

熔炼镁合金用复合型坩埚热疲劳分析及优化*

林旭强, 史伟杰, 潘柏松*

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了提高复合型坩埚热疲劳寿命, 利用有限元法和 Halford-Morrow 方程, 对复合型坩埚进行了热疲劳模拟分析, 并在此基础上利用极差分析法, 研究分析了坩埚几何突变处倒角和内外层材料厚度对坩埚热疲劳寿命的影响, 最终实现了复合型坩埚热疲劳寿命的设计优化。模拟分析结果表明: 疲劳危险区域位于外层坩埚拐角处; 坩埚凸缘倒角对坩埚疲劳寿命影响较大; 可通过采用增大内层厚度或减小外层厚度的方法, 以延长坩埚疲劳寿命。

关键词: 复合型坩埚; 有限元法; Halford-Morrow; 热疲劳寿命

中图分类号: TH123; TF8

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)09-1011-04

Thermal fatigue simulation and optimization of composite crucible for melting magnesium alloy

LIN Xu-qiang, SHI Wei-jie, PAN Bai-song

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to increase fatigue life of composite crucible, the crucible thermal fatigue, based on finite element method (FEM) and Halford-Morrow equation, was simulated and analyzed. On this basis, the influence on thermal fatigue by the chamfer around the geometrical mutation, inner and outer layer material thickness were studied by extreme difference analysis. At last, the design optimization of thermal fatigue life for composite crucible was realized. The result shows that fatigue risk areas are located at the corner of the outer crucible, and that crucible flange chamfer has great effect on the crucible fatigue life, the fatigue life can be increased by increasing inner layer thickness or reducing the outer layer thickness.

Key words: composite crucible; finite element method (FEM); Halford-Morrow; fatigue life of thermal

0 引言

坩埚作为镁合金熔炉的关键部件之一^[1-2], 在生产停顿和恢复过程中, 需反复承受温度梯度导致的较大交变热应力^[3]。有研究表明, 交变热应力使坩埚表现出了明显的低周疲劳现象^[4]。目前, 多数关于坩埚结构性能的研究一般将 Von-Mises 等效应力作为坩埚性能优劣的评判依据^[5]。实际上, 低周疲劳现象表明, 热循环载荷引起的热应力已超出材料的屈服极限, 故静强度分析不再适用, 热疲劳分析更能合理反映坩埚实际结构性能。

对于低周疲劳问题, 研究者一般认为塑性应变幅决定了材料的低周疲劳性能, 通常采用 Manson-Coffin 方程来研究其塑性应变-循环疲劳寿命关系^[6]。然而, 在循环变形过程中, 材料往往表现为循环软化或硬化行为, 同时塑性应变幅依赖于断裂面方向。而塑性应变能密度是一个数值变量, 它能更好的表征材料的循环软化或硬化行为。基于此, Marrow 等^[7]提出了疲劳寿命-塑性应变能密度的关系式, 即 Halford-Morrow 方程。

本研究利用有限元法对复合型坩埚进行多物理场模拟分析, 获得坩埚温度场分布, 并与实验测量值

收稿日期: 2012-02-23

基金项目: 国家级大学生创新性实验计划资助项目(101033707)

作者简介: 林旭强(1989-), 男, 浙江乐清人, 主要从事镁合金熔铸设备可靠性方面的研究. E-mail: 562294688@qq.com

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

进行比较验证。最后,利用 Halford-Morrow 方程和模拟获得的塑性应变能分布,研究分析坩埚几何突变处倒角和内外层材料厚度对坩埚热疲劳寿命的影响,并实现设计优化。

1 分析模型

1.1 熔炉结构

镁合金熔炉主体结构如图 1 所示,其主要由坩埚、加热棒、熔炉支架、保温层、耐火层等组成。加热棒对称布置在坩埚的两侧面,为坩埚提供均匀的热源。

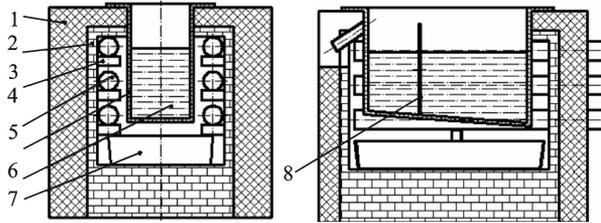


图 1 熔炉结构示意图

1—保温层;2—耐火层;3—加热棒支架;4—加热棒;5—坩埚;6—镁液;7—漏镁盘;8—坩埚隔板

1.2 坩埚有限元模型

本研究采用的复合型坩埚的初步几何尺寸如图 2 所示,其中内层厚度 $n=15\text{ mm}$,外层厚度 $w=5\text{ mm}$,倒角 $r=5\text{ mm}$ 。由于坩埚的对称性,笔者取 1/4 模型为分析对象。本研究采用了间接的多物理场耦合法,首先采用 Solid 70 热分析单元进行温度场模拟,然后转化为 Solid 45 结构分析单元,并设置结构边界条件及温度场边界条件,以进行热-结构耦合分析。

