

# 铝合金熔体旋转喷吹除气净化过程模拟

李杰华 郝启堂 杨光昱  
(西北工业大学材料科学与工程学院)

**摘要** 采用计算机模拟方法对铝合金熔体旋转喷吹除气净化过程的温度场以及流场进行分析。结果表明,在转杆内部放置一个导气管,可以显著降低气体温度,从而可以有效地解决旋转喷头由于熔剂因高温变软而堵塞的问题;旋转速度和进气流量对铝合金熔体旋转喷吹除气净化效果具有重要影响,应该根据具体情况选择合适的工艺参数。熔池为方形结构时,气体主要从对角处出去,而远离对角处的体积分数却显著降低,甚至可能发生吸气。

**关键词** 铝合金熔体;旋转喷吹;除气;模拟

**中图分类号** TG146.2<sup>+</sup>1;TP391.9

**文献标志码** A **文章编号** 1001-2249(2007)02-0100-04

铝合金熔体净化处理是生产高品质铝合金铸件的基本保证措施之一,也是提高铝合金综合性能的主要手段。铝合金熔体精炼效果对疏松、气孔、夹杂等的形成具有重要影响,且直接影响铝铸件的物理性能、力学性能以及使用性能<sup>[1~3]</sup>。铝合金熔体旋转喷吹除气净化法已经成为国内外公认的铝合金熔体的高效除氢技术,受到使用者的欢迎<sup>[1~4]</sup>。本课题将对铝合金熔体旋转喷吹除气净化过程进行模拟分析,希望从各种角度加深对铝合金熔体旋转喷吹除气净化过程的认识,以期能够改善和优化铝合金熔体旋转喷吹除气净化技术。

## 1 除气净化过程的温度场模拟分析

在铝合金熔体旋转喷吹除气净化的实际生产中,最常见的也是最难解决的问题就是旋转喷头堵塞。我们

认为造成喷头堵塞的主要原因是喷吹熔剂时由于高温造成熔剂变软,从而使得熔剂粘性增大,粘附在转杆内壁上堵塞喷头。为此,首先对铝合金熔体旋转喷吹除气净化过程的温度场进行分析。

**几何尺寸设置:**旋转喷头圆盘直径为100 mm,转杆长度为800 mm,转杆外径为25 mm,壁厚为2.5 mm,导气管直径为7.5 mm,导气管壁厚为2.5 mm。使用gambit建立二维轴对称模型,并划分网格(85 696个单元),读入fluent6.2中。模型采用稳态轴对称模型,粘性方程采用标准 $k-\epsilon$ 双方程模型,近壁面采用标准壁面函数处理。由于气体密度很小,而且固体又暂不考虑流动,所以忽略重力加速度。

**边界条件:**网格分为流体区域和固体区域。流体与固体区域分界面设置为耦合面,对流体与固体进行耦合

收稿日期:2006-11-06

第一作者简介:李杰华,男,1979年出生,博士研究生,西北工业大学材料科学与工程学院,西安(710072),电话:029-88493135,13032980772,E-mail:lijiehua2008@126.com

## 3 结论

(1) 恒压模式微弧氧化处理能够在Ti表面形成微孔,原位生成新的包含钙磷的TiO<sub>2</sub>膜层。

(2) 低压处理获得小孔径和锐钛矿型TiO<sub>2</sub>为主的膜层,钙磷含量和钙磷比较低,并且微孔内的钙磷含量少于膜层表面。

(3) 随着阳极电压的升高,膜层的孔径增大,金红石型TiO<sub>2</sub>增多,钙磷含量和钙磷比增大。高压处理时微孔内的钙磷含量与膜层表面相当。提高微弧氧化恒压电压,可以促进Ti氧化反应。

### 参 考 文 献

- [1] SONG W H, JUN Y K, HAN Y, et al. Biomimetic apatite coatings on micro-arc oxidized titania [J]. *Biomaterials*, 2004, 25: 3 341-3 349.
- [2] LIANG B J, FUJIBA YASHI S S, NEO M S, et al. Histological and mechanical investigation of the bone-bonding ability of anodically

oxidized titanium in rabbits [J]. *Biomaterials*, 2003, 24: 4 959-4 966.

