁中形成TiC颗粒, 制备了制氧机壳体铸件。分析了铸件材料的组织、成分和力学性能。结果表明, 当Ti含量为0.03% (质量分数) 时, 球墨铸铁中形成细小的TiC颗粒, 没有影响石墨球化, 球化率达到94%, 符合组织要求。拉伸试验表明, 该铸件材料的强度和伸长率较QT400-18球墨铸铁分别提高了5%以上和22.8%, 此外, 室温冲击吸收功为17 J, 高于QT400-18; 低温冲击韧性较好, -20 ℃、-40 ℃冲击吸收功分别提高了10%和8%。这说明添加0.03%的Ti可以提高球墨铸铁的性能, 根据晶格错配度理论讨论了强韧化机理。

关键词: 球墨铸铁; 碳化钛颗粒; 强韧化; 晶格错配

作者简介:

姜少宁(1982-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为高端装备零部件材料的失效分析与性能提升。

E-mail: jsn@qlu.edu.cn

通信作者:

林江海, 男, 工程技术应用研究员, 硕士生导师。
电话: 0531-85871389,
E-mail: ljh6099@163.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)
01-0026-07

基金项目:

山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2411, 2023TSGC0585); 山东省工程机械智能装备创新创业共同体重点项目(GTT202110, GTT20220209); 齐鲁工业大学(山东省科学院)一枣庄市产学研协同创新基金项目(2021CXY-10); 校级大学生创新训练项目。

收稿日期:

2023-10-12 收到初稿,

2024-02-01 收到修稿稿。

球墨铸铁可用于铸造复杂形状工件, 具有良好的可加工性, 使其成为机械零件制造中替代钢材的一种经济可行的选择, 被广泛应用于风电、机床等高端装备制造业关键铸件的制造^[1]。根据制造业未来的发展要求, 球墨铸铁铸件向绿色化、高端化、精密化方向发展, 对材料等提出了更高的要求^[2-3]。制氧机广泛应用于医疗、冶金、机械工业等行业, 其壳体多采用球墨铸铁铸件。在低温环境下, 制氧设备性能下降可能导致制氧系统运作不畅, 影响制氧系统的高效稳定运行。因此, 要求制氧机壳体用球墨铸铁不仅具有较高的常温性能, 而且要有良好的低温韧性。传统的球墨铸铁存在强度与韧性不能共存的问题, 成为高强韧球墨铸铁应用的瓶颈^[4]。因此, 亟须提高球墨铸铁件的质量, 加快基础材料升级换代。

目前, 大多数铸态高强度、高伸长率球墨铸铁的研究采用平衡铁素体与珠光体比例的方式^[5-6], 但提高塑性的同时可能会导致强度降低。因此, 需要探索改善球墨铸铁性能提升的新途径。通过在组织中形成纳米级第二相, 是改善材料性能的有效途径^[7-8]。其中, 第二相的选择至关重要, 碳化物颗粒的成本较低, 且在球墨铸铁中, 与球状石墨对基体的割裂作用较小, 而且与铁基基体附着力较好。许多合金元素都可以形成碳化物颗粒, 其中, 合金元素钛可以通过在裂纹尖端的桥联、塑性变形等阻止裂纹扩展进而达到增强增韧的目的, 形成的TiC颗粒能细化晶粒^[9-10], 提高强度^[11]、冲击韧性^[12]和耐磨性^[13-14]。但研究指出, 在球墨铸铁中, Ti的加入除了会生成TiC, 还会引起多方面的变化, 比如影响石墨的球化、与球化剂形成夹杂物等^[15]。球墨铸铁的凝固过程复杂, 对Ti的不同添加量所表现出的作用需要进一步研究。此外, 纳米颗粒的形成方式包括外加和内生两种, 外加法普遍存在颗粒与基体的结合度不够的问题^[16], 内生法可以进一步提高颗粒与基体的润湿性, 提高性能^[17-18]。

基于以上分析, 本研究通过高炉-铁液罐-绿色短流程铸造工艺, 通过添加适量钛

铁以内生法形成TiC的方式,研究钛的含量对球墨铸铁组织与性能的影响。通过分析微观组织结构成分,讨论TiC的形成机理。基于力学性能,讨论微观组织和力学性能之间的相关性,探索提高球墨铸铁的强度和韧性的方法,为球墨铸铁应用于高端装备零部件提供参考价值。

