

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.09.006

取代可锻铸铁的高寒低温环境用新型铝合金耐张线夹的研究

陈杰¹,曹少华¹,任永琼¹,童先²,林继兴^{1,2}

(1.永固集团股份有限公司,浙江温州 325600;2.浙江工贸职业技术学院材料工程系,浙江温州 325003)

摘要:通过研究可锻铸铁和铝合金耐张线夹的拉伸性能、冲击性能和耐腐蚀性能,为低温环境用电力金具提供技术参考。结果表明:铝合金线夹的抗拉强度为 331.4 MPa,屈服强度为 219.3 MPa,伸长率为 12.8%,屈服强度和伸长率相对于可锻铸铁更高。铝合金在常温和低温情况下具有稳定的冲击韧度,未出现低温脆性。此外,铝合金相对于可锻铸铁(热镀锌)具有更好的耐腐蚀性能,腐蚀速率降低了两个数量级。

关键词:电力金具;微观结构;力学性能;腐蚀性能;低温脆性

中图分类号: TG243

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)09-0826-05

Research on New Aluminium Alloy Strain Clamp Replacing Cast Iron in High and Cold Environment

CHEN Jie¹, CAO Shaohua¹, REN Yongqiong¹, TONG Xian², LIN Jixing^{1,2}

(1.YONGU Group Co., Ltd., Wenzhou 325600, China; 2. Department of Material Engineering, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou 325003, China)

Abstract: The tensile properties, impact properties and corrosion resistance of malleable cast iron and aluminum alloy strain clamp were investigated, which can provide a technical reference for power fittings applied in low-temperature environments. The results show that the aluminum alloy strain clip shows an ultimate tensile strength of 331.4 MPa, a yield strength of 219.3 MPa, and an elongation of 12.8%, and the yield strength and elongation are higher than those of the malleable cast iron. Aluminum alloy has stable impact toughness and no low temperature brittleness at room temperature and low temperature. In addition, aluminum alloy has better corrosion resistance than malleable iron (hot galvanizing), with corrosion rate reduced by two orders of magnitude.

Key words: power fittings; microstructure; mechanical properties; corrosion properties; low-temperature brittleness

耐张线夹是重要的电力金具之一,是用于固定导线以承受导线张力,并将导线挂至耐张串组或杆塔上的金具^[1,2]。因此,耐张线夹需具有高强度和韧性;同时,线夹长时间暴露在大气中,需具有较好的耐腐蚀性能。

目前,可锻铸铁(俗称马铁或玛钢)由于具有较好的力学性能而成为耐张线夹的主要材料之一,其表面通过热浸锌可提高腐蚀性能。然而,可锻铸铁在铸造、高温退火等制造过程中能耗高,不利于节

能环保。钢铁材料制造的线路金具围绕导线构成闭合回路,当导线通过大电流时,在导线交变电流产生的交变磁场作用下,金具内部产生磁滞损耗和涡流损耗。以铁制悬垂线夹为例,其能耗与 30 W 灯泡消耗的能量相当^[3]。更重要的是,可锻铸铁存在低温脆性^[4]。当架空线路设施处于我国东北、西北以及西藏偏远地区的冬天时,最低温度可达零下 50 ℃,脆性断裂将会成为主要的失效形式。此外,传统的镀锌防腐技术仅适用于正常气候环境。由于镀锌层质软,当金具之间发生磨损时,镀锌层容易发生损坏,短期内即失去保护作用^[5],因此,腐蚀也是线夹失效的形式之一。

在现有的国内研究报导中,电力金具材料的研究主要集中在铸铁改性^[6,7]、新型材料的研发^[8-11]、新型结构节能金具设计^[12,13]及新型制造工艺^[14,15]等方面。铸铁改性虽然能降低涡流损耗和磁滞损耗,但是其低温脆性及后续需要表面处理等缺点仍然存在,不符合节能降耗的发展趋势;新型高分子材料的研

收稿日期: 2020-05-25

基金项目: 温州市重大科技计划项目(ZG2019022),浙江省博士后基金(博士后编号: 205357)

作者简介: 陈杰(1975-),湖北宜昌人,学士,高级工程师。主要从事电力金具材料研究及产业化方面的工作。

电话: 18767778868, E-mail: 54948986@qq.com.

