

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.09.005

# 晶界夹杂物对 QT400-18L 性能的影响

邓 晗, 陈 璐, 朱贵华

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏 常州 213011)

**摘 要:**研究了晶界夹杂物导致其低温冲击韧度下降的微观机理, 并采用热处理技术降低晶界偏析并提高晶粒度等级, 提升材料的低温冲击韧度和抗拉强度。研究表明, 聚集在晶界处的夹杂物有碳化物和氧化物两种类型, 使材料的抗拉强度和冲击韧度大幅降低, 采用常规高温石墨化退火无法提升其低温冲击韧度。通过细晶强化热处理技术, 将晶粒度从 30~40  $\mu\text{m}$  细化至 15~25  $\mu\text{m}$ , 抗拉强度由 383 MPa 提升至 418 MPa, -40  $^{\circ}\text{C}$  低温冲击韧度由 7 J 提升至 14 J 以上。

**关键词:** 低温球铁; 夹杂物; 细晶强化

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)09-0823-04

## Effect of Cell Boundary Inclusions on QT400-18L Properties

DENG Han, CHEN Lu, ZHU Guihua

(CRCC Qishuyan locomotive & Rolling Stock Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China)

**Abstract:** This paper studies the microscopic mechanism of low temperature impact toughness reduction caused by grain boundary inclusions, and heat treatment technology is adopted to reduce grain boundary segregation and improve grain size grade, thus improving low temperature impact toughness and tensile strength of materials. The research shows that the inclusions accumulated at the grain boundary are carbide and oxide, which greatly reduce the tensile strength and impact toughness of the material. Conventional high-temperature graphitization annealing cannot improve its low-temperature impact toughness. Through fine grain strengthening heat treatment technology, the grain size is improved from 30  $\mu\text{m}$ ~40  $\mu\text{m}$  to 15  $\mu\text{m}$ ~25  $\mu\text{m}$ , the tensile strength is improved from 383 MPa to 418 MPa, and the low temperature impact toughness at -40  $^{\circ}\text{C}$  is improved from 7 J to more than 14 J.

**Key words:** low temperature ductile iron; inclusions; fine grain strengthening

QT400-18L 具有良好的低温冲击韧度特性而被广泛应用于轨道交通、工程机械以及风电齿轮箱等领域, 如: 转向架轴箱、风电轮毂、齿轮箱等产品<sup>[1-4]</sup>。通常, 具有低温冲击要求的 QT400-18L 采用两阶段高温石墨化退火工艺来进行热处理: 首先将试样加热至 890~910  $^{\circ}\text{C}$ 、保温 2~5 h, 高温阶段消除渗碳体、三元或复合磷共晶; 随后炉冷至 720~760  $^{\circ}\text{C}$ 、保温 3~6 h、炉冷至 600  $^{\circ}\text{C}$  出炉空冷, 低温阶段组织由奥氏体转变为铁素体, 获得了高韧性铁素体球墨铸铁, 从而保证在 -40  $^{\circ}\text{C}$  低温冲击韧度可达 12 J 以上<sup>[5-9]</sup>。但高温石墨化退火高温阶段温度仅能将 Fe、Mn 等元素形成的碳化物分解, 而 V、Ti、Nb 等强碳化物形成元素则难以分解, 需要更高的温度才能将其消除, 但随着热处理温度的升高, 晶粒会急剧长大使抗拉强度下降, 当热处理温度达到 1 050  $^{\circ}\text{C}$  以上, 组织就会产生过热和过烧, 使晶间物质氧化, 破

坏晶粒间的联系, 使力学性能急剧恶化, 且不可逆转<sup>[12,13]</sup>。因此, 低温球铁生产中通常采用优质的高纯生铁, 限制生铁和废钢中的 V、Ti、Nb 等 10 多种微量元素含量, 从而减少晶界夹杂物的产生。本文研究了晶界夹杂物导致其低温冲击韧度下降的微观机理, 并打破常规的高温石墨化退火工艺, 开发了一种细晶强化热处理技术, 显著提升了材料的低温冲击韧度和抗拉强度。

