

王振生,易轶杰,谢亿,等. 2 种 H59 接线端子的微观组织与性能[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):119-124. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.015

WANG Z S, YI Y J, XIE Y, et al. On the Microstructure and Performance of Two H59 Terminals [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,37(4):119-124. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.015

2 种 H59 接线端子的微观组织与性能

王振生^{1*}, 易轶杰¹, 谢亿², 李海星¹, 刘维可², 王凤祥³

(1.湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;

2.国网湖南省电力有限公司电力科学研究院,湖南 长沙 410007;

3.湖南国生新材料科技有限公司,湖南 湘潭 411201)

摘要:为比较锻造 H59 接线端子与铸造 H59 接线端子的微观组织,采用万能拉伸试验机测试这 2 种接线端子的力学性能,并用氨熏试验对接线端子的抗应力腐蚀性能进行对比研究.结果表明:2 种接线端子均由(Cu,Zn), CuZn 和 Cu₅Zn₈ 相组成,铸造 H59 接线端子合金组织中还存在细小的缩松缺陷和 ZnO;铸造 H59 接线端子的力学性能低于锻造 H59 接线端子,导电性能略优于锻造 H59 接线端子;缩松等缺陷是导致铸造 H59 接线端子延伸率低的主要原因.氨熏腐蚀中,无应力工况下,合金组织中的缺陷易被腐蚀是导致铸造 H59 接线端子发生点蚀的主要原因,拉应力工况下,Cu₅Zn₈/(Cu,Zn) 和 CuZn/(Cu,Zn) 界面产生的微孔是导致锻造 H59 接线端子产生裂纹的主要原因,缩松和 ZnO 是导致铸造 H59 接线端子抱箍发生断裂的主要原因.实际应用中,锻造 H59 接线端子的综合性能较铸造 H59 接线端子更优.

关键词:H59 黄铜;接线端子;微观组织;应力腐蚀;导电性能

中图分类号:TM207 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)04-0119-06

On the Microstructure and Performance of Two H59 Terminals

WANG Zhensheng¹, YI Yijie¹, XIE Yi², LI Haixing¹, LIU Weike², WANG Fengxiang³

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China;

3. Hunan Guosheng New Material Technology Co., Ltd., Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to compare the microstructures of forged and cast H59 terminals, the mechanical properties of the two terminals are tested by universal tensile testing machine, and the stress corrosion resistance of the terminals is compared by ammonia fumigation test. Results show that the two kinds of terminal blocks are composed of (Cu,Zn), CuZn and Cu₅Zn₈ phase, and there are still fine shrinkage defects and ZnO in the cast H59 terminal, which is lower than that of the forged H59 terminal. The conductivity is slightly better than that of the forged H59 terminal. Shrinkage porosity and other defects are the main reasons for low elongation of cast H59 terminal blocks. In ammonia fumigation corrosion, under stress free working condition, the defects in the alloy structure are easily corroded, which is the main reason for pitting corrosion of the cast H59 terminal block. Under tensile stress working condition, the micropores generated at the interfaces of Cu₅Zn₈/(Cu,Zn) and CuZn/(Cu,Zn) are the main reasons for cracking of the forged H59 terminal block. Shrinkage porosity and ZnO are the main

收稿日期:2021-09-29

基金项目:湖南省自然科学基金项目资助(2020JJ4312)

*通信作者,E-mail:zhsh_w@sina.com

reasons for fracture of the hoop of the cast H59 terminal block. In practical application, the comprehensive performance of forged H59 terminal block is better than that of cast H59 terminal block.

Keywords: H59 brass; terminal; microstructure; stress corrosion; electrical conductivity

“十三五”以来,我国明确提出了提高供电质量,着力解决配电网薄弱问题的电力发展规划^[1].变电站作为电力系统的关键节点,发挥着变换电压等级、汇集电流、分配电能和调整电压的重要作用^[2].接线端子作为电站传输线路的重要组成部件,主要作用是固定引线并连接引线与高压套管.由于接线端子长期裸露在室外自然环境中,受风雨、振动、引线重力等因素的影响,其对导电性能、机械性能和抗腐蚀性能的要求较高.

H59 黄铜因其较好的综合性能,被广泛应用于接线端子上.然而,调查发现服役环境中铸造 H59 接线端子有较大的腐蚀开裂风险,容易引发变压器运行事故.如 2015 年 8 月,我国某电站 110 kV 主变发生一起套管爆炸事故,接线端子龟裂为事故原因之一;2019 年 11 月,山东济南仁凤镇某变电站发生爆炸致使一死两伤,起因为接线端子等变压器相关设备存在应力腐蚀缺陷导致局部发热,最终引发事故.

