**DOI**:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3057

# 铜对低温球墨铸铁组织与力学性能的影响研究

齐 鹏<sup>1</sup>,许荣福<sup>1</sup>,马驿皓<sup>1</sup>,王文浩<sup>1</sup>,王广雨<sup>1</sup>,裴栋梁<sup>2</sup>,冯以盛<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学 材料科学与工程学院 山东 济南 250101 ; 2. 山东泰开精密铸造有限公司 山东 泰安 271000)

摘 要:目前对球墨铸铁低温冲击韧性的研究越来越受到重视,本文以低温球墨铸铁为研究对象,研究了铜元素对 低温球铁(球墨铸铁)组织及力学性能的影响规律。结果表明,铜元素可以提高石墨球的圆整度,减小石墨球径,并且使 石墨球的分布更加均匀。在一定范围内(铜的质量分数为 0~0.5%),随着含铜量的增多,球铁的抗拉强度、硬度得到有效 提高,低温冲击性能、伸长率降低;当名义含铜量为 0.3%时,布氏硬度达到 178 HBW,抗拉强度达到 510 MPa,伸长率为 18%,-40 ℃热处理后低温冲击功为 16 J,综合性能较好。

关键词:铁素体球墨铸铁;铜;力学性能;低温韧性;低温球铁 中图分类号:TG143;TG113.25 文献标识码:A 文章编号:1000-8365(2023)05-0443-06

# Effects of Copper on the Microstructure and Mechanical Properties of Low Temperature Ductile Iron

QI Peng<sup>1</sup>, XU Rongfu<sup>1</sup>, MA Yihao<sup>1</sup>, WANG Wenhao<sup>1</sup>, WANG Guangyu<sup>1</sup>, PEI Dongliang<sup>2</sup>, SIMON Yisheng Feng<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China; 2. Shandong Taikai Precision Casting Co., Ltd., Tai'an 271000, China)

Abstract: At present, increasing attention has been given to the low temperature impact toughness of ductile iron. In this paper, the effect of copper on the microstructure and mechanical properties of low temperature nodular iron was studied. The experimental results show that copper can improve the roundness of graphite spheres, reduce the diameter of graphite spheres and make the distribution of graphite spheres more uniform. In a certain range (mass fraction of copper from  $0\sim0.5\%$ ), with increasing copper content, the tensile strength and hardness of ductile iron are effectively improved, while the low temperature impact performance and elongation are decreased. When the nominal copper content is 0.3%, the Brinell hardness is 178 HBW, the tensile strength is 510 MPa, the elongation is 18%, and the low temperature impact energy is 16 J after heat treatment at -40 °C, showing a preferably the comprehensive performance.

Key words: ferritic ductile iron; copper; mechanical properties; low temperature toughness; low temperature ductile iron

球墨铸铁是 20 世纪 50 年代发展起来的一种铸 铁材料,以其优良的力学性能和低廉的生产成本被 广泛应用于铸铁管件、汽车零部件、机床配件等<sup>[1]</sup>。 低温高韧性球铁是指满足低温服役条件而不发生 韧脆转变的球铁。体心立方及某些密排六方结构金 属或合金存在韧脆转变温度,即随着温度的降低, 其冲击值急剧下降<sup>[2]</sup>。寒冷地区的石油、天然气工业 以及交通运输行业等领域需要大量的球铁件,如何 在低温环境下保证球铁的服役性能成为球墨铸铁研 究领域的一个热点。低温冲击韧性实质上是指材料 在外力作用下抗脆性破坏、抵抗裂纹萌生及扩展的 能力<sup>[3]</sup>。铁素体球墨铸铁材料的脆性破坏是在低温 低负荷下发生的,缺陷和低温是发生脆性破坏的必 要条件<sup>[4]</sup>。而材料本身的化学组成、晶格结构、杂质

Email: hontaqmuchen@163.com

收稿日期: 2023-03-14

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME108);泰安市科技创新重大专项(2021ZDZX017)

作者简介:齐 鹏,1988年生,硕士.研究方向:合金熔炼技术,弹簧钢热处理工艺研究.电话:053186367286,

通讯作者: 许荣福, 1984年生, 博士, 副教授. 研究方向: 铸造合金凝固技术及理论. 电话: 0531-86367286, E-mail: rongfu@sdjzu.edu.cn 引用格式: 齐鹏, 许荣福, 马驿皓, 等. 铜对低温球墨铸铁组织与力学性能的影响研究[J]. 铸造技术, 2023, 44(5): 443-448.

