

料层减荷烧结支撑板数值模拟

左海滨 刘征建 张旭 杨天钧 蒋海冰

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

摘要 在烧结台车上安装支撑板,可以支撑起上部烧结饼,减轻下部料层荷重,从而改善下部料层透气性,提高垂直烧结速度,进而提高烧结生产率.应用 ANSYS 软件对烧结过程中料层内支撑板的热应力进行模拟.结果表明:烧结过程中,支撑面中间部位和支撑板窄面中上部是最容易损坏的部位;排矿时,支撑板支脚部位产生应力集中,当支脚厚度大于 40 mm 时可以满足要求.料层减荷烧结工业试验验证了模拟结果的正确性.

关键词 炼铁; 烧结; 支撑板; 热应力模拟

分类号 TF 124.5

Numerical simulation of the stand in load-reduction sintering process

ZUO Hai-bin, LIU Zheng-jian, ZHANG Xu, YANG Tian-jun, JIANG Hai-bing

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT Upper sinter cakes could be supported by the stands installed on the pallets and the load of the lower bed was reduced. As a result the permeability of the lower bed was improved and the sintering velocity increased, moreover the productivity of sintering was boosted. The thermal stress of the stand was simulated during sintering process with ANSYS software. The results revealed that during sintering process the middle of the supporting surface and the middle and upper zone of the narrow surface of the stand were most easily damaged. During discharging, stress concentration occurred at the feet of the stand. When the thickness of the feet was over 40 mm the stand worked safely. The validity of simulation results were proved by the industrial trial of load reduction sintering.

KEY WORDS ironmaking; sintering; stand; heat stress simulation

烧结生产率的提高主要通过改善料层透气性来实现,国内外对于通过加强原料准备、改善烧结混合料制粒以及安装合适的松料器等措施改善料层透气性的研究较多^[1-4].近年来,厚料层烧结技术不断进步,料层厚度不断提高,烧结饼本身重力在抽风作用下对烧结过程的影响越来越受到重视^[5-7].从减轻烧结饼自重对抽风作用的影响出发,提出了料层减荷烧结技术.目前料层减荷烧结主要通过磁力悬浮法和料层内安置支撑板的方法来实现.烧结杯实验中,两种方法均能够提高生产率 20% 以上,并且烧结矿还原性改善.磁力悬浮法由于设备复杂,目前未见工业应用的报道;而料层内安置支撑板的方法只需对现有烧结机进行简单改造即可,工业实施方便,目前该技术

在日本新日铁和我国福建三钢烧结厂得到成功应用^[8-12].

支撑板安置在料层内部,要经历整个烧结过程,工作条件十分恶劣,当支撑板发生断裂或严重烧损后,使用效果大大降低,而且频繁更换支撑板会造成烧结机作业率降低,因此提高支撑板使用寿命是使该技术获得最大经济效益的关键.本文通过支撑板热应力模拟,揭示烧结过程中支撑板的工作状态,分析支撑板破损的机理,为支撑板材质选择、结构优化提供理论指导.

1 支撑板热应力模型的建立

1.1 支撑板热应力分析数学模型

通过对支撑板工作环境和运行时的受力分析可

收稿日期: 2008-12-11

作者简介: 左海滨(1976-),男,讲师, E-mail: zuohaibin@metall.ustb.edu.cn

知,支撑板不仅承受烧结成矿带的负荷,而且由于燃烧带沿支撑板自上向下运动,支撑板内温度变化导致板内发生热应变,从而产生热应力.因此要对支撑板温度场和应力场进行耦合分析.

根据能量守恒定律,支撑板传热控制微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

根据热弹性力学原理,以位移分量表示的支撑板热弹性力学平衡方程为:

$$\begin{cases} (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + G \nabla^2 u - \beta \frac{\partial T}{\partial x} + X = 0 \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G \nabla^2 v - \beta \frac{\partial T}{\partial y} + Y = 0 \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \nabla^2 w - \beta \frac{\partial T}{\partial z} + Z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, k 为导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_p 为比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; τ 为时间, s ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; u, v 和 w 为 x, y 和 z 三个方向位移分量, m ; X, Y 和 Z 为 x, y 和 z 三个方向的体积分力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$; $\lambda = E\mu / [(1 + \mu)(1 - 2\mu)]$, 拉梅常数; $G = E/2(1 + \mu)$, 剪切弹性模量; $\beta = \alpha E / (1 - 2\mu)$, 热应力系数; $e = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$, 体积应变; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯算子; E 为弹性模量, Pa ; α 为线膨胀系数, K^{-1} ; μ 为泊松比.

