

# 半热滑轨温度和应力的三维有限元数值模拟

冯明杰<sup>1</sup>, 吴海霞<sup>2</sup>

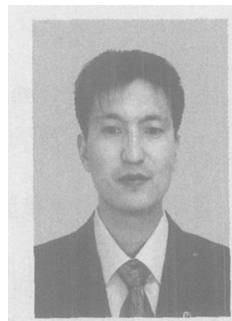
(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110006;

2. 安阳钢铁集团有限责任公司 设计院, 河南 安阳 455004)

**摘 要:** 以热弹性理论为基础, 采用 ANSYS 顺序耦合有限元程序对加热炉半热滑轨在不同外形参数下的传热、应力和应变进行了三维数值模拟。结果表明, 其端面最高温度随着滑轨高度的增大而升高, 随着滑轨长度的增长而稍有降低, 在相同的高度和长度下, 梯形滑轨比矩形滑轨的端面最高温度低  $15 \sim 20^{\circ}\text{C}$ ; 其最大应力位于坡口堆焊金属与滑轨的焊缝处, 其值随着滑轨高度和长度的增大而增大, 在相同的几何尺寸下, 矩形滑轨大于梯形滑轨。

**关键词:** 加热炉; 半热滑轨; 温度场; 应力场

**中图分类号:** TF062 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2006)11-109-04



冯明杰

## 0 序 言

从炼钢厂送来的冷坯或钢锭在轧制前需要对其进行合理的加热以满足轧制工艺的要求。在国内, 钢坯的加热设备以连续推钢式加热炉居多。为了有效地消除或者减弱钢坯的水管黑印, 获得良好的加热质量, 在这种加热炉的加热段和均热段需要采用全热滑轨或半热滑轨, 其中以半热滑轨最为常见<sup>[1,2]</sup>。根据半热滑轨的截面形状又可分为矩形和梯形半热滑轨两种。滑轨的根部开有一定尺寸和形状的坡口, 它和炉底纵水管之间采用堆焊的方式进行焊接, 保证一定的冷却效果, 从而使其在高温的炉膛中还能具有相应的强度和刚度来承受钢坯的全部重量和抵抗钢坯运行时对其的挤压和冲击。滑轨的长度、高度以及外形一直是广大热加工工作者关注的热点之一<sup>[3]</sup>, 它们对钢坯的加热质量和钢坯在炉内的安全运行起着至关重要的作用。如果高度太低, 则不能有效消除钢坯水管黑印, 达不到要求的加热质量, 反之, 则会因为滑轨的顶部温度太高, 一方面需要选择含有更多合金元素的耐高温材质, 增加投资和生产成本; 另一方面还会造成滑轨上端面的开裂和掉块<sup>[4]</sup>。另外, 由于滑轨、焊缝及炉底纵水管金属材料之间存在成分和组织相差较大的熔合界面, 界面两侧材料的物理性能不匹配, 膨胀系数和导热系数存在显著差异, 因而在高温的炉膛中, 在熔合

区将会产生较大的热应力。如果热应力过大, 一方面会造成炉底纵水管的波状弯曲, 另一方面会造成滑轨与纵水管之间脱焊断裂, 严重的话还会引起掉道事故。然而关于这方面的研究却很少, 文中应用三维传热和热应力耦合模型, 采用大型 ANSYS 商业计算软件, 对其在不同外形参数下的传热、应力和应变进行了数值模拟, 得出了一些有意义的结论, 为加热炉半热滑轨的设计和焊接提供参考依据。

## 1 模型的建立和计算方法

### 1.1 物理模型

如图 1 所示, 半热滑轨与炉底纵水管紧密地焊接在一起, 炉底纵水管中流动着冷却用的汽水混合物(汽化冷却系统)或冷却水(水冷系统)。为了减少热损失, 在纵水管的外部包有一定厚度的绝热材料。半热滑轨采用珠光体耐热钢, 焊缝金属采用奥氏体不锈钢, 纵水管采用材质为优质碳素结构钢的厚壁无缝钢管。根据对称性条件, 计算区域取实际区域的一半。考虑到在实际情况中, 半热滑轨与炉底纵水管之间除焊接部位外, 其它部位尽管接触紧密, 但是依然存在较大的接触热阻, 为了更精确地模拟半热滑轨与炉底纵水管之间的传热和相互作用, 建模时, 在没焊接的其它部位, 人为的增加了一薄层理想材料, 这种材料具有较小的导热系数和很小的弹性模量。

