

镁合金熔炉坩埚瞬态传热与热应力分析*

郑立君, 潘柏松*, 章盛泓, 车良松, 刘伟江
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对镁合金熔炉坩埚使用寿命较短, 坩埚各接合处易变形开裂而失效, 采用有限元分析方法, 对镁合金熔炉坩埚升温过程进行了瞬态传热模拟分析, 得到了其升温过程曲线和温度场分布云图, 并与实验采集的数据进行对比; 在此基础上进行热—结构耦合分析, 计算得出了升温结束时坩埚各接合处的热应力分布情况。分析结果显示: 坩埚瞬态传热分析结果与实验数据吻合良好, 说明瞬态传热分析真实可靠; 坩埚各接合处热应力波动较大且局部有应力集中现象。

关键词: 坩埚; 有限元法; 温度场; 瞬态传热; 热应力

中图分类号: TH123

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2010)12-0036-04

Transient heat transfer and thermal stress analysis of crucible in magnesium alloy furnace

ZHENG Li-jun, PAN Bai-song, ZHANG Sheng-hong, CHE Liang-song, LIU Wei-jiang
(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the service life of crucible in a magnesium alloy furnace is short, and the failure would happen more likely in crucible conjunctions, using finite element method (FEM), temperature distribution of the crucible in a magnesium alloy furnace during heating procedure was obtained by transient heat transfer analysis. Then comparison between simulation result and experimental result was made, based on which thermal stress on crucible conjunctions at the end of heating procedure was worked out by thermal-structure coupling. The results indicate that the analysis is accurate and reliable since the thermal analysis results well fit the experimental results and that thermal stress on crucible conjunctions has larger fluctuation and stress concentration.

Key words: crucible; finite element method (FEM); temperature distribution; transient heat transfer; thermal stress

0 引 言

目前, 镁合金在各工业领域的应用迅猛增长, 作为镁合金产品制造的重要设备, 镁合金熔炉的研究开发得到了广泛的重视。坩埚是镁合金熔炉的关键部件之一^[1-3]。坩埚作为镁合金熔炉的熔体盛装和加热容器, 不仅要确保其熔化过程中不污染镁合金熔体, 能够长期承受压铸生产过程中的连续加热, 还要能够反复承受生产停顿和恢复过程中的内盛镁合金加热熔化和凝

固收缩导致的巨大热应力^[4]。焦少阳^[5]等研究表明: 坩埚在使用 3~4 个月 after 在底部和侧面接合处产生严重的变形开裂, 开裂的主要原因是坩埚在使用过程中沿横截面存在温度梯度, 在外表面拉应力的作用下坩埚表面开裂直至报废。

针对坩埚这一失效原因, 本研究利用 ANSYS 有限元仿真软件对坩埚升温过程分析, 得出其瞬态温度场分布, 并与实验测量值对比分析; 其次, 对坩埚进行热—结构耦合分析, 得出坩埚升温结束时各接合处的热应力分布。

收稿日期: 2010-07-19

基金项目: 浙江省科技厅计划资助项目 (2007C21062)

作者简介: 郑立君 (1985-), 男, 浙江台州人, 主要从事镁合金熔铸设备的可靠性方面的研究。E-mail: jun372050110@126.com

通信联系人: 潘柏松, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: panbsz@zjut.edu.cn

1 分析模型

1.1 熔炉结构

镁合金熔炉结构如图 1 所示,主要由坩埚、加热棒、熔炉支架、保温层、耐火层等组成,加热棒沿 Z 轴方向对称布置与坩埚的两侧面,为坩埚提供均匀的热源。测温点位置如图 1 所示,测温点 A 位于炉膛中,贴近坩埚外壁;测温点 B 位于坩埚内,贴近坩埚内壁。

