

大方坯连铸机活动段支撑架工作可靠性的研究

段明南,李山青,陈 军,全基哲

(宝山钢铁股份公司 研究院设备研究所,上海 201900)

摘 要: 为校核全新设计的大方坯连铸机活动段导辊支撑架的工作可靠性,根据活动段支撑架的实际工况进行载荷分类,以有限元数值分析软件为载体,分别计算活动段在设计工况下的动态拉坯阻力与动态铸坯鼓肚力,采用传统理论算法确定活动段的静载荷。以计算所得各载荷值为边界条件,对活动段支撑架进行应力仿真分析,分析结果发现该设计方案的不合理性并推翻了原设计,这为铸机活动段支架的力学分析计算提供了一种科学的校核方式,也为某钢铁厂能按期安全使用活动段支架提供了技术支撑。

关键词: 连铸;活动段;支撑架;有限元

中图分类号: TF777.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1043(2009)03-0069-05

Reliability analysis of sustainment frame in active segment of bloom CCM

DUAN Ming-nan, LI Shan-qing, CHEN Jun, QUAN Ji-zhe

(Equipment Research Institute of R & D Center of Baosteel, Shanghai 201900, China)

Abstract: For check and examination of the working reliability of the sustaining frame of the cast roller in the movement segment of the bloom continuous caster the load of the sustaining frame was sorted in accordance with the actual working conditions of the sustaining frame in that segment and the dynamic drawing resistance and the dynamic bulging force of the bloom in the movement segment under the designed working conditions were calculated respectively by means of the finite element numerical analysis software and the dead load of the frame determined by the traditional theoretic method. Taking each calculated load value as the boundary condition the stress simulation analysis on the sustaining frame of the movement segment was carried out. Results indicate that the original design plan was cast off since it was not reasonable. A scientific check and examination model can be provided for the mechanical analysis and calculation on the sustaining frame in the movement segment of the caster and at the same time the technical support is also provided for a specific iron-making and steel-making plant in safely and timely use of the sustaining frame.

Key words: continuous casting; active segment; sustaining frame; FEM

方坯连铸机的活动段是连接结晶器与导向段的桥梁,其刚度水平是影响铸坯质量的关键因素。活动段由导向辊、支座、调整辊组件等组成。它的作用主要表现在:引导引锭杆顺利进入结晶器;对浇铸中的铸坯起多点支撑作用。处于活动段的铸坯因为表面冷却时间短、坯壳薄、鼓肚严重等因素,一旦冶金通道的型腔变形严重就易引发铸坯缺陷或浇铸事故,造成严重后果,因此活动段刚度

满足生产要求是其最为基本的设计标准^[1]。对此本文首先采用热弹性模型对铸坯与导辊之间的鼓肚力、拉坯阻力进行仿真分析,运用分析结果对全新设计的大方坯活动段导辊支撑架进行综合应力分析,校核其可靠性,确保活动段支撑架的生产使用安全。

根据大方坯连铸机的生产工况可知,活动段导辊支撑架的承载主要分为3个方面:铸坯鼓肚

力、拉坯阻力及静载。下文分别计算 3 种载荷值,并以所得结果为边界条件,运用有限元数值分析软件 ANSYS 对框架整体进行仿真分析。

1 确定载荷

由活动段导辊支撑架的实际工况可知,支撑架承受静载与动载的综合作用,其中动载荷为铸坯鼓肚力与拉坯阻力,可通过有限元动态仿真求得,静载与安装及生产工艺有关,可通过理论计算求得。

1.1 计算铸坯鼓肚力与拉坯阻力

铸坯鼓肚力与拉坯阻力可通过建立三维有限元动态模型即可实现求解。

1.1.1 建立三维动态有限元模型

由炼钢厂实际生产要求及供应商提供的原始设计参数曲线(如图 1 所示),可根据供应商提供的坯壳厚度随浇铸长度的变化曲线来建立活动段铸坯-导辊之间的接触非线性有限元模型如图 2 所示。