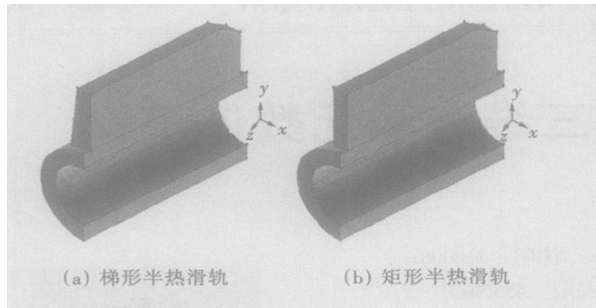


图 1 半热滑轨示意图  
Fig. 1 Chart of modest hot slid

1.2 传热及弹性计算模型

1.2.1 计算简化假定

为了使计算成为可能,突出研究问题的重点,特作如下假定:①冷却水与炉底纵水管内表面之间的局部对流换热系数保持不变,且冷却水温度恒定;②在炉膛内,各处炉气的温度和黑度一致,忽略炉内析热场和不均匀分配的辐射对传热的影响;③滑轨和

炉底纵水管与炉膛相比在几何尺寸上远远小于 1;④不考虑隔热和绝热材料对炉底纵水管传热的影响;⑤材料各相同性,且弹性模量、泊松比取平均值,都不随温度变化而变化;⑥材料是完全弹性的,在受力过程中,变形符合虎克定律,可以使用弹性理论来分析;⑦不考虑焊接残余应力的作用。

1.2.2 计算条件

采用某中板厂的 174 m<sup>2</sup> 连续推钢式加热炉为计算原形,其相关技术参数如下:①加热炉炉底面积:5.8 m×30 m;②最大加热钢坯尺寸:250 mm×1500 mm×2500 mm;③炉底纵水管尺寸:φ133 mm×22 mm;④炉底纵水管材质:20 A 类钢;⑤冷却方式:汽化冷却,汽包运行压力 0.4 MPa;⑥最大加热能力:89 t/h;⑦均热段炉气温度:1 330 ℃;⑧滑轨材质:Cr48Ni40W5;⑨焊条:A402。

根据文献[ 5],炉底纵水管内表面与冷却水之间的强制对流换热系数可取为:14 500 W/(m<sup>2</sup>·℃),传热及热弹性应力模型的计算参数如表 1,表 2 所示<sup>[9]</sup>。

表 1 传热计算参数  
Table 1 Heat parameter

材质	导热系数 λ/(W·m <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )									黑度 ε	对流换热系数 α/(W·m <sup>-2</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )
	20 ℃	100 ℃	200 ℃	300 ℃	400 ℃	600 ℃	800 ℃	1 000 ℃	1 200 ℃		
20A	36.5	36.2	35.9	35.7	34.7	31.7	27.8			0.78	687.5
Cr48Ni40W5	15.7	16.8	18.4	20.1	21.4	22.9	25.9	29.8	31.2	0.79	702.4
铬镍钢		16.2	17.5	18.8	20.4	23.3	25.9			0.79	698.2

表 2 弹性应力计算参数  
Table 2 Material parameter

材质	线膨胀系数 α <sub>l</sub> /×10 <sup>-6</sup> ℃ <sup>-1</sup>								弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
	100 ℃	200 ℃	300 ℃	400 ℃	600 ℃	800 ℃	1 000 ℃	1 200 ℃		
20A	51.1	48.5	44.4	42.7	35.5	28.5	27.6	29.7	198	0.28
Cr48Ni40W5			13.2	14.0	15.0	15.5	15.7	15.3	189	0.29
铬镍钢	16.2	17.2	18.3	20.1	23.8	26.7	28.0	29.6	196	0.28

1.2.3 传热模型

建立如图 1 所示的笛卡儿坐标系,则传热方程可表示为<sup>[7]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) = 0, \quad (1)$$

式中:λ 为材料的导热系数;T 为热力学温度。

边界条件:

炉底纵水管的内表面采用第三类边界条件,即

$$-\lambda \left[ \frac{\partial T}{\partial n} \right]_{wji} = \alpha_{wi} (T_{wi} - T_{fw}), \quad (2)$$

