

艾依墨登6#高炉30年以上炉龄探析

艾依墨登塔塔钢铁公司的6#高炉在全部换衬、改进炉衬冷却系统和炉顶装料系统之后于1986年4月开炉。只对20世纪70年代的炉缸设计或多或少地进行了更改，保留了炉底空气冷却和侧壁喷雾冷却。16年之后，更换了炉缸耐材，但是炉腹和炉身未修补。目前，超过33年之后，自从最初开炉起，炉子在生产率、效率、可靠性方面仍然运行地非常好，这得益于良好的仪表装置、卓越的工艺控制、以及全面资产管理。

作者: 艾依墨登、达涅利康力斯、塔塔钢铁公司
F. Kerkhoven, J. Stuurwol, G. Tjihuis, B. Nugteren, R. van Laar
Tata Steel, IJmuiden and Danieli Corus, IJmuiden

		6#高炉	7#高炉
炉缸直径	m	11.00	13.83
风口数	-	28	38
铁口数	-	3	3
工作容积	m ³	2,328	3,775
内容积	m ³	2,678	4,435
装料		料斗+无钟炉顶	
最大顶压	巴	1.7	2.3
日产量	T铁水/天	8,500	11,700
工作容积生产率 (单位容积)	T铁水/m ³ /天	3.65	3.10
炉缸生产率 (单位面积)	T铁水/m ² /天	89.5	77.9

表 1 高炉主要参数

炉龄	日期	天数	产铁量
1A	1967年11月 ---1971年2月	1,162	~ 8Mt
1B	1971年5月 ---1975年4月	1,437	
2	1976年4月 ---1985年4月	3,216	~ 14 Mt
3A	1986年4月 ---2002年4月	5,856	~ 76 Mt
3B*	2002年6月 ---2019年4月	5,918	

*) 3B炉龄期还在运行: 在2021年第三代炉龄期结束时总产量预期超过80 Mt

表 2 6#高炉炉龄期

这篇文章讨论了塔塔钢铁公司艾依墨登现场的6#高炉炉龄长、超过30年、并且还在继续运行; 描述了相关设计方面和操作运行条件, 对如何获得这样格外长的炉龄进行了阐释。

艾依墨登塔塔钢铁公司

艾依墨登塔塔钢铁欧洲公司于2018年9月现场庆祝成立100周年。现场基本情况包括: 两个焦化厂、一个烧结厂、一个球团厂、两座高炉、一个BOF转炉炼钢厂。2018年产铁6.2Mt、产钢7.0Mt, 只略低于2007年所获得的最高年出铁量6.4Mt, 平均总焦比270 kg/tHM。

表1所示为高炉特性综述。现场配置的烧结厂和球团厂可使高炉炉料代表性达到: 40%烧结+60%球团。平均起来, 现场焦炭自给自足, 净焦出口。

6#高炉炉龄历史

6#高炉在1967年11月首次开炉, 作为霍戈文钢铁公司的扩大部分而诞生, 公司当时称为霍戈文钢铁公司。目前在其第三代炉龄期运行。迄今为止三代炉龄期的汇总如表2所示, 包括1971年和2002年的延长炉龄检修。

6#高炉建造的是一座工作容积为1,843 m³的柱式支撑高炉, 炉缸直径10.0 m、两个铁口。第一代炉龄期自1967年11月至1975年4月, 生产铁水8.1百万吨。运行三年之后由于过梁区内过度磨损, 对炉腹和炉身下部进行了检修。(见图1所示)。

1975年当炉子的设计由过梁式高炉改变为自立式高炉时, 对炉子进行了全部换衬。高炉炉顶设立了塔式结构。炉腹区域内的原始双壳蒸发冷却效果不是很好, 更换为冷却板冷却, 炉身使用改进的冷却板模式。

炉缸直径从10.0 m增大到11.0 m, 工作容积从1,843 m³扩大到2,159 m³。炉喉直径没有变化, 因为保留了原始的双壳炉顶。由于这种改变, 炉身角从83°减小为80.7°。