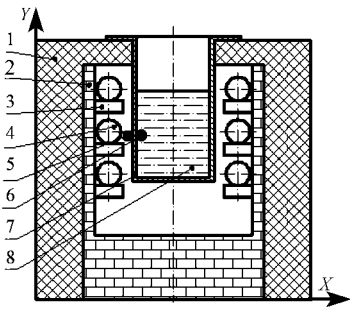


图 1 镁合金熔炉结构图

1—保温层;2—耐火层;3—熔炉支架;4—加热棒;5—测温点 A;6—测温点 B;7—坩埚;8—镁合金熔体

1.2 坩埚有限元模型

由于整个坩埚具有左右对称特性,故取 1/2 模型为分析对象,如图 2 所示。本研究采用间接耦合合法进行分析研究,即首先采用 Solid 70 单元进行瞬态传热

分析;然后采用 Solid 45 单元进行热—结构耦合分析,求得坩埚的热应力^[6]。

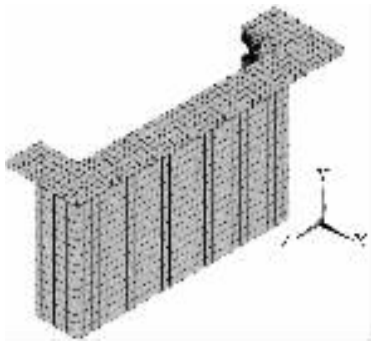


图 2 1/2 坩埚有限元模型

为了缩短计算时间,提高分析效率,该模型边界条件及基本假设如下:①传热分析主要考虑坩埚受热情况,忽略坩埚自重和镁锭质量;②热棒均匀分布在坩埚两个侧面,在坩埚两侧面加载热源;③坩埚法兰下表面施加无摩擦刚性约束,上表面为与空气自然对流换热;④忽略焊接残余应力。

1.3 材料物性参数

低碳钢类金属材料虽然在高温下耐蚀性和抗氧化性能差,但由于其具有导热性好、制造方便、成本低等优点,目前仍为镁及镁合金熔炼的主要坩埚材料^[7-9]。本研究采用的是低碳钢焊接坩埚,其材料物性参数如表 1 所示^[10]。

表 1 低碳钢物性参数

材料	温度/(℃)	密度 /(kg·m ⁻³)	比热 /(J/kg·℃)	热导率 /(W/m·℃)	对流系数 /(W/m ² ·℃)	弹性模量 /GPa	热膨胀系数 /(×10 ⁻⁶ /℃)	泊松比
Q235 及焊条	20	7 850	490	58	6	206	11.59	0.28
	500		550		35	163	14.18	
	800		682		62	82	14.67	

2 瞬态传热分析

对坩埚进行瞬态传热分析,在坩埚内外表面测温点处各取两个关键节点,外表面两节点模拟实际测温点 B 处采集的温度,内表面两节点模拟实际测温点 A 处采集的温度,在 ANSYS 中读出这 4 个关键节点随时间变化的温度曲线,如图 3 所示。

坩埚内外壁热电偶记录的温度实验值曲线如图 4 所示,对比图 3 和图 4 可以得出,ANSYS 计算值与实验值的曲线分布趋势完全一致,只是由于实验条件和环境的影响,在温度数值上存在一定的偏差,最大温差绝对值仅为 7℃,表明计算值与实验值吻合较好。说明本研究所建立的坩埚瞬态传热有限元模型的计算精度达到了使用要求,这为采用该模型进行热—结构耦