式中:α<sub>wi</sub> 为炉底纵水管内表面与冷却水介质之间的

对流换热系数;T<sub>wi</sub> 为炉底纵水管内表面的热力学温度;T<sub>fw</sub> 为冷却水介质的热力学温度。

炉底纵水管的外表面和滑轨的表面采用对流换热和辐射换热相结合的综合边界条件,即

$$-\lambda \left[ \frac{\partial T}{\partial n} \right]_{wo} = \alpha_{wo} (T_{wo} - T_b) + \varepsilon \sigma_0 (T_{wo}^4 - T_b^4), \quad (3)$$

式中:α<sub>wo</sub> 为炉底纵水管的外表面或滑轨表面与炉气之间的对流换热系数;T<sub>wo</sub> 为炉底纵水管的外表面或滑轨表面的热力学温度;T<sub>b</sub> 为炉气的热力学温度;ε 为炉底纵水管的外表面或滑轨表面的黑度;σ<sub>0</sub> 为黑体辐射常数。

其余表面为绝热边界条件为

$$-\lambda\left(\frac{\partial}{\partial n}\right)=0.$$
 (4)

1.2.4 热弹性应变模型

热弹性应变模型可由以下二式描述<sup>[8,9]</sup>,即

$$d\{\sigma\}=[D](d\{\epsilon\}-d\{\bar{\epsilon}\}_t),$$
 (5)

$$d\{\bar{\epsilon}\}_t=(\{\alpha\}+\frac{d[D]}{dt}\{\sigma\})dt,$$
 (6)

式中:  $\{\sigma\}$  为应力列阵;  $d\{\epsilon\}$  为应变增量列阵;  $d\{\bar{\epsilon}_t\}$  为热应变增量列阵;  $\{\alpha\}$  为热膨胀系数列阵;  $[D]$  为系数矩阵。

载荷条件:

炉底水管内壁水压强载荷:  $p=0.4\text{ MPa}$ 。

滑轨上端面钢坯压强载荷:  $p=1.4625\text{ MPa}$ 。

滑轨上端面钢坯摩擦应力载荷:  $\tau=0.14625\text{ MPa}$

温度载荷: 由式(1)计算得到。

2 计算与结果分析

2.1 计算方案

首先根据截面形状将滑轨分为梯形和矩形两种类型, 两种类型半热滑轨上端面宽度都为 40 mm, 下端面宽度梯形的为 60 mm、矩形的为 40 mm, 然后再分别以滑轨的长度和高度作为变量进行计算。其中滑轨长度 ( $L$ ) 分别取 200, 250, 300, 350, 400 mm 五组, 高度分别取  $H=40, 50, 60, 70, 80, 90\text{ mm}$  六组, 两种类型共计 60 组情况进行计算。在求解过程中, 为了保证计算精度和提高计算速度, 将其划分为非均匀网格, 在焊缝附近热应力大, 因而在焊缝及其附近采用较小的网格, 而远离焊缝处采用较大的网格。由于应变对温度分布的影响很小, 所以采用 ANSYS 间接热应力分析方法, 首先进行热分析, 求得各节点的温度, 然后将求得的节点温度作为体载荷施加于结构应力分析中, 再进一步求得各节点的应力和应变。

2.2 结果分析

图 2 示出了  $L=250\text{ mm}$ ,  $H=90\text{ mm}$  的梯形半热滑轨的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 及应变和等效应力 (Pa) 分布云图 (由于篇幅所限, 其它尺寸和外形滑轨的云图没有示出)。由计算结果可知, 无论是矩形还是梯形半热滑轨, 其最高温度均位于上端面的直角处, 最低温度位于炉底纵水管内表面, 而在焊缝及炉底纵水管外表面处, 由于受到汽化冷却系统的强制冷却作用, 其温度均低于  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最大等效应力位于半热滑轨与炉底纵水管的焊缝处, 这是由于滑轨、焊缝及炉底纵水

管金属材料之间存在成分和组织相差较大的熔合界面, 界面两侧材料的物理性能不匹配, 膨胀系数和导热系数存在显著差异, 因而在高温的炉膛中, 在熔合区将会产生很大的热应力。从应变来看, 炉底纵水管有上凸的趋势, 这与长期运行的加热炉炉底纵水管存在波状弯曲的现象相一致。

