

# 净铝器石墨搅拌机构高温失效分析及数值模拟

冯艺,楼华山,李宏军,阙燚彬,莫文峰

(柳州职业技术学院 汽车工程学院,广西 柳州 545006)

**摘要:**为分析净铝器石墨搅拌机构的失效特性,利用流体软件 Fluent 中的多重参考系法、流体体积函数和标准的湍流模型对搅拌炉内铝液和气体流动进行数值模拟,获得净铝器搅拌过程中的流体运动特性,通过试验进行验证。结果表明:铝液槽内搅拌叶轮附件区域流速最大,石墨搅拌叶轮外边缘存在应力集中,铝液槽内气-液交界处存在气体积聚现象。结合实际试验,石墨搅拌机构高温失效特性主要在气-液交界处和浸入铝液区,气-液交界处因氧化气体聚集,其失效特性主要为氧化磨损;铝液区,石墨棒反复提起和浸入铝液,造成较大温度差,其主要是石墨氧化和残余拉应力共同作用而导致开裂失效。

**关键词:**石墨棒;高温性能;数值模拟;残余拉应力

**中图分类号:**TF82 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-00102-03

## Failure Analysis and Numerical Simulation of Graphite Stirring Mechanism of Aluminum Purifier at High Temperature

FENG Yi, LOU Huashan, LI Hongjun, QUE Yibin, MO Wenfeng

(School of Automotive Engineering, Liuzhou Vocational and Technical College, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** To analyze the failure characteristics of graphite stirring mechanism of aluminum purifier, the flow of liquid aluminum and gas in stirring furnace was numerically simulated by using multiple reference frame method, fluid volume function and standard turbulence model in fluid software Fluent. The distribution characteristics of flow field and stress in the stirring process of aluminum purifier were obtained. The results show that the flow velocity in the attachment area of the stirring impeller in the aluminum tank is the largest, stress concentration occurs at the outer edge of the graphite stirring impeller and gas accumulates at the gas-liquid interface in the aluminum tank. Combined with the actual test, the high-temperature failure characteristics of graphite stirring mechanism mainly emerges at the gas-liquid interface and the area immersed in aluminum liquid. Due to the accumulation of oxidizing gas at the gas-liquid interface, the failure characteristics mainly takes on oxidative wear. In the molten aluminum area, the graphite rod is repeatedly lifted and immersed in the molten aluminum, resulting in a large temperature difference, which is mainly caused by the joint action of graphite oxidation and residual tensile stress.

**Keywords:** graphite rod; high temperature performance; numerical simulation; residual tensile stress

## 0 引言

利用铝合金材料代替钢铁金属材料是汽车轻量化设计中常见的举措,也是国家推行节能减排的有效措施之一<sup>[1-2]</sup>。对于所替代的铝合金材料应当保障其强度、硬度等使用性能不变。目前,国内外学者的研究主要集中在对铝合金材料的脱硫、脱氢工艺的研究,即在铝合金熔炼制造过程中通过对铝液的搅拌,然后通入氮气等氧化气体,使得高温下与氢、硫离子产生化学反应以去除有害杂质<sup>[3-5]</sup>。对于搅拌石墨碳棒的高温失效特性研究,国内外较少有相应的报道。因铝合金熔化温度较高及高温氧化反应激烈,搅拌石墨碳棒常在使用过程中产生氧化反应而失效,影响了铝合金材料的熔炼性能<sup>[6-9]</sup>。

为了分析净铝器石墨搅拌机构的失效特性,本文综合石墨碳棒高温失效影响因素下,利用流体软件 Fluent 中的多重参考系法(MRF)、流体体积函数(VOF)和标准的湍流模型对搅拌炉内铝液和气体流动进行了数值模拟,获得了净铝器搅拌过程中的流场分布特点。结合石墨棒高温试验,分析石墨搅拌棒的高温失效原因,以期对设备和工艺的改进提供参考。

## 1 石墨搅拌机构的高温数值模拟

### 1.1 计算流体力学理论分析

假设石墨棒搅拌器槽内的铝液流体和空气为不可压缩模型,选用流体体积函数模型对石墨棒搅拌器槽内的流场进行数值模拟。遵循能量守恒方程:

**基金项目:**2021年度广西高校中青年教师基础能力提升项目(2021KY1035,2021KY1047);2021年柳州市科技局重大科技攻关项目(柳科2021AAD0103)

**第一作者简介:**冯艺(1977—),男,广西贵港人,副教授,硕士,研究方向为高性能轻合金材料应用技术,747302064@qq.com。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k}{c_p} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T \quad (1)$$

式中: $\rho$ 表示铝合金液态下的密度; $\mu$ 表示铝液流动黏稠程度; $k$ 是铝合金的热传导系数; $T$ 表示旋转铝液温度; $c_p$ 表示流场流量; $S_T$ 表示黏性。

文中的铝液流体是变化不定的,所以计算模型选用了湍流模型( $k-\varepsilon$ ),湍流模型相对于其他液体流动形态,具有适应性强、计算精度控制性好的特点。湍流的动能计算方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3)$$

式中: $G_k$ 表示层流速度梯度下的湍流动能; $G_b$ 表示浮力产生的湍流动能; $Y_m$ 表示扩散的波动;常数 $G_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $G_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $G_{3\varepsilon} = 0.09$ ;  $S_k$ ,  $S_\varepsilon$ 表示源相。

## 1.2 计算模型

为了搅拌过程与实际情况一致性,本次模拟石墨搅拌棒的结构如图1所示,石墨搅拌棒总长1000mm、直径60mm,共设置8片叶片,叶片厚度80mm、直径160mm,石墨棒搅拌过程中浸入铝液深度600mm。

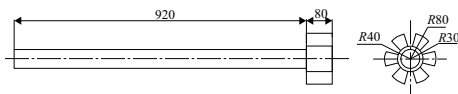


图1 石墨棒结构

铝液流体搅拌区结构如图2所示。为了更好地了解

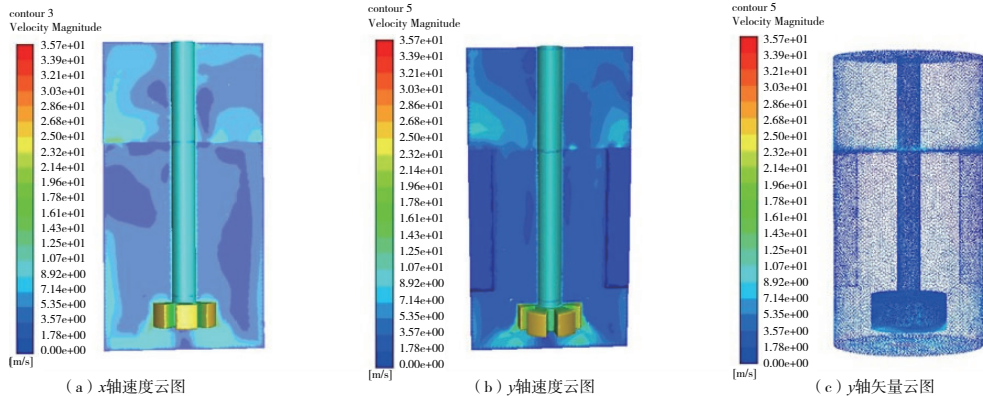


图3 石墨棒搅拌器流体速度云图

## 2 搅拌机构石墨棒的高温失效试验

### 2.1 试验装置

本次试验采用了搅拌熔炼炉,熔化铝液温度达720℃,石墨棒搅拌器通过从转熔炼炉上盖浸入熔化铝液进行搅拌,搅拌叶片转速为500r/min,每次搅拌时间8min,搅拌间隔30min,反复循环2000次,观看石墨棒搅

拌的高温失效特性。把流体区域分为铝液的转动区域和搅拌过程中带动空气的转动区域,铝液中放入挡板改善铝液的转动流向,以减少铝液转动过程中的共振引起铝液上下波动。铝液搅拌中,熔化温度为720℃,搅拌时间约为8min。

