



GRAFTech
International

破记录的高炉炉缸寿命



破记录的高炉炉缸寿命

Peter Sylvén, 于珩, Peter L Duncanson

UCAR® Refractory Systems, GrafTech International

摘要

中国的首钢集团自 1991 年以来已经在 12 座高炉采用了 UCAR® 耐火材料系统的设计和热压炭砖。本文报告了首钢 1 号, 3 号, 4 号以及京唐 1 号 (15.5m 炉缸直径) 四座高炉的炉缸衬里使用情况, 其中前 3 座高炉已经在服役年限和单位炉容产铁方面打破了中国高炉炉缸长寿纪录。其他中国领先的高炉操作者宝钢及本钢最近也报告了破纪录的炉缸寿命, 我们将在本文讨论这些炉缸衬里的使用。除阐述了这些大高炉的耐火材料使用的基本原理外, 本文也讨论了业已证实的使取得上述创造寿命记录成为可能的炉缸衬里概念和设计。

1. 介绍



图 1：首钢高炉，先进的炼铁技术

首钢集团作为中国领先的钢铁厂之一，在 1991 年首次采用了 UCAR®耐火材料体系。对于一个炼铁生产者，炉缸衬里基本概念的改变十分重要，工厂的盈利取决于高炉的生产水平和可靠性。另外，炉缸衬里的可靠性也是事关安全的关键因素。首钢的决定是基于全球炼铁界的情况和其自身使用大炭块炉缸体系带来的寿命较短、麻烦不短的经验。在 1991 年，首钢 2 号炉 (1,726 m³) 采用 UCAR®衬里之前，使用大炭块炉缸的两代炉役是 3 年和 6 年。该炉在运行近 11 年停炉后发现炉缸部位的热压砖状态良好，这使首钢再次选用了相同热压砖进行大修。这也是首钢对其所有高炉炉缸衬里都采用 UCAR®体系做了正确决定的一个证明。2 号炉因为首钢迁址已经停炉。与大炭块技术不同，业已证明的 UCAR®耐火材料系统由小块的热压炭砖，半石墨砖及紧密的胶泥接缝组成。这些细节对于一代炉役中耐火材料对冷却壁始终确保良好的热传输至关重要。衬里技术会在本文的第 2、3 部分进行详细讨论。宝钢是另外一个领先的炼铁生产者，其 3 号炉 (4360m³) 的炉缸寿命也打破了宝钢纪录。该炉的耐火材料和技术的选择与首钢采用的相似。我们将在本文的第 4 部分进一步讨论。在 2009 年上海召开的第 5 届国际炼铁大会 (ICSTI) 上，本钢发表了文章关于在其全部 4 座高炉上“采用 UCAR®炭块长寿技术”将使以前的 5 年炉役延长到超过 15 年，更多的信息会在本文的第 5 部分摘要介绍。

2. 炉缸侵蚀机理

普通炭块和微孔炭块的炉缸壁侵蚀是热应力和机械应力引起的开裂、捣料变质和收缩、化学侵蚀和随后的导热系数相对于时间的下降共同作用而导致的。这种侵蚀是许多因素作用的结果。这些因素包括炉壁厚度过大，没有释放热膨胀的能力或不足或者差热膨胀，较厚且易变质的绝缘型捣料层以及不合适的耐火材料性质。结果是热膨胀和温度梯度引起的机械应力会导致大炭块炉缸壁的开裂。开裂中断了炭块传输热量给冷却系统的能力，因此，炭块的温度在整个厚度方向上会升高，特别是在热面。这使炭块的温度会超过锌和碱金属的关键反应温度 (约 800°C)，这使炭块的化学侵蚀得以发生。另外，冷面的捣料层通常会收缩或被蒸汽/煤气所侵蚀并成为有效热传递的障碍，这会使炭块的温度进一步升高。

当碱金属和锌侵蚀炭块时，粘结剂会被破坏并进而使炭块强度和导热系数的下降，同时炭块体积也会膨胀导致炉缸壁在垂直方向上涨。许多使用大炭块炉缸衬里的炼铁操作者都见证了炉缸膨胀是如何引起高炉的风口或冷却器的移动！随着化学侵蚀的进行，炭块会进一步损失传输热量的能力，并使炭块包括热面达到更高的温度。请注意当炉缸壁过厚时，炭块的热面温度会与铁水和炉渣的温度相同。