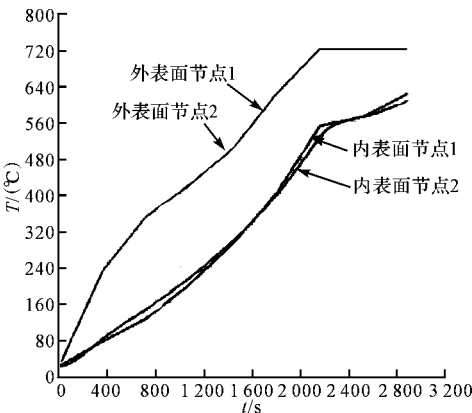


图 3 坩埚四个节点升温过程曲线

合分析提供理论保证。

坩埚升温过程结束时的温度场分布,如图 5 所示。由图可得,升温过程结束时,坩埚内壁各处的温度达到

了 610 ℃ 左右,满足镁液正常浇注要求;坩埚法兰处由于施加了与空气的自然对流换热,温度相对较低,最低处温度为 531.987 ℃。

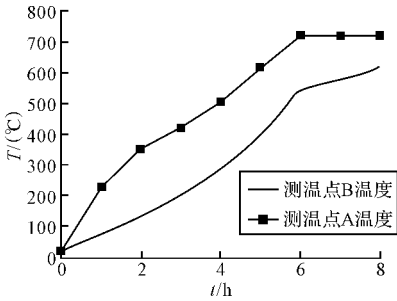


图 4 温度实验值曲线图

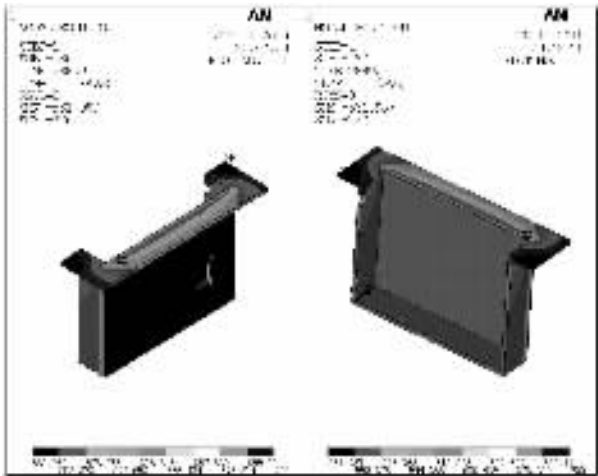
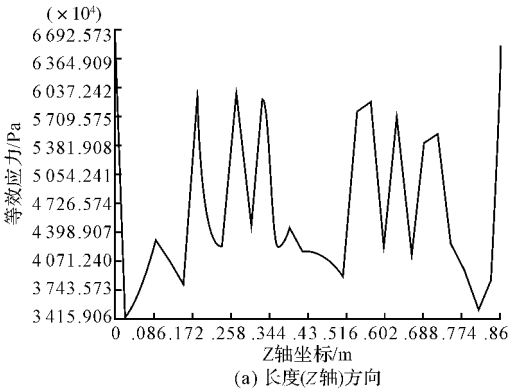


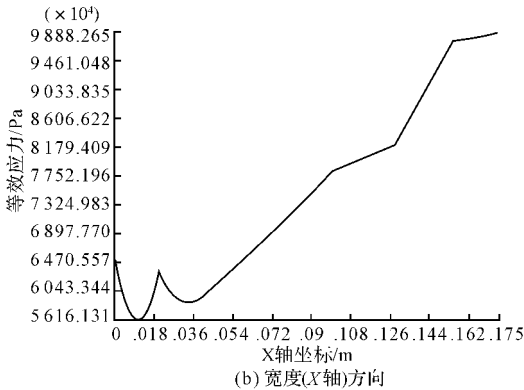
图 5 坩埚温度场分布云图

3 热应力分析

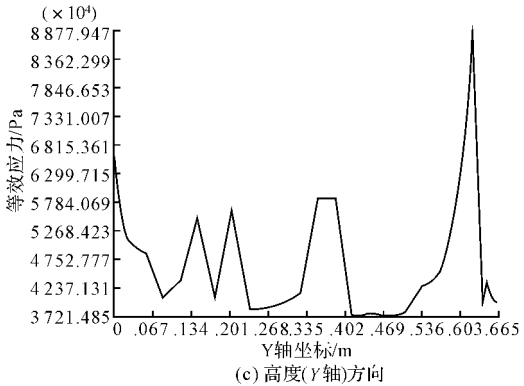
升温过程完成后,由于温度梯度的存在,将在坩埚内产生热应力^[11-12]。根据温度场的计算结果,对模型进行热应力计算。在实际的镁合金压铸生产中,坩埚各个面的结合处是最容易出现裂纹的部位,因此热应力分析分别选取坩埚外表面结合处沿长度、宽度、高度方向的节点定义路径,然后将等效应力分析结果映射到路径上,以此为主要研究对象,其显示的热应力分布曲线如图 6 所示。



(a) 长度(Z轴)方向



(b) 宽度(X轴)方向



(c) 高度(Y轴)方向

图 6 节点等效应力沿各方向变化曲线

由图 6(a)可知:在坩埚的长度(Z 轴)方向,两端的热应力较大,最大值约为 66.93 MPa,中间热应力波动剧烈,这也是坩埚侧边与底面接合处容易产生裂纹的原因之一;在坩埚接合处的宽度(X 轴)方向,随着 X 坐标的增大,节点热应力开始时有一定波动,随后成单调递增趋势,在坩埚端点时达到最大值,约为 98.89 MPa;在坩埚接合处的高度(Y 轴)方向,在 Y=0.635 m 处节点等效应力最大,最大值约为 88.78 MPa,此处为坩埚法兰和侧面的结合处,有应力集中现象。

4 结束语

本研究建立了镁合金熔炉坩埚的有限元分析模型,对升温过程进行瞬态模拟分析,得出坩埚的温度场分布,并与实测数据相比较,确定了更接近于实际的坩埚升温曲线;升温结束时,对坩埚易出现裂纹的各接合处进行热应力分析,结果显示:各接合处节点等效热应力波动较大,局部应力集中现象严重。

参考文献 (References) :

[1] 黄瑞芬. 镁合金的研究应用及其发展[J]. 科技与经济, 2006(11):58-59.
[2] 李 强,黄国杰,谢水生,等. 镁合金半固态成形研究进展[J]. 热加工工艺,2009,38(23):61-65.