鉴于接线端子的重要性,国内学者做了一些研究.吕中宾等^[3]研究发现在安装施工时,引线的偏移量越大,接线端子所受的应力越大;郑准备等^[4]研究发现改变镀层的材质和厚度对接线端子的抗腐蚀性能的影响较大;Wu 等^[5]研究发现铜合金的接线端子开裂主要是受残余应力的影响.目前,铸造 H59 接线端子在服役过程中,抱箍外表面受拉应力影响产生开裂的问题仍没有完全杜绝.为避免铸造 H59 接线端子腐蚀开裂的风险,新建变电站开始使用锻造 H59 接线端子,但其可靠性还没有得到充分验证.本文从接线端子材质的角度出发,对比研究锻造 H59 接线端子和铸造 H59 接线端子的微观组织、导电性能、力学性能和抗腐蚀性能,为变电站接线端子的材料优选提供参考,对解决配电网薄弱问题具有重大意义.

1 试验材料及方法

1.1 接线端子的制备方法

铸造 H59 接线端子由国网湖南省电力有限公司电力科学研究院提供.锻造 H59 接线端子采用 $\Phi 60$ mm 的 H59 黄铜棒热锻制备.2 种接线端子的名义化学成分相同,如表 1 所示.2 种接线端子的自然时效为 1 a.采用电镀锡工艺表面镀锡,工艺为化学除油→水洗→电解除油→水洗→化学抛光→水洗→纯水洗→硫酸活化,开缸剂为 40 g/L 的 SnSO_4 , 100 mL/L 的 H_2SO_4 , 40 mL/L 的 BSnG-2007, 辅助剂为 1 mL/L 的 BSnG-2007, 电流密度为 1 A/dm², 温度为 10~15 °C, 镀层厚度控制在约 10 μm .

表 1 2 种接线端子的名义化学成分

						%
Cu	Zn	Fe	Pb	Ni	P	
59.910	38.520	0.679	0.052	0.835	0.004	

1.2 氨熏腐蚀试验

采用密闭容器测试接线端子的氨熏腐蚀性能.氨水溶液的质量分数为 14%, 用量为每升容器总体积不少于 166 mL, 每平方米试样表面积不少于 100 mL, 试样不相互接触且不与氨水直接接触.根据电力系统内部检验黄铜应力氨熏试验法, 试验时间为 24 h.氨熏腐蚀对象为经螺栓紧固的未镀锡和表面镀锡的 2 种 H59 接线端子, 以及未经螺栓紧固的未镀锡和表面镀锡的 2 种 H59 接线端子.氨熏腐蚀后, 未镀锡接线端子采用硝酸溶液去除腐蚀产物, 表面镀锡接线端子采用酒精超声波清洗、干燥, 采用着色探伤方法分析 2 种 H59 接线端子的抗腐蚀性能.

1.3 力学性能试验

拉伸试样尺寸如图 1 所示.线切割切取厚度为 2.5 mm 的拉伸试样, 依次用不同型号(100 号、200 号、400 号、600 号和 800 号)砂纸研磨试样表面, 采用丙酮超声波清洗、烘干.采用 WDW-100C 型万能拉伸试验机测试 2 种 H59 接线端子的拉伸性能, 拉

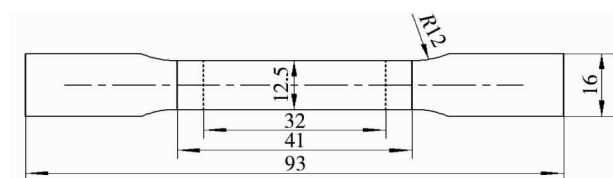


图 1 拉伸试样尺寸规格(单位:mm)

伸速率为 2 mm/min.采用 HB-3000 型布氏硬度计测试 2 种 H59 接线端子的硬度,淬火钢球压头直径为 5 mm,载荷为 50 N,载荷保持时间为 15 s.

1.4 导电性能试验

采用 FD102 型电导率仪测量 2 种 H59 接线端子的电导率.