## 1 晶界夹杂物

某轨道交通零部件采用低温球铁 QT400-18L (-40  $^{\circ}\text{C}$ ), 以适应俄罗斯等高寒地区的特殊工况, 铸件采用常规高温石墨化退火工艺消除珠光体和游离碳化物, 保证材料的低温冲击性能。但生产中发现某一批次零件抗拉强度和冲击韧度远低于标准规定值, 其性能如表 1。

通过扫描电镜观察其低温冲击后断口的微观形貌发现, 断口以韧窝为主, 同时存在解理状断面, 为脆性穿晶断裂, 如图 1(a)。在部分解理断面的晶界处, 可观察到明显的裂纹源, 解理面呈现放射状纹

收稿日期: 2020-05-19

作者简介: 邓 晗(1986-), 土家族, 湖北宜昌人, 工程师, 主要从事铸铁材料及成型工艺方面的工作。

电话: 15106123738, E-mail: 493856266@qq.com

表 1 力学性能检测数据  
Tab.1 Test data of mechanical property

	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 (%)	布氏硬度(HBW)	-40℃冲击吸收能量 /J		
标准范围	≥400	≥240	≥18	120~175	单值≥9,均值≥12		
检测性能	383	261	23.5	124	8	7	8

路。由于晶界夹杂物尺寸通常较小,难以和石墨化退火之后的析出石墨区分,因此采用二次电子成像观察了试样抛光后的显微形貌,如图 1(b)。基体组织中存在较多夹杂物,这些夹杂物沿晶界分布,阻碍了原子位错运动,是造成材料塑性和韧性下降的主要原因。

采用扫描电镜和能谱仪对夹杂物的成分进行分析,其能谱如图 2。结果表明,夹杂物成分较为复杂,其中主要为 TiC 和 MgO。Ti 元素是强碳化物形成元素,属于反球化元素,对球铁性能影响较大,一般来源于生铁和废钢中。在球墨铸铁中,含有很少

量的 Ti 元素就会形成碳化物,而 Ti 等强碳化物形成元素一旦形成则难以将其分解。因此如果生铁中 Ti 含量过高,则会导致晶界碳化物聚集,降低材料低温韧性 Ti 含量的增加对断后伸长率和冲击韧度均有不良影响<sup>[10,11]</sup>,原材料中的 Ti 等强碳化物形成元素超标是导致 QT400-18L 低温韧性下降的主要原因之一。此外 Mg 作为球化的主要元素,生产球铁必不可少,但球化剂加入量过大,其反应产物 MgO 如果不能及时排除,则会滞留在铁液中,凝固后在晶界聚集形成氧化渣,也是造成冲击韧度下降的原因之一。

