

电子束冷床炉熔炼 TA31 钛合金过程中元素的挥发损失

张浩泽^{1,2} 王隽生² 黄海广^{1,2} 肖永江² 钟 海²

(1.昆明理工大学材料科学与工程学院; 2.云南钛业股份有限公司)

摘 要 采用电子束冷床炉熔炼 TA31 合金圆锭,对其化学成分和熔炼工艺进行对比分析。发现熔炼速度显著影响铸锭轴向成分的稳定性,铸锭轴向 Al 含量随熔炼速度的增加而升高,反之亦然;减小熔炼速度波动可提高铸锭中 Al 含量的稳定性;Nb、Zr、Mo 元素在轴向和径向分布均匀。试验检测 results 和动力学分析均表明,Nb、Zr、Mo 元素挥发量可忽略,由于 Ti 和 Al 元素的挥发,导致其含量略有升高。

关键词 TA31 钛合金;电子束冷床熔炼(EBCHM);元素挥发;成分均匀性

中图分类号 TG146.23;TF134

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Element Volatilization Loss of TA31 Titanium Alloy during Electron Beam Cold Hearth Melting

Zhang Haoze^{1,2}, Wang Junsheng², Huang Haiguang^{1,2}, Xiao Yongjiang², Zhong Hai²(1.School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology;
2.Yunnan Titanium Industry Co., Ltd.)

Abstract: Round ingot of TA31 alloy was melted by electron beam cold hearth furnace, and the chemical composition as well as the melting process were analyzed comparatively. The results indicate that the stability of axial composition in the ingot is significantly affected by melting speed. The axial Al content in the ingot is increased with the increase of melting speed, and vice versa. The reduction of melting speed fluctuation can improve the stability of Al content in ingot, and the distribution of Nb, Zr and Mo is uniform along the axial and radial direction. The test results and kinetic analysis reveal that the volatilization amount of Nb, Zr and Mo can be negligible. The volatilization of Ti and Al results in a slight increase of percentage content.

Key Words: TA31 Titanium Alloy, Electron Beam Cold Hearth Melting, Element Volatilization, Composition Uniformity

TA31 钛合金是一种近 α 型钛合金,具有高强、高韧、可焊、耐蚀性良好的综合性能^[1],已应用于载人深潜器耐压壳体、高压容器、船舶焊接结构件等,是我国在舰船、海洋工程领域应用量最大的钛合金,也是工程应用研究最为完善的舰船用钛合金^[2~4]。

长期的应用及研究表明,真空自耗电弧熔炼(VAR)无法彻底去除钛合金中的高、低密度夹杂,熔炼过程中容易出现夹杂、偏析等冶金缺陷。电子束冷床熔炼(EBCHM)是 20 世纪 80 年代迅速发展起来的一种生产洁净金属的先进熔炼技术,在减少高低密度夹杂能力上远超过 3 次 VAR 熔炼,已成为生产航空发动机钛合金转动部件的主要方法,美国航空标准已将冷床炉熔

炼纳入航空旋转件、结构件用钛合金材料必须采用的熔炼技术^[5]。但 EBCHM 要求的真空度远高于 VAR 的,采用 EBCHM 技术生产钛合金时,较基体钛饱和蒸气压高的元素挥发损失比 VAR 炉熔炼更强烈,控制难度更大^[5],准确控制易挥发元素是目前研究的热点。国内外对 EBCHM 技术的研究局限于 TC4 等钛合金^[6~12],对于 TA31 合金的 EBCHM 制备技术尚未见报道。

本课题以大型 EBCHM 炉熔炼 TA31 合金圆锭为研究对象,揭示熔炼工艺对元素挥发的影响,探索元素的损失机理,旨在探索高品质 TA31 合金的制备工艺路线,为舰船、海洋用钛合金的发展应用提供参考。

收稿日期:2021-07-20;修改稿收到日期:2021-08-16

基金项目:云南省重大科技专项基金资助项目(202002AB080001-3)

第一作者简介:张浩泽,男,1986 年出生,博士研究生,昆明(651209),E-mail:3175811562@qq.com

引用格式:张浩泽,王隽生,黄海广,等.电子束冷床炉熔炼 TA31 钛合金过程中元素的挥发损失[J].特种铸造及有色合金,2022,42(3):314-318.

