包钢高炉中修炉壳悬吊技术研究[*1]

李晓华,张建东,杨 青

(内蒙古包钢钢联股份有限公司炼铁厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章介绍了高炉中修通过悬吊上部炉壳后更换中间段炉壳和冷却壁的技术方案,利用 SolidWorks Simulation软件对悬吊拉杆和支撑梁进行有限元强度校核,同时与工程实践中炉壳下沉的监测数据进行对比分析。

关键词: 高炉; 悬吊; 有限元分析

中图分类号: TF573^{+}.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2019)02 - 0060 - 04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.02.018

Research on Suspension Technology for Furnace Shell in Medium Repair of Blast Furnace of Baotou Steel

Li Xiao - hua, Zhang Jian - dong, Yang Qing

(*Iron - making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, the technical scheme for replacing middle section of furnace shell and cooling wall by suspending upper furnace shell in the medium repair of blast furnace is introduced, the finite element strength check for suspending tie rod and support beam was carried out with the SolidWorks Simulation software as well as it is compared and analyzed with the monitoring data for sinking of furnace shell in engineering practices.

Key words: blast furnace; suspension; finite element analysis

高炉是现代工业生产用于冶炼液态铁水的主要设备,高炉本体自上而下分为炉喉、炉身、炉腰、炉腹、炉缸 5 个部分。在一代炉龄的后期由于炉壳内部冷却壁失效,在炉腰和炉腹位置的炉壳会出现变形和开裂现象,继而发生煤气泄漏甚至炉体烧穿事故,对安全生产造成严重威胁。需要通过中修对高炉炉腰、炉腹位置的炉壳和冷却壁全部进行更换,以此消除炉壳开裂的安全隐患。为了快速完成高炉炉壳与冷却壁的局部更换,通常采用悬吊上部炉壳的技术方案[1]。

1 炉壳悬吊方案的设计与计算

1.1 炉壳悬吊方案设计

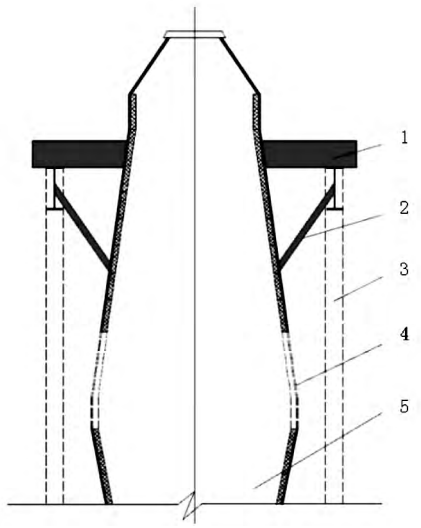
图 1 为包钢 2 200 m^3 高炉中修炉壳悬吊示意图,利用高炉两侧的框架梁、平台梁作为悬吊的承重支撑梁,材质为 Q345。在框架与炉体之间焊接安装 8 组悬吊梁,型钢为 H1500 mm × 600 mm × 20 mm × 30 mm,材质为 Q235。悬吊梁安装在框架梁和平台梁上,与框架梁焊接并设置厚度为 20mm 的卡板。同时,在框架梁与炉体之间焊接 8 组悬吊拉杆,每组拉杆由两根 H588 mm × 300 mm × 12 mm × 20 mm 型钢组成,长度为 5 600 mm,材质为 Q235。悬吊梁、悬

* 收稿日期: 2019 - 02 - 12

作者简介: 李晓华(1988 -),男,内蒙古乌兰察布市人,在读硕士,工程师,现从事炼铁设备技术管理工作。

中国知网 https://www.cnki.net

吊拉杆、炉体与框架梁焊接成一体后，只有两端支撑在框架梁上，主要承受正弯矩，为静定结构，可简化成各部分刚度不同的简支梁。在此简支梁中，当支撑梁下挠时，炉体本身不会发生变形。表 1 为悬吊重量明细表。



1 – 悬吊梁；2 – 悬吊拉杆；3 – 炉体框架；
4 – 要更换的炉壳与冷却壁；5 – 高炉本体

图 1　炉壳悬吊示意图

1.2　悬吊拉杆强度校核计算

根据之前经验，在炉体下沉过程中，8 根支撑梁的变形量非常小。所以前期设计只计算 8 组悬吊拉杆的受力与变形情况。如果 8 组悬吊拉杆的强度和变形满足要求，那么整体悬吊就一定能够成功，且具有足够的安全系数。如表 1 所示，经过统计悬吊炉体的总重量 Q 约为 1 720.54 t，每组悬吊拉杆为与水平成 45°角安装，其承受的悬吊重量为 $1.414Q/8$，每组拉杆由 2 根规格为 H588 mm × 300 mm × 12 mm × 20 mm 的型钢组成。引入载荷系数（受力不均载荷系数 1.2，动载系数 1.4）后得：$Q = 1.2 \times 1.4 \times 1\ 720 = 2\ 890$ t，每组拉杆的承受重量为 $Q_{每组栏杆} = 1.414Q/8 = 511$ t，实际取 520 t 进行计算，每组悬吊拉杆的受力 F 为 5.2×10^6 N。悬吊拉杆的规格为 H588 mm × 300 mm × 12 mm × 20 mm，其截面积 $A = 18\ 721$ mm^2。因为型钢厚度为 16 ~ 40 mm，所以其屈服强度为 225 MPa。