给定温度及应力计算的边界条件,联立式(1)和式(2)可求解出支撑板温度场和应力场.

1.2 支撑板结构及材质物性参数

假设烧结过程沿台车宽度方向是均匀的,计算时取 1/2 支撑板进行分析.支撑板受力及各个面的定义如图 1 所示.支撑板所用材质为 Cr 系耐热钢,热物性参数和力学参数见表 1.该材质熔点为

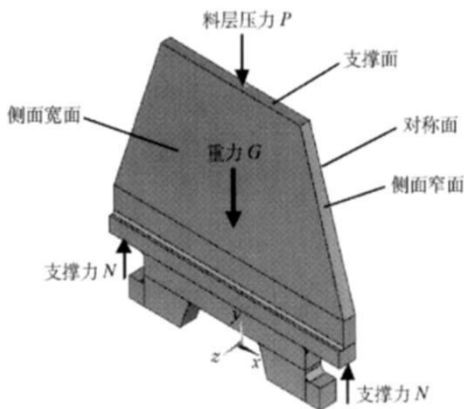


图 1 支撑板受力分析及各个面的定义

Fig.1 Force analysis and definition of surfaces

1500~1530 $^{\circ}\text{C}$, 密度为 $7700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 高温下的屈服极限为 453~583 MPa, 强度极限为 534~711 MPa.

表 1 材质的物性参数及力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

温度/ $^{\circ}\text{C}$	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	弹性 模量/ GPa	线膨胀 系数/ 10^{-6} K^{-1}
20	—	—	217	—
50~100	—	473	—	—
100	25.1	—	—	10.5
100~200	—	507	—	—
200	25.9	—	206	11.0
200~300	—	544	—	—
300	26.8	—	198	11.5
300~400	—	595	—	—
400	28.1	—	189	12.0
400~500	—	666	—	—
500	28.9	—	179	12.0
550	—	—	165	—
500~600	—	754	—	—
600~700	—	846	—	—
700~750	—	904	—	—
750~800	—	691	—	—
800~850	—	515	—	—

注:材质的泊松比为 0.3.

1.3 边界条件和初始条件

(1) 温度场分析初始条件和边界条件. 烧结生产过程中,支撑板固定在台车上,当燃烧带未到达支撑板时,支撑板温度与周围料层温度相同,为了减小过湿层的影响,烧结混合料一般要经过预热,预热温度可达 60~70 $^{\circ}\text{C}$,计算时取支撑板初始温度为 65 $^{\circ}\text{C}$.支撑板在烧结过程中热量的传递主要以对流换热为主,气体与支撑板间的辐射换热以及烧结矿与支撑板之间的传热是少量的.计算过程中采用第 3 类边界条件,利用强制对流换热公式计算出各个面的对流换热系数如表 2^[13],对称面为绝热边界,换热系数为 0.

表 2 支撑板不同壁面的换热系数

Table 2 Heat transfer coefficient of different surfaces

侧面宽面及侧面窄面			$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		
成矿带	燃烧带	生料带	支撑面	对称面	其他
249.2	388.4	103.7	249.2	0	15.47

测定料层内不同高度位置的温度变化是十分困难的,因此根据前人对烧结杯实验中料层温度变化规律的研究,结合烧结机尾红外摄像仪测量的料层温度分布,并考虑料层的自蓄热作用,给出料层不同高度位置的温度变化如图 2 所示.在台车算条以下,支撑板周围的废气温度利用实测风箱废气温度给出.

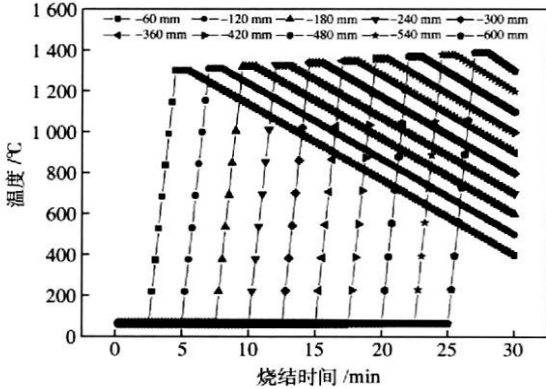


图 2 料层内不同高度位置的温度变化

Fig.2 Change in temperature at different heights of the sintering bed

(2) 结构分析边界条件. 支撑板与烧结台车算条接触部位施加完全约束,其他面为自由边界. 支撑板随台车运行时,在不同阶段承受的上部料层压力是变化的. 当烧结结束时,支撑板所受的负荷达到最大值. 为简化计算,取支撑板最大载荷作为支撑板的外载荷,并忽略侧面窄面上的压力. 烧结矿密度随配料发生变化,根据烧结机台时产量及料层厚度估算烧结矿密度为 $2\ 000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,根据每块支撑板平均支撑的烧结饼面积计算出作用在支撑面上的载荷. 温度载荷由温度场计算结果直接给出.