ZHANG H Z, WANG J S, HUANG H G, et al. Element volatilization loss of TA31 titanium alloy during electron beam cold hearth melting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3):314-318.

1 试验方法

试验材料选用 0 级海绵钛、Al-60Mo 合金、Al-53Nb 合金、海绵锆、Al 豆($Al \geq 99.9\%$, 质量分数), 考虑到熔炼过程中 Al 元素的挥发, 将 Al 含量以 7.0%~8.0%(质量分数)的比例配制, 其余元素按名义成分添加, 进行混合、压料、焊接电极, 然后先用 VAR 炉熔炼一次, 进行合金化和初步成分均匀化, 然后在 3 150 kW 大型电子束冷床炉上熔铸, 所用结晶器截面直径为 $\phi 62$ cm, 真空度为 0.2~0.9 Pa, 获得了尺寸为 $\phi 61$ cm $\times$ 45 cm 的 TA31 钛合金(Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo)铸锭, 熔炼过程见图 1。

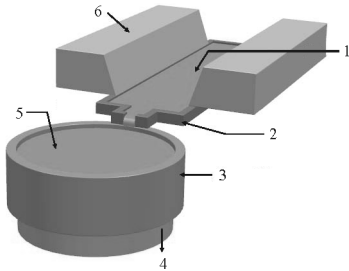


图 1 电子束冷床炉熔炼示意图
Fig.1 Schematic diagram of EBCHM

1.熔体 2.冷床 3.结晶器 4.铸锭 5.合金液 6.原材料

通常 EBCHM 熔炼分为 3 个阶段, 初始阶段主要完成冷床料熔化和铸锭锭头制作, 稳定阶段即完成锭头制作后正常稳定熔铸阶段, 补缩阶段指基本完成熔铸, 对冷床和结晶器进行清边, 减小电子枪扫描电流, 使铸锭逐步凝固的阶段。使用的大型电子束冷床炉具有 7 把冷阴极电子枪, 其额定功率为 450 kW, 其中 1~4 号枪负责原料熔化, 5 号枪负责扫描冷床浇口位置, 6~7 号枪负责扫描结晶器区域, 熔炼工艺参数见表 1。熔铸时采用自动拉锭模式, 结晶器液面上涨到监控控制位置后设备自行拉锭, 每次拉锭长度为 5~15 mm, 熔炼速度主要依靠給料速度调整, 給料速度通过伺服电机控制。

表 1 TA31 钛合金 EBCHM 熔炼工艺参数

Tab.1 The EBCHM melting process parameters of TA31 titanium alloy

熔炼阶段	冷阴极电子枪熔化电流/A		
	1~4 号	5 号	6~7 号
初始阶段	4.4~5.0	2.5~2.7	5.0~5.5
稳定阶段	6.0~7.0	2.5~3.5	5.5~6.5
补缩阶段	2.0~4.0	2.0~2.5	4.0~5.0

将初始熔铸端定为锭头, 将熔铸补缩端定为锭尾, 铸锭扒皮后, 从锭头至锭尾沿轴向每隔 20 cm 取样, 采用 Optima8000 型全谱直读等离子发射光谱仪对 Al、Nb、Zr、Mo 元素进行检测; 在距离锭头 350 cm 处锯切,

采用聚光 MiX5 型 X 荧光光谱仪, 对锯切截面 1/4 区域进行成分测量。

2 试验结果与分析

2.1 铸锭轴向化学成分

图 2 为沿铸锭锭头到锭尾轴向成分检测结果, 其平均值和极差分析结果见表 2。从图 2 和表 2 可以看出, 除去头尾影响区, 铸锭中 Nb、Zr、Mo 元素沿轴向分布较平稳, 平均值比名义成分略有增加, 这表明这些元素基本没有挥发。锭头、锭尾处 Al 偏低, Nb、Zr、Mo 元素含量升高, 这是由于 EBCHM 熔铸初始阶段制作锭头和冷床凝壳, 补缩阶段为了消除铸锭尾部缩孔, 较稳定熔炼阶段用的时间长, 高温下 Ti、Al 元素持续挥发时间增加, 挥发量增多, 相应的导致 Nb、Zr、Mo 含量上升。