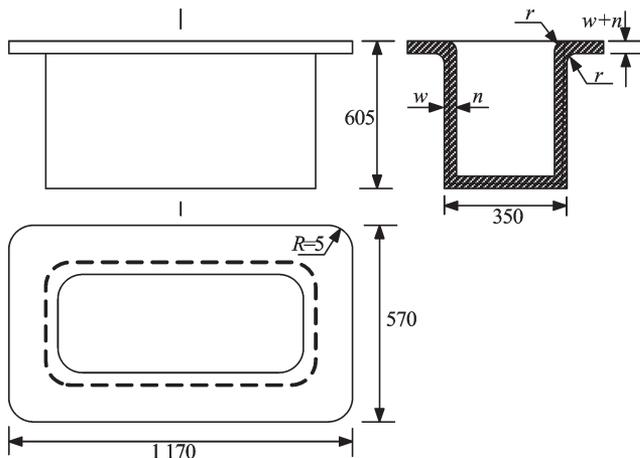


图 2 坩埚几何尺寸示意图(单位:mm)

坩埚是受加热棒的辐射加热,在有限元模型中对坩埚外表面施加热流密度进行加载。为了确定热流密度函数,将坩埚受热面上的热流密度的分布,近似地用高斯数学模型来描述(如图 3 所示)。距受热 o 中心任一点 A 的热流密度可表示为:

$$q(r) = q_m \exp(-Kr^2) \quad (1)$$

式中: $q(r)$ — A 点的热流密度; q_m —加热中心 o 点最大热流密度; \bar{r} —有效加热半径; r — A 点离加热中心的距离; K —能量集中系数, $K=3/\bar{r}^2$ 。

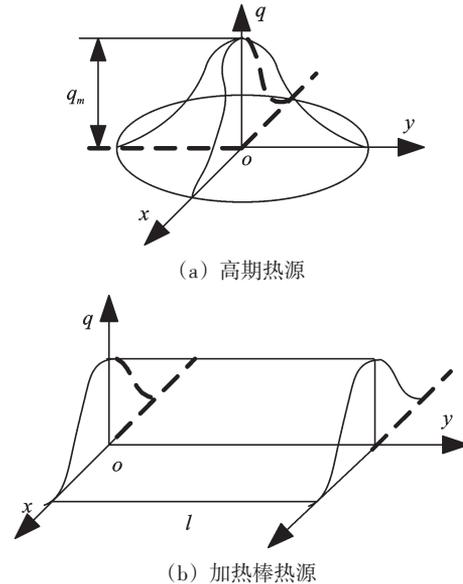


图 3 高斯热源及加热棒热源热流密度分布简图

则由图 3 可得,单根加热棒有效功率 Q_a 可对式(1)沿加热棒总长 l 作面积分获得,即:

$$Q_a = \int_0^l \int_{-\infty}^{+\infty} q(x,y) dx dy = q_m l \sqrt{\pi/K} \quad (2)$$

最后利用式(2)可得最大热流密度 q_m 同加热棒有效功率之间的关系式为:

$$q_m = \sqrt{\frac{K}{\pi}} \frac{Q_a}{l} \quad (3)$$

则可得热流密度函数为:

$$q(x) = \sqrt{\frac{K}{\pi}} \frac{Q_a}{l} \exp(-Kx^2) \quad (4)$$

为了缩短计算时间,提高分析效率,本研究对模型作了如下基本假设: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

本研究采用的复合型坩埚的内壁材料为普通碳素钢 Q235b,外层材料为 316L 不锈钢。相关材料物性参数^[8]如表 1 所示。为了获得塑性应变能密度,本研究在 ANSYS 塑性分析中选用了基于 Von-Mises 准则的等效强化多线性材料模型。用于塑性分析的内外层材料在室温下的应力应变拉伸数据^[9]如表 2 所示,其屈服极限分别为 225 MPa 和 220 MPa。

表1 材料物性参数

温度/℃	热膨胀系数 /(×10 ⁻⁶ /℃)		热导率 /(W/(m·K))	
	Q235b	316L	Q235b	316L
20	-	-	56	-
100	8.0	16.7	49	15.8
200	11.3	17.1	45	18.4
300	12.9	17.6	41	19.8
400	13.6	-	37	-
500	14.0	-	37	-
600	14.4	-	-	-

表2 内、外层材料拉伸曲线数据

Q235b		316L	
应变	应力/MPa	应变	应力/MPa
0.001 07	225.0	0.001 04	206.0
0.002 29	326.8	0.028 48	342.6
0.003 60	334.1	0.032 28	370.6
0.007 12	341.5	0.039 87	391.6
-	-	0.051 27	419.5
-	-	0.089 24	475.5