[3] LU A A. Recent magnesium alloy development for elevated temperature[J]. **International Materials Reviews**,2004, 49(1):13-30.

[4] 龙思远,查吉利,游国强. 压铸镁合金连续熔化定量浇注技术及设备[C]//第五届中国国际压铸会议. 上海:[s. n.],2006:[s. n.].

[5] 焦少阳,卫英慧,侯利锋,等. 压铸机用镁液坩埚失效分析[J]. **机械工程材料**,2006,30(11):91-95.

[6] DING Fei, ZHAO Tian-wen, JIANG Yan-yao. A study of fatigue crack growth with changing loading direction[J]. **Engineering Fracture Mechanics**,2007, 74(13):2014-2029.

[7] 王栓强,刘建睿,李娜,等. 镁及镁合金熔炼用铁质坩埚腐蚀及防护[J]. **铸造技术**,2007,28(3):443-446.

[8] 薛峰,周仲荣. A291D 镁合金在水介质下的冲击磨损特

性研究[J]. **机械**,2008,35(2):69-72.

[9] PAOLINELLIA S C, CUNHA M A. Effect of stress relief annealing temperature and atmosphere on the magnetic properties of silicon steel[J]. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials Volume**,2006,304(2):599-601.

[10] 冯兆龙. LTTE 改善焊接接头疲劳强度及其残余应力分布研究[D]. 天津:天津大学材料科学与工程学院,2006.

[11] STEPHAN J M, PENIGUEL C, GENETTE P, et al. Evaluation of thermal fluctuations and stressess in pipings mixing zones[J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**,2005(6):41-50.

[12] 赵镇南. 传热学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2008.

[编辑:柴福莉]

(上接第 22 页)



图 5 热力平衡图的绘制设置界面



图 6 热力平衡图的自动绘制结果

3 结束语

基于 AutoCAD 热力平衡图的动态绘制系统是工业汽轮机热力设计软件的重要组成部分,相对于手工绘制,动态绘制系统,首先大大节省了时间、提高了效率;

其次减少了设计人员的工作量,避免了很多人为差错;最后具有很强的通用性,可绘制不同工况、不同机型机组的热力平衡图,操作简便、高效,制图规范正确,为设计人员提高工作效率提供了很好的开发工具。

参考文献 (References):

[1] 郝景周,彭岩. 水泥窑纯低温余热发电技术性能评价方法探析[J]. **水泥技术**,2008(5):83-86.

[2] 祝刚. 小型工业汽轮机在化工企业余热利用中的应用[J],**应用科技**,2007,34(12):51-54.

[3] ASHOK S, BANERJEE R. Optimal operation of industrial cogeneration for load management[J]. **Transactions on Power System**,2003,18(2):931-937.

[4] PILAVACHI P A. Mini-and micro-gas turbines for combined heat and power[J]. **Applied Thermal Engineering**,2002, 22(18):2003-2014.

[5] GORSEK A, GLAVIC P. Process integration of a steam turbine[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2003, 23(10): 1227-1234.

[6] 蒙春林,丁星华,沈卫军,等. 模块化非标准工业汽轮机热力设计软件开发[J]. **机电工程**,2008,25(6):71-74.

[7] DATMUS J B, GONZALEZ-ZUGASTI J P, OTTO K N. Modular product architecture[J]. **Design Studies**,2001,22(5):409-424.

[8] 张传伟,郭卫. ActiveX Automation 技术在 AutoCAD 开发中应用[J]. **机床与液压**,2002(3):80-82.

[9] 张晔. 带式输送机 CAD 系统中的总图绘制[J]. **机电工程**,1999,16(4):1-4.

[10] 姚祖安. 汽轮机热平衡图等 CAD 程序设计的开发[J]. **上海汽轮机**,1998(1):21-25.

[编辑:柴福莉]