1 试验方法

1.1 试验零件及材料

所选试验铸件为制氧机壳体,为氧气增压灌装系统中的主体部件,结构简单,选材为QT400-18,要求其常温抗拉强度 ≥ 400 MPa,伸长率 $\geq 18.0\%$,低温冲击韧性在 -40 °C条件下, $\alpha_{KV} \geq 12.0$ J/cm²。

以球墨铸铁(QT400-18)为基础调整材料成分,所用试验材料包括原材料、孕育剂、球化剂、钛铁等,具体成分见表1、2、3、4。在冶炼过程中,选用含稀土、镁含量高的球化剂。孕育剂是球墨铸铁生产环节中重要的材料之一,球化处理过程中加入孕育剂不仅可以消除渗碳体,还可以提高球化率、细化石墨球、使石墨球圆度均匀。

表1 生铁和冷压板块化学成分
Tab. 1 The chemical compositions of pig iron and cold-pressed plate $w_B/\%$

名称	C	Si	Ti	Mn	P	S
QT12生铁	4.41	1.08	0.042	0.08	0.033	0.017
冷压板块	0.08	0.05	0.020	0.06	0.025	0.020

表2 球化剂化学成分
Tab. 2 The chemical composition of nodularizer $w_B/\%$

RE	Si	Ca	Mg	Ba
2.4	42.5	2.3	7.4	1.5

表3 孕育剂化学成分
Tab. 3 The chemical composition of inoculator $w_B/\%$

Si	Ca	Al	Ba
69.88	1.36	1.30	4.68

表4 钛铁化学成分
Tab. 4 The chemical composition of TiFe $w_B/\%$

Ti	Si	P	Mn	Cu	Cu	S
34	4.48	0.049	1.98	0.09	0.09	0.013

1.2 绿色短流程砂型铸造工艺

短流程工艺系统包括烧结系统、炼铁系统及铸造系统。生产工艺流程为:矿粉(配料)→烧结机(焙烧)→铁液(熔炼)→铸件(浇注)。钛铁以粉末状随生铁加入。熔炼1 t铁液,加入球化剂12.5 kg、孕育剂5 kg、钛铁粉3.2 kg、增碳剂1 kg,在熔炼过程中TiC通过以下反应原位生成:Ti+C=TiC。设计钛含量范围为0.03%~0.3%(质量分数,下同),用试块试制时,当钛含量为0.3%时,铁液明显变稠;当钛含量为0.12%时,球化效果较差;当Ti添加量为0.125%~0.25%时,随着含量增加,球化等级下降,石墨球数明显减少,抗拉强度下降,伸长率下降。因此,随后进行了6个炉次试验(表5),Ti的添加量分别为0.03%、0.04%、0.05%、0.06%和0.09%,其中,Ti含量为0.03%的铸件进行了两炉次试验。结果发现,当Ti含量为0.03%时,没有影响石墨的球化效果,因此,选择钛的加入量为0.03%制备的壳体进行分析,为了简化描述,文中以QT400-180.03TiC表示。配料比为优质Q12生铁约70%、回炉料约10%、冷板压块约20%,为了避免钛与稀土镁等作用形成含钛夹杂物,控制球化剂为1.25%、孕育剂0.5%,同时优化铸造工艺参数,通过控制浇注温度、浇注时间以控制反应速度,平衡TiC与石墨中碳的含量。

表5 6炉次铸件化学成分
Tab. 5 The chemical compositions of 6 heat castings $w_B/\%$

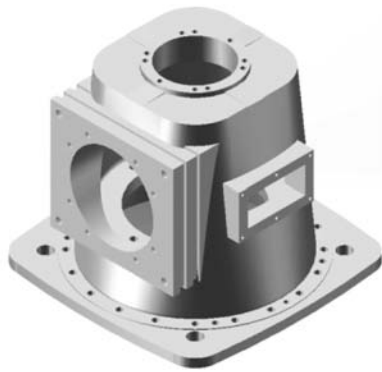
炉次	C	Si	Mn	Ti	S	P	Mg
1	3.61	2.48	0.093	0.027	0.005	0.027	0.040
2	3.55	2.60	0.100	0.030	0.008	0.027	0.035
3	3.57	2.67	0.215	0.040	0.014	0.057	0.048
4	3.58	2.42	0.191	0.048	0.004	0.028	0.032
5	3.62	2.40	0.207	0.062	0.012	0.043	0.055
6	3.63	2.57	0.226	0.088	0.016	0.060	0.047

