DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.09.006

TC4 钛合金 VAR 熔炼过程中夹杂物演变的数值模拟分析

付航涛[1],王凯旋[1],赵小花[1,2],楼美琪[1],孙　峰[1],刘向宏[1]

(1. 西部超导材料科技股份有限公司 陕西省航空材料工程实验室 西安市特种钛合金制备及仿真技术重点实验室,陕西 西安 710018;2. 西北工业大学 材料学院,陕西 西安 710072)

摘　要:采用 MeltFlow 软件,对 TC4 钛合金铸锭在真空自耗电弧熔炼(VAR)过程中不同相对密度及不同直径掉渣、掉块等夹杂物的运动及分布规律进行了数值模拟。通过电极棒中添加海绵钛的方式熔炼铸锭并锻造成棒材开展实验验证,并采用超声波无损探伤方式对缺陷进行检验判定。结果表明,不同相对密度及不同直径的夹杂物在铸锭熔炼中运动及分布规律存在明显差异。大块氧化物夹杂经过一次熔炼并不能完全熔解,最终在棒材上会形成可探伤的缺陷。

关键词:钛合金;真空自耗熔炼;夹杂物;数值模拟

中图分类号:TG243　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)09-0770-04

Numerical Simulation Analysis of Inclusion Evolution During VAR Melting of TC4 Titanium Alloy

FU Hangtao[1], WANG Kaixuan[1], ZHAO Xiaohua[1,2], LOU Meiqi[1], SUN Feng[1], LIU Xianghong[1]

(1. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Shaanxi Aviation Materials Engineering Laboratory, Xi'an Key Lab. of Special Titanium Alloy Preparation and Simulation Technology, Xi'an 710018, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The motion and distribution of inclusions with different relative densities and diameters during vacuum consumable arc melting (VAR) of TC4 titanium alloy ingots were simulated by MeltFlow software. The ingots were melted by adding titanium sponge to the electrode rod and forged into the bar to carry out the experimental verification, and the ultrasonic nondestructive testing was used to check and determine the defects. The results show that the motion and distribution of inclusions with different relative densities and diameters are obviously different during ingot smelting. Large oxide inclusions can not be completely melted after a smelting, and it can finally form defects and can be detected in the bar.

Key words: titanium alloys; vacuum arc remelting; inclusion; numerical simulation

真空自耗电弧(VAR)熔炼作为一种成熟的工业熔炼方法,目前在航空航天及医疗用钛合金铸锭熔炼方面大量应用[1-4]。VAR 熔炼过程的稳定性对铸锭的成分和组织均匀性具有重要影响,熔炼过程中海绵钛或者焊瘤的掉渣、掉块[5]等夹杂物现象可能会形成冶金缺陷,而是否形成缺陷主要取决于夹杂物发生的时间和数量。在工程实践中,夹杂物[6-7]对铸锭最终冶金质量带来的风险难以直观判定,往往在最终制件检查时暴露质量问题,给制订工艺和生产过程控制造成很大困惑。本研究对 TC4 钛合金 VAR 熔炼过程中掉渣、掉块等夹杂物的演变进行模拟分析,结合电极棒中添加海绵钛的方式熔炼铸锭进行实验对比验证,为工程化工艺完善和生产过程控制措施提供一定参考。

1　试验材料与方法

采用 MeltFlow 软件建模并计算,模型为轴对称数学模型,运用有限体积法进行模拟。对 TC4 钛合金铸锭熔炼过程中不同相对密度(0.5、1.0 和 2.0)及不同直径(2、8 和 13 mm)的夹杂物的运动及分布规律进行数值模拟计算;同时采用电极棒中添加海绵钛的方式熔炼铸锭,添加的海绵钛模拟夹杂物对象。熔炼过程中观察期熔炼过程中弧光的明暗程度,将铸锭锻造成小规格棒材对其进行超声波无损探伤,确认异常信号与添加海绵钛的位置对应关系,并对探伤异常区域进行 SEM、EDS 等检测分析。模型中采用的 TC4 钛合金物性参数见文献[8]。

收稿日期:2021-07-13

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFB1106000)

作者简介:付航涛(1988—),陕西西安人,博士,高级工程师.主要从事钛合金熔炼及加工方面的工作.