QI P, XU R F, MA Y H, et al. Effects of copper on the microstructure and mechanical properties of low temperature ductile iron [J]. Foundry Technology, 2023, 44(5): 443-448.

浓度、应力集中及加工情况等,均是影响脆性破坏 的重要因素<sup>[5]</sup>。近年来,许多学者已经对如何改善低 温下球墨铸铁的性能进行了研究。吉文哲等69在 球墨铸铁中加入约 0.6% (质量分数)的镍元素并进 行热处理,在-60℃的试验条件下,冲击功达到了 13.2 J。王文慧等四通过研究发现添加适量的镍、硅 可以改善球墨铸铁的低温韧性,其中 Ni 含量不超 过 1.5%, Si 含量在 1.9%~2.3%之间。杨忠华<sup>图</sup>从电子 层面研究了 Si 和 Ni 对铸态球墨铸铁基体组织、固 溶强化和韧脆转变温度的影响,建立了 Si 和 Ni 扩散 的原子模型,通过计算能量和电子结构,分析了 Si 和 Ni 在溶强化和韧脆转变等方面的作用。LACAZE 等<sup>19</sup>发现,镍的添加可以降低共析转变温度,改善低 温下球墨铸铁的冲击韧性。综上所述,加入合金元素 可以有效提高球铁的力学性能、丰富球铁的应用 范围。

本文采用铜合金化法,在低温高韧性球铁成分 (QT400-18L) 基础上加入质量分数为 0.1%~0.5%的 铜并浇注试样,通过金相组织观察、光谱分析、拉伸 试验、布氏硬度试验、低温冲击韧性试验等表征,研 究铜对低温高韧性球墨铸铁的组织和性能的影响 规律。

## 1 实验材料与方法

本实验在 QT400-18L 成分基础上,通过改变铜 的加入量共设计 6 组实验成分,对应的 a~f 组含铜 量分别为 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%。

实验使用的熔炼设备是1t中频感应电炉,主 要原材料为 Q10 生铁、废钢、紫铜块、金属铋、75 硅 铁和球化剂等。实验用浇包容量 100 kg,孕育剂采 用粒度为 3~8 mm 的 75 硅铁,每包孕育剂加入总质 量为 1.5 kg,其中 0.5 kg 置于包底,剩余 1 kg 采用随 流孕育法加入。球化剂采用粒度为 6~12 mm 的 38 稀土硅铁镁球化剂,每包加入量(质量分数)为 1.6%,同时加入质量分数为0.01%的铋(适量的铋可以 增加石墨球的数量,提高球铁的低温冲击韧度)<sup>[10]</sup>。当铁 液熔清出铁时,采用冲入法球化处理工艺,先出占浇 包容量约 2/3 的铁液进行球化处理,等起爆反应完毕 再倒入占浇包容量约 1/3 铁液的同时进行随流孕育, 扒渣处理后进行试样浇注,分别浇注白口试样、拉伸 试样等。实验过程中铁液出炉温度控制在1530℃ 左右,浇注温度控制在1350℃左右。使用直读光谱 对白口试样进行成分检测,检测结果如表1所示。

珠光体作为基体组织之一,虽然可以提高铸件 的强度和硬度,但会降低铸件的塑性及冲击韧性。

表1 试样化学成分 w/% Tab.1 Chemical composition of the samples

Specimen No.	Fe	С	Si	Mn	Р	S	Cu
а	Bal.	3.92	2.21	0.124 0	0.029 5	0.020 6	0.015 2
b	Bal.	3.95	2.45	0.094 4	0.044 0	0.024 0	0.086 5
с	Bal.	3.99	2.11	0.099 3	0.043 0	0.028 0	0.223 0
d	Bal.	3.81	2.17	0.104 0	0.045 0	0.020 0	0.285 0
e	Bal.	3.84	2.01	0.108 0	0.043 0	0.026 0	0.426 0
f	Bal.	3.84	2.01	0.110 0	0.044 0	0.028 0	0.510 0