1.5 组织与形貌分析

线切割切取 $\phi 10$ mm \times 10 mm 的金相组织试样,研磨抛光,丙酮超声清洗、烘干.采用硝酸铁 10 g+水 100 mL 溶液腐蚀金相组织.利用配置了能谱仪(EDS)的 SU5000 型扫描电子显微镜(SEM)分析 2 种 H59 接线端子的金相组织和拉伸试样断口形貌.采用 D/max-RBX 射线衍射(XRD)分析 2 种 H59 接线端子的相组成.

2 试验结果

2.1 锻造 H59 与铸造 H59 的微观组织

图 2 为 2 种 H59 接线端子的微观组织.图 3 为 2 种 H59 接线端子的 XRD 图谱,其中, θ 为 X 射线入射角,纵坐标为 X 射线强度.在扫描电子显微镜低倍数下(图 2a),锻造 H59 接线端子呈现基体与块状组织腐蚀坑的特征.在扫描电子显微镜高倍数下(图 2b),组织中还存在灰黑色的颗粒组织,腐蚀坑中存在未被腐蚀的金属间化合物颗粒,这些金属间化合物颗粒因耐蚀性较高而保留在基体中.XRD 分析表明:基体为 Zn 在 Cu 中的固溶体,简称(Cu,Zn)相,灰黑色的颗粒为 Cu_5Zn_8 金属间化合物相, Cu_5Zn_8 相不易受侵蚀,性硬而脆^[6-7];块状腐蚀坑为 CuZn 相,因含锌量较高且易受侵蚀形成凹坑^[8],并均匀分布在基体(Cu,Zn)相中^[9].铸造 H59 接线端子的微观形貌(图 2c 和图 2d)呈现基体、星花状组织、粗大的长条状组织、细小孔洞与白色点状物的特征.XRD 分析表明:基体为(Cu,Zn)相,星花状组织为 Cu_5Zn_8 金属间化合物相^[10];粗大的长条状组织为 CuZn 相,CuZn 相在基体(Cu,Zn)相中呈现层片状交替分布;细小孔洞为缩松,是最后凝固时树枝状晶轴之间得不到液态金属的补缩而形成^[11];白色点状物为熔炼与铸造过程中产生的氧化物 ZnO.

