



## 电磁铸轧铸嘴支撑面板热应力分析和结构改进

毛大恒, 刘年春

(中南大学机电工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 利用 ANSYS 有限元分析软件建立了铸嘴支撑面板温度-应力耦合分析的三维有限元计算模型. 为了优化面板内的应力分布,减小热位移,特别是与铸嘴平面稳定性直接相关联的竖直方向热位移,对面板进行了结构改进,并对实际工况下面板的热应力分布进行了计算研究. 研究表明:面板内存在显著的热应力,应力集中现象明显;面板总体上出现了较大的热位移,特别是在竖直方向,热位移量为最大,导致面板因变形过大失效. 改进后面板的热应力在总体数值上有所升高,但应力集中现象有所改善,在竖直方向的热位移量已显著减小,能很好地满足电磁铸轧的工艺要求.

**关键词:** 温度场; 热应力; 热位移; 铸嘴支撑面板; 结构优化

**中图分类号:** TH123+.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-6510 (2007) 04-0044-05

### Thermo-stress Research of Supporting Nozzle Plane Board in Electro-magnetic Cast-rolling Process and Its Structural Optimization

MAO Da-heng , LIU Nian-chun

( College of Mechanical Electrical Engineering , Central South University , Changsha 410083 , China )

**Abstract:** A three-dimensional FEM calculating model for thermo-stress coupling analysis was developed with finite element software package ANSYS to calculating the thermal stress distribution in supporting nozzle plane board. To optimize the distribution of thermo-stress in plane board and reduce the thermal displacement, especially to reduce the upright thermal displacement that associates with the plane stability of nozzle, the plane board's structure was improved, and the calculating research of the thermal stress distribution was prosecuted in factual technics conditions. The research results show that the thermo-stress is remarkable in plane board, and the stress concentration is distinctly. Biggish thermal displacement exists in plane board, especially on the upright orientation, the thermal displacement value is maximal, which is the main reason that causes the deformation failure. The thermo-stress in optimized plane board is increased a little, but the stress concentration is improved, and the thermal displacement value is decreased remarkably. The results prove that the optimized structural plane boards adapt to technics' request perfectly.

**Keywords:** temperature field; thermo-stress; thermal displacement; supporting nozzle plane board; structural optimisation

电磁铸轧工艺技术是中南大学机电工程学院在经过大量实验验证及理论探讨的前提下自主开发出来的一种先进铸轧工艺<sup>[1,2]</sup>,其中电磁感应器为此工艺技术的关键部件.在实际生产中,电磁感应器结构件受到了热载荷的强烈冲击.高温铝熔体通过铸嘴直接将热量大量释放到铸嘴支撑面板内,使面板始终处于较高温度状态,并且在面板上形成了一定的温度梯

度.由于支撑台架的约束,这一温度场及温度梯度在面板上形成了热应力和热位移<sup>[3]</sup>,对铸轧工艺的稳定性产生了很大的影响.生产实践证明:当面板结构形式不合理时,面板内将出现较大的热位移,而过大的热位移量将使得铸轧工艺无法完成.因此,为了完善电磁铸轧工艺,保证铸嘴支撑面板结构设计的合理性,本文对已用于某厂实际生产中的电磁感应器铸嘴

收稿日期: 2007-04-15; 修回日期: 2007-09-05

基金项目: 国家863计划资助项目 (2001AA337070)

作者简介: 毛大恒 (1946—), 男, 湖南道县人, 教授, 博士生导师.

支撑面板进行了温度场及热应力的计算分析,提出了改进方案,并对比了不同结构方案的结果差异,从而在理论上证明了改进方案的可行性,完成了对实际工艺的理论检验,并与实际相匹配<sup>[4-10]</sup>.