因此,为消除珠光体对铸件低温韧性的不利影响,设 计了如图 1 所示的热处理工艺,即热处理时将试样 放在温度为 880 ℃的炉内保温 2 h,随炉冷却至 650 ℃后取出空冷,以消除组织中的珠光体<sup>[11]</sup>。



Fig.1 Heat treatment process curve

使用型号为 YJ-100 的金相显微镜观察金相组 织,采用型号为 WAW-3000B 微机控制电液伺服万 能试验机进行拉伸试验,采用 HB-3000B 布氏硬度 计测量硬度。按照 GB/T 229-2007 加工制成 10 mm× 10 mm×55 mm 的"V"型缺口夏比冲击试样,试样放 在 BWC-1(最低温度 -80 ℃)的冲击实验低温槽中进 行低温处理,之后在混有干冰、无水乙醇的隔热装置 中保温 5 min。用与试样等温的夹具迅速夹取并在 JBN-300B 型自动冲击试验机进行上冲击试验。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 铜对球墨铸铁组织的影响

#### 2.1.1 铸态组织

图 2 所示为不同含铜量铸态试样的石墨形态。 根据 GB/T 9441-2021 球墨铸铁金相检验标准对 6 组试样球化等级、石墨球大小等级分类评级,评级结 果如表 2 所示。

表2 球铁金相检验评级										
Tab.2 Metallographic test rating of the ductile iron										
试样编号	а	b	с	d	e	f				
球化等级	4	3	3	2	2	2				
石墨大小	5	6	6	6	7	7				

由图 2 可以看出,随铜元素含量的增加,石墨球



图 2 铸态试样的石墨形态:(a) 0.01%(质量分数,下同),(b) 0.09%,(c) 0.22%,(d) 0.29%,(e) 0.43%,(f) 0.51% Fig.2 Morphology of the graphite in as-cast samples: (a) 0.01%(mass fraction), (b) 0.09%(mass fraction), (c) 0.22%(mass fraction), (d) 0.29%(mass fraction), (e) 0.43%(mass fraction), (f) 0.51%(mass fraction)

圆整度有所提高,石墨球径有所减小,并且石墨球 的分布更加均匀。当含铜量为 0.015 2%~0.223 0% 时,石墨球化效果较差,有部分石墨球出现畸变,原 因可能是本次实验所用中频感应电炉是工厂用于 日常生产的设备,残余的炉渣中含有硫化物,引起 球化衰退,出现畸形石墨球<sup>[11]</sup>。但总体球化率能够达 到 3 级,当含铜量为 0.51%时,石墨球径最小,数量 最多,分布也较为均匀。铜或 Bi 元素在铁液凝固时 提供了部分形核质点,有利于提高石墨的形核率, 同时由于进行了二次随流孕育,石墨形核质点进一 步增加,减缓了孕育衰退的发生<sup>[12]</sup>。

图 3 所示为铸态试样经 4%(质量分数)的硝酸酒

精腐蚀后的金相组织。由图 3 可知,铸态下球墨铸铁 的显微基体组织是由球状石墨(G)+铁素体(F)+珠光 体(P)组成,在试样 a~c 中可观察到碳化物。而随后 几组碳化物大大减少,这是因为铜是促进石墨化的 元素,在铁液的共晶反应中弱化铁原子与碳原子间 的作用,促进碳原子以石墨相结晶出。随着含铜量的 增加,视场中珠光体组织明显增加,铁素体组织减 少,并且珠光体组织中的层片间距随含铜量增加变 得更加细密。铜元素降低 Fe-C-Si 合金体系的共析 转变温度<sup>[13]</sup>,由于相变温度相对没有加入铜元素时 降低,碳原子在晶界前沿的界面扩散受到一定抑制, 此时为了更加容易的进行扩散,自发形成细密间距



图 3 不同含铜量试样腐蚀后的组织:(a) 0.01%(质量分数,下同), (b) 0.09%, (c) 0.22%, (d) 0.29%, (e) 0.43%, (f) 0.51% Fig.3 Etched microstructure with different copper contents: (a) 0.01%(mass fraction), (b) 0.09%(mass fraction), (c) 0.22%(mass fraction), (d) 0.29%(mass fraction), (e) 0.43%(mass fraction), (f) 0.51%(mass fraction)