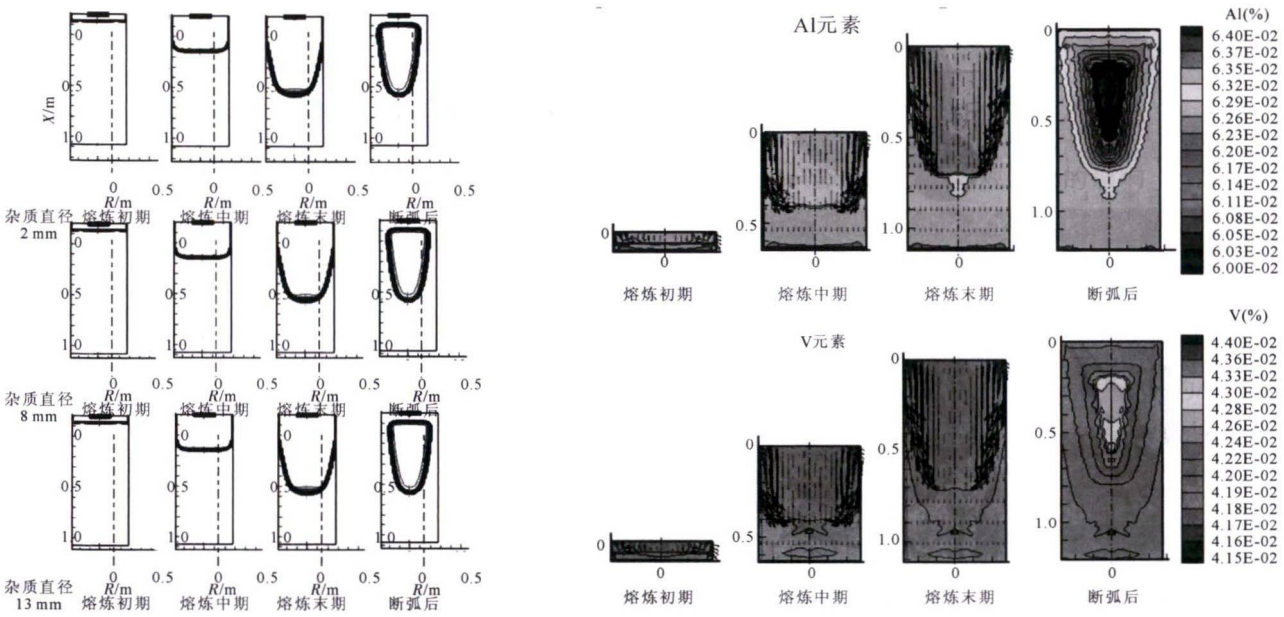
电话:02986538737,Email:fuhangtao1005@163.com

2 结果与讨论

2.1 不同相对密度夹杂物情况数值模拟

采用 MeltFlow 软件建立了 TC4 钛合金 ϕ560 mm 一次铸锭的 VAR 熔炼模型。图 1 为不同直径、相对密度 0.5 夹杂物在不同时刻熔池中的运动轨迹。可以看到，在夹杂物相对密度较小（夹杂物相对密度为 0.5）的情况下，不论夹杂物的直径如何变化，在熔炼不同时刻夹杂物均表现相同的运动规律，即始终漂浮在最表面，也就是熔池中温度最高的位置。在该情况下，熔池内的比重偏析起主要作用[9-10]，因此较轻的夹杂物不易进入熔池内部形成冶金缺陷。图 1(b) 为该情况下的 Al、V 元素的成分模拟结果，可以看到在最终凝固前，夹杂物一直位于熔池上表面液相区，因此并未对凝固过程造成影响，铸锭的成分分布不受该情况下夹杂物运动影响。