通讯作者: 林继兴(1982-),浙江苍南人,博士,副教授。研究方向: 金属功能材料及先进制造工艺研究。

电话: 0577-88313017, E-mail: linjixing@163.com

发能取代部分的铸铁金具,但在可靠性与使用周期上与金属材料相比仍有一定的差距;而3D打印技术这一类新型制造工艺的生产成本较高,可用于产品研发及个别零件替换,大批量生产受到限制。

早在20世纪80年代,我国就提出要减少可锻铸铁在电力金具中的比重,而新型铝合金材料的研发是一种普遍被认可的经济有效的途径。本文通过开发一种新型的近共晶Al-Si合金,通过对其力学性能与腐蚀性能等研究,并结合可锻铸铁进行对比分析,为铝合金电力金具在高寒低温环境中的应用提供参考。

1 试样制备及试验方法

1.1 试样制备

首先将铝锭加入到中频炉中的坩埚内,升温使其熔化,当温度升至800℃时,加入结晶硅,保温一定时间。待其完全熔化后,温度降至720℃左右,用钟罩将镁块压入铝液深处,静置10 min。然后加入0.3%的Al-8Sr中间合金进行变质处理,变质时间为10 min。熔化过程中加入覆盖剂,通氩气除气精练之后,除去表面熔渣,最后将金属液用低压铸造设备铸造成型产品。

采用布鲁克S4 Pioneer型X射线荧光光谱仪对铝合金的成分进行测试,其化学成分如表1。

表1 Al-11.6Si-0.5Mg-0.02Sr合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical compositions of Al-11.6Si-0.5Mg-0.02Sr alloy

Si	Mg	Sr	Al
11.5 ± 0.2	0.45 ± 0.07	0.023 ± 0.05	余量

与铝合金进行力学性能和腐蚀性能对比,选用现有的可锻铸铁线夹产品进行对照试验。可锻铸铁的牌号为KT-330-8,同样采用X射线荧光光谱仪和钢冶纳克CS-3000碳硫分析仪对可锻铸铁的化学成分进行测试,其化学成分如表2所示。

对铝合金线夹进行T6热处理,工艺参数为:固溶温度535℃,保温6h,常温水冷;时效温度160℃,时效时间6h,空冷。

1.2 试验方法

铝合金金相试样经磨制、抛光后用0.5% HF水溶液浸蚀试样,在徕卡DM2500M型光学显微镜上观察金相组织;采用华龙WDW-100C型电子万能试验机对可锻铸铁和铝合金的室温拉伸性能进行

测试,拉伸速率为1 mm/min。合金拉伸试样的尺寸根据ASTM E8/E 8M-08^[16]标准进行切割。硬度测试在华银310 HBS-3000型硬度计进行。硬度计的试验载荷为2.45 kN,压头直径为5 mm,保载时间为30 s。冲击试验依据GB/T 229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》的试样要求,制成10 mm×10 mm×55 mm的V型缺口标准试样,并与可锻铸铁试样进行对比试验。测试温度为室温和-60℃。拉伸试验和冲击试验的取样位置如图1所示。采用荷兰飞纳的Pro X FEI扫描电镜对金属试样的冲击断口进行观察,扫描电镜的测试电压为15 kV。

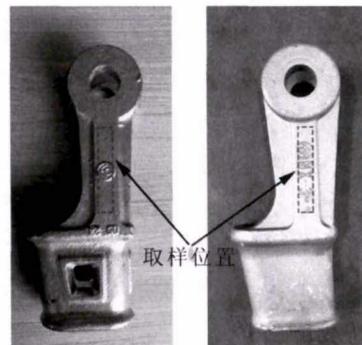


图1 可锻铸铁和铝合金线夹拉伸和冲击试样取样位置
Fig.1 Sampling point of tensile and impact specimens of malleable cast iron and aluminum alloy

使用普林斯顿ParStat 2273型三电极体系电化学工作站对铝合金及可锻铸铁试样的电化学腐蚀行为进行测试。试验在装有3.5% NaCl溶液的三颈烧瓶中进行,溶液体积为200 mL。用线切割切取 $\phi 8$ mm×2 mm的金属试样,并用冷镶嵌料包埋,经打磨抛光至表面粗糙度为0.5 μ m。在电化学极化测试过程中,将暴露面积为0.5 cm²的金属样品作为工作电极,铂板电极为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。采用相对于开路电位-400 mV至1 200 mV的扫描电位作为电位测试区间,并以1 mV/s的扫描速率进行极化试验测试。最后,根据ASTM G102-89^[17]计算出金属样品的腐蚀速率。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图2是铸态和热处理态铝合金的显微组织。从图2(a)中可以看出,经Sr变质处理后,铸态合金中存在白色的 α -Al相和黑色细小团絮状共晶硅组织,共晶硅相存在于 α -Al相晶界处。经T6热处理后,铝