采用砂型铸造方法,优化工艺参数后,浇注温度为 1370 °C,浇注时间控制在36 s,制氧机壳体铸件的尺寸、形状如图1(a)所示。经表面清除砂粒、杂质后,在铸件上取样,进行组织和性能分析,取样部位位于主体壁厚的1/4处,示意图如图1(b)所示。

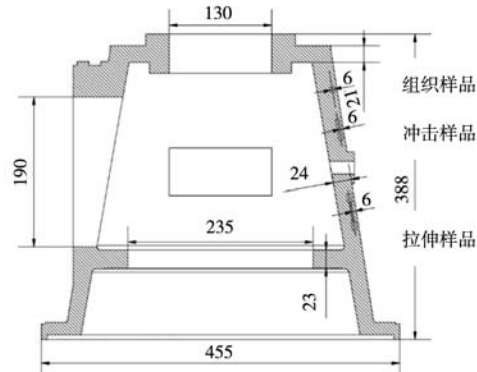
1.3 微观组织和力学性能测试

将样品切割成 10 mm \times 10 mm \times 10 mm的块体,经过磨平、抛光之后,用4%的硝酸酒精溶液腐蚀抛光面,腐蚀时间控制在10~15 s,采用金相显微镜以及配备能谱仪的扫描电镜进行微观组织观察和成分分析。

力学性能测试包括拉伸和冲击测试,按照GB/T



(a) 制氧机壳体铸件



(b) 取样位置示意图

图1 制氧机壳体铸件的尺寸、形状以及取样位置示意图

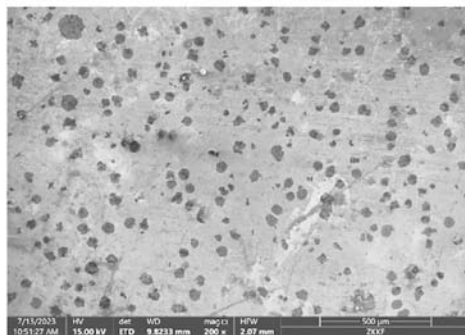
Fig. 1 Schematic diagram of the size, shape and sampling locations of oxygenator shell casting

228.1—2021《金属材料拉伸试验 第一部分：室温试验方法》的尺寸要求制备拉伸试样。按GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》标准加工为V型缺口样品，并进行室温、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冲击试验。

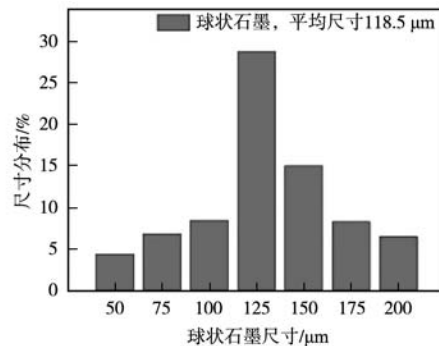
2 结果与讨论

2.1 球墨铸铁的显微组织

图2为添加0.03% Ti制备的球墨铸铁 (QT400-18_{0.03TiC}) 制氧机壳体材料的显微组织。其中，图2 (a)



(a) 球墨铸铁金相组织



(b) 石墨的尺寸分布

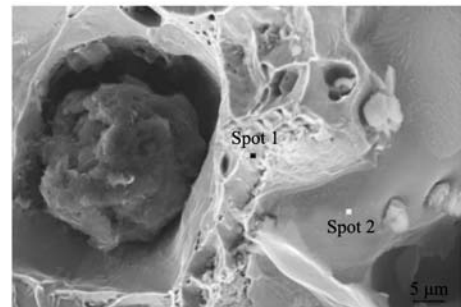
图2 添加0.03% Ti制备的球墨铸铁金相组织和球状石墨的尺寸分布

Fig. 2 Metallographic structure and graphite sphere distribution of ductile iron prepared by adding 0.03% Ti