总布置如图2所示, 更多详情可参见[1]。第二代

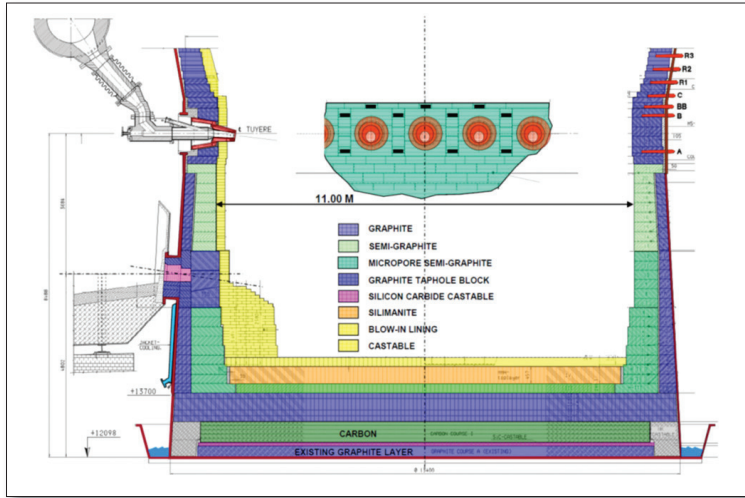


图3 2002年炉缸布置

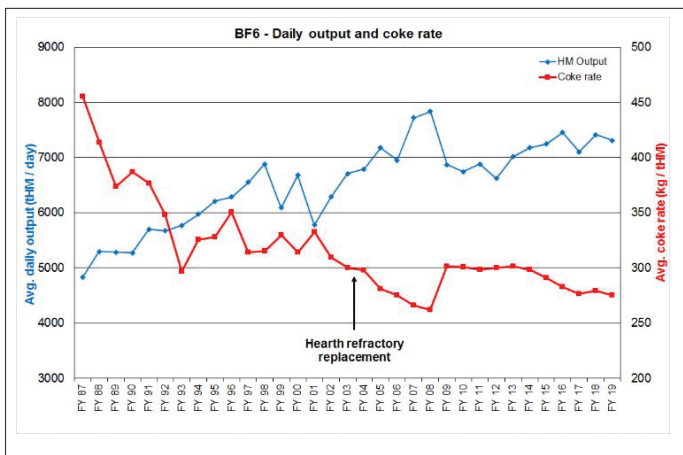


图4 1986-2018生铁产量和焦比

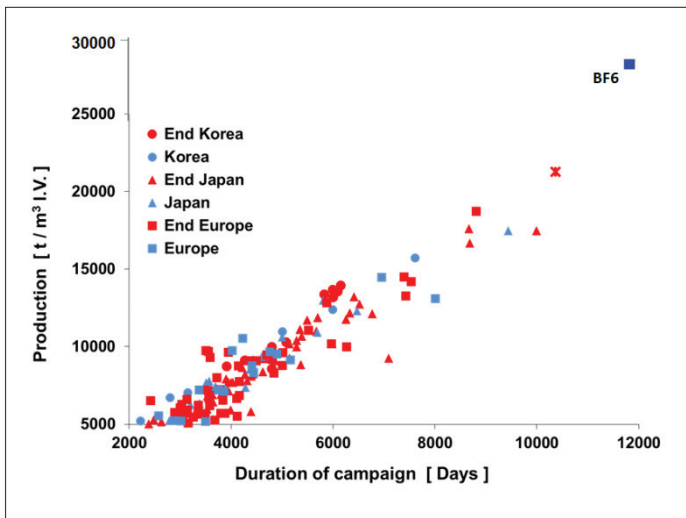


图5 炉龄期生产率及持续时间；在[4]之后

积小。相对厚的炉底，顶层有一层硅线石，抵抗炉底的侵蚀、保护易损的气冷底板。鉴于这种特性、并考虑6#高炉的高生产率和低焦比操作运行，热负荷尤其集中在正好位于炉底标高上方的炉缸侧壁处。尽管改进了耐材设计，这有助于预期中等寿命、需要对炉缸进行全面监控和资产管理系统。