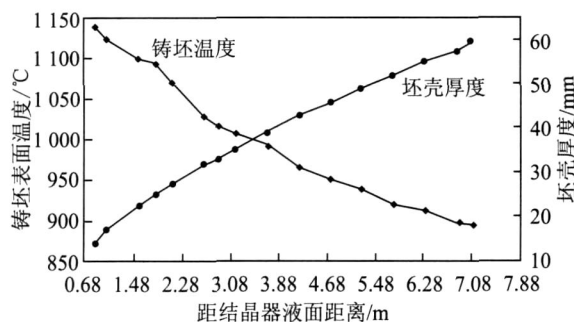


图 1 大方坯表面温度及坯壳厚度随浇铸长度的变化曲线

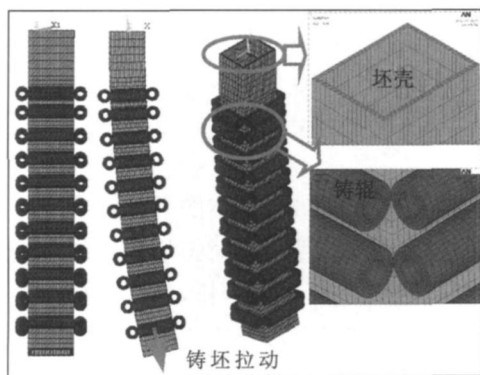


图 2 三维有限元动态仿真模型多视角图

所建模由 44 对 Contact 接触对组成,且所有单元均采用六面体等参单元。

1.1.2 确立动态模型的边界条件

由供应商提供的图 1 曲线以及支撑架与导辊

之间的传力作用可确定仿真模型的边界条件^[2],具体如下:

(1)施加钢水对铸坯坯壳内面上产生的静压力,且该压力从结晶器弯液面开始,随铸机深度逐渐升高;

(2)根据图 1 曲线施加随浇铸长度变化的铸坯温度分布,模拟铸坯的温度分布;

(3)坯壳的厚度与强度直接决定了活动段各部位导辊的受力状态,包括鼓肚力与拉坯阻力,因此铸坯的坯壳厚度的确定是导辊受力分析的关键所在。在实际生产中,现场会根据需要实现不同拉速与过热度,这势必造成坯壳厚度的波动,由文献[3]可知,活动段坯壳厚度值会在 15% 内波动,且由设计商的坯壳凝固厚度曲线(见图 1)可知,活动段出口处厚度为 38 mm,故此,计算导辊受力时,活动段出口处的坯壳厚度可分别取: $38 \text{ mm} \times (1 \pm 7.5\%) = 35.15 \sim 40.85 \text{ mm}$,基于此,确定计算 3 个工况,坯壳厚度分别为: 35.15、38.00、40.85 mm,以计算 3 种坯壳厚度所得最大鼓肚力以及拉坯阻力为后期计算的标准。

(4)建立导辊与铸坯之间的接触对,约束所有导辊的自由度仅为转动,并设定滚动摩擦系数;在模型的铸坯头部施加恒定的拉坯速度。

施加边界条件后的模型如图 3 所示。

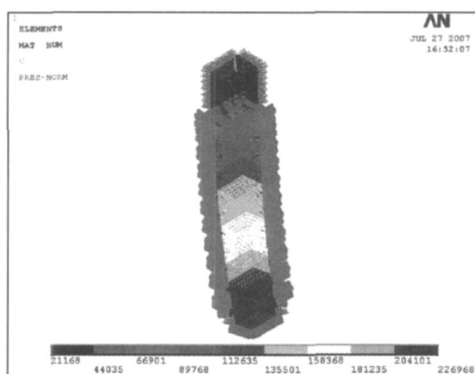


图 3 施加边界条件的动态模型

1.1.3 确定材料模型

该模型为计算铸坯鼓肚效果与拉坯阻力,将模型建为一种中空条形物,以便于边界条件的施加。为详细描述模型在活动段坯壳的强度变化规律,通过施加图 1 中的温度分布曲线与材料弹性模量及泊松比随温度变化规律来进行综合定义,具体如下。