为金相组织，可以看出，QT400-18_{0.03TiC}的金相组织与常规球墨铸铁类似，以铁素体为基体，均匀分布球状石墨，石墨面积为32.39%，单位面积石墨数 $187.3\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。图2 (b) 是石墨的尺寸分布统计图，平均尺寸为 $118.5\text{ }\mu\text{m}$ ，石墨球大小等级为8级，球化率为93.89%，球化等级为2级^[19]。

图3为QT400-18_{0.03TiC}的成分分析，选取疑似TiC颗粒区域的点1和基体点2进行分析。点1处Ti原子浓度远高于点2，可以断定，点1处为TiC颗粒。

图4为图3区域的面扫描成分分布图像，直观地反映了各元素的分布，在球状石墨区域主要分布着C元素，而Si、Ti、Fe元素的分布远低于基体。而在TiC颗粒区域，Ti元素的分布远高于基体，这与图3的结果一致。



区域	C	Ti	Fe	Si	Mg	Mn	w_B /%
1 (TiC)	4.40	82.55	5.640	2.62	0.02	0.10	
2 (铁素体基体)	0.02	1.210	92.73	2.93	0.06	0.04	

图3 QT400-18_{0.03TiC}中TiC和铁素体的成分分析Fig. 3 Composition analysis of TiC and ferrite in QT400-18_{0.03TiC}

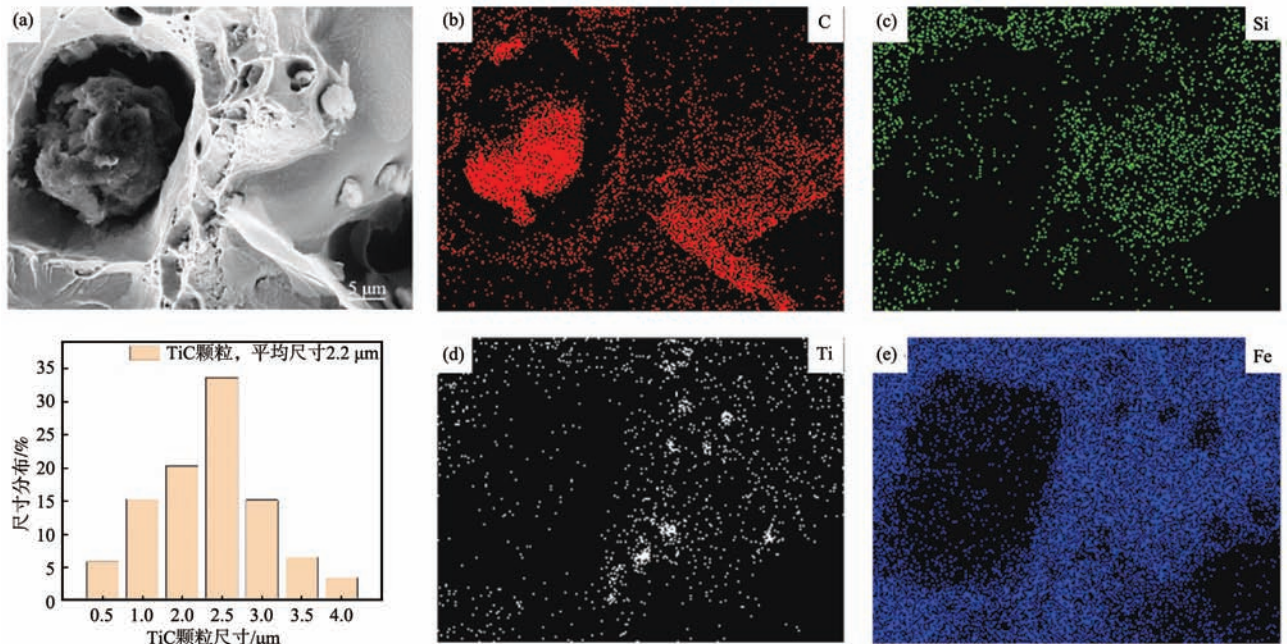


图4 QT400-18_{0.03TiC}的元素分布图以及TiC颗粒尺寸分布
Fig. 4 Element distributions of QT400-18_{0.03TiC} and size distribution of TiC particles