炉龄期取得的成果

第三代炉龄期生铁产量增加。平均日产量开始时约5,500 t铁水/天，逐渐增加到2007年7,800 t铁水/天。同一时期，焦比从370降到262 kg/t铁水。6#高炉在2008年12月由于经济危机停用了7个月。2009年重新开炉之后，高炉起初由于此时高品质原料的可用性限制，无法恢复其最佳性能（见图4）。后来，由于炉缸耐材问题妨碍了进一步的改进。

这些问题起因于传热问题：归因于炉缸炉壳变形、安全石墨层和炉壳之间的间隙引起高温和侵蚀。大约在2013年使用灌浆解决了该问题。这些灌浆行为同样在2015年进行了记载（参见[3]）。从那时起，高炉的性能又逐渐提高。2018年平均焦比达274 kg/t铁水、日产量达7,300 t铁水。

至2019年4月份，高炉自1986年开炉以来，已运行33年、生产76.6 Mt铁水。用每个容积单位的产量来表示，则为：32,885 t/m³WV（工作容积）或28,590 t/m³IV（内容积）。DC在维也纳ICSTI 2018上发表了：全世界不同高炉的炉龄持续时间和生产率图表展示（参见[4]）。DC对该出版物的图表进行了更改，增加了6#高炉的运行成果，如图5所示。

工艺控制

自炉龄期开始以来，高炉工艺控制已经实现了重要的改进，包括布料模式在引进喷煤之后，成为工艺开发更加显著的部分。

喷煤提高了高炉的生产率，但是降低焦比也造成了对煤气分布的挑战。高炉中心煤气量太大妨碍其效率和生产率，但边缘煤气太多会导致炉衬磨损、并可能导致铜冷却板泄漏。

DC根据在炉壁热损失和炉顶煤气有效率之间进行最优化，定义了渴望的煤气分布，6#高炉炉顶煤气分布，无论是温度还是成份，均通过位于炉料上方的4套热电偶监控。同时安装了四套位于炉料内的热电偶，监控上部炉壁区和干燥区。热电偶监测入炉料30到90 cm之间的温度和煤气成份。

在艾依墨登DC布料的原理基于几个原则。中心加焦产生中心焦窗、要确保并控制中心气流。焦炭量可根据高炉运行情况、通过几个标准的装料程序来改变。装料曲线几乎平坦、最小化原料波动，从而最小化物料性能对炉料分布的影响。细粉布料沿着半径方向，防止集中在中心或边缘。

正常情况下，矿批固定，然而，最重要的是布料重复性和一致性。

这种原理可得到所渴望的炉料分布。装料程序使用已开发多年的布料模型进行了设计，并使用轨迹测量进行了改进，该测量大多在炉子休风时进行。一项进行在线轨迹测量的方案正在开发中，以便能够随时跟踪装入的原料轨迹。

2004年安装了一套雷达表面测量仪，用来测控渴望的布料结果。根据这套测量仪的测量结果，计算几个关键的性能指数。当前炉顶使用的是一套2D声纳测温装置，帮助改进炉子的效率、控制边缘煤气流。

图6所示为如何结合不同的测量值和计算值达到渴望的炉料分布，图7所示为代表性雷达表面测量仪测量输出值。

工艺控制和仪表装置开发的更多详细描述可参见[5]和[6]。

近年来，炼铁行业面临着某些原料可用性和品质限制的挑战。原料的改变会对高炉内的炉料分布有着显著的影响，为了最小化该影响，DC在现有的原料仓库内进行了一定量的改进。这些改进提高了应对原料变化的灵活性，改善了不同原料的混用，优化了炉内煤气分布。

资产管理：炉腹和炉身

DC在计划休风期间，每年两次测量炉腹、炉腰和炉身的耐材磨损情况。针对此目的，在炉腹、炉腰和炉身耐材内安装了陶瓷棒。根据陶瓷棒与内衬一样以相同的速率磨损的原理，其长度是炉衬剩余厚度的可靠指示值。