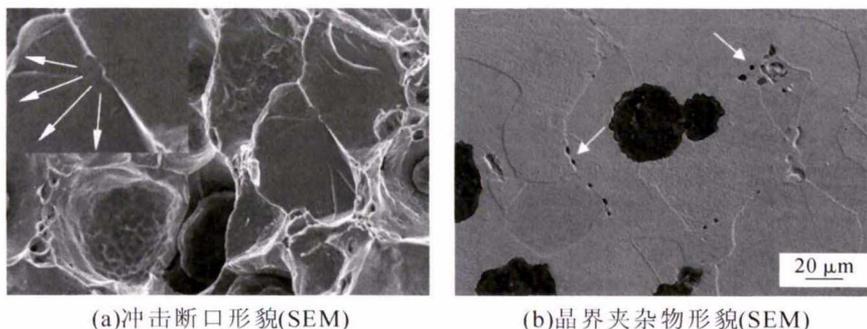


图 1 晶界夹杂物的电镜形貌  
Fig.1 SEM of inclusions in grain boundary

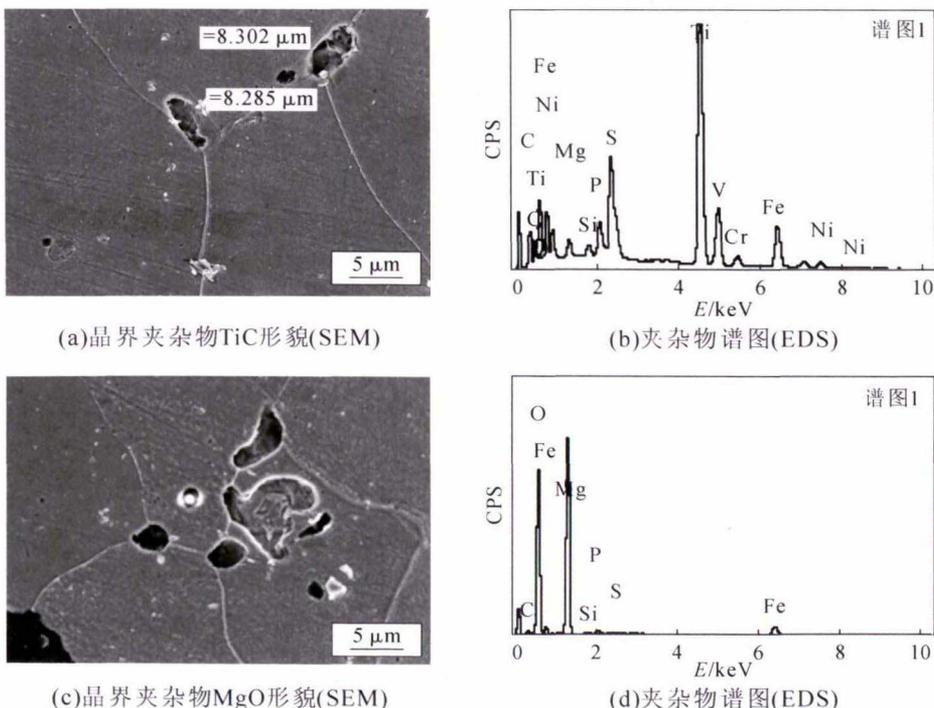


图 2 晶界夹杂物的能谱分析  
Fig.2 EDS of inclusions in grain boundary

## 2 细晶强韧化热处理工艺

一般的高温石墨化退火工艺,仅能将 Fe、Mn 等元素形成的碳化物分解,而 V、Ti、Nb 等元素形成强碳化物则难以分解消除。由于采用高温退火消除碳化物的同时,过高的温度及长时间的保温会导致晶粒长大,甚至晶界过烧,使强度急剧下降。同时,晶粒粗大使得低温冲击韧性存在瓶颈,其冲击吸收功无法提升至 12 J 以上。因此,通过常规的高温石墨化退火热处理方法,既要消除 TiC 等强碳化物提高低温冲击韧度,同时又要满足强度大于等于 400 MPa,是非常困难的。无法解决抗拉强度与冲击韧度的平衡。

为了保证消除碳化物的同时晶粒得到细化,需要采用特殊的热处理工艺,其方案如下:首先采用超高温均匀化退火,其目的在于分解强碳化物,并使晶界成分均匀化,超高温均匀化退火随后空冷,得到较细小的晶粒。但此时会产生大量珠光体组织,因此需采取适宜的石墨化退火温度消除珠光体,同时抑制晶粒长大;最后 600 °C 出炉空冷,防止低温回火脆性。热处理曲线如图 3。