的铁素体与渗碳体交织形貌也就成为了必然结果。 2.1.2 热处理后的组织

图 4 所示为试样热处理后经 4%(体积分数)的 硝酸酒精腐蚀的金相组织。由图 4 可知,经热处理 后的球墨铸铁显微组织主要是由球状石墨(G)+铁素 体(F)组成。铁素体占 95%以上,铸态时形成的珠光 体组织大部分已分解。但试样 e~f 可看到仍有部分 珠光体组织,其原因是铜具有稳定珠光体的作用<sup>[14]</sup>, 由于本次实验所设计的退火温度为 880 ℃,因铜的 加入而被稳定的珠光体在此温度下未完全分解,欲 完全消除基体中的珠光体可适当提高退火温度、延 长保温时间,但要防止由此引起的晶粒长大,晶粒过 大消除了细晶强化效果,个别异常长大会恶化性能。 经退火后石墨球的形态基本没有变化。

2.2 铜对球墨铸铁力学性能的影响

对铸态和经过热处理后的试样进行力学性能检 测,包括室温下的抗拉强度、硬度、伸长率,以及测试 试样在-40℃下的冲击功。





2.2.1 抗拉强度

图 5 所示为含铜量对铸态和热处理态试样抗拉 强度与屈服强度的影响规律。由图 5 可知,加入铜 的球墨铸铁在铸态时抗拉强度均大于 400 MPa,并 且随着含铜量的增加,抗拉强度呈现小幅走高的 趋势,但总体来看对抗拉强度的提高幅度并不大, 当含铜量为 0.3%(名义含量)时,抗拉强度最大达到 510 MPa。其原因为:①铜元素的加入增加了铸态时 珠光体组织的含量,抗拉强度得到提高;②铜元素



是负偏析元素[15],铁液在凝固过程中,初析奥氏体中 的含铜量高于周围铁液,奥氏体心部的含铜量高于 远端的含铜量,其在随后的共析相变中,固溶于铁素 体,所以对铁素体起到固溶强化的作用,随着含铜量 的提高,铁素体中所固溶的铜元素也增加,其固溶强 化效果100也相应增强,所以铸态抗拉强度的小幅提 高。至于为何没有大幅度提升,可能与铁素体对铜 的固溶度有关。本实验中铜的上限加入量为 0.5%, 在强度曲线中并未出现由于铜过量(出现游离态的 铜)导致组织差异引起的强度下降。经热处理后试样 的抗拉强度明显低于铸态,并在 400 MPa 附近小幅 提升。经退火后球铁组织中的珠光体减少,铁素体 增加,铁素体作为基体时其抗拉强度低于珠光体。 屈服极限与抗拉强度有较好的一致性,对于铸态含 铜量 0.4%时屈服强度的下降可能是偶然实验因素 所导致。总之,铜元素可以在一定范围内提高球铁 的抗拉强度,铜元素对球墨铸铁强度的提高主要归 因于促进珠光体的形成以及铜对铁素体的固溶强 化作用。

#### 2.2.2 伸长率

图 6 所示为含铜量对球铁伸长率和断面收缩率 的影响规律。可见铸态时随着铜的加入,球墨铸铁的 伸长率整体呈下降趋势,塑性逐渐降低。经过热处理 后的球铁随含铜量的增加,伸长率呈现先上升后下 降的趋势。当含铜量为 0.086 5%时,伸长率最大为 20.5%;当含铜量为 0.51%时,伸长率最小为 15.8%。 如前所述,由铜元素的加入所导致的珠光体含量增 加,固溶强化均会降低球铁的塑性,经热处理后球铁 的塑性显著升高,基本能够达到 QT400-18 的力学 性能标准,但含铜量高于 0.4%后,球铁的断后伸长 率低于 18%,因此在球化孕育工艺相同或相近的情 况下,为保证塑性应尽量控制铜元素的加入量。



shrinkage of ductile iron

#### 2.2.3 硬度

图 7 所示为含铜量对球墨铸铁硬度的影响规律。 由图 7 可知,球铁铸态时的硬度整体高于热处理态, 这是由于铸态组织中有较多珠光体,经热处理后珠 光体中的渗碳体发生分解,碳原子扩散到距离较近 的石墨球上<sup>[17]</sup>,同时在原相界面处铁素体通过形核、 长大逐渐生长为整个基体组织,由于铁素体是软韧 相,未经固溶强化时其强度,硬度均低于珠光体,故 在硬度上表现为铸态硬度高于热处理态。同时可以 看出加入铜元素可有效提高球墨铸铁的硬度,铸态 球铁的硬度基本随含铜量的增加而提高;而经热处