由公式[1]：

$$\sigma_{max} = \frac{F}{2A} \tag{1}$$

式中：σ_{max}—— 极限应力；

F—— 拉杆所受拉力；

A—— 单根拉杆的横截面积。

带入数据得 $\sigma_{max} = 139.9$ N/mm^2 < [σ] = 225 N/mm^2，拉杆的许用强度满足要求。

表 1　悬吊重量明细表

序号	部件名称	重量/t	序号	部件名称	重量/t
1	炉壳	288.00	9	4 根煤气上升管	70.00
2	冷却壁	890.00	10	上升管内衬	80.00
3	冷却壁联锁管	53.50	11	炉喉保护棚	26.00
4	冷却壁填料	6.00	12	吊盘	35.50
5	压浆料	39.54	13	保护棚、吊盘载荷	12.00
6	炉喉保护板	37.40	14	炉喉钢砖	120.00
7	冷却壁螺栓垫、螺母	4.60	15	探尺	12.00
8	炉顶钢圈	8.00	16	其它	38.00

1.3　悬吊拉杆伸长量计算

拉杆的长度为 5 500 mm，由于两端都焊接节板，所以悬吊拉杆的有效受拉长度 $L = 3\ 500$ mm。由公式[1]：

$$\Delta L = \frac{FL}{EA} \tag{2}$$

式中：$\triangle L$—— 拉杆的绝对变形；

L—— 拉杆长度；

A—— 拉杆的横截面积；

E—— 拉杆的弹性模量，取 206 GPa。

带入数据得，拉杆的伸长量 $\triangle L = 3.28$ mm，变形量满足要求。

中国知网　https://www.cnki.net

2 炉壳悬吊强度校核及变形分析

对炉壳悬吊完成初步宏观的设计和强度计算后，利用 SolidWorks Simulation 有限元分析软件对悬吊整体及各连接细节做进一步的强度和变形分析。

2.1 SolidWorks Simulation 有限元分析软件

SolidWorks Simulation 是 SolidWorks 公司开发的一种功能强大的有限元分析工具软件。它作为嵌入式分析软件与 SolidWorks 无缝集成。运用 SolidWorks Simulation 一般的工程技术人员就可以进行产品分析，并快速得到相应的计算、分析结果。SolidWorks Simulation 能够提供丰富的计算与分析工具来对较为复杂的零件及装配体进行运算、测试和分析，其主要功能包括应力计算与分析、应变计算与分析、产品设计及优化、线性与非线性分析等。

2.2 模型建立

在 SolidWorks Simulation 的实际应用中，一般会遵循如下过程：算例创建→材料使用→约束添加→载荷施加→网格划分→运算分析→结果分析[2]。利用 SolidWorks 进行零件实体建模，即构建悬吊炉壳和框架的几何模型，见图2。

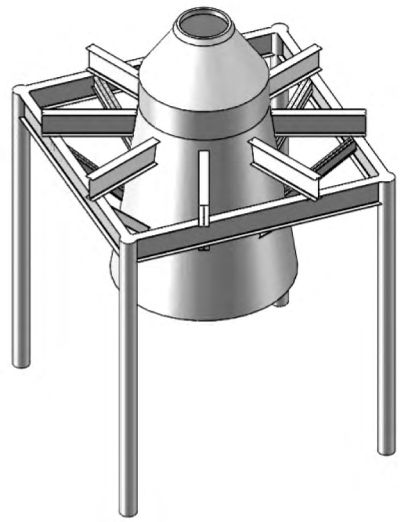


图2 建立炉壳悬吊模型

2.3 设定材料并添加约束和载荷

在运行算例前，首先需要设定模型的材质。Simulation 中的材料属性定义不会影响 Solidworks 建立的零件实体几何模型的材料类型。因为主要分析悬吊拉杆和支撑梁的受力变形情况，所以统一设置材质为 Q235。其次设定约束和施加载荷，使用 Simulation 系统工具栏中的“外部载荷”→“压力”命令施加载荷，设计框架梁为固定，在炉体表面施加向下载荷，大小为 2 890 t。最后使用 Simulation 工具栏中【运行】→【生成网格】命令，可以实现模型的网格化，如图3所示。

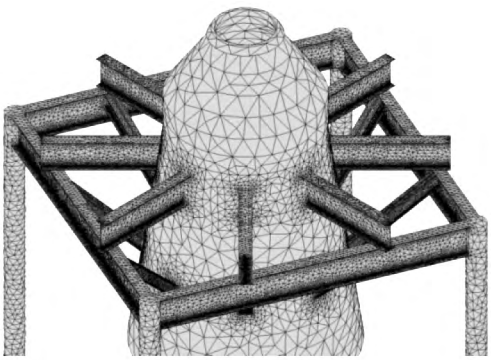


图3 对模型进行网格划分

2.4 分析结果

有限元算例运算、分析完成后，可以查看“应力”、“位移”的分析结果。如图4所示，最大应力为 142.2 N/mm^2，与计算结果 139.9 N/mm^2 基本吻合，误差由建模精确度引起。与支撑梁相比较，悬吊拉杆受到的应力最大，承受主要的悬吊拉力。