图 2. 微孔炭块炉缸的典型侵蚀和开裂，也称“环裂”。本图是经过 8 年炉役的炉缸情况。

这样，炉内压力和铁水的静压力会迫使熔融物质/煤气/碱金属进入高温炭质材料的孔隙，这只有在因为大炭块的开裂阻碍了对炭块的适当冷却使炭块和熔融物质的温度相同时才会可能。为了抵御熔融物质进入热的炭块，一些炭素供应商生产了非常小孔隙的材料（微孔，超微孔，超超微孔等）。但是，必须注意这种微孔的特性不能消灭炭块高温的根源，即开裂。它只是阻止了熔融材料对得到良好冷却炭块的渗透，但因为开裂，变质及捣料的收缩，炭块的温度却不能保持足够的冷却来防止这种渗透的发生。图 2 是经过几年生产的大炭块炉缸体系中发生的典型开裂。图 3-5 描述了这种侵蚀过程。图 6 表示了在大炭块体系中的典型“象脚”侵蚀模式-炉衬已经消耗到必须停炉的某点。

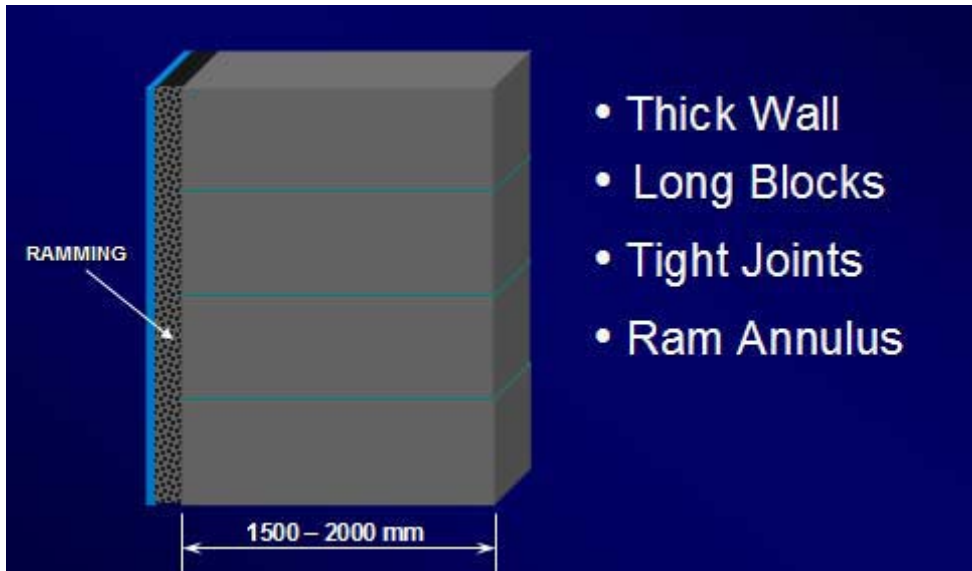


图 3: 典型的微孔炭块炉缸设计