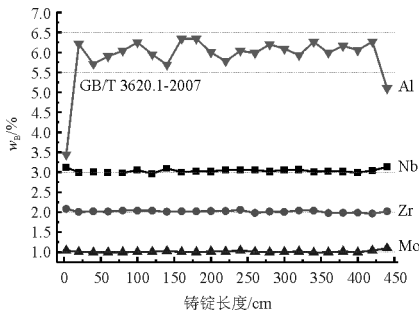


图 2 铸锭轴向化学成分

Fig.2 Axial chemical composition of the ingot

表 2 铸锭轴向化学成分分析结果

Tab.2 Analysis result of axial chemical composition of ingot %

元素	w_B				
	Al	Nb	Zr	Mo	Ti
平均值	5.97	3.06	2.02	1.01	余量
极差	0.65	0.13	0.09	0.05	—

Al 元素沿轴向波动较其他元素大, 极差为 0.65%, 含量虽然在 GB/T3620.1-2007 允许范围内但波动较大。电子束功率、金属液面面积及熔炼速度是影响元素挥发的主要因素^[13]。金属液面面积主要由原料熔化面积、冷床面积和结晶器面积决定, 是一个稳定值。为了尽可能减少影响因素, 将各电子枪的电流严格控制使其平稳, 因此 EBCHM 炉熔炼速度就成为影响 Al 含量高低的关键因素。沿轴向长度对应的熔炼速度和 Al 含量见图 3, 在锭长为 160~200 cm 之间, 熔炼速度出现较大波动, 熔炼速度极差为 135 kg/h, 对应的 Al 含量波动也增大, Al 含量极差为 0.65%; 在锭长 240~340 cm 之间, 熔炼速度波动幅度较小, 熔炼速度极差为 87 kg/h, 相应的 Al 含量波动也减小, Al 含量极差为 0.42%, 在该区间平均熔炼速度为 502 kg/h, 平均 Al 含量为 6.0%。

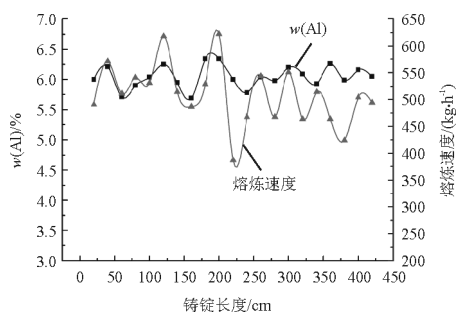


图3 铸锭轴向 Al 分布与熔炼速度对比

Fig.3 Comparison of axial Al distribution of the ingot and melting speed

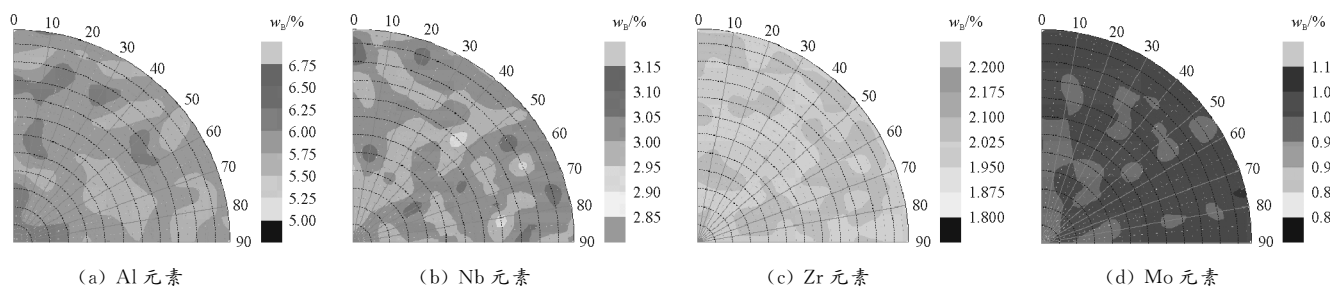


图4 铸锭径向成分分布图

Fig.4 Radial composition of the ingot

使得各组元能够均匀分布。

2.3 EBCHM 熔炼 TA31 钛合金元素挥发分析

2.3.1 挥发动力学分析

合金元素挥发过程包括 3 个阶段^[13]:第 1 阶段,合金元素从金属熔体内通过液相边界层迁移到熔体表面;第 2 阶段,金属熔体表面发生从液相转变为气相的过程;第 3 阶段,挥发元素通过气相边界层扩散到气相中。