### 1 计算模型

图1为初始结构形式的铸嘴支撑面板结构模型,依据几何对称性,此处只选取了面板的右半部分作为计算域。

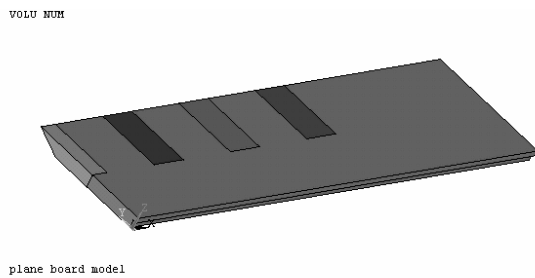


图1 铸嘴支撑面板三维几何模型

Fig. 1 Three-dimensional geometric model of supporting nozzle plane board

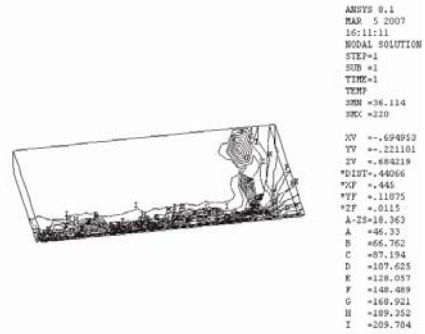
数值计算程序是在大型有限元分析软件 ANSYS 平台上开发的,该软件具有强大的多物理场耦合分析功能<sup>[4,5]</sup>.从物理变化过程可以看出,温度的变化使得面板内产生热应力,从而导致形变,但是由于是小变形问题,所以形变过程对于温度场的反向耦合作用为弱作用,可以忽略不计.因此本次耦合计算可视为单向耦合分析过程,可以先进行温度场的计算得到模型的节点温度分布,然后将模型由热分布计算模型转换为结构应力计算模型,进行热应力分布计算<sup>[4]</sup>.在进行热分布计算时,面板上表面、下表面与支撑架架接触区域定义为接触导热边界,右端面、下表面及前斜端面在总体上定义为对流传热边界;其他小区域及对称面定义为绝热边界;而在进行热应力分布计算时,除了定义前面所求得温度分布为初始条件外,还需定义面板与架架固接的区域所有自由度为零,左端面为对称面,位移为零。

### 2 计算结果分析

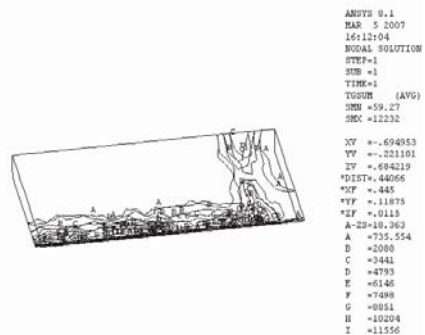
#### 2.1 温度场及温度梯度分布

图2为初始结构面板温度及温度梯度分布.从图中可以看出,由于支撑面板上表面的大部分面积用来支撑铸嘴,受到铸嘴热源的影响,大部分区域的温度

都是在 200 °C 以上,温度梯度不明显.但是在脱离铸嘴接触区域后,对流换热作用加强,温度下降很快,并在一个较小的区域内形成比较大的温度梯度。



(a) 温度分布



(b) 温度梯度分布

图2 初始结构面板三维温度及温度梯度分布

Fig. 2 Three-dimensional temperature and temperature gradient distribution of prime structural plane board

#### 2.2 热位移分布

图3为面板总体热位移分布.从图中可以看到,热位移主要集中在面板前端中间位置,与观察到的实际变形情况一致,最大值为 1.9 mm.这主要是由于前端中间的约束最弱,并且由于嵌块的存在,加大了应力集中,使得此位置的热位移量为最大。

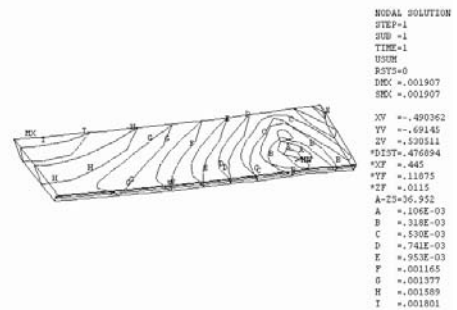


图3 面板三维热位移分布

Fig. 3 Three-dimensional thermal displacement distribution of plane board

图4为面板Z轴方向的热位移分布.从图中可以看到,初始结构形式面板在Z轴方向产生了较大的热

位移,最大值达到了1.59 mm,这个值已大大超出了工艺稳定(Z轴方向最大热位移量应小于0.4 mm)所容许的变形量.这主要是因为:面板在Z轴方向的几何尺寸同其他两个方向相比较要小得多,所以此方向上的刚度及温度梯度也较小,由温度梯度本身所引起热变形相应地也较小.而对于X方向,由于几何尺寸较大,因此其形变也应该显著,但是由于X方向严格的约束条件抑制了其形变,这样Z轴方向由于其自身的刚度较小并且约束也较弱而成为了X方向的应力及形变的释放方向,造成Z轴方向出现了较大的热位移.因此从热位移角度看,此种结构的面板由于在Z轴方向变形量过大而无法满铸轧工艺的需要.