本文应用基于有限元的 ANSYS 软件模拟支撑板在烧结过程中的温度及应力变化情况,计算采用间接耦合的方式进行. 根据料层高度及烧结时间计算平均垂直烧结速度为 $21\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,烧结温度取 $1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$,燃烧带宽度取 30 mm .

2 计算结果与分析

2.1 支撑板温度分析

烧结不同阶段支撑板内温度分布情况如图 3 所示.

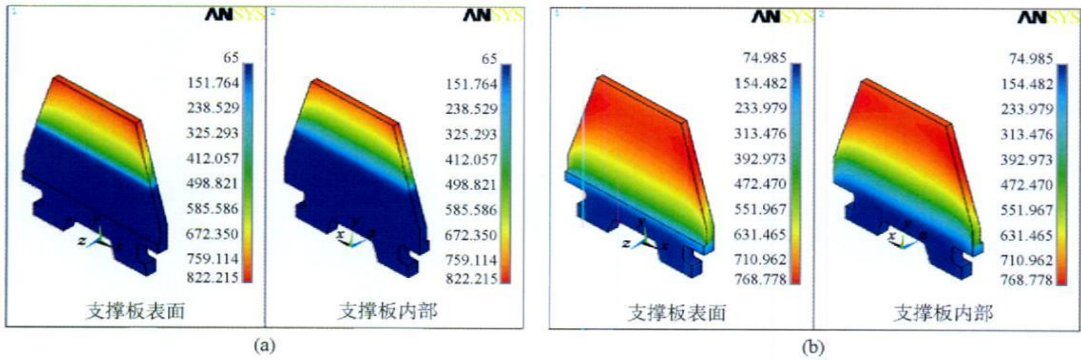


图 3 烧结不同阶段支撑板温度分布. (a) 最高温度时刻; (b) 烧结结束时刻

Fig.3 Temperature distribution of the stand in different sintering stages; (a) time of the highest temperature; (b) time of the burn-through point

从图中看出:整个烧结过程中,当燃烧带到达支撑板 $1/2$ 高度时,支撑板温度达到最高,位于支撑面角部,达到 $822.2\text{ }^\circ\text{C}$. 当烧结结束时,支撑板最高温度下降到 $768.8\text{ }^\circ\text{C}$,位于支撑板上上部靠近支撑面的位置,支撑板下部靠近算条的位置温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 左右. 台车算条下面支脚部位温度始终较低,小于 $100\text{ }^\circ\text{C}$. 整体来看,支撑板上半部分温度普遍高于下半部分,而且最高温度位置在烧结过程中,始终位于中上部,上半部分温度高,高温持续时间长,对材料性能影响大. 温度为 $1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ 左右的燃烧带沿支撑板逐渐向下移动,燃烧带经过之处,温度迅速升高,在支撑板侧面窄面边缘上温度变化最为剧烈,温度变化如图 4 所示.

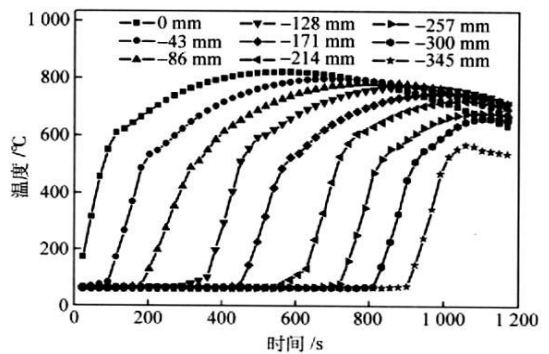


图 4 支撑板窄面温度变化

Fig.4 Change in temperature on the narrow surface of the stand

从图中看出:燃烧带经过位置,在开始阶段温度

迅速上升,随着燃烧带下移,升温速率逐渐减小,之后随着该位置烧结矿在抽风作用下逐渐冷却,支撑板温度在达到最高后开始下降,但温度下降速率明显小于升温速率;这种快速升温、缓慢降温的温度循环方式对材料的热疲劳强度非常不利. 同时在快速升温阶段,支撑板边缘受到的热冲击严重,产生很大的热应力. 此外,从支撑面向下,随着高度的降低,最高温度逐渐下降,而且高温持续时间逐渐缩短,支撑板上部更容易损坏.