表2 KT-330-8可锻铸铁的化学成分 w(%)
Tab.2 Chemical compositions of malleable cast iron

C	Si	Mn	S	P	Cr	Fe
3.1 ± 0.4	1.4 ± 0.3	0.53 ± 0.11	0.11 ± 0.03	0.082 ± 0.027	0.032 ± 0.013	余量

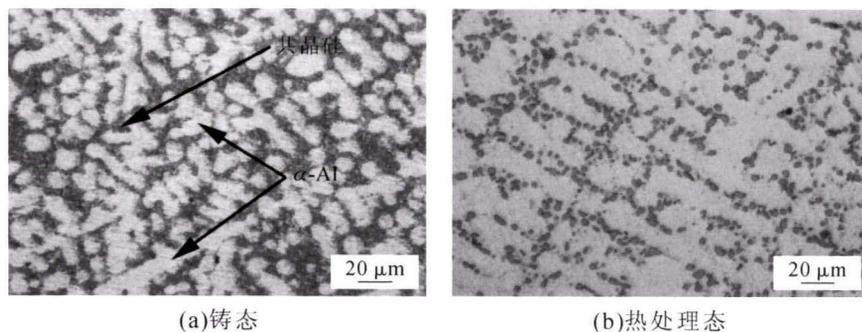


图2 铝合金显微组织

Fig.2 Microstructures of aluminum alloy of as-cast and heat-treated alloy

合金中共晶硅相转变为圆形或椭圆形颗粒并均匀分布在铝基体上,见图 2(b)。

2.2 力学性能

可锻铸铁和铝合金的常温拉伸曲线、拉伸力学性能和硬度值如图 3(a)和图 3(b)所示。从图 3(b)可以看出,可锻铸铁的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 330.2 ± 4.8 MPa、 206.8 ± 3.5 MPa 和 $9.0 \pm 1.2\%$ 。铝合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 331.4 ± 2.4 MPa、 219.3 ± 2.9 MPa 和 $12.8 \pm 2.0\%$ 。此外,可锻铸铁的布氏硬度为 143.2 ± 3.5 HB, 铝合金的布氏硬度为 81.5 ± 2.9 HB。铝合金的抗拉强度与可锻铸铁接近,但其屈服强度和伸长率则显著高于可锻铸铁,分别提升了 6.0%和 42%,但其硬度值则低于可锻铸铁。因此,铝合金线夹的拉伸性能能够满足现有耐张线夹的力学使用要求。

2.3 冲击性能

可锻铸铁和铝合金试样在常温和 -60 °C 冲击后的冲击功如图 4 所示。从图中可以看出,常温下可锻铸铁和铝合金的冲击功分别为 15.1 ± 1.2 J 和 22.7 ± 2.3 J。而在 -60 °C 冲击试验后,可锻铸铁的冲击功降低至 7.2 ± 1.9 J,相较于常温显著降低。而低温下铝合金的冲击功变化不大,达到了 21.7 ± 2.1 J。

可锻铸铁和铝合金试样在常温和 -60 °C 冲击后断口形貌如图 5 所示。可以看出,在常温冲击试验

中,可锻铸铁冲击断口中存在较多大小不一的韧窝,且在韧窝底部分布着第二相颗粒。此外,部分区域存在少量细小的解理面和石墨,表现出韧窝-解理混合型断口(图 5a)。而在低温冲击试验中,可锻铸铁冲击断口中存在大量的解理面和光滑的断面,表现出解理型脆性断口(图 5b)。铝合金试样在常温和低温下均分布着尺寸均匀的等轴状韧窝,韧窝尺寸差异较小,且在韧窝底部分布着第二相颗粒,表现出韧窝型韧性断口。此外,铝合金试样的韧窝尺寸较可锻铸铁更大和更深,表现出更好的塑性变形能力。

由常温和低温的冲击试验数据可以看出,随着温度的降低,可锻铸铁韧性明显降低,说明可锻铸铁具有明显的低温脆性现象;而铝合金的冲击功随温度变化不大,几乎不存在低温脆性。体心立方晶体(BCC)和密排六方晶体(HCP)的合金都具有低温脆性,这主要是由于 BCC 和 HCP 结构金属在晶体中的运动阻力对温度变化很敏感;当温度下降时,滑移应力增加,在晶界处较难滑移变形来缓和应力集中和位错积塞,进而引起裂纹的产生和扩展,因此该类材料都会在低温下处于脆性状态^[4,18]。而 FCC 结构合金中切应力对温度变化不敏感,不会引起低温脆性现象。因此,相对于 FCC 结构的铝合金,作为典型的 BCC 结构的可锻铸铁表现出明显的低温脆性。在 -60 °C 的环境下,铝合金材料基本满足了电力金具