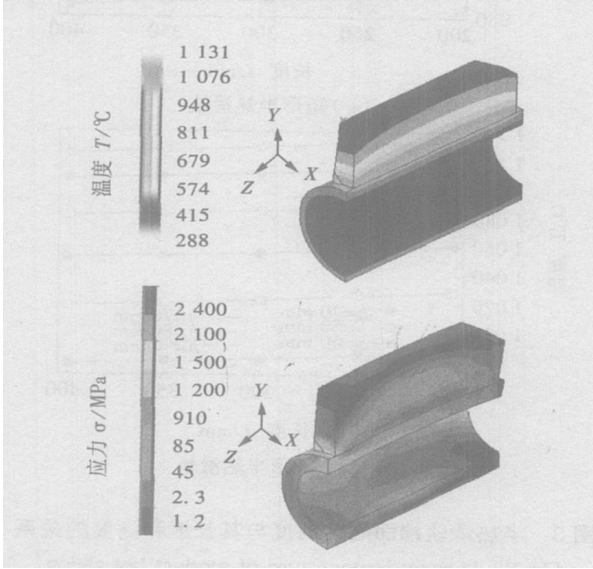


图 2 梯形半热滑轨温度及应变和等效应力分布云图  
Fig. 2 Temperature strain and stress nephogram of trapezoid modest hot slid

图 3 示出了矩形和梯形两种半热滑轨的端面最高温度与滑轨的高度及长度的关系。从图中可以看出, 无论是矩形还是梯形, 随着滑轨高度的增加, 其端面最高温度也快速升高, 高于 80 mm 左右时, 其温度增高趋势逐渐变缓, 有关材料介绍半热滑轨高度不应高于 80 mm, 这主要是从材质和运行安全角度考虑, 从计算结果来看, 在材质允许的情况下滑轨可以设计的更高一些, 因为当滑轨达到一定高度后, 再增加高度而滑轨端面温度却增加不多, 但对钢坯的下部传热却非常有利。从图中也可以看出, 在同一高度下, 随着长度的增长, 滑轨的端面最高温度稍有下降, 但降幅小于  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是因为, 随着长度的增长, 受汽化冷却的表面积与接受炉气传热的表面积之比稍有增大, 但增大值非常有限。

通过比较也可以看出, 在同样的高度和长度下, 梯形滑轨的端面最高温度要比矩形滑轨低  $15\sim20\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。这主要是因为, 与矩形滑轨相比, 梯形滑轨与炉底纵水管具有更大的接触面积, 在同样的工况条件下, 将受到更强的冷却作用。因此, 在相同的材质和加热条件下, 梯形滑轨可以设计的更高一些。

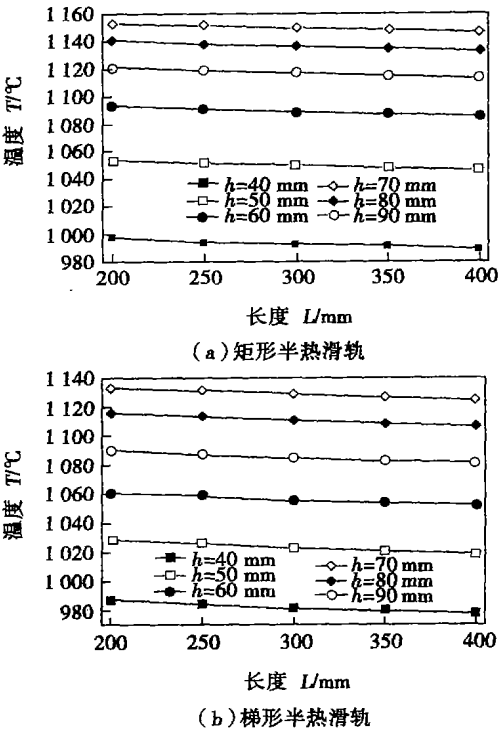


图 3 半热滑轨端面最高温度与其长度和高度的关系  
Fig. 3 Highest temperature of modest hot slides versus length and height