C在TiC中的含量不明显，这是由于在非平衡凝固过程中TiC内部存在位错^[20]。这些位错相互平行，有些位错甚至延伸到TiC与基体的界面，这可能不利于TiC的有效载荷传递。因此，TiC的组成中很难达到钛原子与碳原子的比例为1：1，TiC中存在大量的碳空位（高达50%）^[21]。

2.2 力学性能分析

2.2.1 拉伸性能分析

图5为QT400-18_{0.03TiC}试样的应力应变曲线，表6为与QT400-18材料的拉伸性能数据对比结果。QT400-18_{0.03TiC}试样的抗拉强度为425.58 MPa，屈服强度为264 MPa，总伸长率为22.47%。相比QT400-18，分别提高了5.3%、5.2%和22.8%。这说明添加0.03%Ti提高了球

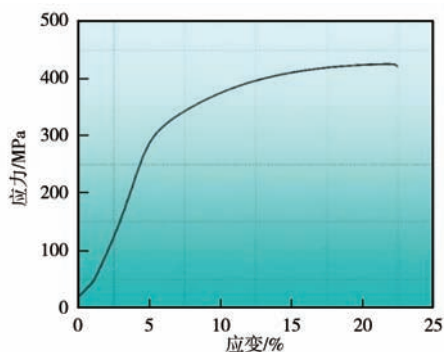


图5 QT400-18_{0.03TiC}试样的应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curve of QT400-18_{0.03TiC} sample

表6 QT400-18_{0.03TiC}与QT400-18拉伸性能对比
Tab. 6 Tensile properties of QT400-18_{0.03TiC} and QT400-18

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
QT400-18 _{0.03TiC}	425.6	264	22.47
QT400-18	404	251	18.3
增加/%	5.3	5.2	22.8

墨铸铁的强度和伸长率。

2.2.2 冲击性能分析

韧性的改善对于提高球墨铸铁的抗冲击性有重要意义，图6为不同温度下QT400-18_{0.03TiC}的冲击吸收功。从图中可以看出，添加0.03%Ti的球墨铸铁试样的室温

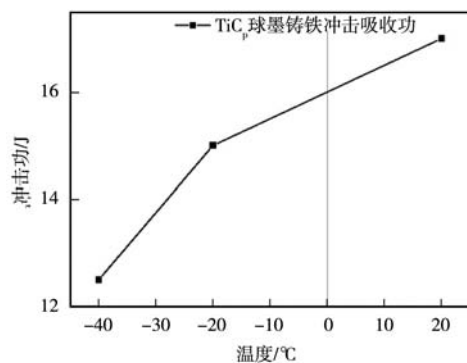


图6 不同温度下QT400-18_{0.03TiC}的冲击吸收功
Fig. 6 Impact absorbing energy of QT400-18_{0.03TiC} under different temperatures

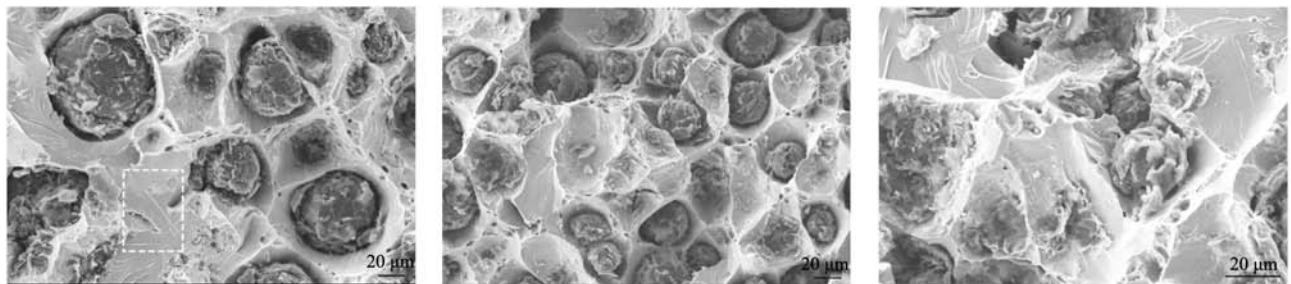
冲击吸收功为17 J, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功高于12.3 J, 高于超低温铁素体球墨铸铁(QT400-18L) ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 平均12 J, 单个试样9 J)^[22], 并能在 $-40\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域达到稳定的冲击吸收功($\geq 12\text{ J}$)。