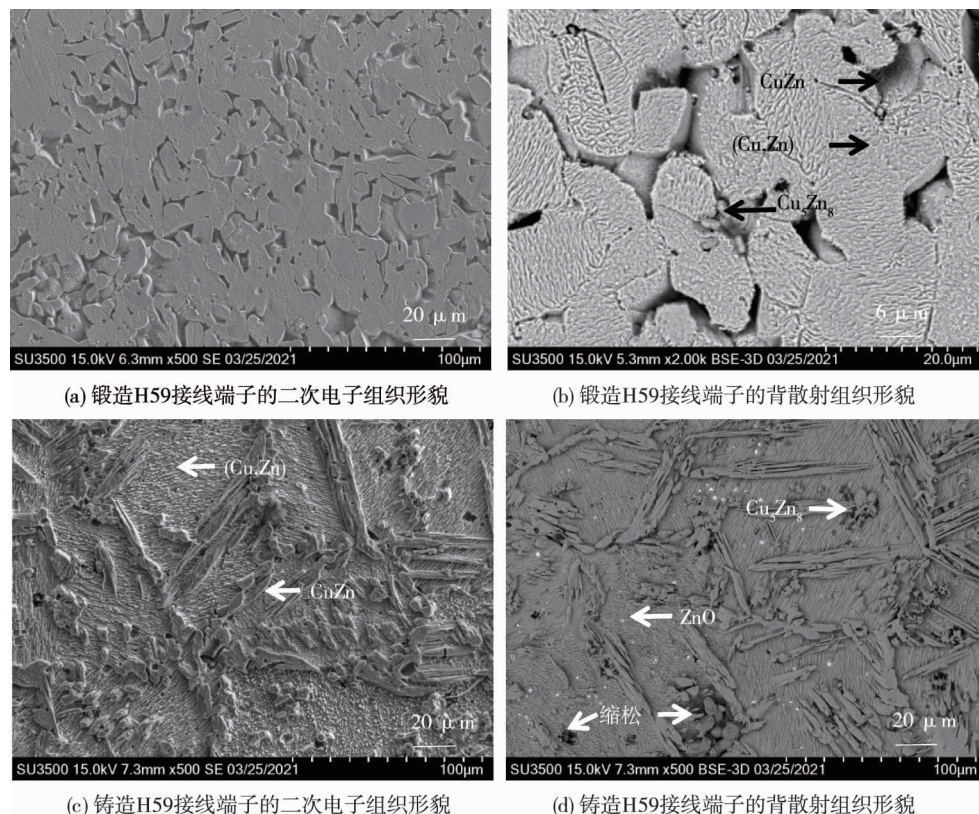


图 2 2 种 H59 接线端子的微观组织形貌

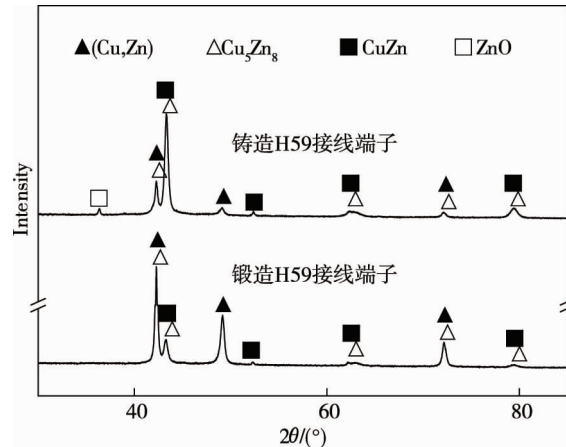


图3 2种H59接线端子的XRD图谱

2.2 2种H59接线端子的力学性能与导电性能

表2为2种H59接线端子的力学性能与导电性能.由表2可知:锻造H59接线端子的强度及延伸率均高于铸造H59接线端子,硬度和电导率略低于铸造H59接线端子.铸造H59接线端子的延伸率低于锻造H59接线端子,这是由于缩松缺陷会降低材料的延伸率,并对接线端子的载重性能、抗冲击性能、抗疲劳性能都有很大的影响^[12].电导率是由合金元素对电子的散射作用大小来决定的,锻造H59接线端子组织中的晶粒较铸造H59接线端子组织中的晶粒更细小,导致锻造H59合金组织的晶界密度增多,加大了对电子的散射作用^[13-15],因此,锻造H59合金的电导率相对较低.

表2 2种H59接线端子的力学性能和电导率

接线端子	布氏硬度/HB	屈服强度/MPa	延伸率/%	电导率/(MS/m)
锻造H59	95.36	384	21.88	11.542
铸造H59	114.18	364	4.06	12.528

2.3 多种铜合金的腐蚀性能

图4为氨熏腐蚀后2种H59接线端子表面的着色探伤形貌.由图4可知:氨熏腐蚀后,无应力工况下,锻造H59接线端子(图4a)抱箍外表面没有缺陷特征,铸造H59接线端子(图4b)抱箍外表面呈现较显著的点蚀缺陷特征.压应力工况下,2种H59接线端子(图4c,图4d)抱箍内表面均未出现裂纹特征.拉应力工况下,锻造H59接线端子(图4e)抱箍外表面呈现密集的细裂纹特征,表面镀锡后(图4g),抱箍外表面的裂纹特征减弱,呈现较轻的裂纹和点蚀缺陷特征;铸造H59接线端子(图4f)抱箍外表面发生断裂现象,表面镀锡后(图4h),抱箍外表面呈现明显的裂纹特征.本文采用自然时效去除2种H59接线端子的内应力,经螺栓紧固的接线端子抱箍外表面受到拉应力作用,抱箍内表面承受压应力;未经螺栓紧固的接线端子,抱箍外表面和内表面均不受应力作用.

3 分析与讨论

窦照英等^[16]研究发现:在压应力工况下,H68A合金和HAl77-2A合金经氨熏腐蚀均未发生破裂,在拉应力工况下均发生破裂,并且随着拉应力的增大,穿晶腐蚀程度随之增加^[10].这与本文的试验结果是一致的.这是因为压应力有利于抑制或消除晶体由于塑性变形引起的各种微观破坏^[17],而拉应力会加剧晶体由于塑性变形引起的各种微观破坏,并促进裂纹的萌生与扩展^[18-19].结合在无应力工况下,锻造H59接线端子表面无缺陷(图4a),铸造H59接线端子表面呈现点蚀缺陷的特征(图4b),可知氨熏腐蚀下,拉应力是导致2种接线端子产生裂纹与开裂的主要原因.