图 4 给出了矩形和梯形两种半热滑轨的最大等效应力与其高度和长度的关系。从图中可以看出，

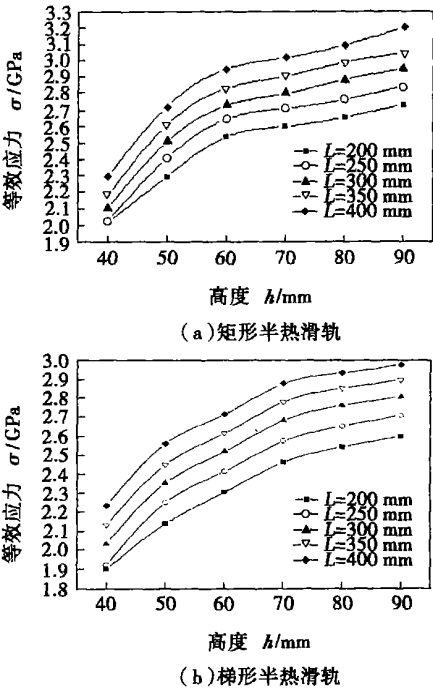


图 4 半热滑轨最大等效应力与高度和长度的关系  
Fig. 4 Maximal equivalent stress of modest hot slid versus height and length

其等效应力均随着长度及高度的增大而增加，最大可达到 3.091 GPa，但滑轨增加到一定高度后，其最大等效应力增大趋势逐渐平缓，但最大等效应力与滑轨的长度基本上呈直线关系，持续增大。在同样的高度和长度下相比较，梯形滑轨的等效应力小于矩形滑轨，其变形量也相对较小。因而，从使用性能上来讲，梯形半热滑轨优于矩形半热滑轨。

3 结 论

- (1) 无论是矩形还是梯形半热滑轨，其最高温度均位于上端面的直角处，最低温度位于炉底纵水管内表面，在焊缝及炉底纵水管外表面处，其温度均低于 350 °C。
- (2) 两种半热滑轨的端面最高温度随着滑轨高度的增大而升高，随着滑轨长度的增长而稍有降低；在相同的高度和长度下，梯形滑轨比矩形滑轨的端面最高温度低 15~20 °C。
- (3) 两种滑轨的最大应力均位于坡口堆焊金属与滑轨的焊缝处，其值随着滑轨高度和长度的增大而增大，且梯形滑轨小于矩形滑轨。
- (4) 从计算结果来看，在使用性能上，梯形半热滑轨优于矩形半热滑轨。

参考文献:

[1] 邓志刚. 加热炉纵水管的布置的改进及热滑轨结构的选择 [J]. 冶金能源, 1997, 16(1): 40-43.  
[2] 陆钟武. 火焰炉 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.  
[3] 吴荣荣, 马华政. 高温合金在钢坯加热炉中的应用 [J]. 金属学报, 1999, 35(12): 1259-1261.  
[4] 冯明杰, 陈文仲, 吴海霞. 滑块温度分布的计算及分析 [J]. 冶金能源, 2003, 22(2): 30-36.  
[5] 蔡照信. 气化冷却工艺在钢铁企业中的应用和发展 [D]. 沈阳: 东北大学, 1984.  
[6] 陈家祥. 连续铸钢手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.  
[7] 杨世铭. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.  
[8] 金晓军, 霍立兴, 张玉凤, 等. 双相不锈钢管道全位置焊接残余应力三维有限元数值模拟 [J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 52-56.  
[9] Rybicki E F, Stonesifer R B. Computation of residual stresses due to multiphase welds in piping systems [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1979, 101(2): 149-154.

作者简介: 冯明杰, 男, 1971 年出生, 博士生, 工程师。研究方向为电磁连续铸造高速钢复合轧辊, 发表论文 6 篇。  
Email: mingjie\_feng@163.com

ta of short-circuiting time  $t_1$ , burring time  $t_2$ , weighted burning time  $t_3$ , cycle time  $t_c$ , which are existed in four kinds of typical metal transfer modes and can be added up and analyzed by ANALYSATOR HANNOVER. Four typical metal transfer modes can be evaluated by analyzing above-mentioned parameters. The arc physical characteristic of different metal transfer modes can be accurately described. The statistical analysis of electric parameters which are collected by ANALYSATOR HANNOVER provide a new method to determine the metal transfer mode for the covered electrodes.