在炉腰和炉身内安装了9处不同标高的陶瓷棒。每处标高有3个陶瓷棒，约相隔120°。每个陶瓷棒定位在预期磨损率最高点的两块冷却板的中间。炉壳上有一个带气密帽的喷嘴。

每个陶瓷棒的长度使用超声装置测量，当陶瓷棒损坏更换时、以及在更换冷却板期间，对陶瓷棒进行物理（实际）测量。根据超声波测量值，可制作实际磨损线图，最近的线图如图8所示。

自1986年以来，陶瓷棒测量值的历史性研发代表性实例如图9所示：炉身下部第22层。只在最初几年内观察到有耐材磨损，之后炉衬厚度稳定。许多年看不到磨损增加，但是最近观察到有一些磨损。然而，应当注意到：炉衬厚度仍然相当可观。

最近的开发是：使用一套3D测量装置，在每次计划休风时检查炉身上部磨损情况和炉喉部位，如图10所示。

铜冷却板管理对控制耐材磨损必不可少。由于水泄漏产生蒸汽，导致耐材氧化、损伤结壳的稳定性。

冷却器泄漏的管理同样重要，泄漏暴露为热负荷高。操作不当会导致那些区域内的局部耐材严重磨损。

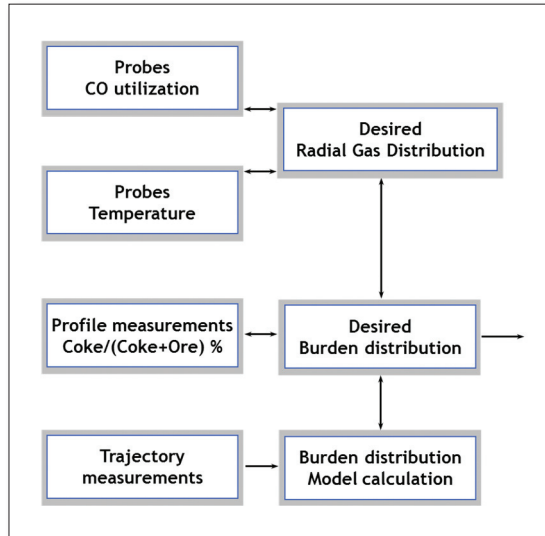


图6 布料控制模式

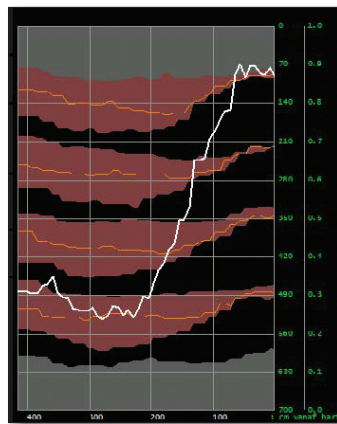


图7 雷达表面测量仪输出值

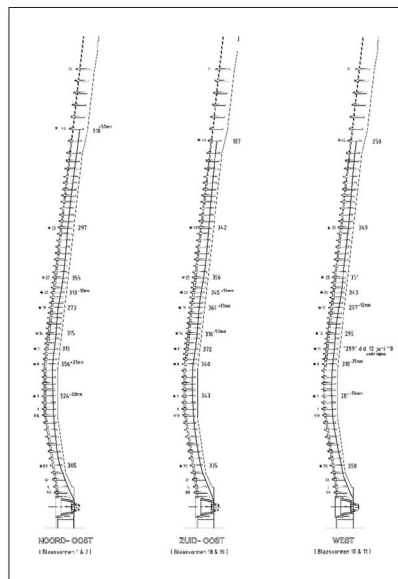


图8 2018年12月陶瓷棒状况

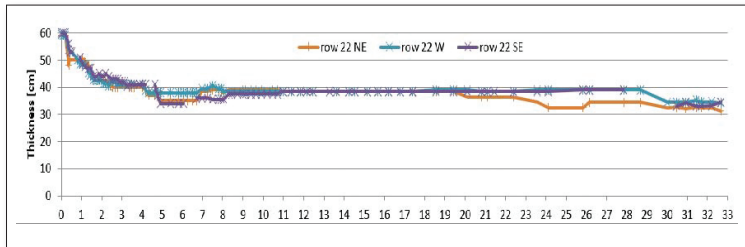


图9 陶瓷棒测量历史

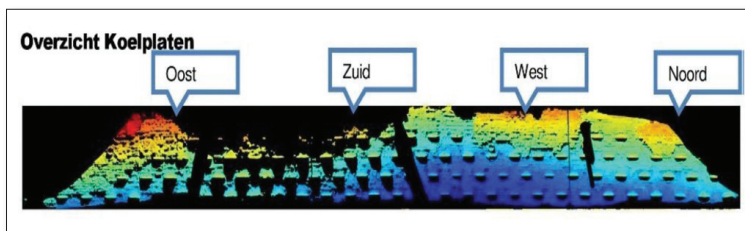


图10 炉身上部3D炉衬测量



图11 2009年产铁51 Mt之后的炉身状况

艾依墨登高炉部门有一条公式化的金箴：“不接受漏水”。这意味着，每班要检查全部铜冷却板，一旦发现有任何泄漏要立即从冷却系统断开。在炉身下部、炉腰和炉腹区域，对泄漏的铜冷却板要直接灌浆，防止冷板容积的损失。只有直接定位于风口上方的铜冷却板层不断开，在这些情况下，当更换铜冷却板时，炉子要准备在24小时内休风。每次计划休风要更换全部识别出的泄漏铜冷却板。