2.2 支撑板应力分析

不同烧结阶段支撑板应力分布如图 5 所示. 从图中看出,支撑板表面应力大于内部应力. 在开始阶段,支撑板内最大应力位于支撑面中心部位,达到 724 MPa;随着燃烧带下移,最大应力位置逐渐转移到支撑板窄面边缘上,当燃烧带到达支撑板高度 1/2 左右时,支撑板内最大等效应力达到 862 MPa. 对于支撑板内部,在整个烧结过程中,除了很小区域应力较大外,绝大部分区域应力小于 300 MPa.

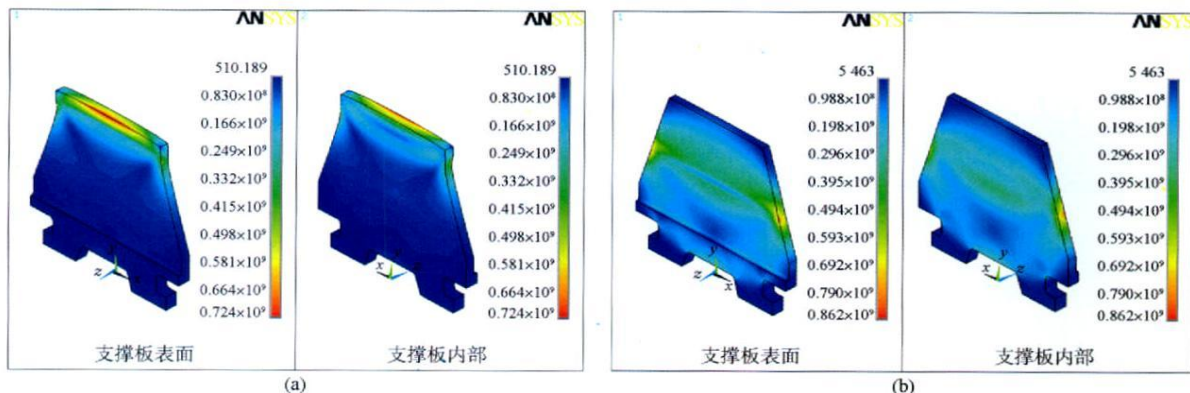


图 5 不同烧结阶段支撑板应力分布. (a) 燃烧带经过支撑面时刻; (b) 最大应力时刻

Fig. 5 Stress distribution of the stand in different sintering stages: (a) time when the combustion zone passes through the supporting area; (b) time of the maximum stress

支撑面上应力随时间变化如图 6 所示. 由图 6 可以看出,在整个烧结过程中,支撑面中心区域较大范围内应力始终大于两边的应力. 随着烧结进行,燃烧带逐渐远离支撑面,在 630 s 左右时,支撑面周围温度分布逐渐均匀,支撑面上的应力减小,平均小于 10 MPa. 随后在抽风作用下,支撑板表面温度开始下降,支撑板内温度梯度发生变化,应力逐渐增大. 烧结结束时的应力水平与 450 s 时相当,最大应力在 200 MPa 左右. 由于温度对材料的力学性能影响较大,因此在分析热应力的同时还要考虑温度的

影响. 支撑面应力较大时,温度与应力的分布如图 7 所示.

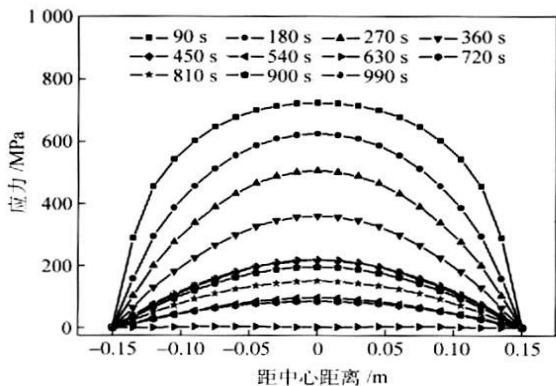


图 6 支撑面应力变化

Fig. 6 Change in stress on the supporting surface of the stand

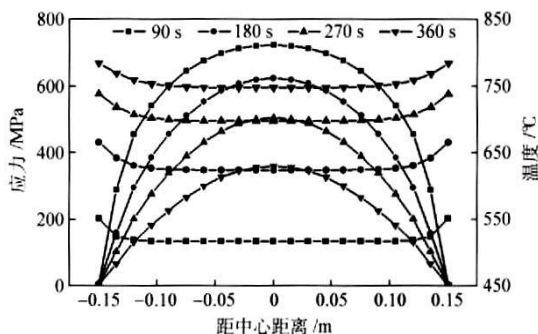


图 7 支撑板支撑面应力与温度分布

Fig. 7 Stress and temperature distribution on the supporting surface of the stand