第 1 阶段,熔体内扩散走的金属元素的通量为:

$$J_m = -\beta_m(C_m - C_{ms}) \quad (1)$$

式中, β_m 为合金元素由液相向界面层的传质系数,cm/s; C_m 为合金元素在熔体中的质量浓度,g/cm³; C_{ms} 为合金元素在界面层中的质量浓度,g/cm³。

第 2 阶段,合金组元的挥发通量 J_m 可表示为:

$$J_{ms} = K_m C_{ms} - K_g C_{gs} =$$

$$\epsilon[P_{e(i)} - P_{g(i)}] \sqrt{M_i / (2\pi RT_{ms})} \quad (2)$$

式中, ϵ 为凝结系数,对于金属蒸气来说接近 1; K_m 为合金元素挥发传质系数,cm/s; K_g 为合金元素在气相中的传质系数,cm/s; C_{gs} 为挥发表面空间合金元素的质量浓度,g/cm³; $P_{e(i)}$ 为熔体中合金元素 i 在 T_{ms} 温度时的饱和蒸气压,Pa; $P_{g(i)}$ 为挥发表面空间元素 i 的蒸气分压,Pa; T_{ms} 为熔体挥发界面层的温度,K; M_i 为元素 i 的摩尔质量,g/mol。

$$P_{e(i)} = x_i \gamma_i P_i^0 \quad (3)$$

式中, x_i 为合金元素 i 的摩尔分数; γ_i 为合金元素 i 的活度系数; P_i^0 为纯组元 i 的饱和蒸气压,Pa。

2.2 铸锭径向化学成分

对铸锭锯切截面上的元素含量进行检测,其二维云图见图 4。可以看出,径向 Al 含量为 5.75%~6.25%,Nb 含量为 2.91%~3.11%,Zr 含量为 1.96%~2.10%,Mo 含量为 0.96%~1.04%。径向成分表明,挥发主要为 Al 元素,Nb、Zr、Mo 元素挥发可以忽略,且波动范围较窄,未出现宏观偏析,分布较均匀。相较 VAR 工艺,EBCHM 虽然没有电磁强制搅拌的功能,但原料熔化形成熔体到凝固成铸锭前一直流动,电子束持续对熔体表面扫描引起熔体热对流,这均加强了熔体内对流传质,

合金界面挥发传质系数 K_m 可计算如下^[14,15]:

$$K_m = P_i^0 \gamma_i M_{Ti} / (\rho_{Ti} \sqrt{2\pi RT_{ms} M_i}) \quad (4)$$

第 3 阶段,合金组元向气相空间的扩散通量可表示为:

$$J_g = -\beta_g(C_{gs} - C_g) \quad (5)$$

式中, β_g 为合金元素在气相中的扩散速度,cm/s; C_g 为合金元素在气相中的质量浓度,g/cm³。

在 EBCHM 熔炼过程中,为保证电子枪的运行,真空度通常小于 1 Pa,挥发元素的平均自由程都很大,超过了真空室空间,因此气体空间的扩散即不会成为 EBCHM 熔炼合金元素挥发的控制环节,挥发主要由液相中扩散和界面挥发控制,挥发通量为:

$$J = C_{ms}(K_m \cdot \beta_m) / (K_m + \beta_m) \quad (6)$$

2.3.2 元素挥发量计算

(1)Nb、Zr、Mo 元素的挥发

纯组元的饱和蒸气压是熔炼过程中衡量金属蒸发趋势大小的一个重要的热力学参数,在相同条件下,元素的饱和蒸气压越高,则挥发损失越快。TA31 合金各纯组元的饱和蒸气压计算如下^[16]:

$$\lg P_i^0 = A \times 10^3 T^{-1} + B \lg T + C \times 10^{-3} T + D \quad (7)$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 为金属蒸气压常数。