这种耐材和铜冷却板管理保护了30多年的系统完整性。在那些年中，没有发生严重的磨损，炉腹、炉腰或炉身炉壳的外部冷却从来没有必要。

炉衬极好的状况也可在世界金融危机停炉7个月期间所拍的照片中可看得见（见图11和12）。

资产管理：炉底炉缸

由于基本约束：6#高炉炉缸设计、高生产率、以及低焦比操作，使得炉缸的完整性管理比炉腹和炉身更有挑战性。

这需要一套全面的炉缸监控系统。目前炉缸热电偶超过600支。DC根据热电偶的位置、自动计算报警温度，对炉缸状态进行连续监控。报警温度，连同一套标准的测量值到位，防止安全石墨层的磨损。

石墨和半石墨炉缸耐材只能存在于当系统能够生成结壳，保护石墨层不溶解到铁水里的炉缸状况，结壳需要热面到炉缸炉壳冷却系统有极好的传热。许多的破坏机理都可能妥协于良好的传热条件，比如：

- 炉缸炉壳钙沉淀（结垢）
- 煤气泄漏
- 水泄漏
- 炉壳和热面之间形成间隙
- 锌和碱金属沉积

管理每个破坏机理都可防止炉缸磨损，针对此目的，DC开发了一项控制方案。

通过防止钙沉淀的连续监控系统控制喷雾冷却系统的水质。用高压定期清理炉缸炉壳，保护从炉壳到冷却水的传热。

DC的另一条金箴是“不接受煤气泄漏”。煤气泄漏会造成炉衬内积碳，尤其是Fe的出现催化该区域积碳。通过炉缸炉壳的煤气泄漏促进了通过耐材的煤气传递，这样在结壳和石墨层之间、或者更坏的是在石墨层自身内导致碳沉积。为了防止积碳，DC设立了监控系统。

这意味着，每个月都要对安装在炉缸炉壳上的全部热电偶进行煤气泄漏检查。对识别出的全部泄漏要直接调整。如有必要，要对高炉休风检修。

炉底底板的煤气泄漏连续检查。在炉底底板冷却的四个风机风道上安装煤气监测器。铁口正面的煤气泄漏通过使用堵铁口、灌浆、铁口正面

结构的管理进行控制，最小化煤气泄漏。

水泄漏在炉内形成蒸汽或氢气。蒸汽损坏结壳，高温时进水也会造成石墨耐火层的氧化。

因此在艾依墨登水泄漏的管理非常严格。铜冷却板泄漏上面已讨论过，但是DC同样不接受风口泄漏。如果风口嘴回路泄漏，要立即从冷却回路断开，但风口只保留对本体回路冷却。识别出风口本体回路泄漏时，高炉在最多8小时之内要休风换风口。