选取两组初始样 Y1 作为对比样,与经细晶强韧化处理后的试样 X1 进行了对比。试样通过细晶

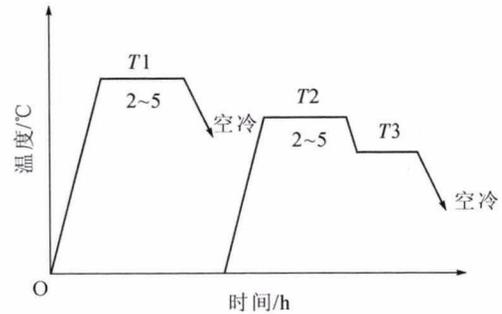


图 3 细晶强韧化热处理曲线示意图

Fig.3 Curve diagram of fine grain strengthening heat treatment

强韧化热处理后,将试样取出,沿中部平整切割,磨抛之后采用光学显微镜对材料的腐蚀形貌进行观察,利用三圆截线法计算其平均铁素体晶粒尺寸,平均晶粒尺寸由初始状态的 31.3 μm 降低至 20.2 μm,减小 50%以上,如图 4。

力学性能检测对比结果如表 3,结果表明:试样晶粒细化后,其 V 形缺口 -40 °C 夏氏冲击吸收功可从 7 J 提升至 12 J 以上,且抗拉强度也从 385 MPa 提升至 406 MPa 以上,硬度小幅度提升,对屈服强度、伸长率、没有影响。综上所述,通过细化晶粒的强化方式可以同时提升抗拉强度及韧性;通过细晶强韧化热处理工艺可有效解决 Ti 等强碳化物形成元素超标影响了 QT400-18AL 低温冲击韧度的问题。

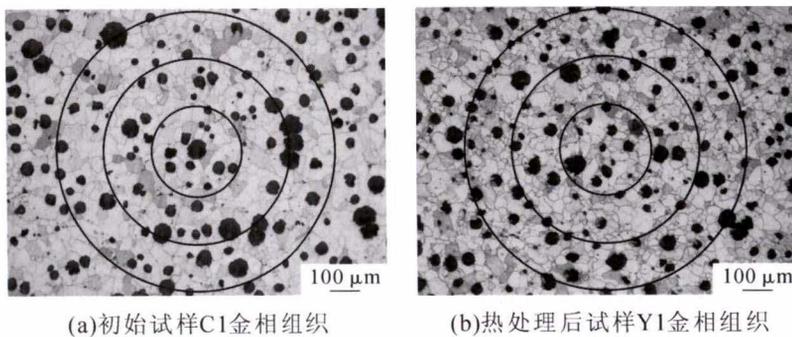


图 4 初始金相组织与晶粒细化后组织对比  
Fig.4 Comparison of initial metallographic structure with that after grain refinement

表 2 细晶强韧化热处理试验结果  
Tab.2 Test results of fine grain strengthening heat treatment

试样编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 (%)	硬度 (HBW)	-40 °C 冲击吸收能量 /J		
C1	383	261	23.5	124	8	7	8
X1	418	260	19.0	137	14	12	12

## 3 结论

(1)TiC 和 MgO 等夹杂物在晶界聚集,是导致 QT400-18AL 的抗拉强度和低温冲击韧度大幅降低的主要原因之一。

(2)采用细晶强化热处理技术,可以同时提升抗拉强度和低温冲击韧度,可有效解决 V、Ti、Nb 等强碳化物形成元素超标导致 QT400-18L 抗拉强度和

低温冲击韧度下降的问题。

### 参考文献:

- [1] 张伯明主编. 铸造手册(铸铁卷)第二版[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 马敬仲,丁建中,尤其光,等. 超低温高韧性球墨铸铁 QT400-18AL 的研究与应用[J]. 铸造,2012,61(8):856-864.
- [3] 岳明,罗超. 风电轮毂铸造技术研究[J]. 东方电气评论,2010,24

(下转第 830 页)

[9] 晁芬,周勇,吴航. 新型塑料电力金具材料的制备及性能研究[J]. 江苏科技信息, 2015, (31): 53-55

[10] 牛海军,付斌,朱宽军. 改性复合材料间隔棒和悬垂线夹的研制及应用[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 97-101.

[11] 宋宁宁,王景朝,严行建. 高效节能系列电力金具的研制与应用[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(9): 34-37.