按式(7)计算出 2 000~2 200 K 范围内纯组元 Ti、Al、Nb、Zr、Mo 的饱和蒸气压 P_i^0 值,见图 5, P_{Al}^0 远高于 P_{Ti}^0 , P_{Al}^0 是 P_{Ti}^0 的 213~1 077 倍, P_{Nb}^0 、 P_{Zr}^0 和 P_{Mo}^0 均接近于 0。在 2 100 K 时, P_{Nb}^0 为 1.4×10^{-5} Pa, P_{Zr}^0 为 $1.2 \times$

10^{-3} Pa, P_{Mo}^0 为 1.5×10^{-4} Pa, TA31 合金中 Nb、Zr、Mo 元素摩尔分数仅分别为 1.5%、1.0% 和 0.5%, 根据式 (3) 可知, Nb、Zr、Mo 元素在合金中的饱和蒸气压 $P_{e(i)}$ 会更低, 因此, Nb、Zr、Mo 元素在熔铸过程中的挥发可以忽略不计, 这与铸锭轴向及径向检测结果是一致的。

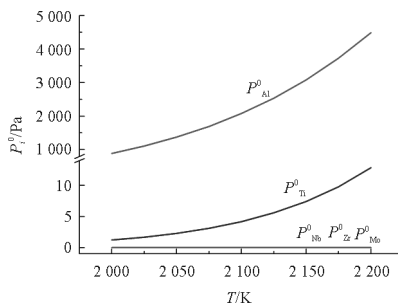


图 5 纯组元的饱和蒸气压

Fig.5 Saturated vapor pressure of pure components

(2) Ti 和 Al 元素的挥发

由式 (3)~式 (6) 可知, 活度系数、传质系数和界面层中的质量浓度是计算挥发量的主要参数。将 TA31 钛合金视为由 Ti-Al-Nb、Ti-Al-Zr 和 Ti-Al-Mo 组成, 采用 Miedema 模型计算各体系中 Ti、Al 活度系数^[17]:

$$\ln \gamma_i / \gamma_0 = \ln \gamma_k +$$

$$\sum_{j=2}^3 \epsilon_{ij}^j x_j + \sum_{j=2}^3 \rho_{ij}^j x_j^2 + \sum_{i=2}^3 \sum_{j>1}^3 \rho^{jk} x_j x_k + O(x^3) \quad (8)$$

式中, i 和 j 表示溶质组元; k 为溶剂; γ_i 为 i 的活度系数; γ_i^0 为 i 的 0 阶活度系数; γ_k 为溶剂 k 的活度系数; x_i 、 x_j 和 x_k 分别为 i 、 j 、 k 的摩尔分数; ϵ_{ij}^j 、 ρ_{ij}^j 分别为 i 与 j 的一阶、二阶相互作用系数; ρ_{ij}^{jk} 为 i 与 j 、 k 的二阶相互作用系数。

然后取平均值作为 TA31 熔炼过程中 Ti、Al 的活度系数, 温度在 2 000~2 150 K, Al 含量在 6.0%~7.5% 时, γ_{Al} 对应计算结果为 0.032~0.067, γ_{Ti} 对应计算为 0.830~0.896。

合金以 Ti 为基体, Ti 元素挥发不受液相扩散影响, 主要受界面挥发控制, 联合式 (2)~式 (4) 和式 (7)、式 (8) 可计算 Ti 的挥发通量 $J_{\text{ms(Ti)}}$, 考虑到 EBCHM 熔炼真空度高, 通常小于 1 Pa, $P_{\text{g(Ti)}}$ 近似为 0。则

$$J_{\text{ms(Ti)}} = P_{e(\text{Ti})} \sqrt{M_{\text{Ti}} / (2\pi RT)} \quad (9)$$

采用的 3 150 kW 电子冷床炉的冷床、结晶器和原料熔化面积合计约为 8 820 cm², 熔体表面温度约为 2 100 K^[18], 熔炼速度为 380~622 kg/h, 按式 (9) 计算得到对应的 Ti 的损失率为 0.29%~0.47%。