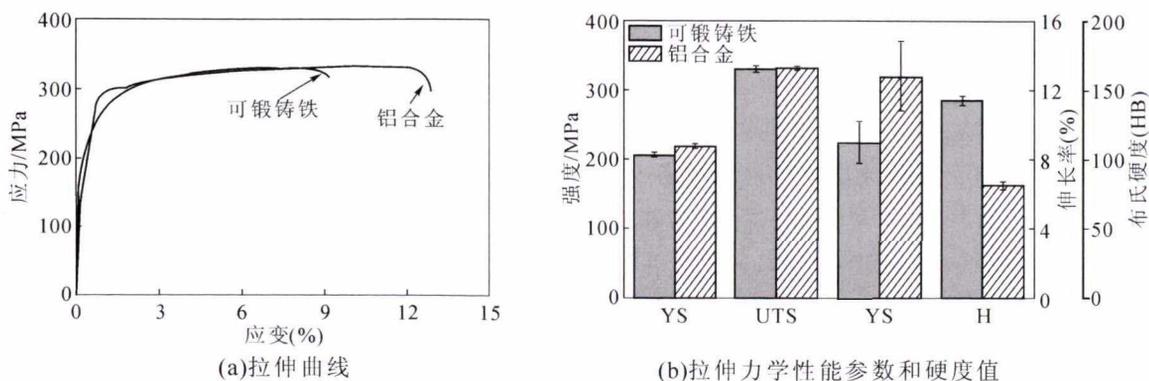


图3 可锻铸铁和铝合金常温拉伸曲线、拉伸力学性能参数和硬度值

Fig.3 Normal temperature tensile curves, tensile mechanical properties, and hardness values of malleable cast iron and aluminum alloy of tensile curves tensile mechanical properties and hardness values

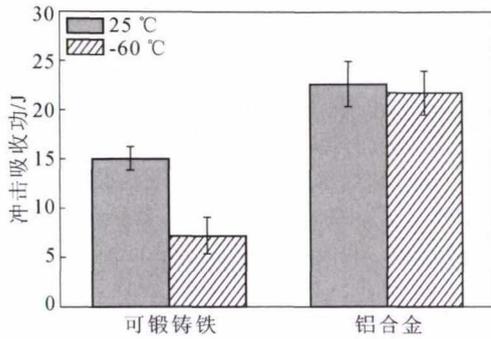


图4 可锻铸铁和铝合金常温 and -60 °C 冲击后试样冲击功对比

Fig.4 Impact energy of malleable cast iron and aluminum alloy at normal temperature and -60 °C

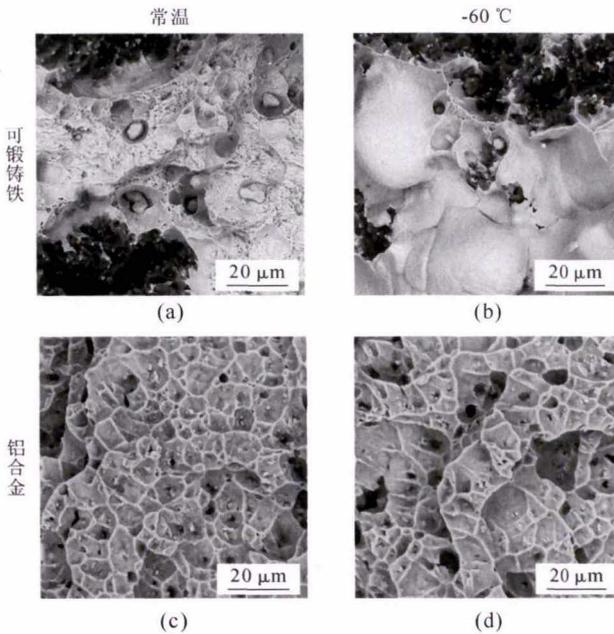


图5 可锻铸铁和铝合金常温 and -60 °C 冲击后试样断口形貌
Fig.5 Fracture morphologies of malleable cast iron and aluminum alloy after impact testing at normal temperature and -60 °C