[12] 袁刚,赵杰. 一种节能螺栓型耐张线夹[P]. 中国: ZL201110172835.1, 2011. 10. 19.

[13] 丁珂, 吴斌, 张雍斌, 等. 一种新型节能悬垂线夹. 201711479046.6[P]. 2018-06-01.

[14] Li S L, Wei Z Y, Jun D, et al. Research on the manufacturing of electrical power fittings based on metal droplet deposition [J]. Appl. Phys. A, 2017, 123: 405-411.

[15] 范志刚,祝德春,吴明,等. 3D 打印在电网设备结构设计与制造中的应用概述[J]. 机械制造, 2016, 45(6): 56-59.

[16] ASTM E8/E8M-08, Standard test methods for tension testing of metallic materials[S]. the United States of America: ASTM, 2008.

[17] ASTM G102-89. Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements [S]. the United States of America: ASTM, 2004.

[18] 王宏伟. 金属材料低温性能的研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015.

(上接第 822 页)

[8] 刘从庆,赵文学,王帆,等. 碳含量对一种高温合金铸态组织的影响[J]. 铸造技术, 2019, 40(2): 372-375.

[9] 杨金侠,魏薇,刘路,等. 镍基高温合金中的初生碳化物及其强化作用[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(4): 979-981.

[10] 张雷雷,陈晶阳,赛磊,等. 浇注温度对 K439B 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(9): 57-63.

[11] 安宁,郭文东,牛永吉,等. IN738 合金显微组织和高温性能[J]. 金属材料研究, 2019, 45(2): 20-23.

[12] 王宇飞,满延林,闫红梅,等. 浇注温度对 K424 合金疏松影响的数值模拟[J]. 铸造, 2014, 63(3): 245-248.

[13] 艾厚望,吕志刚,郭馨. 熔模铸造条件下 K424 合金枝晶间疏松及微观偏析研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2476-2480.

(上接第 822 页)

(93): 36-40.

[4] 马敬仲,丁建中,尤其光,等. 高速列车转向架轴箱铸件的生产试验——-40℃超低温高韧性球墨铸铁件的生产技术 [J]. 现代铸造, 2012(5): 15-21.

[5] 丁建中,马敬仲,曾艺成,等. 低温铁素体球墨铸铁的特性及质量稳定性研究[J]. 铸造, 2015, 64(3): 193-201.

[6] 季火绩,丁杰,于赞,等. 热处理对 QT400-18AL 低温韧性球墨铸铁力学性能的影响[J]. 铸造, 2016, 65(4): 383-385.

[7] 陈琦,彭兆弟主编. 铸件热处理应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[8] 张华锋,孙树峰,朱于国,等. 超低温传动齿轮箱用铁素体球墨铸铁的开发[J]. 铸造技术, 2018, 39(12): 2766-2768.

[9] 戴起勋主编. 金属材料学第二版 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.

[10] 邓军伟,李俊强,李会涛,等. 球墨铸铁感应淬火过热过烧缺陷分析[J]. 制造技术与材料《汽车与配件》, 2013(10): 30-33.

[11] 刘宗昌,冯佃臣主编. 热处理工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.

[12] 张羿. 金属材料 and 零部件断裂形式和失效原因的分析与探讨——谈金属材料中晶界上碳化物的影响[C] // 湖北省机械工程学会热处理专业委员会. 湖北省第九届热处理年会论文集. 湖北: 2004: 93-96.

**技术资料邮购**

### 《铸造抗磨产品实用生产技术集》

《铸造抗磨产品实用生产技术集》本书由李德臣教授级高工编著。共8章：1、关于锰钢生产技术；2、球墨铸铁与蠕墨铸铁生产技术；3、抗磨产品生产技术；4、锤头生产技术；5、消失模、V法生产技术；6、典型铸件的生产技术；7、还原罐生产技术；8、关于企业管理。全书22万字。特快专递邮购价：98元。

邮购咨询：李巧凤      电话/传真：029-83222071