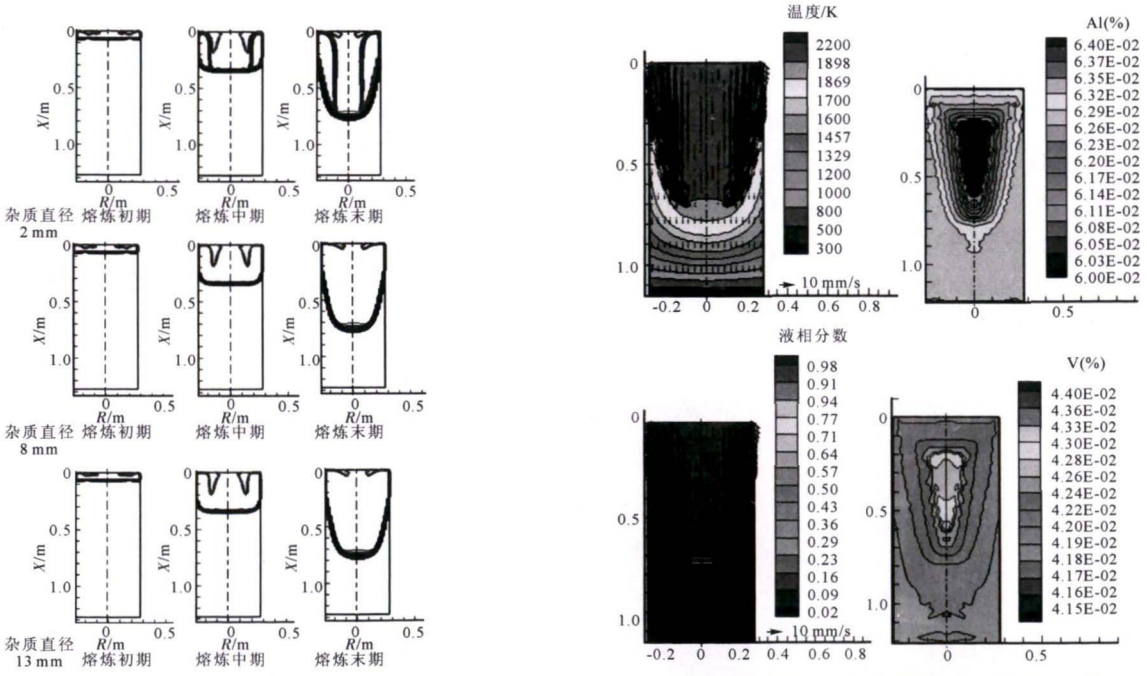
图 2 为不同直径、相对密度 1 夹杂物在不同时刻熔池中的运动轨迹。可以看到，当夹杂物相对密度



(a)运动轨迹　　(b)成分分布

图 1 不同直径、相对密度 0.5 夹杂物在不同时刻熔池中的运动轨迹

Fig.1 The trajectors of inclusions with different diameters and relative densities of 0.5 in the molten pool at different times



(a)运动轨迹　　(b)熔池温度场、液态熔池以及成分分布

图 2 不同直径、相对密度 1 夹杂物在不同时刻熔池中的运动轨迹

Fig.2 The trajectors of inclusions with different diameters and relative densities of 1 in the molten pool at different times

与熔液相当(夹杂物相对密度为 1)时,夹杂物会进入到熔液内部一定深度。随着熔炼过程的进行,夹杂物出现的位置也不同,且不同直径的夹杂物在熔炼相同时刻进入熔池的深度不同。尤其当夹杂物直径较小(2 mm)时,其运动位置随着熔池加深而加深,一般会出现在熔池底部(约铸锭头部向下 700 mm 范围),在铸锭的横截面上,其主要集中在 1/2 半径处。由于熔池底部和边部温度较低,当这些夹杂物运动到这些位置时极有可能形成缺陷,因此这类夹杂物最危险,极易形成冶金缺陷。当直径较大时,夹杂物到达深度约为熔池一半,且其位置主要分布在铸锭头部和边部,未能到达熔池底部。夹杂物直径为 2 mm 的铸锭凝固后成分分布如图 2(b)所示,可见其最终出现的位置与 TC4 钛合金中 Al、V 元素开始偏析加重的位置基本重合。

图 3 为不同直径、相对密度 2 夹杂物在不同时刻熔池中的运动轨迹。可以看到,当夹杂物相对密度大于熔液密度(夹杂物相对密度为 2)时,无论在熔炼的哪个阶段,夹杂物均会沿熔池 1/2 半径位置深入熔池底部,若夹杂物熔点较低,这种情况下大部分可以熔解,不会造成质量隐患。若夹杂物熔点较高,一般会在熔池底部形成高密度夹杂,形成冶金缺陷。

综上所述,不同密度不同规格的夹杂物在熔炼不同阶段均能呈现出不同的运动轨迹。这些主要与熔炼过程不同阶段熔池内的温度分布和流场分布相关,因此,判断夹杂物是否可能对铸锭质量造成影响,需要分类而定。