由图 7 可以看出,在燃烧带到达支撑面时,支撑板应力最大,而且温度较高,达到 500 °C 以上,非常容易产生龟裂纹. 随着烧结进行,应力逐渐下降,但温度迅速升高,当应力下降到 350 MPa 左右时,温度升高到 750 °C 以上. 可见,在燃烧带经过支撑面以后一段时间内,支撑面中心部位始终处于高温下应力较大的状态,因此支撑面中心部位是最容易损坏的. 同时,由于最大应力位置始终位于中心部位,所

以该部位裂纹发展速度较快,形成的裂纹较深.

在支撑板侧面窄面上,随着烧结的进行,最大应力位置逐渐下移,最大应力值先增大后减小. 在支撑板 1/2 高度偏上位置,应力达到最大的 860 MPa 左右. 支撑板窄面应力达到最大值的前后时刻应力、温度分布如图 8 所示.

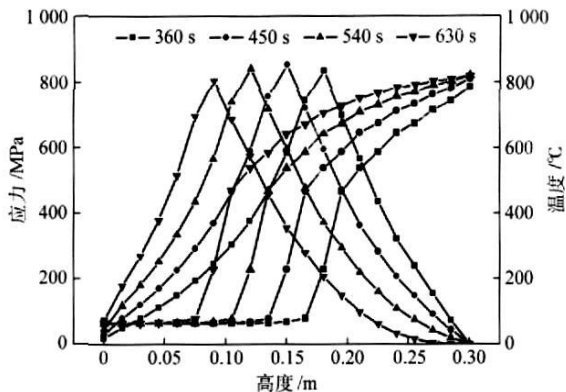


图 8 支撑板窄面应力与温度分布

Fig. 8 Stress and temperature distribution on the narrow surface of the stand

整体看来支撑板上下部分应力值相当,但上部温度明显高于下部,而且由温度分析可知,支撑板上部高温时间长,材质热强度下降,因此支撑板上半部分的侧面窄面处更容易出现裂纹. 同时看到,在支撑板侧面窄面上应力最大位置的温度均不高,为 100~200 °C,但在最大应力点以上 0.025~0.075 m 的范围内往往温度较高,应力也较大,容易发生裂纹. 在支撑板窄面上,由于应力最大位置是不固定的,因此在窄面上容易出现裂纹的范围较宽,裂纹出现后,会释放内应力,导致窄面上以细小裂纹居多.

2.3 支撑板支脚部位应力分析

在烧结过程中,支脚断裂会造成支撑板脱落,给烧结过程带来安全隐患. 由前面的热应力计算可以看出,烧结过程中支脚部位热应力较小,最高只有几十兆帕,而且该部位温度较低,因此烧结过程中发生断裂的可能性很小. 在排矿时,由于台车粘料或支

撑板对料层阻力较大,造成料层有时不能靠自身重力自行排矿,要靠机尾刮刀的冲力把料层冲开,才能排矿,这时支撑板支脚要承受较大的冲击力. 对烧结矿高温抗压强度的研究表明,在不同温度下其值存在较大差异,从几兆帕到 30 MPa 之间^[14],随着温度升高,抗压强度下降. 对厚度分别为 70 和 40 mm 的整体式支脚和由两片厚度为 10 mm 的小脚组成的中空式支脚在排矿时产生的应力进行模拟. 中空式主要是考虑降低支撑板重量,降低成本. 当烧结饼强度为 7 MPa 时三种支脚的应力分布如图 9 所示.

从图中看出,三种形式支脚的应力集中都在支脚部位,支撑板本体应力都很小,在本体上主要是热应力的破坏. 支脚厚度为 70 mm 时,支脚部位最大应力仅为 90.3 MPa,远小于材料的屈服极限. 当支脚厚度减到 40 mm 时,支脚部位的应力达到 244 MPa,对于一般的耐热钢而言也是安全的. 当采用中空式时,支脚由两个 10 mm 的小脚组成,此时小脚的应力达到了 2 000 MPa 以上,所以断裂的可能性非常大. 因此,采用两个 10 mm 厚度支脚组成的中空式设计是不可取的. 为了进一步考察降低整体式支脚厚度的可能性,对烧结饼强度较大的极端情况进行模拟. 当烧结饼强度增加到 30 MPa 时,支脚厚度为 40 mm 的支撑板应力分布如图 10 所示.