- [3] SUL Y T. The significance of the surface properties of oxidized titanium to the bone response: special emphasis on potential biochemical bonding of oxidized titanium implant [J]. *Biomaterials*, 2003, 24: 3 893-3907.
- [4] ZHU X L, KIM K H, JEONG Y S. Anodic oxide films containing Ca and P of titanium biomaterial [J]. *Biomaterials*, 2001, 22: 2 199-2 206.
- [5] HAN Y, HONG S H, XU K W. Structure and in vitro bioactivity of titania-based films by micro-arc oxidation [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 168: 249-258.
- [6] HUANG P, ZHANG Y, XU K W, et al. Surface modification of titanium implant by microarc oxidation and hydrothermal treatment [J]. *Biomedical Materials Research*, 2004, 70B(2): 187-190.
- [7] 黄平,徐可为,憨勇. 钙、磷在钛表面微弧氧化层中的存在形式及进入机制 [J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(9): 1 184-1 188.
- [8] 黄平,徐可为,憨勇. 富含钙磷的多孔氧化钛膜及其生物活化机理 [J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(12): 1 449-1 454.
- [9] 马楚凡,李冬梅,蒋百灵,等. 钛种植体表面微弧氧化生物改性的研究 [J]. *第四军医大学学报*, 2004, 25(1): 4-7.

(编辑:张春明)

计算。转杆与流体接触面设置为静止面,温度为 725 K。气体入口为速度入口,设定速度为 1 m/s,温度为 300 K。出口压力设为 16.314 kPa。对求解的方程组(流动方程、紊流方程和能量方程)离散均采用 2 级迎风格式,对离散方程求解采用 Simplec 算法,残差设置为 0.000 1,计算直到收敛,计算结果见图 1。

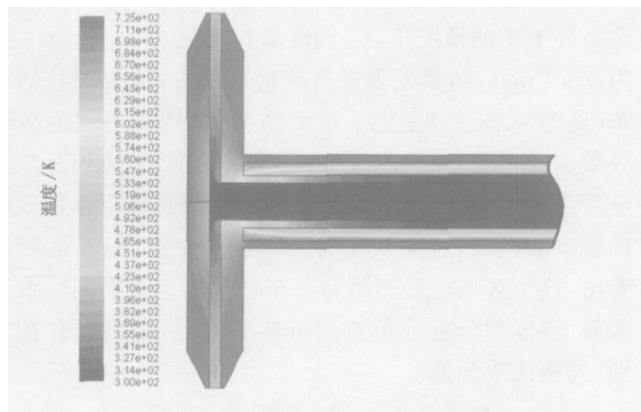


图 1 气体入口速度为 1 m/s,沿轴纵截面温度场分布

可以看出,转杆外围表面温度很高,而在转杆内部放置一个导气管,可以显著降低气体温度;在转盘中的气体温度在流出转盘的过程中,温度还是逐渐升高的,只能够通过减小转盘的直径来调整。

## 2 除气净化过程的流场模拟分析

### 2.1 转速对除气净化过程的影响

为了了解铝合金熔体旋转喷吹除气净化过程中熔体内部的情况,采用计算机模拟的方法对不同工艺条件下铝合金熔体内部压力分布、体积分数分布以及速度流场进行了研究。

首先考虑圆柱槽形熔池,熔池高为 300 mm,直径为 300 mm,旋转喷吹组件距底面 35 mm,喷头底盘直径为 100 mm,盘厚为 15 mm,盘上突出 8 个边长为 5 mm 的正方形气流出口,转杆直径为 25 mm。

假设气体是不可压缩的,温度场对气体体积分数影响很小,氩气和铝熔液的粘性系数为定值。为了使用多坐标系(MRF),把流体区域用直径为 200 mm 的圆柱面分为两部分,靠近转杆的部分为内流区,设定参考系旋转轴,并设置旋转速度为 300 r/min;转杆外围的部分为外流区,使用默认设置,即绝对参考系。铝合金熔体的密度为 2 300 kg/m<sup>3</sup>,粘度系数为 0.002 9 Pa·s;氩气的密度为 1.628 8 kg/m<sup>3</sup>,粘度系数为 0.00 002 125 Pa·s。设定主相为铝合金熔体,第二相为氩气,重力加速度为 9.8 m/s<sup>2</sup>。压力出口(铝合金熔体上表面)设置为 101.325 kPa,其他参数采用默认设置(一般其他出口参数不影响最终计算结果)。外壁面和熔池底面(铝合金熔体与熔池的接触面)设定为绝对速度 0,即静止壁面。内壁