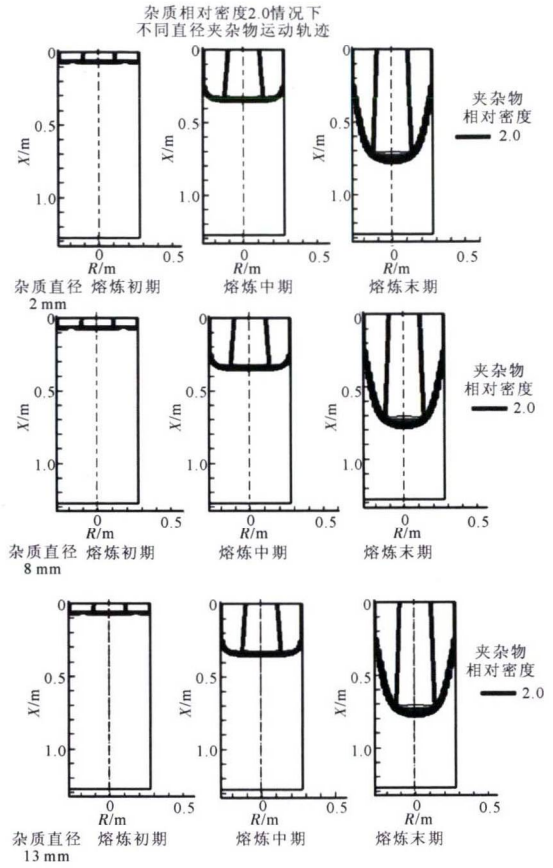


图 3 不同直径、相对密度 2 夹杂物在不同时刻熔池中的运动轨迹

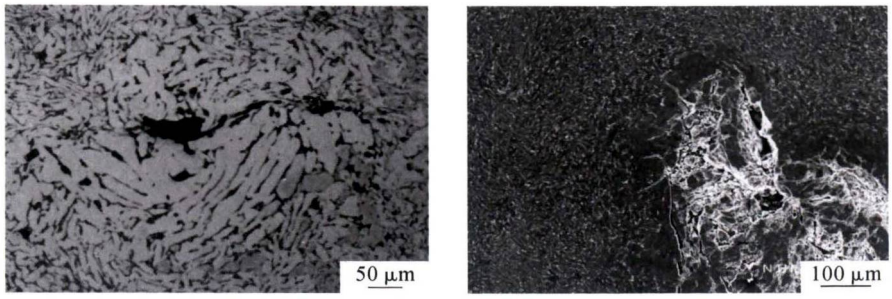
Fig.3 The trajectors of inclusions with different diameters and relative densities of 2 in the molten pool at different times

2.2 添加海绵钛夹杂物的熔炼实验结果

选取 1 支 TC4 钛合金 ϕ 250 mm×1 500 mm 的棒材,在距底部 750 mm 处锯切,并在锯切位置沿横截面面中心加工直径 ϕ180 mm 深度为 50 mm 的孔,在该位置填充海绵钛颗粒之后,最后将该两节物料焊接作为电极棒进行熔炼。

熔炼至填充海绵钛位置(距原始电极棒底部约 750 mm)时,熔池弧光变暗并出现较大波动,对应可以看到海绵钛颗粒进入熔池。熔炼获得的铸锭采用快锻机经高温锻造、表面车光成 ϕ85 mm 棒坯。对棒坯进行超声波探伤检查,在距相对铸锭底部 70~140 mm 内发现明显反射信号,该异常区域与熔炼过程中海绵钛颗粒掉落的位置基本对应。分析其原因,可能由于掉料位置位于铸锭中下部,该阶段熔池的整体温度较低,海绵钛颗粒掉入熔池后,熔化效果较差。

棒坯探伤后,在超声波探伤异常区域采用线切割取样,进行了金相及扫描电镜观察(见图 4)。从金相照片结果可见,缺陷部位组织与正常部位相差明显,缺陷呈孔洞伴随裂纹出现,在缺陷周围分布一圈



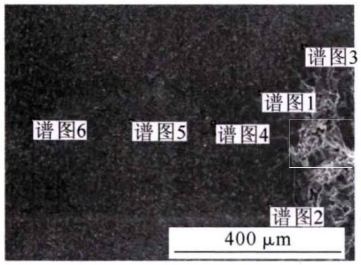
(a)OM (b)SEM

图 4 棒材探伤异常区域的金相分析

Fig.4 Metallographic analysis of UT abnormal areas in TC4 alloy bar

亮白 α 相，形貌呈粗大长条状，由缺陷区至正常区 α 相含量及尺寸逐渐减小。缺陷形貌的 SEM 照片可见，探伤异常区域存在较明显的凹坑，凹坑内高低不平，且伴随有熔炼后锻造过程引发的裂纹；缺陷周边有大量 α 相，并逐渐过渡至正常区域。

另外，通过 EDS 对缺陷位置、正常位置及二者过渡区域进行成分差异对比，如图 5 所示，发现在缺陷内部 Al、V 含量较低，缺陷边缘大块 α 相区域表现为富 Ti、贫 Al、V 的状态，这与实验电极棒中添加海绵钛作为模拟夹杂物的结果一致。