图 4 2 种 H59 接线端子氨熏腐蚀形貌

2 种 H59 接线端子的断面形貌如图 5 所示.进一步分析拉伸试样断口形貌,可以看出,锻造 H59 断口(图 5a,图 5b)呈微孔聚集型断裂形貌,微孔呈等轴状,第二相粒子与微孔几乎是一一对应的,说明一个第二相粒子就是一个微坑的形核位置,第二相粒子对微坑的形核具有重要作用;另外,断口还呈现冰糖状沿晶断裂和少量微裂纹的特征.EDS 分析表明:较大白色块状物为 Cu_5Zn_8 相,细小白色第二相晶粒为 CuZn 相和 Cu_5Zn_8 相.第二相粒子 CuZn 和 Cu_5Zn_8 相界面处均呈现细小的微孔特征,这是由于 CuZn 和 Cu_5Zn_8 周围堆积着位错环,在没有外应力作用时,它们处于平衡状态,当受到拉应力作用后,平衡被打破,位错环被推向第二相粒子 ($\text{Cu}_5\text{Zn}_8, \text{CuZn}$), 当一个或一对位错环到达 $\text{Cu}_5\text{Zn}_8/(\text{Cu}, \text{Zn})$ 和 $\text{CuZn}/(\text{Cu}, \text{Zn})$ 界面时,相界立即分离形成微孔^[20].微孔的形成又导致后面的位错受到的排斥力大大降低,从而迅速推向新形成的微孔并使其长大^[21].另一方面,原来存在于位错环后面的位错源,由于原来堆积位错的约束消失而又重新活跃起来,产生新的位错环,并源源不断地推向微孔,使微孔迅速地发生不稳定扩展及聚合^[21].综上所述,由于锻造 H59 中存在大量的 CuZn 相和 Cu_5Zn_8 相,微坑的形核位置很多,拉伸变形时, $\text{Cu}_5\text{Zn}_8, \text{CuZn}$ 与 (Cu, Zn) 的变形不协调,导致其相界易产生微孔,微孔聚集形成微裂纹,氨熏腐蚀加剧了微孔和裂纹的萌生与扩展,因此,锻造 H59 线端子抱箍外表面产生了裂纹缺陷.

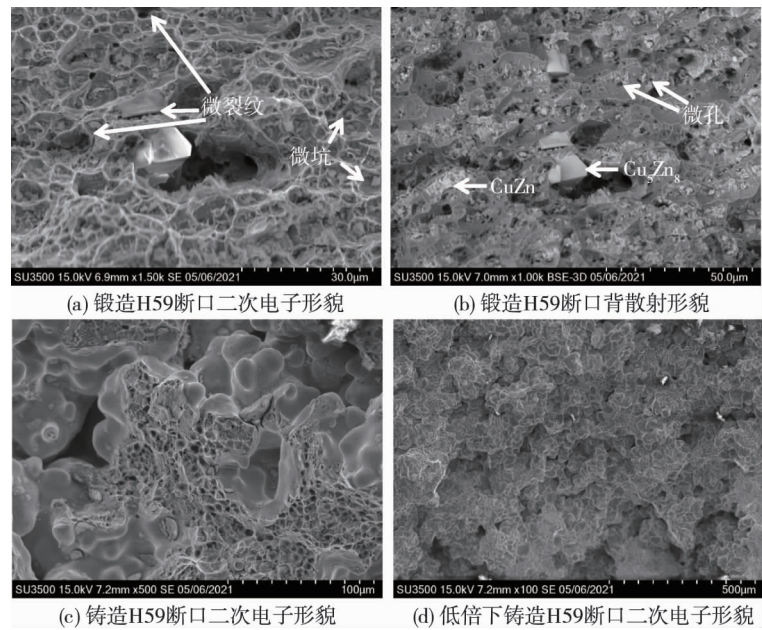


图 5 2 种 H59 接线端子的断面形貌

铸造 H59 接线端子拉伸试样断口(图 5c)呈现沿晶与韧窝并存的断裂形貌,整体上呈脆性断口特征.由于熔炼和铸造过程中形成的 ZnO 不但会影响合金的耐腐蚀性,而且有可能成为裂纹源而降低合金的力学性能^[22],另外,疏松缺陷也会形成裂纹源,在拉应力的作用下,引起开裂.又由于无应力工况下,铸造 H59 接线端子抱箍外表面的点蚀特征(图 4b)也表明合金组织易被腐蚀.因此,在拉应力的氨熏腐蚀工况

下,接线端子抱箍外表面的缩松和 ZnO 产生的缺陷成为裂纹源,并在应力作用下扩展,最终导致接线端子发生脆性断裂(图 4f)。

4 结论

1) 锻造 H59 接线端子由基体(Cu,Zn)相、块状 CuZn 相和颗粒状 Cu_5Zn_8 相组成;铸造 H59 接线端子由基体(Cu,Zn)相、粗大长条状 CuZn 相与星花状 Cu_5Zn_8 相组成,组织中还存在细小的缩松缺陷和 ZnO。