面(铝合金熔体与转杆的接触面)设定为相对速度 0,即相对于旋转参考系的速度为 0。气体入口速度设置为 0.02 m/s,气体体积分数设置为 100%。对所要解的方程组(流动方程、体积分数方程、滑移速度方程和紊流方程)离散化均采用一级迎风格式,解离散方程组使用 Simplec 算法,取沿轴纵截面和圆形转盘的横截面进行分析。

转速较高(300 r/min)时,转杆周围的体积分数并不是很大,而远离转杆(熔池壁周围)的体积分数却较高(见图 2、图 3)。主要是因为转速较高时,出口的气流扬程较大,可以在水平直线方向上运动较远的距离。同时,也可以看出,在转盘的下面也有一个体积分数比较大的区域,这点从压力分布图(见图 4)上很容易看出,这个区域是一个低压区,气体容易进入,而在同一水平截面上,体积分数分布差别不大。

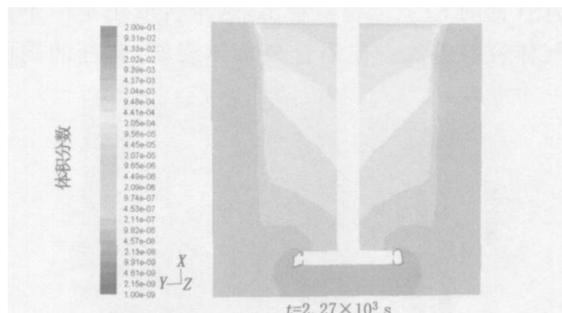


图 2 300 r/min 时铝熔体沿轴纵截面体积分数分布

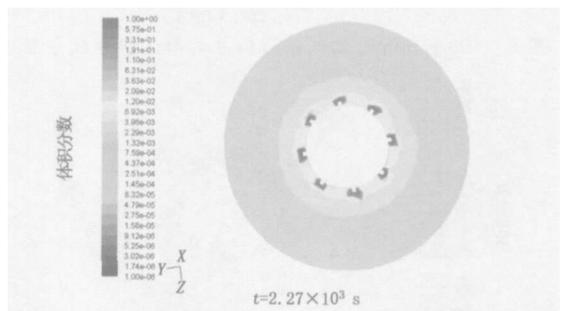


图 3 300 r/min 时圆形转盘的铝熔体横截面体积分数分布

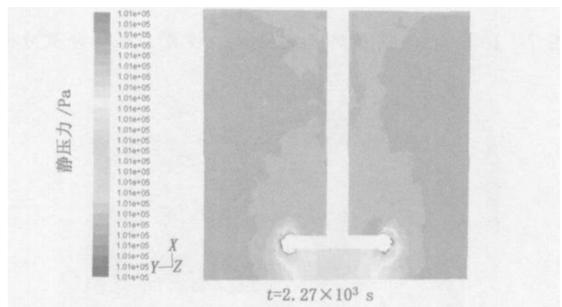


图 4 300 r/min 时铝熔体沿轴纵截面压力分布

从流场速度分布图(见图 5)可以看出,转杆周围的流场分布比较密集,而远离转杆(熔池壁周围)的流场却较稀疏,而且还存在漩涡。同时,也可以看出,在转盘的下面流场比较稀疏,这和压力分布以及体积分数分布是符合的。

当转速从 300 r/min 降低为 100 r/min 时,由模拟

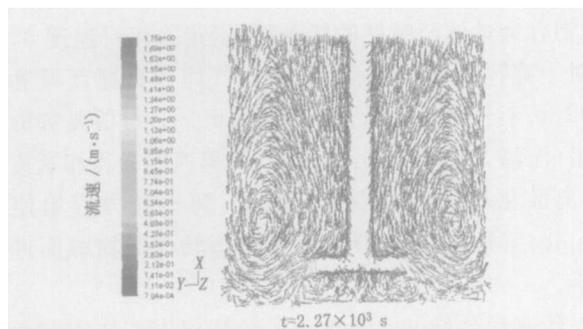


图5 300 r/min时铝熔体沿轴纵截面速度分布

结果可以看出,转速降低时,体积分数的分布(见图6、图7)发生了较大的变化,转杆周围的体积分数还不是很大,而远离转杆(圆柱槽壁周围)的体积分数却有所降低。原因主要还是转速降低时,出口的气流扬程降低,而扩散可以更加充分地进行。同时,也可以看出,在转盘的下面仍有一个体积分数比较大的区域,这点从压力分布图(见图8)上也容易看出,这个区域仍是一个低压区,气体容易进入。在铝合金熔体表面,转杆的周围有