从图中看出,支脚部位的应力集中达到 1 050 MPa,其中大于 680 MPa 的区域主要集中在突出的小脚根部,进入支脚深度较浅,可能不会马上断裂,但会逐渐产生裂纹. 在循环不断的冲击下,断裂萌生是不可避免的. 当烧结矿强度为 20 MPa 时,支脚部位的最大应力为 697 MPa,此时接近材料的屈服极限,应该说还是比较安全的. 对于支脚厚度为 70 mm 的支撑板,当烧结饼强度为 30 MPa 时,支脚部位的最大应力仅为 386 MPa,因此支脚厚度为 70 mm 时是安全的. 由于烧结饼强度在高温下不是很高,因此选择支脚厚度时,为了降低重量选择支脚厚度为 40 mm 就可以了.

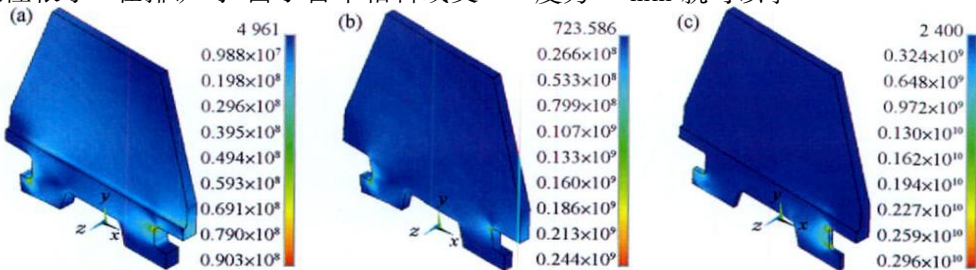


图 9 烧结饼强度为 7 MPa,排矿时支撑板应力分布. (a) 支脚厚度 70 mm; (b) 支脚厚度 40 mm; (c) 中空式支脚厚度 10 mm

Fig. 9 Stress distribution of the stand at discharging when the strength of sinter cakes is 7 MPa; (a) the thickness of supporting feet is 70 mm; (b) the thickness of supporting feet is 40 mm; (c) the thickness of hollow supporting feet is 10 mm

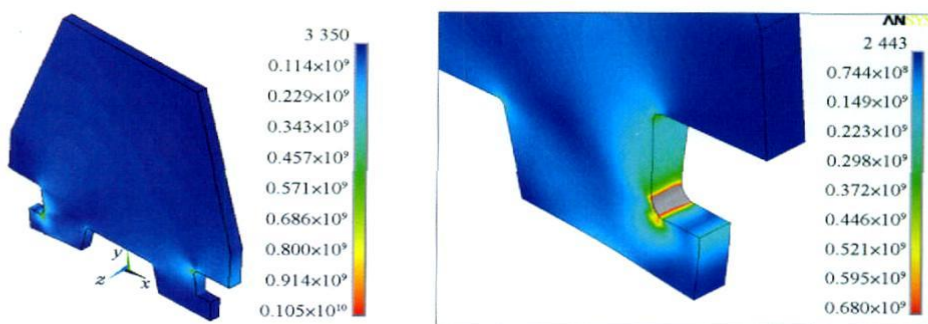


图 10 支脚厚度为 40 mm 时支撑板应力分布

Fig. 10 Stress distribution of the stand when the thickness of feet is 40 mm

3 支撑板应用

料层减荷烧结工业试验在福建三钢烧结厂 33 m² 烧结机进行, 在每部台车的后两排算条中间部位分别安装支撑板, 支脚厚度为 40 mm. 工业试验

表明, 安装支撑板后, 烧结机利用系数最大提高 6.90%, 转鼓强度几乎不变, 还原性提高. 支撑板使用 4 个月后, 随机抽取台车上前排后排支撑板各 30 块, 对破损情况进行分析. 支撑板损坏形式如图 11 所示.