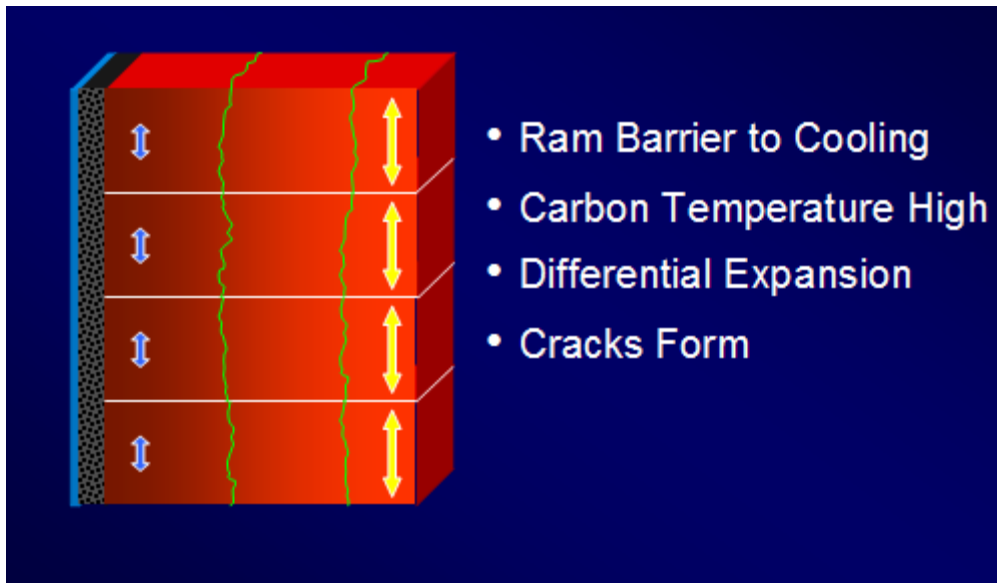


图 4: 微孔炭块衬里的侵蚀过程

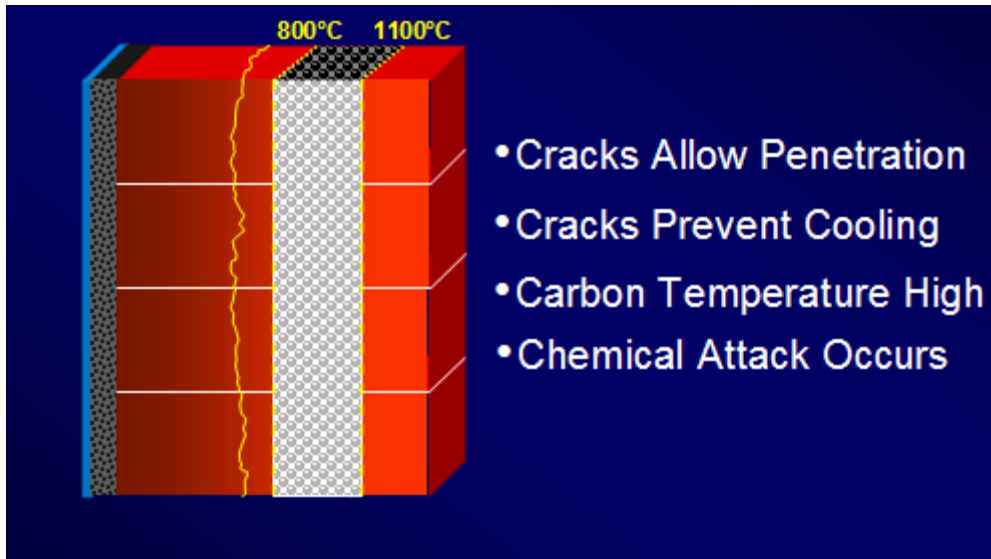


图 5. 微孔炭块衬里的侵蚀过程—材料损失

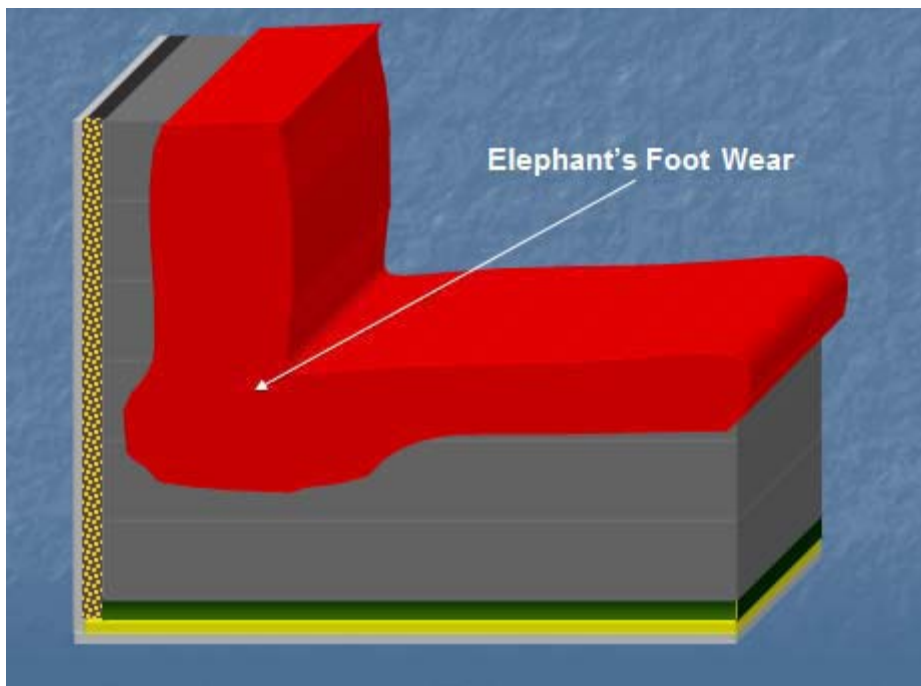


图 6. 大炭块体系中的象脚侵蚀模式

在炭块冷面和炉壳/冷却壁之间采用的捣料，其施工和理化指标也至为关键。不幸的是用来填充炭块和炉壳之间空隙的捣料又是采用大炭块所必需的材料。理论显示

的捣料密度在砌筑现场永远无法实现，同时材料指标随时间而变质的现象也比较常见。

捣料密度和捣料焙烧温度与捣料的导热性直接相关。捣料如果未经完全捣固和适度的焙烧就不能取得理论上的密度或导热系数指标。捣料是紧临炉皮或冷却壁捣固，它永远不能得到合适的焙烧温度。较低的初始温度降低了捣料的导热系数并使炭块的热面温度升高。这层捣料层最终成为一层传热障碍，也不再是计划中的高导热材料区域。