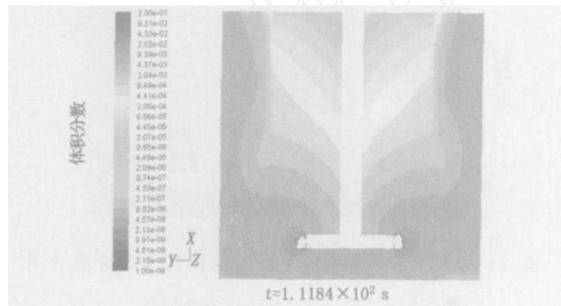


图6 100 r/min时铝熔体沿轴纵截面体积分数分布

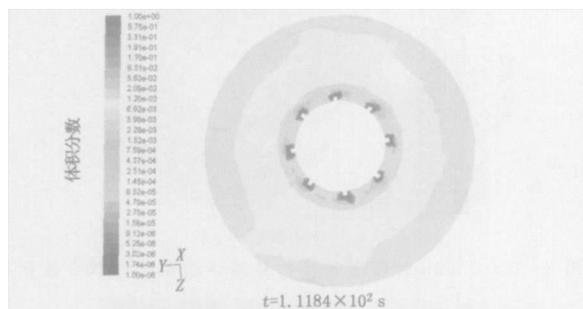


图7 100 r/min圆形转盘的铝熔体横截面体积分数分布

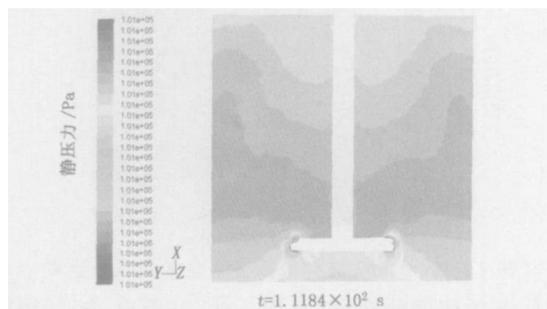


图8 100 r/min时铝熔体沿轴纵截面压力分布

一个区域体积分数非常低,同时从压力分布图(见图8)上也可以看出,这是一个低压区,因此比较容易吸气。而在同一水平截面上,体积分数分布差别虽然不大,但是已经存在差别,周围比中间低。因此,在铝合金熔体旋转喷吹除气净化过程中,旋转速度是一个非常重要的

工艺参数。速度太高,会产生液面翻腾,加重吸气倾向,不利于除气净化效果的提高;速度太低,无法充分发挥旋转喷吹除气净化的优势,而且也会在转杆周围液面产生吸气。

## 2.2 气流出口速度对净化效果的影响

为了考察进气流量的影响,在转速为100 r/min、其他条件不变的情况下,把气流出口速度由0.02 m/s变为0.10 m/s,结果发现进气流量增加时,体积分数的分布(见图9、图10)发生了很大的变化,转杆周围的体积分数变得很大,而远离转杆(熔池壁周围)的体积分数却显著降低。同时,在转盘的下面已经没有那个体积分数比较大的区域,这点从压力分布图(见图11)上也容易看出,这个区域已经不再是一个低压区。而在同一水平截面上,体积分数分布差别虽然不大,但是已经存在差别,周围比中间低。