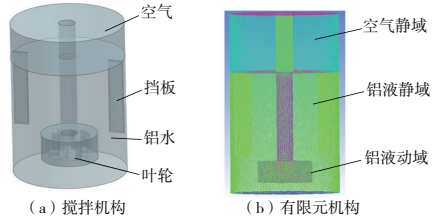


图2 流体域模拟结构及有限元网格

本文采用的搅拌机构划分为3个计算区域:铝液流体静域、空气静域和铝液动域。计算域结构存在倒角、结构不规则,有限元分析网格采用了非结构四面体网格划分,共1045101个网格单元,186409个网格节点。网格划分完成后,通过装配网格形式导入Fluent软件进行求解。计算采用多重参考系法、流体体积函数、标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型对搅拌机构进行数值模拟,通过计算迭代2000步得到稳态计算结果,分析出搅拌器流场分布特点。

### 1.3 计算结果

石墨棒搅拌器流体速度云图如图3所示,铝液搅拌区域流体转动呈现向叶轮中心聚集靠拢,越接近石墨搅拌叶轮边缘转速越快。空气区域搅拌机构处于封闭熔炼炉运动,因铝液的旋转运动,同时带动了空气的转动,并向气-液交界处汇聚在搅拌棒周围,形成旋转气流,即在气-液交界面石墨棒周围形成气流积聚,加快了石墨棒的高温氧化现象。石墨棒叶轮外边缘由于切割水流,形成了较大的应力集中,高温下加快了叶轮的磨损失效。

拌的高温失效特性。

### 2.2 试验结果分析

石墨棒搅拌器高温失效如图4所示,石墨棒搅拌器主要失效发生在:a点区域,即石墨棒高温搅拌过程中铝液与空气交界处;b点区域,即浸入高温熔炼铝液的石墨棒空气冷却过程中裸露于空气接触区域。

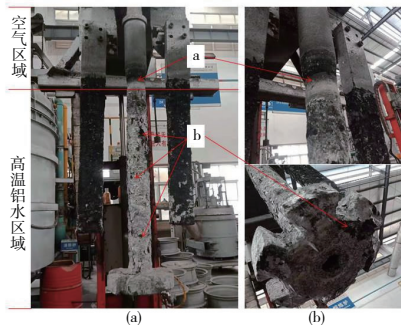


图4 石墨棒搅拌器高温失效试验结果

a点铝液与空气交界处,石墨棒搅拌器直接与空气产生接触,由于石墨棒在气-液界面与高温熔铝合金接触处温度高达720℃,温度随远离气-液界面迅速降低到400℃以下形成较大温度梯度。石墨高温一般超过500℃以上存在较强高温氧化反应,形成了CO<sub>2</sub>或CO气体,并且温度越高氧化速度越快<sup>[10]</sup>,在较大的切应力作用下石墨棒产生了高温磨损。由上述数值模拟结果表明,由于石墨棒搅拌高温熔铝形成旋转气流,在气-液界面处形成

气流集中和加速,同时石墨棒在气-液界面的温度差产生变应力以及气-液旋转产生的切变应力差,加速a点区的高温磨损。因此a点区是石墨棒高温失效危险区,特别是转轴与液面相接触部位的工况异常恶劣。同时,也验证了本文对石墨棒搅拌器数值模拟的正确性。

b点区域石墨棒搅拌过程中浸入熔化的铝水中,与空气进行了隔绝,氧化保护较好。但是,熔炼期间,需要将石墨转子反复从铝合金熔池提升,暴露在空气中。石墨材料具有多孔特性,且大多孔隙彼此相通(图5)。这些孔隙使得氧气很容易侵入石墨材料内部,导致组织变得疏松,而造成结构性破坏<sup>[11-13]</sup>。同时,石墨棒静止冷却过程中表面粘附了熔化铝的快速凝固层,铝合金与石墨棒的热膨胀系数差别,同时冷却过程中的温度梯度,使得石墨棒表面存在了较大的残余拉应力。因熔化铝的重力作用,铝合金在石墨棒表面凝固厚度不均,残余拉应力变化较大,而且部分区域暴露与空气接触,产生了高温氧化。因此,b点区域石墨棒搅拌器的高温失效主要是残余拉应力和石墨高温氧化共同作用的结果,失效形式以石墨棒的开裂失效为主,呈现出麻花形态(图5(b))。