(1)弹性模量:由于活动段坯壳温度基本保持在 900°C 以上,可选择 $900 \sim 1441^\circ\text{C}$ (固相限)之

间的公式^[4];1 441 (固相线)~1 514 °C(液相限)采用铸坯两相区中两种晶体的成分比例来确定弹性模量。

$$E = 968 - 2.33 T + 1.9 T^2 \times 10^{-3} - 5.18 T^3 \times 10^{-1} \quad \text{GPa} \quad (1)$$

(2) 泊松比:0~1 441 °C(固相限)之间泊松比采用线性递增公式;1 441~1 514 °C泊松比根据两相区晶体的强度级别以及所占有比率进行等级换算,并在1 514 °C时确定钢水的泊松比为一个极大数——0.499 9,以确保模型材质能足够近似地模拟实际钢水的静压力特征。当温度高于液相线时, E 数量级要足够低,以削减额外的结构变形应力,即定义 E 为固相线值的0.01~0.001倍的水平;当温度高于液相限时,热膨胀系数的确定要保证热膨胀应力足够低;液态体积模量 $E/(1-2r)$ 与室温下的 $E/(1-2r)$ 近似相等为准^[5]。

(3) 密度:在不同温度水平钢水的密度值呈现一定规律性的波动,1 441~1 514 °C时,密度公式如下:

$$\rho = f_s \rho_s + (1 - f_s) \rho_l \quad (2)$$

式(2)中, ρ_s 为固态钢的密度,取7 400 kg/m³; ρ_l 为液态钢的密度,取7 000 kg/m³; f_s 为两相区钢的固相率,%^[6]。

1.1.4 动态模型的分析结果

限于篇幅,下文仅列出坯壳厚度为40.85 mm时拉坯工况的分析结果,由所得导辊与铸坯的应力模型,可得图 4 所示应力云图。

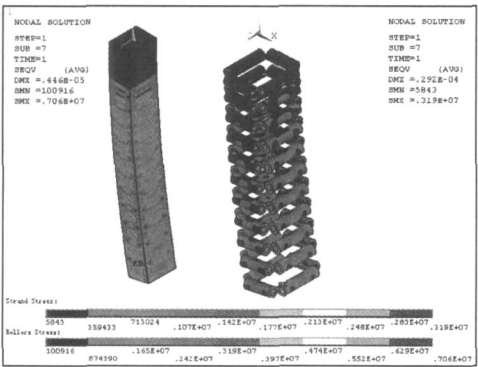


图 4 坯壳与导辊各自的等效应力云图

由导辊支反力(X 向、 Y 向与 Z 向)可分别提取得到导辊的鼓肚力与拉坯阻力,如图 5 与图 6 所示(注:等效应力为材料力学中的第 4 强度理论的米赛斯等效应力^[7])。

由计算结果曲线可知:

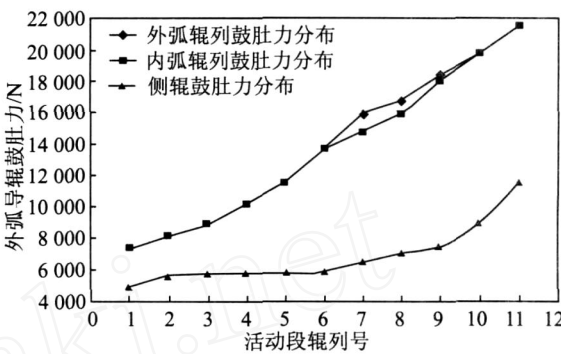


图 5 活动段导辊鼓肚力分布曲线

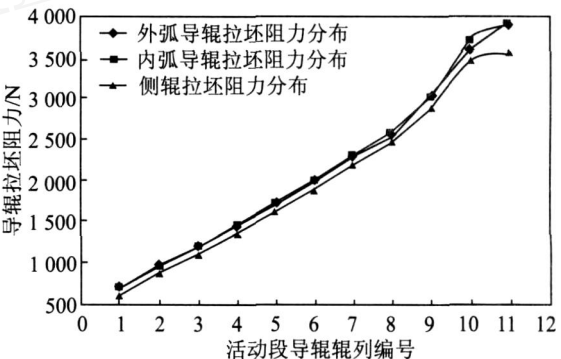


图 6 活动段导辊拉坯阻力分布曲线

(1) 导辊鼓肚力随钢液深度的增大而增大,最高鼓肚力发生在活动段内外弧最底部的一对导辊处,可达 22 kN。这说明在活动段区域,虽然铸坯的坯壳随浇铸长度的增加而增厚,抵御钢液的鼓肚能力强度也相应增加,但是此时的钢液静压力也急剧增大,以至铸坯鼓肚力反而增大;同时,相对于内、外弧,侧辊鼓肚力要低许多,最大仅为 12 kN;

(2) 拉坯阻力随着钢液深度的增加而增大,呈现较为规则的线性关系,这种规律与鼓肚力的分布曲线是相辅相成的,因为鼓肚力增大,造成足辊对坯壳的阻力增大,拉坯阻力因此而急剧增大;且侧辊与内、外弧的拉坯阻力相差较小,仅为几十牛顿,这是铸坯侧面与侧辊之间的接触始终为平面鼓肚,而内、外弧存在典型的弯曲鼓肚,故此侧面在承受较小鼓肚力时却能产生与内、外弧相当的拉坯阻力;其中,最高拉坯阻力发生在活动段最底部的内外弧导辊处,可达 4 kN 水平,这是与鼓肚力的分布规律一致的。

1.2 确定支撑架的静载荷

活动段支撑架所承受的静载主要是重力,具体可分为:

(1) 支撑架所支撑导辊的自重。导辊的自重主要包括辊套、轴承、连接螺栓、冷却通水管等构

件的重力,可分别均分于各个导辊与支撑架的连接凸台的受力面处,方向为垂直向下,如图 7 所示。

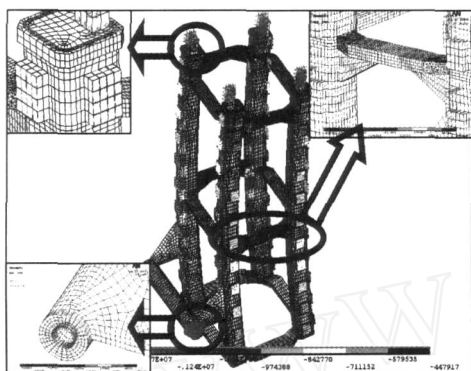


图 7 支撑框架施加边界条件后的有限元模型

(2) 活动段导辊冷却水重力。浇铸过程中,导辊内部必须通冷却水,以确保导辊保持高刚度与耐磨损的特性,其冷却水自重可通过计算活动段导辊冷却水腔、冷却水管水的体积来获得冷却水自重,可均分至各个导辊的凸台受力面上,方向垂直向下,如图 7 所示。

(3) 活动段支撑架自身的重力作用,可通过定义框架材质密度以及重力加速度来获得。

由以上 3 类静载荷叠加可得,活动段支撑架所承受的总静载为 40.95 kN。

2 建立有限元模型

根据设计商的设计图纸,按实体等比例建立三维有限元模型。该模型采用三维六面体等参单元(solide45)与三维壳单元(shell43)相结合^[8],具体模型如图 8 所示。