6#高炉间隙形成是一个重要的问题。这主要是由于炉缸炉壳的变形。6#高炉当前的炉缸炉壳安装于1975年，在象脚区标高处的变形已开发了数年，现在在某些点处的变形大于100 mm。自2002年以来，有些点处的变形大于60 mm。结合炉缸设计和操作模式，确定变形的原因是炉缸炉壳相对薄(40 mm)。鉴于该原因，设立了炉壳变形监控程序。

炉缸炉壳和安全石墨层之间的间隙形成通过安装在炉壳和安全石墨层内的热电偶进行探测。热流比变化显示安全石墨层和炉壳之间的接触或好或坏。如有必要，进行灌浆、修复接触。

间隙的形成或捣打层的退化同样要进行探测。半石墨层内的热电偶热流计算与安全石墨层内的热流进行比较。在这种情况下也可通过灌浆进行修正。

耐火层和结壳之间的接触评估处于研发之中。在结壳内使用热电偶进行检测，但是无法生成有价值的或可再生的数据。

锌或碱金属对耐材的损坏通过对炉料输入设置上限来进行控制。高密度石墨层的使用和煤气泄漏的管理同样有助于减慢这种退化机制。在艾依墨登的情况是这种退化现象没有意义。

新6#高炉设计

此刻，6#高炉下次换衬计划在2021年底进行。到那时，高炉炉身出铁量将大于80 Mt铁水，炉缸出铁量将几乎达50 Mt。

2013年启动方案、研发换衬范围。那时，预测要进一步提高生产能力。现有的炉腹、炉腰和炉身设计可满足要求，但决定要改进炉缸设计，消除基本的约束条件，比如容积和深度。必需对炉缸炉壳进行完整的更换。炉缸炉壳冷却系统将升级为现代技术，即：炉缸炉壳喷淋冷却要更换为水套冷却，炉底空气冷却要更换为现代的水冷却系统。

决定把半石墨耐火层更换为超微孔碳砖、减少在液态生铁内的溶解风险，引入陶瓷杯，延长炉缸炉龄。设计结合了从运行的第三代炉龄期所获得的全部知识。设定目标炉龄寿命在25年以上，可与炉身寿命匹敌。