2.3 断口分析

图7(a)为试样的拉伸断口形貌, 表面裸露石墨球, 存在以石墨球为核心的韧窝, 周围出现撕裂棱及少量的微孔, 说明局部发生了塑性变形。另有具有“河流花样”特征的脆性区(白色虚线框内所示)。图7(b)为试样的常温冲击断口形貌, 断口表面有较多的解理断裂特征。这是因为冲击或低温条件更有利

于材料解理断裂的发生。冲击断口上具有少量韧窝, 另有解理台阶汇合而成的河流花样。石墨球的细化、球化率和石墨数的提高, 使断口表面的韧窝尺寸变得均匀, 数量更多。细小TiC颗粒造成了很多微孔, 分布在韧窝周围。图7(c)为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冲击断口形貌, 与室温下的特征相似, 但断口褶皱不平。这可能是由于其滑移从一个滑移面借螺旋位错的交滑移移至另外一个滑移面造成的。当交滑移较多时, 会在断口出现波纹状的滑移线, 这说明冲击试样缺口附近的基体经历了比较剧烈的塑性变形, 当超过基体的塑性变形限度时, 就会断裂^[23-24]。

低温冲击韧性是影响铸件在低温条件下安全服



(a) 拉伸断口形貌

(b) 常温冲击断口形貌断口形貌

(c) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冲击断口形貌

图7 QT400-18_{0.03TiC}拉伸试样的断口形貌

Fig. 7 Fracture morphologies of QT400-18_{0.03TiC} tensile samples

役的重要性能, 根据设计要求, 低温球铁铸件要求具有一定的低温冲击韧性, 尤其是 $-40\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 要达到12 J的冲击吸收功, 材料的组织至少需要达到表7要求^[25-26]。

由表7可见, 本研究制备的球墨铸铁的组织均达到要求, 其中, 石墨较细化, 大小超过了要求的5级, 达到了8级。说明TiC颗粒的形成明显改善石墨的球化率, 根据晶格错配度理论, 当两相晶面间距最为接近时, 其界面的晶格畸变最小, 即界面能最小, 最有利于形核。当非均质形核时, 基体相和形核相的二维错配度 $<12\%$, 可以认为该基体可以作为异质核心^[27]。本研究中的TiC颗粒, 其(111)面与石墨(0001)面的错配度为8.33%, 具备作为石墨异质核心的条件, 促进石墨形核和析出, 石墨球直径略微减小, 密度增加, 球化率提高^[10]。

表7 球墨铸铁的组织要求

Tab. 7 Microstructure requirement of ductile iron

项目	球化率/%	石墨大小	石墨球数/(个·mm ²)
要求	90~95	≥ 5 级	90~200
QT400-18 _{0.03TiC}	93.89	8级	187.3

此外, TiC可以细化铁素体晶粒。根据经典成核理论, TiC等外来粒子只有在TiC与铁素体的界面能小于铁素体在均匀成核情况下的固液界面能时, 才能充当非均相核^[28]。根据分子静力学方法计算发现, bcc-Fe/TiC界面的界面能低于bcc-Fe的固液界面能, 这说明TiC可以作为铁素体的非均相核, 从而达到晶粒细化的效果^[29]。

综合性能的提高是由于其组织变化决定的。添加0.03% Ti通过内生法形成的TiC使球墨铸铁的球化率提高, 石墨球更加细小, 单位面积石墨数增多, 这相当于分散了基体的变形。拉伸时, 基体中存在的细小的TiC颗粒周围产生细小微孔, 可以缓解应力集中^[30]; TiC颗粒对铁素体晶粒的细化, 增加了塑性变形时位向有利的晶粒数, 变形可以更均匀地分散到各个晶粒^[10], 这使得试样在拉伸过程中表现出更好的塑性变形能力。该制氧机壳体目前处于小批量生产阶段, 客户订购试用后尚未反馈异常。下一步工作将重点考虑应用及产业化推广方面, 面向典型应用场景, 针对制氧系统分析系统匹配, 开展性能与耐久性验证, 为制氧系统的高效稳定运行提供保障。