2) 铸造 H59 的强度及延伸率低于锻造 H59,导电性能略优于锻造 H59.缩松等缺陷是导致铸造 H59 接线端子延伸率低的主要原因。

3) 无应力的氨熏工况下,铸造 H59 接线端子发生点蚀的主要原因是合金组织中的缺陷易被腐蚀。

4) 拉应力的氨熏工况下,锻造 H59 接线端子外表面产生裂纹的主要原因是拉应力作用下, Cu_5Zn_8 /(Cu,Zn)和 CuZn/(Cu,Zn)界面产生的微孔;铸造 H59 接线端子发生断裂的主要原因是组织中存在缩松和 ZnO;表面镀锡可以减轻接线端子外表面的裂纹特征。

5) 锻造 H59 接线端子的应用可靠性优于铸造 H59 接线端子。

参考文献:

- [1] 马钊,安婷,尚宇炜.国内外配电前沿技术动态及发展[J].中国电机工程学报,2016,36(6):1552-1567.
- [2] 刘振亚.特高压交直流电网[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [3] 吕中宾,谢凯,张习卓,等.特高压变电站引下线及连接金具系统力学特性分析[J].高压电器,2017,53(9):30-37.
- [4] 郑准备,张向军,杨文涛,等.电力节能接线端子表面镀层的试验研究[J].陕西电力,2015,43(11):90-93.
- [5] Wu T Q, Zhou Z F, Xu S, et al. A corrosion failure analysis of copper wires used in outdoor terminal boxes in substation[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 98: 83-94.
- [6] 王子文.稀土 Ce 对高强耐磨锰黄铜组织和性能的影响[D].北京:北京有色金属研究总院,2016.
- [7] Wang X W, Wang W, Chen W, et al. Effect of Al addition and heat treatment on the microstructures and corrosion resistance of Mg-Cu alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 98: 219-232.
- [8] 白苗苗,白子恒,蒋立,等.H62 黄铜/TC4 钛合金焊接件腐蚀行为研究[J].中国腐蚀与防护学报,2020,40(2):159-166.
- [9] 孟凯,黄华贵,季策.铸轧黄铜薄带组织模拟与性能分析[J].特种铸造及有色合金,2021,41(1):63-68.
- [10] 洛阳铜加工厂中心试验室金相组.铜及铜合金金相图谱[M].北京:冶金工业出版社,1983.
- [11] 牛俊民,蔡晖.钢中缺陷的超声波定性探伤[M].2版.北京:冶金工业出版社,2012.
- [12] 朱利利.低压铸造铝合金车轮主要缺陷分析与控制[D].秦皇岛:燕山大学,2015.
- [13] 陆建邦. $\text{TiB}_2/\text{TiC}_x-\text{TiB}_2$ 增强 Cu 基复合材料的制备与性能[D].长春:吉林大学,2012.
- [14] Maxim G, Galina G, Elena H C, et al. Conductivity mechanisms and influence of the Cu/Zn disorder on electronic properties of the powder $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_4$ solid solutions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 2251-2259.
- [15] Li R G, Zhang S, Zou C L, et al. The roles of Hf element in optimizing strength, ductility and electrical conductivity of copper alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 758: 130-138.
- [16] 窦照英.凝汽器黄铜管内应力检验方法对比试验研究[J].华北电力技术,1984(8):31-34.
- [17] 王振生,张孟恩,杨双双,等.NiAl-2.5Ta-7.5Cr-1B 合金的微观组织、力学性能与摩擦磨损特性[J].金属学报,2013,49(11):1325-1332.
- [18] 周滢.超细晶 Cu-Cr-Zr 合金的应力腐蚀[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [19] 胡亚东.T91 钢在静态铅铋氧控环境中应力腐蚀行为研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [20] 上海交通大学《金属断口分析》编写组.金属断口分析[M].北京:国防工业出版社,1979.
- [21] 曾祥亮.合金元素 Cd 和 Nd 对 ZK60 镁合金力学性能及腐蚀性能的影响[D].长沙:中南大学,2009.
- [22] 朱弘伟,夏书乐,武思成,等.AZ31 镁合金铸造夹杂成因分析及防止[J].山西大同大学学报(自然科学版),2021,37(3):12-14.