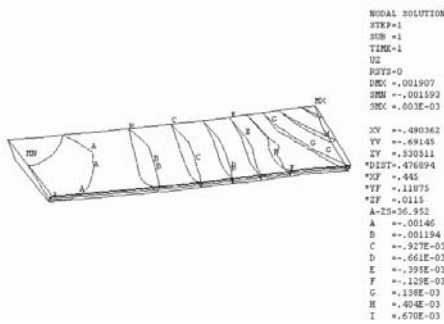


图4 面板Z轴方向热位移分布

Fig. 4 Z axis orientation thermal displacement distribution of plane board

### 2.3 热应力分布

图5为计算所得面板等效热应力分布图.

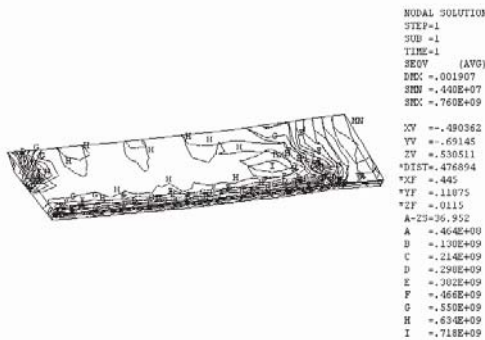


图5 面板等效热应力场分布

Fig. 5 Equivalent thermal stress distribution of plane board

从图5中可以看出,面板内存在显著的热应力.应力高值主要集中在约束点附近,其最大值为 $7.94 \times 10^8$  Pa,并形成了高梯度变化区.这主要是由于约束点附近区域正好是铸嘴的边缘区域,在此区域内温度变化显著,形成了较大的温度梯度,同时由于约束的存在使膨胀受到限制,所以形成了较大的热应力.在嵌块位置主要是由于结构形状的变化及约束的限制,产生了应力集中,因而出现高值应力区.在铸

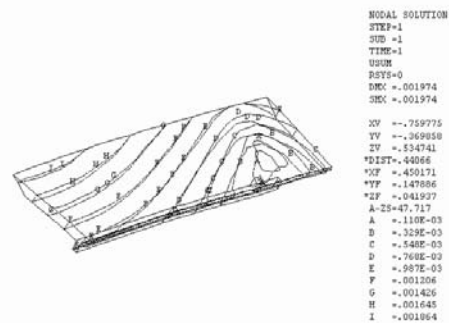
嘴的边缘区域,由于有着显著的温度梯度,因此形成了应力集中带.总体上来说,面板内大部分区域的应力分布值都是处于500~600 MPa之间,这个值在一定程度上已经超出了材料的屈服极限,如果材料长时间处于此种应力状态下,必然会发生塑性形变.宏观上表现为材料的翘屈变形,影响到部件的结构稳定性.

### 3 结构优化

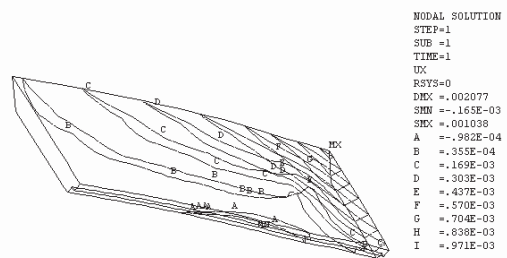
工业实践证明,将上述结构的面板用于实际生产过程中,在连续工作50 h后就由于在Z轴方向的形变量过大而无法继续使用,根本无法保证工艺过程的稳定.因此,为了完善铸轧工艺过程,必须对现有结构形式的面板加以改进,以改善其应力分布,抑制其形变量,尤其是在Z轴方向的形变量.由于铸轧条件的限制,以及电磁感应器总体结构的特殊要求,对于面板的总体结构模式已难于进行改造,只能在现有结构上加以改进.本文设计了两种改进后的优化方案,优化方案1为在面板的下底面靠近后端面处焊接上一根不锈钢肋条,直接针对Z轴方向热位移加以限制;优化方案2为增加Z轴方向的厚度,也就是增大Z轴方向的刚度以抑制此方向的热位移,其他条件不变.

#### 3.1 改进方案热位移计算结果及分析

图6(a)为改进方案1热位移分布计算结果,图6(b)为改进方案2热位移分布计算结果.