3 结论

(1) 当Ti添加量为0.03%时, Ti的加入能够使球墨铸铁组织细化, 且不影响石墨的球化率, 并产生新的TiC强化相。

(2) 加入0.03% Ti, 提高了球墨铸铁的力学性能, 其中, 强度提高5%以上, 伸长率提高22.8%, 此

外, 低温冲击韧性较好, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功分别提高了10%和8%。

(3) 添加Ti形成的TiC颗粒, 作为石墨异质核心, 提高了石墨的异质形核数目, 使得石墨球尺寸减小, 球化率提高。

参考文献:

- [1] 李克锐, 李增利, 崔宇, 等. 我国铸铁生产技术现状与发展趋势 [J]. 铸造, 2022, 71 (2): 123-135.
- [2] 刘刚. QT400-18球墨铸铁组织与性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] 李英昌, 董健, 员一泽, 等. 基于风电球墨铸铁件的强度提升研究及实践 [J]. 铸造, 2021, 70 (4): 483-485.
- [4] 齐凯, 王之新, 李廷举, 等. 球墨铸铁新型强韧化处理方法的研究与应用 [J]. 铸造, 2007, 56 (5): 459-466.
- [5] 周鼎华. 球墨铸铁的强韧化处理 [J]. 热处理, 2013, 28 (3): 12-18.
- [6] 戴品强, 何则荣. 球墨铸铁强韧化的组织设计及其热处理工艺 [J]. 热处理, 2007 (4): 32-36.
- [7] XU L J, ZHANG Y F, LIANG Z Q, et al. Creep behavior and microstructure evolution of titanium matrix composites reinforced with TiB, TiC and Y_2O_3 [J]. The Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33: 467-480.
- [8] 潘蕾, 陈锋, 吴申庆, 等. 高能超声作用下 $\text{SiC}_p/\text{ZA}27$ 复合材料的制备及性能 [J]. 铸造, 2003, 52 (4): 235-238.
- [9] YUAN Q, CHAI L J, YANG T, et al. Laser-clad FeCrAl/TiC composite coating on ferrite/martensitic steel: significant grain refinement and wear resistance enhancement induced by adding TiC [J]. Surface & Coatings Technology, 2023, 456: 129272.
- [10] 王金国, 任帅, 闫瑞芳, 等. TiC颗粒对铸态球墨铸铁组织和力学性能的影响 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49 (16): 2011-2018.
- [11] PARK J J, PARK E K, HONG S M, et al. Microstructure and properties of SA 106B carbon steel after treatment of the melt with nano-sized TiC particles [J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 613: 217-223.
- [12] FU H G, WU X J, LI X Y, et al. Effect of TiC particle additions on structure and properties of hypereutectic high chromium cast iron [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18 (8): 1109-1115.
- [13] RAZAVI M, RAHIMIPOUR M R, RAJABI-ZAMANI A H. Effect of nanocrystalline TiC powder addition on the hardness and wear resistance of cast iron [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 454: 144-147.
- [14] 邱涵, 李杰, 涂小慧, 等. 原位自生TiC对低合金马氏体钢磨料磨损性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2021, 41 (3): 357-364.
- [15] 郭文涛, 常国威, 李冲, 等. 钛含量与冷却速率对球墨铸铁中含钛夹杂物的影响 [J]. 机械工程材料, 2012, 36 (10): 19-22.
- [16] WANG B X, ZHANG Y, QIU F, et al. Simultaneously enhanced hardness and toughness of normalized graphite ductile irons by TiC-TiB₂ nanoparticles [J]. Materials Letters, 2021, 291: 129597.
- [17] 王驰, 孙俊生, 徐虎, 等. 原位自生TiC对高铬铸铁堆焊金属组织与性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2021, 45 (9): 30-34.
- [18] 朱和国, 吴申庆. 自生铝基复合材料的制备性能及生成机理 [J]. 材料导报, 1998, 12 (4): 61-65.
- [19] 王泽华, 张欣, 郭道成. GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相检验》标准解读 [J]. 铸造, 2023, 72 (3): 333-341.
- [20] SUN W W, EHTESHAMI H, KENP P R, et al. Self-diffusion of Ti interstitial based point defects and complexes in TiC [J]. Acta Materialia, 2019, 165: 381-387.
- [21] GUSEV A I, REMPEL A A, MAGERL A J. Disorder and order in strongly nonstoichiometric compounds: transition metal carbides [M]. Berlin: Springer, 2001.
- [22] 朱正锋, 喻光远, 封雪平, 等. 超低温球墨铸铁件的生产过程控制及技术研究 [J]. 2023, 72 (12): 1636-1641.
- [23] 李荣德, 张新宁, 蒋立鹏, 等. 铁素体球墨铸铁低温冲击断裂行为的影响因素 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (10): 25-31.
- [24] LI R D, ZHANG X N, JIANG L P, et al. Influence factors of ferrite cast iron of low-temperature impact fracture behavior [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (10): 25-31.
- [25] 路焱. 含镍量及热处理对QT400-18L低温冲击韧性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2007.
- [26] 厉旭旺, 黄成彦, 范焕, 等. 风电机组低温高韧性球墨铸铁成分设计研究现状 [J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58 (4): 23-29.
- [27] BRAMFITT B L. Planar lattice disregistry theory and its application on heterogistry nuclei of metal [J]. Metall Mater Trans B, 1970, 1 (7): 1987-1995.