理后的试样呈现出硬度先升高后降低的现象,在含铜量 0.3%附近出现硬度极大值 178 HB。

#### 2.2.4 冲击韧性

图 8 所示为含铜量对球铁冲击韧性的影响规律。 从图 8 可以看出, 当含铜量在 0~0.3%范围内变化 时,铜对球铁的冲击韧性基本没有影响,当含铜量超 过 0.3%时,随着含铜量的增加,球铁的冲击韧性呈 单边下降趋势。含铜量较低时,因铜具有面心立方晶 体结构,其{111}晶面族与 <110 > 晶向族能组成 12 个滑移系统[18],在球铁受到冲击变形过程中,通过位 错在较多滑移系统的滑移来实现变形。由于铜原子 与铁原子的原子半径相差较大,其固溶于铁素体中 会产生较大晶格畸变,随着含铜量增加这种晶格畸 变更加严重,由畸变引起的应力场阻碍了位错的滑 移、因此铜元素由含量低时的促进塑性变形作用逐 渐过渡到因晶格畸变过大导致的阻碍变形。此外铜 元素能够提高韧脆转变温度<sup>[19]</sup>,每增加0.1%的铜, 会使韧脆转变温度提高 0.8~1.0 ℃,随着铜的加入, 断口可能由韧性断裂逐渐转变为脆性断裂<sup>[20]</sup>。因此 以铜作为低温高韧球墨铸铁合金化元素、应综合考 虑其对组织与力学性能的各种影响。



图 8 含铜量对球铁冲击韧性的影响 Fig.8 Effect of copper content on impact toughness of ductile iron

## 3 结论

(1)在一定范围内增加铜元素的含量可以提高 石墨球的圆整度,减小石墨球径,并且使石墨球的分 布更加均匀。加入铜元素后,各组试样的球化等级为 2~3级,石墨球大小为 6~7级。

(2)铜元素能促进球铁凝固时的石墨化,抑制游 离渗碳体的生成。含铜量超过 0.3%时,经过热处理 后未分解的珠光体开始出现并随含铜量的增加而 增多。

(3)铜元素可以在一定范围内提高球铁的抗拉 强度与硬度,主要归因于促进珠光体的形成以及铜 对铁素体的固溶强化作用。随含铜量的增加球铁伸长 率呈现先上升后下降的趋势,在含铜量为 0.086 5% 时伸长率最大为 20.5%

(4)当含铜量在 0~0.3%范围内变化时,铜对低 温球铁的冲击韧性基本没有影响。当含铜量超过 0.3%时,随着含铜量的增加,低温球铁的冲击韧性 单边下降;当含铜量为 0.3%时,具有良好的低温综 合力学性能。

#### 参考文献:

- 廖裕力.国内外球墨铸铁发展概况及我省球铁生产中急需解决的问题[J].机械科技动态,1978(2): 3-6.
   GU Y L. The development of ductile iron at home and abroad and the urgent problems in the production of ductile iron in our province[J]. Mechanical Science and Technology Trends, 1978(2): 3-6.
- [2] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
   SU D L. Mechanical properties of engineering materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [3] 原田昭治,小林俊郎.球铁强度评价[M].于春田,王磊,刘春明,译.沈阳:东北大学出版社,2002.

AKJI H, SHUNO K. Strength evaluation of ductile iron[M]. YU C T, WANG L, LIU C M, translate. Shenyang: Northeastern University Press, 2002.

[4] 尤三三. 镍对低温高韧性球墨铸铁组织及性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.

YOU S S. Effect of nickle on microstructure and mechanical properties of low-temperature high-ductility ductile iron[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.

[5] 张丽辉. 球墨铸铁冲击韧性的改善及其摩擦焊接工艺的研究[D]. 吉林:吉林大学,2006.

ZHANG L H. Study on improving impact toughness and friction welding technology of ductile cast iron[D]. Jilin: Jilin University, 2006.