为了预测高温下坩埚疲劳寿命,本研究利用文献[10]中测试获得的不同温度下316L不锈钢的疲劳寿命关于塑性应变能密度分布,确定了Halford-Marrow方程中的材料参数,其具体表达式为:

$$\begin{aligned}
 T = 550\text{ }^{\circ}\text{C} \quad N_f^{4.918} \cdot \Delta w_p &= 9.183\text{E} + 20 \\
 T = 600\text{ }^{\circ}\text{C} \quad N_f^{4.291} \cdot \Delta w_p &= 1.216\text{E} + 21 \\
 T = 650\text{ }^{\circ}\text{C} \quad N_f^{5.009} \cdot \Delta w_p &= 2.618\text{E} + 20
 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: Δw_p —循环塑性应变能密度, N_f —疲劳寿命。

2 热疲劳寿命分析及优化

为了对坩埚疲劳寿命进行模拟及优化,必须保证数值模型的正确性,而正确设置热分析边界条件是保证数值模型正确性的最为关键之处,因此本研究对坩埚进行了温度场的实物测量,从而确定热分析边界条件,以保证模型的正确性。镁合金达到浇注温度时稳态条件下的坩埚温度场分布云图如图4所示。由图4可见,与镁液接触部分温度约为670℃,法兰处的试验测试点温度在470℃,该值接近实际测得的温度值。

基于有限元数值模型,本研究利用正交试验法及极差分析对坩埚热疲劳寿命进行了分析及结构设计优化。设计变量为内、外层厚度及倒角半径(如图2所示);设计目标为在满足疲劳寿命要求的前提下,材料成本最小,其数学表达式为:

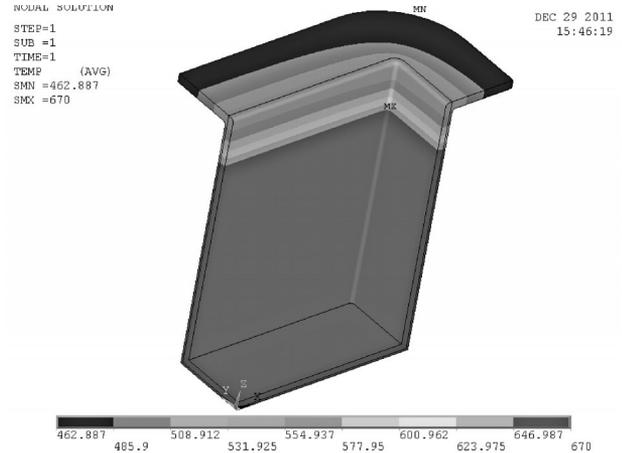


图4 稳态时坩埚温度场分布云图

$$\begin{aligned}
 &\min(\rho_1 q_1 n + \rho_2 q_2 w) \\
 &\text{subject: } P(n, w, r) \geq 200 \\
 &10 \leq n \leq 30 \\
 &5 \leq w \leq 15 \\
 &0 < r < 10
 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ρ_1, q_1 —内层材料的密度和单价; ρ_2, q_2 —外层材料的密度和单价; n, w, r —内、外层厚度及倒角半径; P —坩埚疲劳寿命。

式(6)中各个设计变量的区间上、下限根据实际可行性和加工条件获得,其单位为毫米。并由当前内外层材料的市场价格可得 $q_1=10$ 元/千克, $q_2=20$ 元/千克。

为了分析各个结构几何尺寸对坩埚疲劳寿命的影响及设计优化,并缩短模拟时间,本研究安排了如表3所示的试验因素及其水平,并设计了如表4所示的正交试验表。基于表4,笔者模拟获得了各个试验组合下的塑性应变能密度分布。结果表明其最大值均位于外层坩埚拐角处。

表3 试验因素水平表

因素	编号	因素水平		
		1	2	3
内层厚度 n/mm	A	15	20	25
外层厚度 w/mm	B	7.5	10	12.5
倒角 r/mm	C	2.5	5	7.5

故研究者可利用316L的Halford-Marrow方程和最大塑性应变能密度处温度值,求得坩埚疲劳寿命。在计算坩埚疲劳寿命时,本研究参考了ASME和BS5500的锅炉疲劳设计规范,将非承压坩埚的疲劳安全系数取为5,其最终计算结果和坩埚每平方米材料成本如表4所示。

为了分析各参数对坩埚使用次数和材料成本的影响程度和规律,从而寻得最优参数组合方案,本研究采用了极差法对模拟试验结果进行分析讨论。极差是指一组数据中最大值和最小值之差,是用来划分