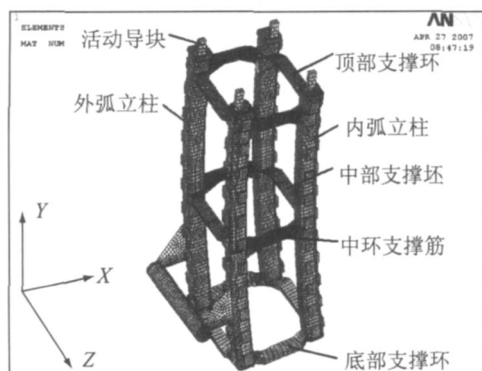


图 8 三维有限元网格模型

本模型除活动段支架转动套筒的支撑肋采用三维薄壳单元以外,其他部位均采用三维实体的六面体等参单元,其目的是保证三维应力分析的

准确性,避免因模型的单元缺陷而造成局部应力集中的假相^[9]。

3 确定边界条件与材料模型

由以上两节计算所得的载荷分布,可在各承载面上施加相应载荷,具体如图 7 所示。

所建模型由 1 577 个六面体等参单元与 368 个三维壳单元组成,对于两条支撑中部支撑环的支撑筋均采用六面体等参单元建立,其目的是确保该部位的计算精度。

原始设计材料为 16 Mn,属低合金结构钢,它具有良好的综合力学性能、焊接性能及低温冲击韧性,其化学成分为: $w(C) = 0.12\% \sim 0.20\%$, $w(Mn) = 1.20\% \sim 1.60\%$, $w(Si) = 0.20\% \sim 0.65\%$, $w(S) \leq 0.045\%$, $w(P) \leq 0.045\%$ ^[10]。

力学性能(以直径 20~36 mm 为例):抗拉强度 470~620 MPa,屈服应力约 345 MPa。

4 计算结果分析

通过计算即可获得分析结果。基于活动段的设计要求,分析结果主要针对支撑框架在 3 个方向的刚度以及等效应力分布规律,具体如图 9 与图 10 所示(限于篇幅,仅列两图)。

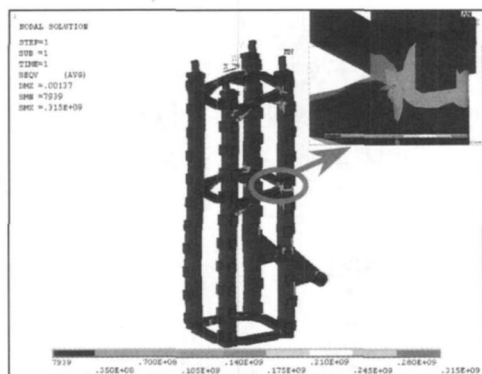


图 9 支撑框架等效应力云图

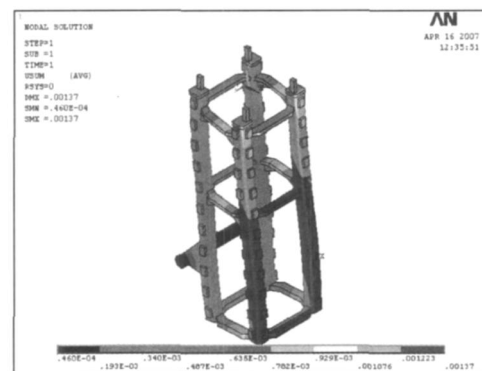


图 10 支撑框架综合位移云图

由模型的分析结果可知:

(1) 活动段支撑架等效应力水平最高可达 315 MPa, 主要分布于中部支撑环与两根外弧立柱的连接区域, 此处主要采用焊接方式连接, 且焊接方式往往容易产生焊接缺陷, 因此, 过高的应力集中往往是造成支撑架发生开裂失效, 从而造成框架变形严重, 影响辊列分布。

(2) 支撑架的最大综合位移可达 1.37 mm, 主要分布于中部支撑环与底部支撑环之间的内弧立柱区域; 其中, X 向最大位移可达 0.807 mm, Y 向可达 1.288 mm, 这远超过所要求的辊缝精度参数 (操作现场要求达到 ± 0.2 mm), 且处于活动段区域, 直接影响导辊的辊缝分布, 造成生产事故。

由以上分析可知, 供应商提供的这种活动段支撑架的结构设计不符合安全生产的要求, 必须尽快修改设计, 确保大方坯铸机能准时投产。经与供应商谈判协商, 及时修改了原设计方案。