- [6] 吉文哲,王守忠. 镍含量对球墨铸铁组织性能的影响[J]. 热加工 工艺,2016(45): 81-84.
  JI W Z, WANG S Z. Effects of Ni content on microstructures and mechanical properties of nodular cast iron[J]. Hot Working Technology, 2016(45): 81-84.
- [7] 王文慧,孙玉福,肖志云. 镍和硅复合添加对低温高韧性球墨铸 铁组织和性能的影响[J]. 铸造,2019,68(5):456-463.
  WANG W H, SUN Y F, XIAO Z Y. Effect of combined addition of nickle and silicon on microstructure and mechanical properties of low-temperature high-ductility ductile iron [J]. Foundry, 2019,68(5):456-463.
- [8] 杨忠华. Si 和 Ni 在铸态铁素体球墨铸铁中作用的电子机理研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
   YANG Z H. Investigation of effect mechanism of Si and Ni in

as-cast ferrite ductile iron by electronic theory [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.

[9] LACAZE J, LARRANAGA P, ASENJO I, et al. Influence of 1 wt.% addition of Ni on structural and mechanical properties of ferritic ductile irons[J]. Materials Science and Technology, 2012 (28): 603-608.

[10] 董亮. 风电配件用球墨铸铁的研制[D]. 济南:山东建筑大学, 2011.

DONG L. Development of the ductile iron for wind power casting [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2011.

- [11] 张仲勇,李金梅,赵江涛,等.风电机组用球墨铸铁性能不达标 原因分析[J]. 热处理技术与装备,2019,40(3):57-60.
  ZHANG Z Y, LI J M, ZHAO J T, et al. Cause analysis on unqualified performance of spheroidal graphite cast iron for wind turbines
  [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2019, 40 (3): 57-60.
- [12] 侯晓霞,张维友,赵岩. 热处理冷却方式对铁素体基体球墨铸铁 组织与性能的影响[J]. 铸造技术,2018,39(9):2078-2081.
  HOU X X, ZHANG W Y, ZHAO Y. Effect of heat treatment cooling on microstructure and property of ductile iron with ferritic matrix[J]. Foundry Technology, 2018, 39(9): 2078-2081.
- [13] 周继扬. 石墨的球状生长——球墨铸铁基础理论的最新发展 (二)[J]. 现代铸铁,2002(4): 1-6.
  ZHOU J Y. Spheroidal growth of graphite--latest development of the basic theory of spheroidal graphite cast iron(Part II)[J]. Modern Cast Iron, 2002(4): 1-6.
- [14] 丛建臣,倪培相,邵诗波. 高冲击韧性 QT900-6 材料的开发与应用[J]. 铸造,2022,71(3): 302-309.
  CONG J C, NI P X, SHAO S B. Development and application of QT900-6 with high impact toughness [J]. Foundry, 2022, 71(3): 302-309.
- [15] 中国机械工程学会铸造分会.铸造手册第1卷:铸铁[M].北京: 机械工业出版社,2002.

Foundry institution of chinese mechanical engineering society casting manual volume 1: Cast iron [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

- [16] 曾维和,田迎新,李德江,等. 汽车发动机曲轴用高性能球墨铸 铁显微组织与力学性能研究[J]. 铸造,2016,65(1): 71-75.
  ZENG W H, TIAN Y X, LI D J, et al. Microstructure and mechanical property of high performance ductile cast iron crankshaft of automotive engine[J]. Foundry, 2016, 65(1): 71-75.
- [17] 吴德海. 球墨铸铁[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
   WU D H. Ductile Iron[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006.
- [18] 胡廣祥. 材料科学基础[M].上海:上海交通大学出版社,2000.
   HUGX. Fundamentals of material science[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000.
- [19] 朱华明,辛国忠,胡苟生,等. 铸态低温高韧性球墨铸铁 QT400-18L 缸体的研究及应用[J]. 铸造技术,2014,35(1): 106-108.
  ZHU H M, XIN G Z, HU G S, et al. Research and application of QT400-18L cylinder with high toughness at lower temperature without heat treatment[J]. Foundry Technology, 2014, 35(1): 106-108.
- [20] GULCAN TOKTAS. Effect of matrix structure on the impact properties of an alloyedductile iron[J]. Materials Characterization, 2006, 57(43): 290-299.