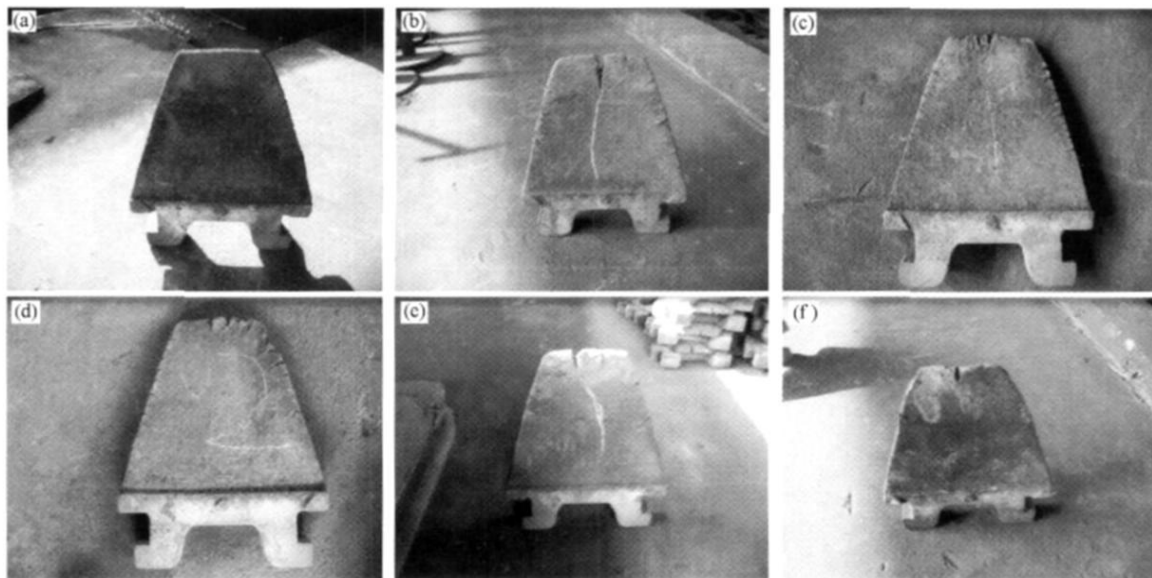


图 11 支撑板破损形式: (a) 轻度磨损; (b) 单一开裂; (c) 锯齿开裂; (d) 小块缺损; (e) 顶部变形; (f) 严重烧损

Fig. 11 Damage styles of stands; (a) slight abrasion; (b) single crack; (c) saw-toothed crack; (d) lump loss; (e) distortion on the top; (f) severe burning loss

将支撑面的破损形式分为 6 类, 即轻度磨损、单一开裂、锯齿开裂、小块缺损、顶部变形和严重烧损, 并对各种损坏形式进行统计如表 3.

表 3 支撑面破坏形式统计

Table 3 Statistics of damage styles of the supporting surface 块

支撑板位置	破坏形式					
	轻度磨损	单一开裂	锯齿开裂	顶部变形	小块缺损	严重烧损
前排	3	13	7	2	3	2
后排	7	15	8	0	0	0

从表 3 中可以看出, 无论是前排还是后排支撑

板, 支撑面靠近中心区域单一开裂和锯齿开裂的支撑板数量都是最多的, 两者共占 2/3 以上. 由热应力模拟结果可知, 此部位不仅温度高, 而且热应力大, 在循环热应力作用下, 损坏最为严重. 同时, 在整个烧结过程中, 最大应力始终位于中间部位, 加快了裂纹的发展. 单一开裂最大长度为 80 mm, 平均为 47 mm, 最大宽度为 20 mm, 平均为 11 mm; 锯齿开裂除一块有三条裂纹外, 其余均为两条, 开裂最大长度为 50 mm, 平均为 26 mm, 最大宽度为 22 mm, 平均为 9 mm. 裂纹的产生会释放热应力, 同时产生裂纹敏感性. 多条裂纹的产生使应力在多点释放,

而且多条裂纹一般会偏离应力最大的中心部位,因此裂纹发展速度小于单条中心裂纹.

支撑板窄面上的侧面裂纹多为 1~3 mm 的浅裂纹,比支撑面裂纹要小得多,但数量多.前排支撑板共计裂纹 139 条,后排 107 条,平均每块支撑板 4.1 条.裂纹多位于支撑板中上部,分布范围较宽.由热应力模拟结果可知,随着烧结的进行,支撑板窄面最大应力值所处位置逐渐下移,不像在支撑面上,应力最大位置始终位于支撑面中心,所以侧面裂纹的发展速度比支撑面要慢.同时,由于支撑板侧面窄面上最大应力位置不断变化,在最大应力值较大的区域,均可能出现裂纹,因此侧面窄面出现裂纹数量较多,分布范围也要宽.多条裂纹对应力集中的分散作用和支撑板侧面受到料层的压力较小也是侧面裂纹发展缓慢的原因之一.