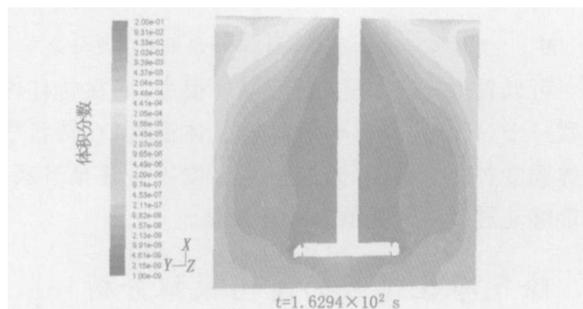


图9 0.10 m/s时铝熔体沿轴纵截面体积分数分布

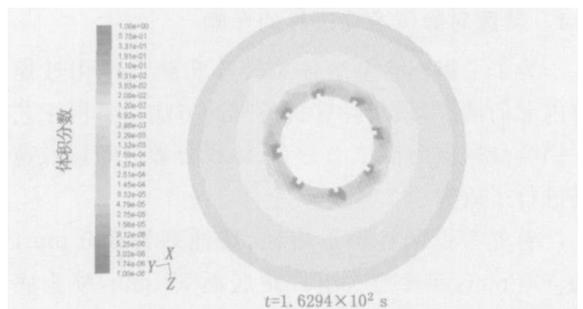


图10 0.10 m/s时圆形转盘铝熔体横截面体积分数分布

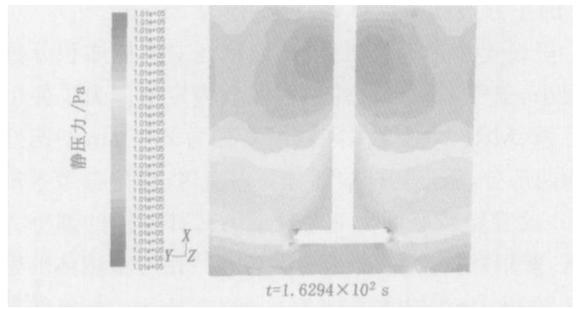


图11 0.10 m/s时铝熔体沿轴纵截面压力分布

因此,在铝合金熔体旋转喷吹除气净化过程中,进气流量也是一个非常重要的工艺参数,进气流量太高,会产生合泡现象,无法得到均匀、弥散的细小气泡,不利于净化气体除气效果的发挥;速度太低,也无法得到大量的细小气泡。应该和旋转速度相对应,选择一对合适的、相匹配的工艺参数。

### 2.3 熔池形状对除气净化效果的影响

为了考察熔池形状的影响,在旋转速度为 100 r/min、气流出口速度为 0.02 m/s、其他条件不变的情况下,把圆柱形熔池变为方形熔池。结果发现,圆柱形熔池变为方形熔池时,体积分数的分布(见图 12、图 13)发生了很大的变化,气体主要从对角处出去,而远离对角处的体积分数却显著降低,甚至可能发生吸气。这些从流场速度分布(见图 14、图 15)方面也可以看出,对角处