**Key words:** covered electrode; welding arc physics; metal transfer; ANALYSATOR HANNOVER

**Vacuum hot roll bonding of titanium to stainless steel using Cu and Nb composite interlayer** ZHAO Dong-sheng, YAN Jiu-chun, WANG Yong, YANG Shi-qing (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p99–102

**Abstract:** This article describes a study of the application of a vacuum hot roll bonding technique to Ti alloy plate and stainless steel plate using the composite interlayer of copper (pure copper and copper contains lanthanum Yt) and Nb sheet. The tensile strength was tested and the microstructure of the joint interface, fractograph and the structure of copper interlayer were analyzed by optical and scanning electron microscopy, XRD, energy spectrum analysis. The results showed that the defects such as separation and crack were not observed at interface, and there are no intermetallic compounds formed after bonding. There existed a transition layer at Nb-Ti interface, the thickness of which is about 2.5  $\mu\text{m}$  and the thickness of transition layer at Cu-SS and Nb-Cu interface is about 1.9  $\mu\text{m}$ . At copper grain boundary the voids were observed and the fractograph showed crack along the grain boundary. Doping of the lanthanum Yt can reduce the grain size. No voids appear in copper layer with Yt comparing with without Yt with the same bonding parameters, and the effect of reducing grain size is more efficient with the content of Yt in copper increasing from 0.01% to 0.02wt%. Comparing with the specimen using pure copper interlayer, the tensile strength increased 51.3 MPa (Yt 0.01wt% in Cu) and 61.7 MPa (Yt 0.02wt% in Cu), respectively.

**Key words:** vacuum hot roll bonding; Ti alloy; stainless steel

**Pitting resistant test of welded joint of YUS270 steel** DUAN Yang-zhong, ZHANG Yu-feng, HUO Li-xing (School of Material Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p103–105

**Abstract:** YUS270 steel is a super austenitic stainless steel produced by Japan and has a perfect pitting resistance. The specimens had been put into the hydrochloric acid with  $\text{FeCl}_3$  for testing pitting resistance. The experiment was based on ASTM G-48 Test Method C at 40  $^{\circ}\text{C}$ . Then the losing weight, pitting density and maximal depth were compared. The results showed that all the items sat-

isfied the standard in this condition. It also proved the excellent pitting resistance of  $\text{Cl}^-$  of YUS270 steel and provided the evidence for the application in the offshore oil platform.

**Key words:** YUS270 steel; super austenitic stainless steel; pitting

**Forming mechanism of flash butting welded joint of SiC particle reinforced aluminium matrix composite ( $\text{SiC}_p/3003\text{Al}$ )** TU Yi-min, LI Xing-rui (Material Science and Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China). p106–108

**Abstract:** The studies were conducted by flash butting welding of SiC particle reinforced 3003 aluminium matrix composites. The welding process of SiC particle reinforced 3003 aluminium matrix composite can be conducted effectively and the joint of high quality can be gained under the appropriate flash butting welding parameters. The forming mechanism of the joint was studied by means of EDX unit and SEM. The distribution of SiC particles in the joint and interface reaction of SiC-Al were analyzed and discussed. The results show that the impurities of gas and solid state can be removed and the sound joint without gas hole, impurities and cracking can be gained by means of the burst of metal beam and the plastic deformation of joint interface in the flash butting welding process, and the joint possesses high strength owing to the SiC particle gathering in the joint zone. When the SiC-Al reacted, the harmful affection for the joint quality can be reduced because of low welding temperature and short welding time in the flash butting welding process.

**Key words:** metallic matrix composite; flash butting welding; welded joint

**Three dimensional finite element numerical simulation of temperature and stress in modest hot slide** FENG Ming-jie<sup>1</sup>, WU Hai-xia<sup>2</sup> (1. Key Laboratory for Electromagnetic Processing of Materials of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Anyang Iron & Steel Ltd. Co., Anyang 455004, Henan, China). p109–112

**Abstract:** On the base of the thermal-elastic theory, the three-dimensional finite element numerical analysis simulated distribution of temperature, strain and stress in the modest hot slides with ANSYS sequential coupling analyzing heat transfer and stress equations. The results show that the highest temperature rises with increasing of height of the slide and reduces with increasing of length of the slide, and the highest temperature of trapezoid slide is lower 15–20  $^{\circ}\text{C}$  than that of rectangle slide at the same time. The highest equivalent stress for the rectangle slide is bigger than that of the trapezoid slide at the same time, and it lies in weld and rises with increasing height and length of the slide.

**Key words:** heating furnace; modest hot slide; temperature distribution; stress distribution