此外,支撑板在高温下的烧损、烧结矿的冲刷、磨损以及硫化腐蚀也是造成支撑板逐渐破坏的原因.

4 结论

(1) 料层内支撑板损坏主要是热应力破坏和高温烧损.在支撑面上,中间部位始终应力最大,而且温度较高;支撑板窄面上应力最大位置逐渐下移,最大应力位置温度为 100~200 °C.因此支撑板损坏形式以支撑面单一开裂和锯齿开裂为主,其次为支撑板窄面细小裂纹.

(2) 通过对排矿时支撑板应力模拟可知,排矿时支撑板支脚部位产生应力集中,支撑板支脚设计应为整体式,厚度大于 40 mm 能够满足要求.

(3) 工业试验验证了模型模拟的正确性.

参 考 文 献

- [1] Zhang Y M, Wang H B, Cheng G B. Measures to improve sinter machine utilization factor. *Iron Steel*, 2000, 35(5): 1
(张咏梅, 王宏斌, 程国彪. 提高烧结机利用系数的措施. 钢铁, 2000, 35(5): 1)
- [2] Ramos M V, Kasai E, Kano J, et al. Numerical simulation model of the iron ore sintering process directly describing the agglomeration phenomenon of granules in the packed bed. *ISIJ Int*, 2000, 40(50): 448
- [3] Kamijo C, Matsumura M, Kawaguchi T. Sintering behavior of raw material bed placing large particles. *ISIJ Int*, 2004, 45(4): 544
- [4] Zhang Z L, Lv J Z. Practice of increasing the ventilation of sintering mixture. *Sinter Pelletiz*, 2004, 29(4): 52
(张展雷, 吕娟珍. 提高烧结料层透气性的实践. 烧结球团, 2004, 29(4): 52)
- [5] Zhou X W, Chen T Z, Zuo J T. Application of low temperature and deep bed sintering technique. *Sinter Pelletiz*, 2003, 28(3): 34
(周先武, 陈天柱, 左江涛. 低温厚料层烧结技术的应用. 烧结球团, 2003, 28(3): 34)
- [6] He X X. Development of deep-bed sintering in Wugang. *Sinter Pelletiz*, 2004, 29(3): 1
(贺先新. 浅析武钢厚料层烧结的发展. 烧结球团, 2004, 29(3): 1)
- [7] Shi B Y. 600 mm deep bed sintering operation practice on Laigang 105 m² sintering machine. *Sinter Pelletiz*, 2000, 25(3): 39
(石宝云. 莱钢 105 m² 烧结机 600 mm 厚料层生产实践. 烧结球团, 2000, 25(3): 39)
- [8] Inazumi T, Fujimoto M, Sato S, et al. Effect of sinter cake load reduction by magnetic force on iron ore sintering. *ISIJ Int*, 1995, 35(4): 372
- [9] Zuo H B, Cao L H, Liu Z J, et al. Stand-support sintering for improving sinter productivity. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2008, 30(10): 1101
(左海滨, 曹丽华, 刘征建, 等. 支架支撑烧结提高烧结生产率. 北京科技大学学报, 2008, 30(10): 1101)
- [10] Higuchi K, Kawaguchi T, Kobayashi M, et al. Improvement of productivity by stand-support sintering in commercial sintering machines. *ISIJ Int*, 2000, 40(12): 1188
- [11] Higuchi K, Kawaguchi T, Kobayashi M et al. High-productivity operation of commercial sintering machine by stand-support sintering. *Nippon Steel Tech Rep*, 2006, 94: 31
- [12] Zuo H B, Lin J Z, Dai Y S, et al. Industrial trial of bed load reduction sintering for increasing productivity. *Iron Steel*, 2008, 43(11): 16
(左海滨, 林金柱, 戴玉山, 等. 料层减荷烧结提高生产率工业试验. 钢铁, 2008, 43(11): 16)
- [13] Zhao Q C, Sun D M. Countermeasure and study about heat failure rupture of trolley fence on sintering machine. *J Kunming Univ Sci Technol*, 2008, 33(2): 11
(赵琪昌, 孙东明. 烧结机台车栏板因热疲劳断裂的研究及其对策. 昆明理工大学学报, 2008, 33(2): 11)
- [14] Shao J H, Fang J, Chang J Z, et al. High temperature compressive strength of sinter. *Iron Steel*, 2008, 43(9): 12
(邵剑华, 方觉, 常久柱, 等. 烧结矿高温抗压强度研究. 钢铁, 2008, 43(9): 12)