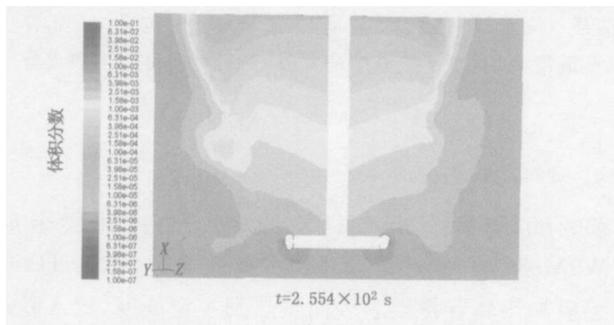


图 12 转速为 100 r/min、气流出口速度为 0.02 m/s 时方形熔池沿轴对角纵截面体积分数分布

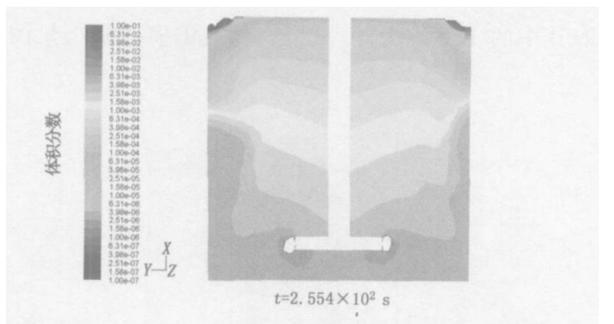


图 13 转速为 100 r/min、气流出口速度为 0.02 m/s 时方形熔池内铝熔体沿轴纵截面体积分数分布

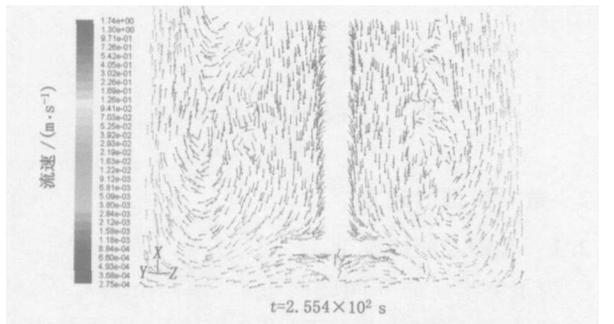


图 14 转速为 100 r/min、气流出口速度为 0.02 m/s 时方形熔池内铝熔体沿轴对角纵截面速度(流场)分布的速度场向上,而远离对角处的速度发生回转,速度场向下。这表明在设计熔池时可以考虑方形结构,同时在方形熔池上面加上圆形密封盖,有效避免大气中水分进入熔池,加重吸气倾向,污染铝合金熔体,同时也可以有效地把用过的气体通过方形熔池的对角处排出熔池。

### 3 结论

(1) 在转杆内部放置一个导气管,可以显著降低气体温度,从而可以有效地解决旋转喷头由于熔剂因高温

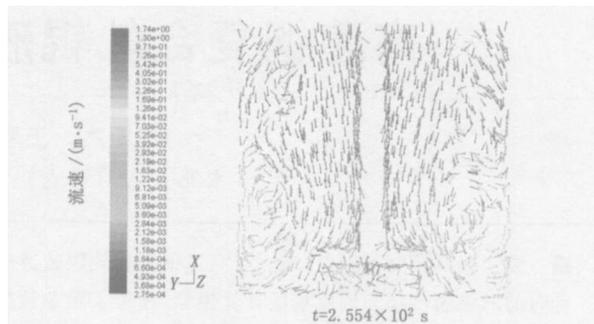


图 15 转速为 100 r/min、气流出口速度为 0.02 m/s 时方形熔池内铝熔体沿轴纵截面速度(流场)分布变软而堵塞的问题。

(2) 旋转速度和进气流量对铝合金熔体旋转喷吹除气净化效果具有重要影响,应该根据具体情况选择一对合适的工艺参数。

(3) 熔池为方形结构时,气体主要从对角处出去,而远离对角处的体积分数却显著降低,甚至可能发生吸气。

### 参 考 文 献

- [1] 杨长贺,高钦. 有色金属净化[M]. 大连:大连理工大学出版社,1989.
- [2] 傅高升,康积行. 铝熔体净化的理论基础及净化技术的发展现状[J]. 有色金属加工,2001,30(6):20-27.
- [3] 郭京利,肖文丰,季代杰,等. 旋转喷吹铝液净化工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2005,25(2):120-122.
- [4] 韩奎,毛协民,欧阳志英,等. 稀土元素在铸铝熔体除气净化过程中的行为[J]. 特种铸造及有色合金,2004(2):61-62.
- [5] 韩建德,边秀房,孙益民,等. 一种新型铝熔体净化设备的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2004(3):64-65.

(编辑:张正贺)

### 2007 中国铸造活动周 10 月在武汉举行

2007 中国铸造活动周将于 2007 年 10 月在历史文化名城武汉举行。本次活动周将组织范围广泛的交流活动,现在开始征文,欢迎广大铸造界人士积极投稿并参与 2007 中国铸造活动周。

征文范围:涉及铸造领域的新理论、新观点、新技术、新材料、新工艺、新设备;铸造行业发展综述;节能环保技术与设备;测试与控制技术;管理及生产经验总结等。

联系单位:中国机械工程学会铸造分会

地址:沈阳市铁西区云峰南街 17 号 邮政编码:110022

电话:024 - 25851598 25852311 - 202

传真:024 - 25855793

网址:www.foundrynations.com

会议联系人:刘秀玲 曹阳 李大放

电子信箱:lxl@foundrynations.com

展示会联系人:刘鸿超 曹秀梅

电子信箱:lhc@foundrynations.com

**Rapid Measurement of Hydrogen Content in Magnesium Alloy Melt** Wu Shusen, Xu Sixiang, Mao Youwu, An Ping (College of Materials Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China) 2007, 27(2) 95 ~ 96

**Abstract** We have developed a system suitable for rapidly measuring hydrogen content in magnesium alloy melt by using computer and controlled circuit based on a mathematical model for measurement of hydrogen content in magnesium alloy to measure hydrogen content in AZ91 magnesium alloy. The results show that hydrogen content in AZ91 magnesium alloy is 6 ~ 14 cm<sup>3</sup> per 100 g in the condition of gas protection, increasing with temperature increase.