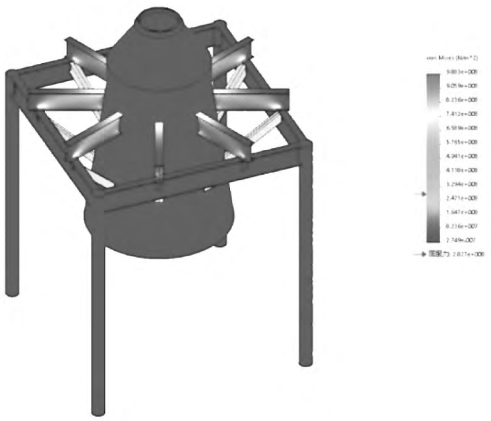


图4 悬吊应力分布分析结果

如图5所示，数据显示炉体的最大沉降量为 12.2 mm，在悬吊拉杆和悬吊支撑梁与炉体的连接处的集中应力最大，变形最为严重。实际施工中，在每一根悬吊梁与炉皮连接点处分别设置了4块厚度 20 mm 的加强板，并且上翼缘板与炉皮设厚度 30 mm的加强筋。在悬吊拉杆的节点处也分别设置了厚度为20 mm的加强筋板。悬吊拉杆与炉体之间通过厚度 30 mm 的节点板焊接，并设两组厚度 20 mm的筋板。从而有效控制连接处的集中应力，

中国知网 https://www.cnki.net

同时计算后，焊缝的强度满足要求。

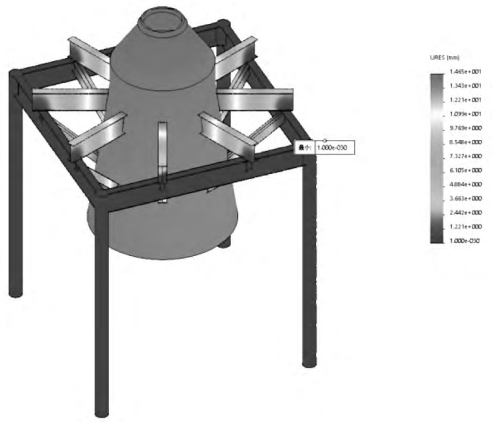


图 5　悬吊变形分析结果

3　施工过程中的炉壳沉降监测

3.1　炉壳沉降监测方案

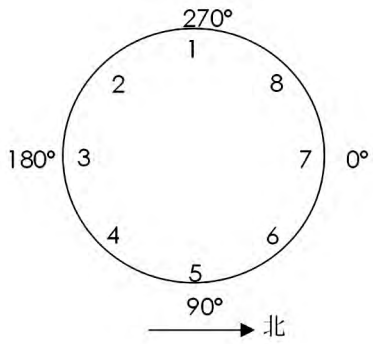


图 6　测量点布置图

选用经鉴定合格的 S3、N3 水准仪各一套，TS09 全站仪一套，经过鉴定的塔尺各一个。首先在悬吊拉杆下一层平台的炉身上选取 8 个沉降点（见图 6），用红油漆标注点位；同时在炉身周围的框架柱上选取沉降点，并用红油漆标注其点位。通过水准仪，对其进行联测，从而形成闭合水准路线，此测量方法符合水准测量的规范要求。先测量出 8 个沉降点的首次高程值，之后按规定时间间隔定期进行沉降测量。

3.2　监测结果

在高炉中修过程中，每 8 h 对炉壳沉降监测一次，从中间段炉壳全部拆除后开始监测到炉壳安装完成停止监测，一共进行了 46 次测量，累计沉降值最大的点为 12 mm，最小的点 8 mm。因为有测量误差的存在，可以认为测量结果与 SolidWorks Simulation 软件分析的结果符合。

4　结束语

炉壳悬吊是高炉中修目前较为成熟的技术方案，但是由于每一座高炉的具体情况不同，导致悬吊的重量有所差异。对悬吊拉杆和支撑梁进行初步宏观的强度校核，保证悬吊具有足够的安全系数。再利用计算机软件对其进行有限元分析，可以更为准确地发现各应力集中的部位以及判断出悬吊的变形和沉降。同时根据悬吊整体分析结果，提前对各部位的薄弱环节进行优化加固。并根据沉降量提前调整安装方案，从而有效避免沉降量对后期新炉皮及冷却壁安装的影响。

参　考　文　献

[1]　王平. 高炉炉顶悬吊顶升技术及优化 [J]. 包钢科技，2015，(2)：6－9.

[2]　鲁亚云. 基于 Solidworks 的梁变形分析 [J]. 科技教育，2011，(28)：190－191.

中国知网　https://www.cnki.net