表 4 $L_9(3^3)$ 正交试验表

试验号	A	B	C	寿命/次	材料成本/(RMB·m ⁻²)
1	1	1	1	191	2 374.5
2	1	2	2	202	2 774.5
3	1	3	3	199	3 174.5
4	2	1	2	208	2 766.0
5	2	2	3	207	3 166.0
6	2	3	1	179	3 566.0
7	3	1	3	210	3 157.5
8	3	2	1	193	3 557.5
9	3	3	2	208	3 957.5

因素重要程度的依据。某因素的极差值越大,说明该因素的改变所引起的实验结果变化最大,因素越关键。由极差法计算获得的结果如表 5 所示。基于表 5 的结果,本研究获得了各个因素同疲劳寿命和坩埚材料成本之间的关系图,如图 5、图 6 所示。

表 5 极差分析结果

指标	疲劳寿命/次			材料成本/(RMB·m ⁻²)		
	A	B	C	A	B	C
K_1	592	609	563	8 323.5	8 298.0	9 498.0
K_2	594	602	618	9 498.0	9 498.0	9 498.0
K_3	611	586	616	10 672.5	10 698.0	9 498.0
k_1	197	203	188	2 774.5	2 766.0	3 166.0
k_2	198	201	206	3 166.0	3 166.0	3 166.0
k_3	204	195	205	3 557.5	3 566.0	3 166.0
极差 R	19	23	55	2 349	2 400	0
结果对比	$C > B > A$			$B > A > C$		

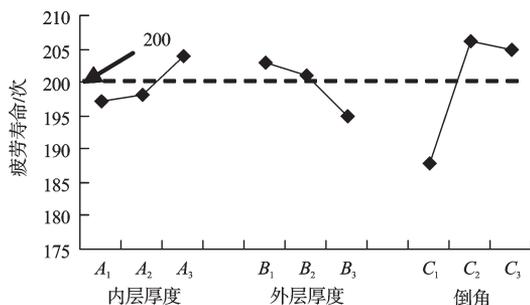


图 5 因素与疲劳寿命的关系图

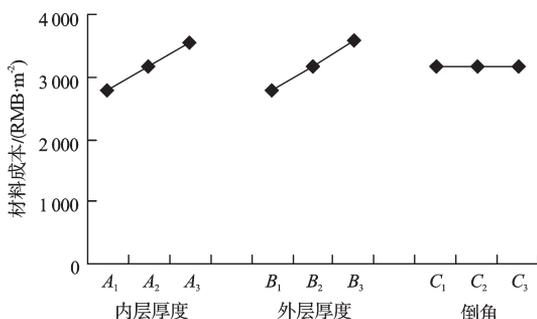


图 6 因素与材料成本的关系图

对图 5 和图 6 分析后可得:① 内层厚度仅在第 3 水平处满足使用次数要求(不小于 200),内层厚度越厚对疲劳性能越有益;② 可通过减小外层厚度坩埚使用次数;③ 坩埚疲劳寿命关于倒角尺寸呈抛物线趋势;④ 内、外层厚度增加坩埚材料成本上升,该结果符合常识;⑤ 外层厚度对材料成本的影响较高于内层厚度对材料成本的影响。综合图 5 和图 6 结果可得,在满足使用次数(不小于 200)的前提下,材料成本最优的组合为 $A_3B_1C_2$,即内层厚度为 25 mm,外层厚度为 7.5 mm,倒角尺寸为 5 mm。

3 结束语

针对熔炼镁合金用复合型坩埚,本研究利用有限元法、Halford-Marrow 和正交试验法,实现了坩埚热疲劳分析及设计优化。分析结果表明:疲劳危险区域基本位于外层坩埚拐角处;复合型坩埚内外层材料厚度对疲劳寿命具有相反的影响结果,而坩埚凸缘倒角几何尺寸对坩埚疲劳寿命影响较大。

同时,本研究在一定意义上为复合型坩埚热疲劳寿命分析起到了借鉴作用,研究成果具有一定的工程实践意义。

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] 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.
- [4] 宋广飞,许树勤. 镁合金回收用坩埚失效原因分析[J]. 腐蚀科学与防护技术,2007,19(6):457-459.
- [5] 郑立君,潘柏松,章盛泓,等. 镁合金熔炉坩埚瞬态传热与热应力分析[J]. 机电工程,2010,27(12):36-39.
- [6] 陈传尧,高大兴. 疲劳断裂基础[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1991.
- [7] JODEAN M. Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals[C]. American Society for Testing Material, 1965.
- [8] 鲁惠民. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [9] 宋开红,李春福,季正勇,等. 316L 不锈钢 25~300 °C 动态拉伸及流变应力计算[J]. 材料热处理技术,2011,40(8):64-67.
- [10] LEE K O, HONG S G, LEE S B. A new energy-based fatigue damage parameter in life prediction of high temperature structural materials[J]. **Materials Science and Engineering: A**, 2008, 496(1-2):471-477.

[编辑:张 翔]