(a) 方案1



(b) 方案2

图6 热位移分布

Fig. 6 Thermal displacement distribution

从图中可以看出,改进结构同初始结构相比较在最大热位移量上变化不大,这是合理的结果.因为不论对于原结构还是改进结构,它们在总体几何结构上并没有显著的变化,而热载荷条件是一致的,所以在此条件下材料的形变应该也具有相似性.如果某个方向上的热位移受到抑制,则另外两个方向的热位移必定增大,总位移图为矢量合成图,在数值上将满足其等同性.

图7分别为改进方案在Z轴方向的热位移分布.从图中可以看到,在Z轴方向,方案2的位移分布与原结构相似,但在热位移量上已显著变小了;而方案1与原结构相比较,不论在分布状态上还是在热位移量上都变化显著.对于方案1来说,这主要是由于肋条的存在大大抑制了Z轴方向的热位移,使得此方向的热位移量被强制转移至X轴及Y轴方向,导致两个方向的热位移量增大,尤其对于Y轴方向,由于受肋条的影响最弱,形变量增加显著.对方案2来说,这主要是由于Z轴方向增厚使得刚度变大,其受X方向形变的影响减弱,变形以温度梯度产生的热位移为主导,符合典型热翘屈变形特征.

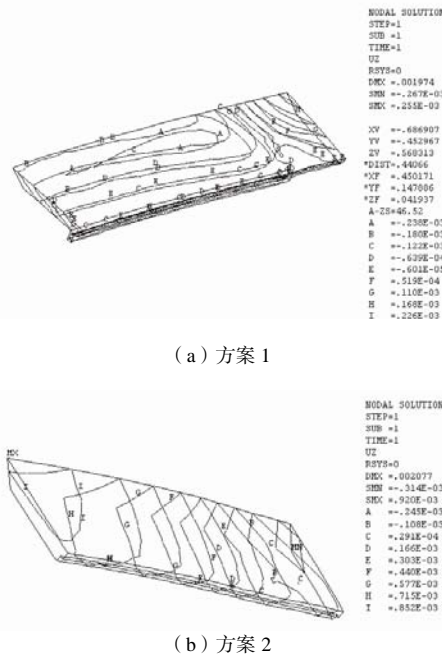


图7 面板Z轴方向热位移分布  
Fig.7 Z axis orientation thermal displacement distribution

表1给出了三种结构形式各方向最大热位移量的比较.从表中可以明显看出,方案2在Z轴方向的最大热位移量与原结构相比较已显著减小,而方案1更要比其他两种方案小得多,能很好地满足铸轧工艺稳定所要求的Z轴方向容许的最大热位移量(小于0.4 mm).由前述分析可知,Z轴方向的热位移量正

是重点关注的因素,在相同的工艺条件下,Z轴方向热位移量的极小化为保证工艺完备性的关键环节.因此,从热位移角度看,方案1和方案2都要优于原结构,而方案1为最佳选择方案.将方案1结构形式的面板应用于实际工艺过程,其连续稳定工作时限可达到12个月以上,从而在实践上证明了此方案的可行性.

表1 不同方向最大热位移量的比较

Tab.1 Maximal thermal displacement comparisons in different directions mm

方案	总位移	X方向	Y方向	Z方向
原结构	1.907	0.691	1.164	1.593
方案1	1.974	1.135	1.965	0.267
方案2	1.038	1.862	0.920	2.077

3.2 改进方案热应力计算结果及分析

图8分别为两种改进方案热应力场计算结果.

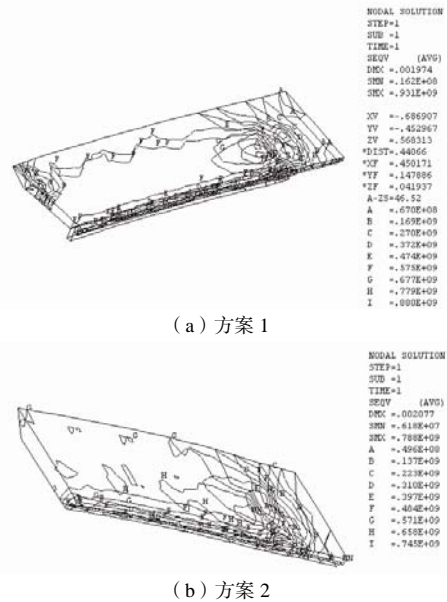


图8 等效热应力分布图

Fig.8 Equivalent thermo-stress distribution

从图中可以看到,两种方案的等效应力分布状态同原结构相比较变化不大,在数值上方案1的等效应力最大值有所增加,达到了 $9.26 \times 10^8$  Pa,方案2增加量较小,最大值为 $8.03 \times 10^8$  Pa;各个坐标轴方向的分应力分布与初始结构相比较基本上也有着同样的分布规律.对于方案1来说,这主要是由于肋条的强约束作用加大了应力集中效应,在同等的应力释放条件下,必然使得应力值在各个区域普遍升高,而在同样的约束条件下应力的升高必定会引起位移量增加.从前述的位移分析已经得到了这一结果,此处从应力场的角度证明了X轴及Y轴方向位移量的增大