Al 挥发由液相中扩散和界面挥发双重控制, 挥发通量按式 (6) 计算。根据文献^[19]研究结果, β_m 的值为 1.1×10^{-2} cm/s, K_m 按式 (4) 计算。实际熔铸过程中最大熔炼速度为 622 kg/h, 最小熔炼速度为 380 kg/h, 对应的 Al 的损失率约为 11.9% 和 19.5%, 按搭建的数学

模型计算得到理论 Al 含量为 6.29% 和 5.64%, 而实际铸锭的 Al 含量为 6.00% 和 5.78%, 实际值较理论结算结果波动要小。这是由于冷床内和结晶器内已有熔体对短时间内过快、过慢引起 Al 含量波动起到均匀化作用。因此, 短时间内熔炼速度的小幅波动, 不会引起 Al 含量的明显变化, 熔炼过程中应尽可能提高熔炼速度的稳定性, 从而实现 Al 元素沿轴向的均匀分布。

Ti 和 Al 挥发量之和占总合金质量的 1.33%~2.19%, 而 Nb、Zr、Mo 挥发基本可以忽略, 导致最终铸锭 Nb、Zr、Mo 元素含量略有增加, 这与轴向的检测结果相符。要实现铸锭成分的精确控制, 除了控制熔炼速度外, 还应考虑元素挥发损失对合金成分的影响。

3 结 论

(1) EBCHM 熔铸大规格 TA31 钛合金时, Al 元素在轴向和径向分布波动较大, Nb、Zr、Mo 均匀分布。

(2) 铸锭的轴向、径向检测结果以及动力学分析表明, EBCHM 熔铸大规格 TA31 钛合金, 具有较低饱和蒸气压的 Nb、Zr、Mo 挥发量可以忽略不计, 但由于 Ti 和 Al 元素的挥发, 导致 Nb、Zr、Mo 含量略有上升。

(3) 熔炼速度显著影响 TA31 铸锭轴向成分的稳定性, 轴向 Al 含量随着熔炼速度的增加而升高, 反之亦然, 熔炼过程中应尽可能提高熔炼速度的稳定性, 从而实现 Al 元素沿轴向均匀分布。

参 考 文 献

- [1] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1-8.
- [2] CHEN H S, LIU X H, LIU G F, et al. Hot deformation behavior and processing map of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(4): 901-906.
- [3] 杨英丽, 罗媛媛, 赵恒章. 我国舰船用钛合金研究应用现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 538-543.
- [4] 孟祥军, 陈春和, 余巍, 等. 几种海洋工程用钛合金及其应用[J]. 中国造船, 2004, 45: 38-43.
- [5] 陈峰, 陈丽, 国斌, 等. 电子束冷床熔炼的优与劣[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): S873-S876.
- [6] 冯寅楠, 闫鹏, 贾国斌. 电子束冷床熔炼的应用现状[J]. 中国材料进展, 2020 (4): 295-303.
- [7] 张英明, 周廉, 孙军, 等. TC4 合金电子束冷床熔炼过程中 Al 元素的挥发计算研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(5): 99-101.
- [8] IVANCHENKO V G, IVASISHIN O M, SEMIATIN S L. Evaluation of evaporation losses during electron-beam melting of Ti-Al-V alloys[J]. Metallurgical and materials transaction, 2003, B34: 911-915.
- [9] CEN M J, LIU Y, CHEN X, et al. Calculation of flow, heat transfer and evaporation during the electron beam cold hearth melting of Ti-6Al-4V alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(3): 833-841.
- [10] 李育贤, 杨丽春. 3150KWB BMO-01 型大功率电子束冷床炉熔炼 TC4 钛合金[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(3): 59-61.