项目	Al(%)	Ti(%)	V(%)
谱图1	2.97	95.64	1.39
谱图2	3.69	94.79	1.52
谱图3	3.14	95.87	1.00
谱图4	4.60	92.11	3.29
谱图5	5.10	91.19	3.71
谱图6	5.11	90.81	4.08

图 5 棒坯不同区域 EDS 分析结果对比

Fig.5 Comparison of EDS analysis results in different regions of bar

3 结论

(1)VAR 熔炼过程中，不同密度不同规格的夹杂物在熔炼不同阶段呈现出不同的运动轨迹。掉渣、掉块夹杂物等异常情况造成的冶金风险，在熔炼不同阶段需要根据夹杂物的密度和直径进行评估。

(2)TC4 钛合金 VAR 熔炼过程中出现大块海绵钛夹杂物掉渣、掉块时，经过一次 VAR 熔炼很难保证成分的均匀性，冶金风险较大。

参考文献：

[1] 陈显明. 钛合金熔炼与铸造技术新进展[J]. 肇庆学院学报, 2010, 31(2): 20-25.

[2] 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.

[3] 张喜燕，赵永庆，白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[4] 王向东，逯福生，贾翊，等. 中国钛行业发展的思考[J]. 中国金属通报, 2010 (7): 38-39

[5] 何春艳，祝建雯，朱康平. 浅析原材料对钛合金冶金质量的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 309-312.

[6] 沈海军，王 宁，张 戈. 钛及钛合金中硬 α 夹杂及其去除方法[J]. 上海金属, 2010, 32(2): 38-45.

[7] Aircraft accident report-united airlines flight 232 McDonnell douglas DC-10-10 sioux gateway airport: NTSB/AAR-SO/06 [R]. Washington: National Transportation Safety Board, 1990: 49-55.

[8] 罗文忠，赵小花，刘鹏，等. 采用数值模拟方法分析影响 VAR 熔炼钛合金铸锭表面质量的因素 [J]. 稀有金属与工程, 2020,49 (3): 927-932.

[9] 高平，赵永庆，毛小南，等. 钛合金铸锭偏析规律的研究进展[J]. 钛工业进展, 2009, 26(1): 1-5.

[10] 章锦如. TC4 钛合金中的偏析. 稀有金属材料与工程[J]. 1980，9 (6)：17-21.

(上接第 769 页)

参考文献：

[1] SHAPOVALOV V I. Method for manufacturing porous articles [P]. US Pat, 5181549, 1993.

[2] ZHANG H W, CHEN L T, LIU Y, et al. Experimental study on heat transfer performance of lotus-type porous copper heat sink [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 56: 172.

[3] ALVAREZ K, HYUN S K, NAKANO T, et al. In vivo osteocompatibility of lotus-type porous nickel-free stainless steel in rats [J]. Materials Science and Engineering C, 2009, 29: 1182.

[4] YAMAMURA S, SHIOTA H, MURAKAMI K, et al. Evaluation of porosity in porous copper fabricated by unidirectional solidification under pressurized hydrogen [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 318: 137.

[5] LIU Y, LI Y X. A theoretical study of Gasarite eutectic growth [J]. Scripta Materialia, 2003, 49: 379.

[6] LI Z J, JIN Q L, YANG T W, et al. A thermodynamic model for directional solidification of metal-hydrogen eutectic [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50: 507.

[7] KASHIHARA M, YONETANI H, KOBI T, et al. Fabrication of lotus-type porous carbon steel via continuous zone melting and its mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 524: 112-118.

[8] NAKAJIMA H, IKEDA T, HYUN S K. Fabrication of lotus-type porous metals and their physical properties [J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6: 377-384.

[9] HYUN S K, IKEDA T, NAKAJIMA H. Fabrication of lotus-type porous iron and its mechanical properties [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2004, 5:201-205.

[10] TRINKAUS H, SINGH B N. Helium accumulation in metals during irradiation-where do we stand? [J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 232(2): 229-242.

[11] PARK J S, HYUN S K, SUZUKI S, et al. Fabrication of lotus-type porous Al-Si alloys using the continuous casting technique [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2009, 40(2): 406-414.

[12] 沈春飞，蒋兴元，李阳，等. 奥氏体不锈钢中氮溶解度的热力学计算和实验研究[J]. 特殊钢，2010, 31(5): 1-4.

[13] 李再久. Gasar 多孔铜(合金)的气孔结构及其力学性能研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2014.