是必然的. 对于方案 2 来说, 由于增大了 Z 轴方向的厚度, 使得刚度得到增强, 变形抗力加大, 因此应力也应该有所增大, 但是由于外载及约束条件与原结构一致, 所以应力的分布不会出现显著变化.

从应力分析可知, 改进方案引起了应力值一定程度的升高, 但是其增大值还是在可接受范围之内. 不同方向的最大热应力值见表 2.

表 2 不同方向最大应力值的比较

Tab. 2 Maximal thermo-stress comparisons in different Directions Pa

方案	等效应力	X方向	Y方向	Z方向
原结构	$7.94 \times 10^8$	$-1.12 \times 10^9$	$9.47 \times 10^8$	$9.95 \times 10^8$
方案 1	$9.26 \times 10^8$	$-1.21 \times 10^9$	$-1.20 \times 10^9$	$-1.13 \times 10^9$
方案 2	$8.03 \times 10^8$	$-1.08 \times 10^9$	$-8.04 \times 10^8$	$-8.77 \times 10^8$

### 5 结 论

(1) 从温度场分布来看, 高温区集中在铸嘴与面板接触的区域, 以铸嘴边缘为分界, 形成较大的温度梯度区. 面板上下表面由于热边界条件的差异使得温度分布有所变化, 上表面温度分布值要高于下表面. 优化方案同初始结构相比较, 其温度场分布并没有发生明显的变化.

(2) 从热位移分布来看, 热位移主要集中在面板的中间靠近前端的位置, 其中 Y 方向的热位移量要高于其他两个方向. 优化方案同初始结构相比较, 其 Z 方向的热位移量有了显著的减小, 其中优化方案 1 已将 Z 方向的热位移量降至极低值, 很好地满足了工艺的要求.

(3) 从热应力分布来看, 面板内始终存在着显著的热应力, 等效应力高梯度区出现在约束点附近, 在嵌块位置及铸嘴边缘区域, 由于形成了应力集中, 也表现出应力高值. 优化方案同初始结构相比较, 其热应力的数值略有升高, 但还是在可接受范围之内,

在等量比级下与热位移的减小量相比较, 其优越性得到了充分的肯定.

### 参 考 文 献:

[1] 赵啸林, 毛大恒, 陈欠根. 将电磁场引入连续铸轧的新技术探讨[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5 (4): 145—149.

[2] 毛大恒, 钟 掘, 赵啸林, 等. 铝及铝合金连续铸轧新技术——电磁场对金属凝固的作用机理 [J]. 矿业工程, 1996, 16 (2): 145—149.

[3] 严宗达, 王洪礼. 热应力[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 143—150.

[4] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西北工业大学出版社, 1999: 110—135.

[5] 陈丽敏, 陈思作. 基于 ANSYS 软件的焊接工字型截面梁残余应力的有限元分析[M]. 钢结构, 2003 (2): 45—52.

[6] Lin Zone-Ching, Chu Kou-Tsay, Pan Wen-Chueh. A study of the stress, strain and temperature distributions of a machined workpiece using a thermo-elastic-plastic coupled model[J]. Materials Processing Technology, 1994, 41 (3): 291—310.

[7] Wang En-Gang, He Ji-Cheng. Finite element numerical simulation on thermo-mechanical behavior of steel billet in continuous casting mold[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2 (1): 157—164.

[8] 谢延敏, 于沪平, 阮雪榆, 等. 连铸结晶器温度场和应力场的有限元分析[J]. 塑性工程学报, 2005, 12 (6): 103—108.

[9] 李洪洋, 赵瑞海. 超大型镁合金压铸机定型板温度场及热应力的有限元分析[J]. 铸造, 2006, 155 (1): 34—37.

[10] 邓 凯, 程惠尔. 结构参数对高炉冷却壁温度场及热应力分布的影响[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18 (2): 1—5.