脉冲电流作用下 20 低碳钢的疲劳损伤恢复研究

刁爱民¹ 王景鹏^{2,3} 杨雨秋⁴ 刘纪德³ 郭敬东^{2,3}(1.海军工程大学舰船与海洋学院; 2.沈阳材料科学国家研究中心; 3.中国科学院金属研究所;
4.沈阳理工大学材料科学与工程学院)

摘要 研究了脉冲电流对 20 低碳钢疲劳损伤的修复及其机理。对预疲劳原始疲劳寿命的 60% 周次的试样进行脉冲电流处理, 修复其疲劳损伤, 再进行疲劳试验, 发现试样总的疲劳寿命比原始试样疲劳寿命延长了 41%。对比分析了脉冲电流处理对试样的微观组织形貌和力学性能的影响, 发现 20 钢在脉冲电流作用下未发生强化, 表明疲劳寿命的延长是由于脉冲电流的修复作用造成的。TEM 观察发现, 经过脉冲电流处理后, 疲劳试样铁素体中观察到的墙状位错结构部分消失, 位错分布更为均匀。此外, 脉冲电流处理可以有效地修复疲劳损伤材料的微观缺陷, 延长材料的服役寿命。

关键词 脉冲电流; 疲劳寿命; 损伤修复; 钢**中图分类号** TG113.25⁺5; TF761⁺2**文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fatigue Damage Recovery of 20 Carbon Steel under Pulsed Current

Diao Aimin¹, Wang Jingpeng^{2,3}, Yang Yuqiu⁴, Liu Jide³, Guo Jingdong^{2,3}(1.College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering; 2.Shenyang National Laboratory for Materials Science; 3.Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences;
4.School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University)

Abstract: The fatigue damage recovery of 20 low carbon steel by pulse current as well as the mechanism were investigated. A pulse current was applied on the pre-fatigued specimens with 60% of the original fatigue life cycles to recover the fatigue damage, and the total fatigue life of the pulse current treated specimens is increased by 41% compared with the original ones. The effects of pulse current treatment on the microstructure and mechanical properties of the specimens were analyzed. The results reveal that absence of strengthening is observed in 20 low carbon steel under the action of pulse current, indicating that the prolongation of fatigue life is attributed to the recovery effect of pulse current. TEM observation reveals that after the pulse current treatment, the wall-like dislocation structure observed in ferrite of the fatigue specimens is partially disappeared, and the dislocation is more evenly distributed. Moreover, pulse current treatment may be an effective way to recover the micro-defects of fatigue-damaged materials, extending the service life of the materials.

Key Words: Pulse Current, Fatigue Life, Damage Recovery, Steel**收稿日期:** 2021-05-28; **修改稿收到日期:** 2021-09-28**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2020YFA0714900)**第一作者简介:** 刁爱民, 男, 1966 年出生, 教授, 武汉(430033), E-mail: 670088878@qq.com**通信作者:** 郭敬东, 男, 1968 年出生, 正高级工程师, 沈阳(110006), E-mail: jdguo@imr.ac.cn**引用格式:** 刁爱民, 王景鹏, 杨雨秋, 等. 脉冲电流作用下 20 低碳钢的疲劳损伤恢复研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(3): 318-322.

DIAO A M, WANG J P, YANG Y Q, et al. Fatigue damage recovery of 20 carbon steel under pulsed current[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(3): 318-322.

[11] WOOD J R. Producing Ti-6Al-4V plate from single-melt EBCHM ingot[J]. JOM, 2002(2): 56-58.

[12] 杜彬, 唐增辉, 张志斌, 等. TC4 合金的电子束冷床炉熔炼工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2 989-2 995.

[13] VUTOVA K, MLADENOV G. Computer simulation of the heat transfer during electron beam melting and refining[J]. Vacuum, 1999, 53(1): 87-91.

[14] BLACHA L, GOLAK S, JAKOVICS A, et al. Kinetic analysis of aluminum evaporation from the Ti-6Al-7Nb alloy[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2014, 59(1): 276-278.

[15] 张永伟. TC4 组元挥发机制及配料参数的研究[D]. 昆明: 昆明理

工大学, 2018.

[16] 梁英教, 车荫昌, 刘晓霞, 等. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.

[17] 郭景杰, 苏彦庆. 钛合金 ISM 熔炼过程热力学与动力学分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.

[18] GAO L, HUANG H G, ZHANG Y Q, et al. Numerical modeling of EBCHM for large-scale TC4 alloy round ingots[J]. JOM, 2018, 70(12): 2 934-2 942.

[19] 樊生文. 译. 钛、锆及其合金的电子束熔炼[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

(编辑: 刘晨辉)