5 结 论

(1) 综合考虑支撑框架的所有工作受载后所计算的最大应力水平高达 315 MPa, 该应力水平与支撑框架的材料 16Mn 钢的屈服极限几乎相当 (345 MPa), 因此, 该支撑框架在生产中极易产生塑性变形, 从而使冶金通道的辊缝参数发生变化, 影响铸坯质量。

(2) 支撑框架刚度过低, 在 3 个坐标方向的变形量基本达到 1 mm, 严重威胁到辊缝分布; 且支撑框架腰环支撑筋板的结构设计有明显缺陷, 是

造成应力集中的主要原因, 应修改原始设计。

(3) 基于该支撑框架的结构强度和刚度都存在明显缺陷, 在大方坯连铸设备改造的前期及时否定了活动段的这种设计形式, 为设备改造节约了大量时间。

(4) 本次分析为铸机活动段支架的力学分析计算提供了一种通用的校核方式, 也为连铸改造及时提供了安全可靠的活动段支架。

[参 考 文 献]

- [1] 韩 锐. 方坯连铸机导向架的工艺方案[J]. 机械管理开发, 2001, (4): 38-39.
- [2] 焦晓凯, 秦 勤, 吴迪平, 等. 板坯连铸铸坯鼓肚变形的仿真研究[J]. 冶金设备, 2007 (1): 9-11.
- [3] 王宝峰, 孟志国, 丁 国, 等. 大方坯在连铸过程中传热及凝固规律的数学模拟[J]. 炼钢, 2002, (5): 15-18.
- [4] H Mizukami, K Murakami and Y Miyashita, Mechanical properties of continuously cast steel at high temperatures [J]. Nihon Kohan Cororation, Tetsu - to - hagane (Iron and Steel), 1977, 63 (146): 652.
- [5] 荆德君. 连铸结晶器内钢水凝固过程热和应力状态数值模拟研究[D]. 北京科技大学. 2000.
- [6] 陈家祥. 连续铸钢手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [7] 刘鸿文. 材料力学第三版[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [8] 尚晓江, 邱 峰, 赵海峰, 等. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [9] 邢静忠, 王永刚, 陈晓霞, 等. ANSYS7.0 分析实例与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 徐 灏. 机械设计手册 (第一卷) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

(修回日期: 2008-05-07)

(上接第 18 页)

造生产高强度六角螺栓, 产品冷镦合格率达到 98 % 以上。直接冷镦后, 经 870~880 °C 油淬, 420~450 °C 中温回火和 210~260 °C 低温回火等调质处理, 成品分别达到 10.9 级和 12.9 级的紧固件螺栓的技术要求。对该批标准件进行疲劳寿命检验, 各项指标达到用户产品检验标准。

5 结 论

(1) 生产 ML20MnTiB 盘条用于制造高强度标准件, 含硼钢冶炼工艺控制防止 B 的氧化和氮化是冶炼含硼钢的关键。

(2) 含硼钢热轧盘条要求具有高的塑性和低的表面硬度, 轧材组织为铁素体 + 珠光体, 应当避免盘条形成贝氏体组织。

(3) 盘条冷镦成型后, 经调质可得到不同组织状态, 使强度和韧性得到良好的配合。当回火温度在 220 °C 时, 得到了回火马氏体; 回火温度达到 420 °C 时, 得到均匀的回火屈氏体。

[参 考 文 献]

- [1] S K 巴纳机, J E 莫罗尔. 钢中的硼[M]. 祖荣详, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 20-24.
- [2] 黄丽明. 22SiMn2TiB 钢中硼相的研究[J]. 天津科技大学学报, 2004, 19 (3): 53-55.
- [3] 林慧国. 钢的奥氏体转变曲线 —— 原理、测试与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988, 4: 63.
- [4] 徐效谦. 钢丝组织与热处理[C]// 全国金属制品信息网第 21 届年会, 2007, 11: 31.
- [5] 宋维锡. 金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989, 11: 344

(修回日期: 2008-12-15)