在低温环境中的使用要求。

2.4 腐蚀性能

图6为可锻铸铁和铝合金在3.5% NaCl溶液中的动电位极化曲线图。对图6中极化曲线进行Tafel外延法拟合,可得出表3所示的电化学性能参数。可锻铸铁的腐蚀电位(E_{corr})、腐蚀电流密度(I_{corr})和腐蚀速率(V_{corr})分别为 -1.088 ± 0.146 VSCE、 $186.1 \pm 3.2 \mu A/cm^2$ 和 $2726.1 \pm 46.9 \mu m/y$ 。而相对于可锻铸铁,铝合金试样具有更正的 E_{corr} 、更小的 I_{corr} 和 V_{corr} ,分别达到了 -0.615 ± 0.146 VSCE、 $0.5 \pm 0.1 \mu A/cm^2$ 和 $5.17 \pm 1.0 \mu m/y$ 。可锻铸铁的腐蚀速率高过铝合金两个多数量级,表明铝合金相对于可锻铸铁具有更优异的耐腐蚀性能。作为露天使用的电力金具,除需要考虑温度对其影响外,还需要考虑雨水和湿度造成的器件腐蚀。通过极化试验可以看

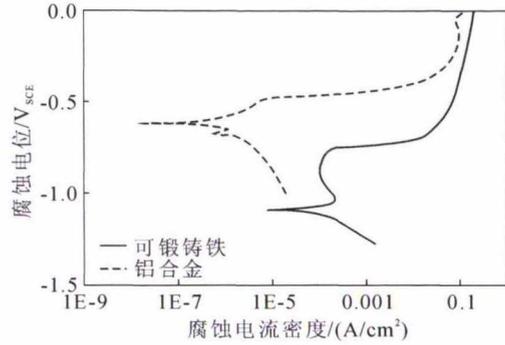


图6 可锻铸铁和铝合金在3.5% NaCl溶液中的动电位极化曲线图

Fig.6 Potentiodynamic polarization curves of malleable cast iron and aluminum alloy in 3.5% NaCl solution

表3 可锻铸铁和铝合金在3.5% NaCl溶液中的电化学腐蚀参数

Tab.3 Electrochemical corrosion parameters of malleable cast iron and aluminum alloy in 3.5% NaCl solution

参数	腐蚀电位(E_{corr}), V vs. SCE	腐蚀电流密度 (I_{corr}), $\mu A/cm^2$	腐蚀速率 (V_{corr}), $\mu m/y$
可锻铸铁	-1.059 ± 0.024	15.7 ± 1.9	229.9 ± 27.8
铝合金	-1.045 ± 0.146	15.4 ± 1.0	225.5 ± 14.6

出,铝合金线夹的耐腐蚀性能显著高于可锻铸铁,更适用于实际的使用工况,延长了产品的使用寿命。

3 结论

(1) Al-11.6Si-0.5Mg-0.02Sr 铝合金线夹的抗拉强度为331.4 MPa,屈服强度为219.3 MPa,伸长率为12.8%,屈服强度和伸长率相对于可锻铸铁更高。铝合金在常温 and 低温情况下具有稳定的冲击韧度,未出现低温脆性。

(2) 铝合金线夹在常温 and 低温下均保持稳定的力学性能,并具有优异的耐腐蚀性能,非常适宜作为金具材料用于寒冷地区电力金具的使用。

参考文献:

- [1] 董洁涛. 电力金具手册[M]. 北京:中国电力出版社,2002:150.
- [2] 王鹏宇,白耀鹏,王元君. 220 KV 线路耐张线夹断裂原因分析及建议[J]. 山西电力,2019,216: 69-72.
- [3] 徐乃管,吴渝生,白中琪. 论开发应用节能金具-铝合金线夹的重要意义[J]. 电力建设,1998,1: 11-13.
- [4] 黄明华. 可锻铸铁低温脆性研究 [J]. 昆明理工大学学报, 1997,22(6): 135-137.
- [5] 王若民,吴刚,严波,等. 高压输电用耐张线夹的失效分析[J]. 热处理,2018,3(4): 41-47.
- [6] 李德,杨艳,张丽娟,等. 用增加珠光体方法提高可锻铸铁电力金具的服役寿命[J]. 辽宁工学院学报,1997,17(1): 26-28.
- [7] 陈吉豫. 可锻铸铁电力金具热裂和冷裂及防止 [J]. 四川电力技术,1993,(6): 44-47.
- [8] 郭康生,江民世. 聚碳酸酯在悬挂金具方面的应用 [J]. 塑料科技,1994,(6): 29-30.

[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.



《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