**Key Words :** Magnesium Alloy Melt, Hydrogen Content, Mathematical Model, Hydrogen-measuring Apparatus

**Effects of Anode Voltage on Medical Titanium Material by Microarc Oxidation** Li Wei, Chen Liuzhu, Liu Ying, Huang Yan (College of Materials Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, China) 2007, 27(2) 97 ~ 100

**Abstract** TiO<sub>2</sub> composite film containing P and Ca was prepared on surface of medical Ti materials by microarc oxidation with constant voltage. The effects of anode voltage on the morphology, phase constituent and Ca, P content in the oxide films were investigated by SEM, XRD and EDS, focusing on the Ca and P content disposition regularity in the oxide film surface and in intra-pore. The results show that the composite film is composed of mini-pore and anatase TiO<sub>2</sub> phase with lower P and Ca contents as well as Ca/P ratio, in which the Ca and P contents in the mini-pore are lower than ones in film surface with low anode voltage treatment. The mini-pore, the volume number of the rutile TiO<sub>2</sub> and the Ca and P contents as well as Ca/P ratio are increased with the increase of anode voltage. Ca and P contents in mini-pore is equivalent to ones in the film surface in case of high anode voltage treatment. The Ti oxidization reaction can be effectively promoted with increasing constant voltage. After MAO (microarc oxidation), Ti surface porous morphology, phase constituent and Ca, P contents would have an important effect on the formation of hydroxyapatite in hydrothermal synthesis treatment.

**Key Words :** Micro-arc Oxidation, Ti, TiO<sub>2</sub> Composites Film, Anode Voltage, Ca

**Simulation of Degassing and Purification Process of Molten Aluminum Alloys by Rotary Impeller** Li Jiehua, Hao Qitang, Yang Guangyu (Materials Science and Engineering College, Northwestern University, Xi'an, China) 2007, 27(2) 100 ~ 103

**Abstract** The temperature field and flow field of molten aluminum alloys during degassing and purification process by rotary impeller have been simulated by a computational model. The results indicate that a special pipeline fixed into the rotate pole can remarkably

decrease the temperature in the rotate pole and prevent the spinning rotor from jamming resulting from spray flux softening at high temperature. The rotate speed and the flux have the important effects on the degassing and purification of molten aluminum alloys, so appropriate parameters should be considered according to the actual situation. With square furnace, the gas got out in the vertical section along shaft on the cross, while the volume fraction of the gas can be decreased remarkably in vertical section along shaft, even exhibiting hydrogen inhalation.

**Key Words :** Liquid Aluminum Alloy, Spinning Rotor, Degassing, Simulation

**Numerical Simulation of Liquid-solid Bonding Process of High Speed Steel Compound Roll** Feng Mingjie, Wang Engang, Wang Jungang, He Jicheng (Key Laboratory of Nation Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang, China) 2007, 27(2) 104 ~ 107

**Abstract** The 3-dimensional flow and temperature field as well as turbulent flow models were established to simulate the liquid metal onflow of outer shell high speed steel during filling and liquid-solid bonding of roll core and shell metal based on the practical experimental data, observing the effects of pre-heating temperature of roll core on solidification and liquid-solid bonding. The results show that the molten high speed steel is progressively solidified from underside and two-side interfaces to upper and midst in the mold, however, the solidification characteristics are different with the preheating temperature variation of roll core. With lower pre-heating temperature, the end-solidification position lies in the middle of shell metal while it lies in the interface of shell metal and roll core with the higher preheating temperature at the same sections. The shell can tightly bond with the core to form the compound roll with proper preheating temperature, however, the metallurgical bonding can not be found with the lower preheating temperature for the core. The optimized preheating temperature of the core is about 1 100 ~ 1 200 .

**Key Words :** Compound Rolling, Casting, Filling, Solidification, Numerical Simulation

**Three-dimensional Finite Element Model (FEM) Analysis of the Roller's Shape with an Uneven Inlet Temperature Field in Continuous Roll-casting Process** Chen Lin, Li Xiaoqian, Hu Shicheng (College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, China) 2007, 27(2) 108 ~ 110

**Abstract** Based on the large non-linear finite element software MSC.Marc, the three-dimensional thermodynamic coupled mathematical and physical models were built up, in which the thermal profile and the elastic deformation of the roller have been considered. Based on the high-temperature flow change constitutive formula and the thermal contact conductance computation