2013年研发的炉缸设计如图13所示。

然而换衬的策略在2017年发生了改变，因为可▶



图 12 2009年产铁51 Mt之后的炉腹状况

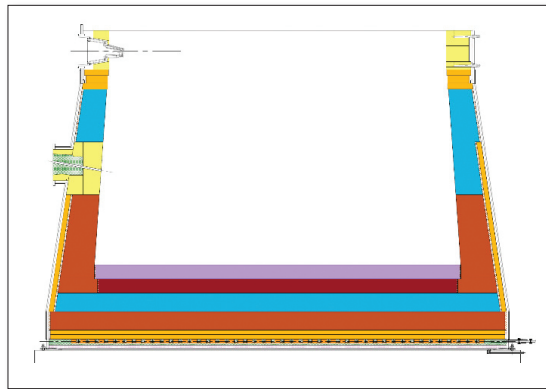


图 13 2013年的炉缸设计

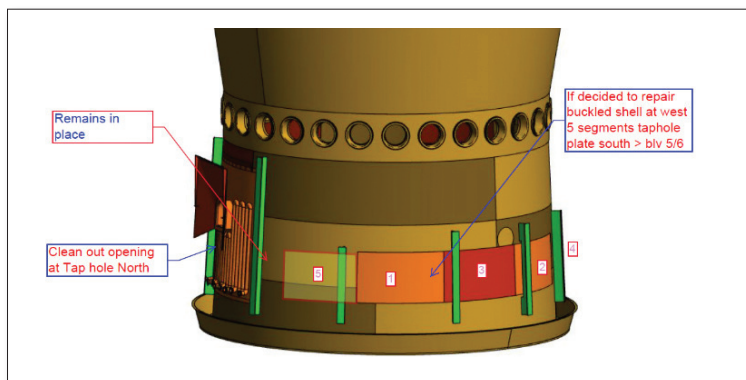


图 14 计划局部更换炉缸炉壳

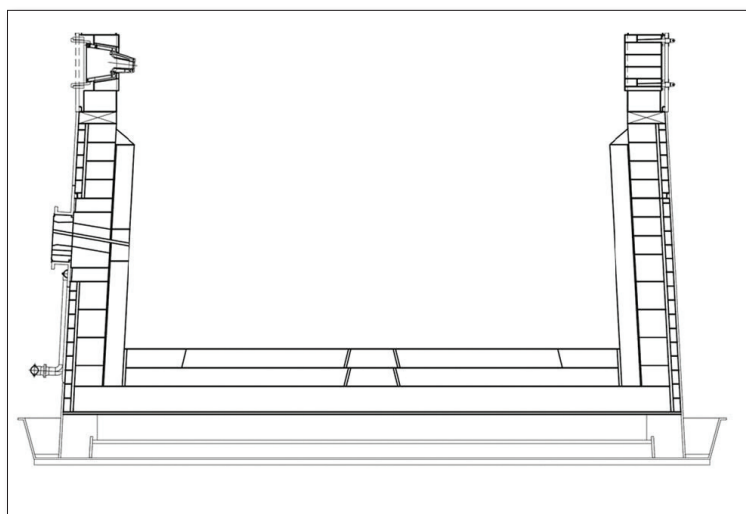


图 15 第4代炉龄期炉缸设计总布置

能将来对减少CO₂排放造成影响，不清楚欧洲在2030年以后高炉生铁产量是否还可行。鉴于这种原因，决定限制目标炉龄为15年、取代25年以上。

因此决定重新使用现有的炉缸炉壳，只进行局部检修，消除炉壳变形。原理如图14所示。

这意味着在下一代炉龄期内炉壳的基本约束条件将保留。不过，进一步优化耐材设计，包含超微孔碳砖和陶瓷杯。

图15所示是按计划下次换衬的炉缸设计。

结论

6#高炉自1986年开炉以来，已按低焦比和高生产率运行33年。低焦比得益于一套有效的工艺仪表装置和工艺控制方法。

通过炉腹、炉腰、和炉身设计使用铜冷却板、石墨和碳化硅，并用有效的工艺控制程序进行支撑，炉龄寿命长已成为可能，无论何时这些措施都确保了煤气分布和热负荷的优化。

在炉龄期最初的16年内，高生产率和原始设计的约束条件造成了炉缸侵蚀，迫使2002年产铁34.3 Mt之后进行了炉缸检修。有效的资产管理对长炉龄寿命而言很关键，在艾依墨登这包含着一套综合监控程序、且必须附上“金箴”。

下次换衬目前计划在2021年进行。炉腹、炉腰和炉身将使用原始设计。对炉底炉缸实行新的设计，处理目前设计中存在的一些约束条件。

参考文献

- [1] E. Janssen, Reconstruction of Hoogovens No. 6 Blast Furnace, Iron and Steel International, 1977
- [2] W. Koen, R. Vogel: The modernization of Hoogovens No. 6 Blast Furnace, 1986
- [3] J. Liefhebber, R. Hes, J. Stuurwold, J. van der Stel, L. Bol: Blast Furnace Hearth Grouting at Tata Steel IJmuiden; METEC 2015
- [4] H.B. Lungen, P. Schmöle; Comparison of Blast Furnace Operation Modes in the World; ICSTI 2018, Vienna
- [5] G. Tjihuis, H. Toxopeus, H. van den Berg, C. van der Vliet: Hoogovens Blast Furnace No. 6 the first eleven years of a continuing campaign, Ironmaking Conference Proceedings, 1997
- [6] T. Bakker, G. Tjihuis, L. Bol: Developments of operating points of the IJmuiden Blast Furnaces; 6th European Coke and Ironmaking Congress / METEC 2011 **MS**

联系人: frank.kerkhoven@tatasteelurope.com

F. Kerkhoven, J. Stuurwold, G. Tjihuis, B. Nugteren are with Tata Steel, IJmuiden, The Netherlands. R. van Laar is with Daniëli Corus, IJmuiden, The Netherlands.