- [28] IWASAKI T, MATSUYAMA A, NAKAMURA H, et al. Rapid synthesis of octosilicate, a layered alkali silicate by heterogeneous nucleation at the solid liquid interface [J]. *Applied Clay Science*, 2012, 58: 39–43.
- [29] LIU S, GAO Y K, WANG Z J, SHI Z J, et al. Refinement effect of TiC on ferrite by molecular statics/dynamics simulations and first-principles calculations [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 731: 822–830.
- [30] ZHAO Y, ZHANG W, QU Y D, DONG S L, et al. Effect of TiC particles addition on tribological behavior of ductile iron [J]. *Tribology Letters*, 2023, 71: 27.

Effect of Titanium on Microstructure and Low Temperature Properties of Ductile Iron

JIANG Shao-ning^{1, 2, 3}, ZHU Xiao-yu^{2, 3}, LIN Jiang-hai^{2, 3}, SUN Zhong-heng⁴, XIA Yu-hai^{2, 3}, YANG Shuai^{2, 3}, LIU Wen-jun^{2, 3}, WANG Chao-feng^{2, 3}, WANG Xue-song⁵

(1. Shantui Construction Machinery Co., Ltd., Jining 272073, Shandong, China; 2. School of Mechanical Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, Shandong, China; 3. Shandong Institute of Mechanical Design and Research, Jinan 250031, Shandong, China; 4. Zaozhuang Shengda Precision Casting Co., Ltd., Zaozhuang 277400, Shandong, China; 5. Taian Wanchuan Electrical Equipment Co., Ltd., Taian 271200, Shandong, China)

Abstract:

Ductile iron has the advantages of good machinability and low cost. However, the strength and toughness of ductile iron could not coexist, which seriously limits its application, especially at low temperature. In this study, the oxygenerator shell was prepared by resin-binded sand casting process, in which, the TiC particles were formed by the addition of element Ti. The microstructure, composition and mechanical properties of the casting materials were analyzed. The results show that when the addition of Ti is 0.03% (mass fraction), fine TiC particles are formed in the ductile iron and do not affect nodulizing of ductile iron at the same time, and the nodulizing rate of graphite is 94%, meeting the microstructure requirements. Tensile tests show that the strength and elongation of the casting material are more than 5% and 22.8%, respectively, higher than that of QT400-18 ductile iron. In addition, the impact absorbing energy at room temperature is 17 J, which is higher than that of QT400-18. The impact toughnesses are better at lower temperatures, increasing by 10% and 8% at -20 °C and -40 °C, respectively. It is indicated that adding 0.03% Ti can improve the mechanical properties of ductile iron. The strengthening and toughening mechanisms are discussed according to the theory of lattice mismatch.

Key words:

ductile iron; TiC particles; strengthening and toughening; lattice mismatch