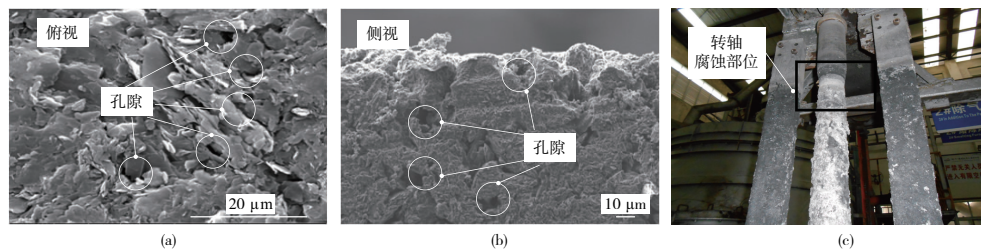


图5 多孔性石墨结构图

### 3 结语

通过利用有限元仿真软件ANSYS模拟石墨棒搅拌器旋转流场以及高温应力分布,结合对石墨棒搅拌器的试验的结果表明:石墨棒搅拌过程中气-液界面存在空气流聚集和温度梯度差,石墨棒在该区域主要为氧化磨损失效;搅拌区域的石墨棒的失效主要是静止冷却过程中高温凝固的铝合金与石墨棒的热膨胀系数差和温度梯度差,石墨棒开裂是该区域的主要失效形式。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG L F, LUE X W, TORGERSON A T, et al. Removal of impurity elements from molten aluminum: a review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2011, 32 (3): 150-228.
- [2] SATERNUS M, MERDER T. Physical modelling of aluminum refining process conducted in batch reactor with rotary impeller [J]. Metals, 2018, 8(9): 726.
- [3] 姚晨明,石秀东,彭晶鑫.基于CFD的不同搅拌组合多相流场研究[J].轻工机械,2021,39(4):20-25.
- [4] 殷俊杰,刘雪东,周成奇,等.大型圆筒罐体侧壁搅拌过程流场分析与测量[J].化学工程,2021,49(8):73-78.
- [5] 龚昌运,但斌斌,牛清勇,等.搅拌器磨损对KR法脱硫搅拌效果的数值分析[J].材料与冶金学报,2021,20(2):97-103,143.
- [6] 李春华,黄可龙,李效东,等.炭材料高温抗氧化研究进

展[J].材料导报,2004,18(2):56-58.

- [7] WALKER P L Jr, TAYLOR R L, RANISH J M. An update on the carbon-oxygen reaction [J]. Carbon, 1991, 29(3): 411-421.
- [8] INAGAKI M, KANG F Y, TOYODA M, et al. Advanced Materials Science and Engineering of Carbon [J]. Materials Science & Engineering of Carbon Fundamentals, 2014, 25(6): 519-525.
- [9] TANG J, SALUNKHE R R, LIU J, et al. Thermal conversion of core-shell metal-organic frameworks: a new method for selectively functionalized nanoporous hybrid carbon [J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137(4): 1572-1580.
- [10] KHAN F R, RIELLY C D, BROWN D A R. Angle-resolved stereo-PIV measurements close to a down-pumping pitched-blade turbine [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(9): 2799-2806.
- [11] MANIRUZZAMAN M, MAKHLOUF M. Mathematical modeling and computer simulation of the rotating impeller particle flotation process: part II. Particle agglomeration and flotation [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2002, 33(2): 305-314.
- [12] WARKE V S, SHANKAR S, MAKHLOUF M M. Mathematical modeling and computer simulation of molten aluminum cleansing by the rotating impeller degasser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(1): 119-126.
- [13] MORI K, OZAWA Y, SANO M. Characterization of gas jet behavior at a submerged orifice in liquid metal [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1982, 22(5): 377-384.

收稿日期:2022-07-04