应当注意的的是铁水会最终熔蚀它所接触的任何炭质材料，这只是一个曝于铁水的时间/温度长短而已。如果铁水与微孔炭块一直保持接触，铁水也会不断的熔蚀炭素直到炉缸壁厚度减到穿炉发生或直到加钛护炉使炭砖热面受到保护。对于一个高生产率高炉说，如果不连续采用成本高昂的加钛护炉或者改变高炉操作如堵风口和/或降低生产率等办法，使用普通炭块或微孔炭块来取得长寿目标是不可能的。

然而，这需要相当多的运行成本如对矿石的特殊要求，燃料比的升高 以及努力减少炉衬侵蚀和温度的操作带来的生产水平的降低。许多高炉操作者在报告高炉长寿的同时，却几乎不提加钛护炉的成本、利用系数降低的代价以及灌浆、修补等的花费。

3. UCAR[®] 炉缸衬里体系

UCAR[®] 炉缸系统是基于一个事实即所有的重大炉缸侵蚀机理都与高温有关。碱侵蚀只在 800°C 以上发生；热应力是极度热膨胀的结果；冲刷侵蚀发生在铁水与炭块直接接触期间。因此如果能维持一个低水平的温度，将会防止侵蚀发生。

UCAR®炉缸体系的四个要素 (图 7):

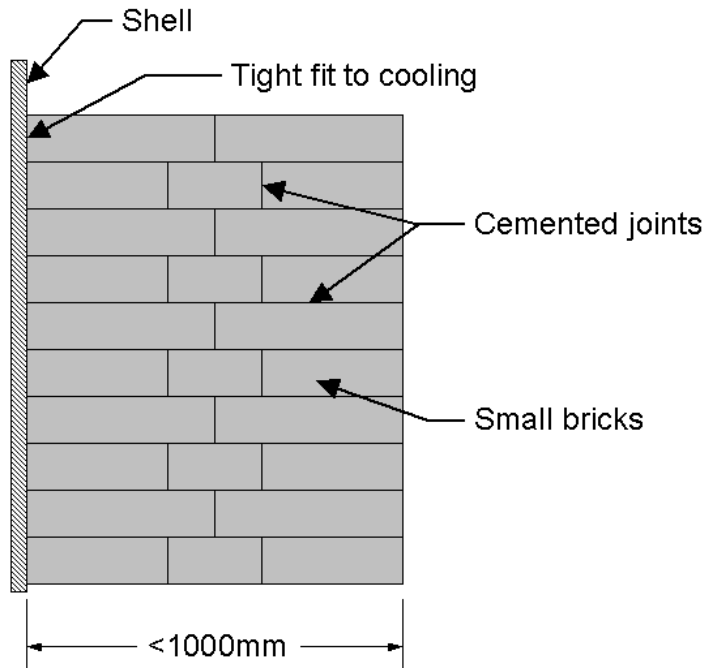


图 7. UCAR® 炉缸壁耐火材料的概念

1. 相对于传统大炭块设计，炉缸壁较薄，通常厚度小于 1 米，这有助于更有效的热传输和获得较低的热面温度。
2. 使用热压小砖取代大炭块。小块具有较小的膨胀，而且热面的环状砌砖可以独立膨胀而不影响冷面的环状砌状，从而减少内部应力。我们不推荐把大的炭块切成小块来当“砖”来使用；众所周知，所有的焙烧炭块的性质从炭块的一端到另外一端或从炭块的中心到表面是变化的。就象一只链条的强度取决于最弱的一环，所有炉缸壁的砌砖一定要同时满足最高的标准。热压小砖具备优秀的热-机械性能，并且已在世界范围的许多长寿高炉上得以验证。
3. 在炉壁砌体和冷却系统（炉壳或冷却壁）之间没有捣料。相对于焙烧炭素耐材，捣料的导热能力较差，随着时间的进行，它也会变的干燥，粉化或与炭块分离并导致传热中断。
4. 在所有的炭砖表面采用特殊的胶泥来填充砖缝、粘结砖块、传输热量，但最重要的是吸收膨胀而不产生应力。当这些原则得以贯彻，炉缸壁的热面温度会低于渣铁

的凝固温度，一层保护性的渣壳会在热面形成。这个渣壳会保护炭砖、进一步降低炭砖温度并保护炭砖不受铁水的接触侵蚀。

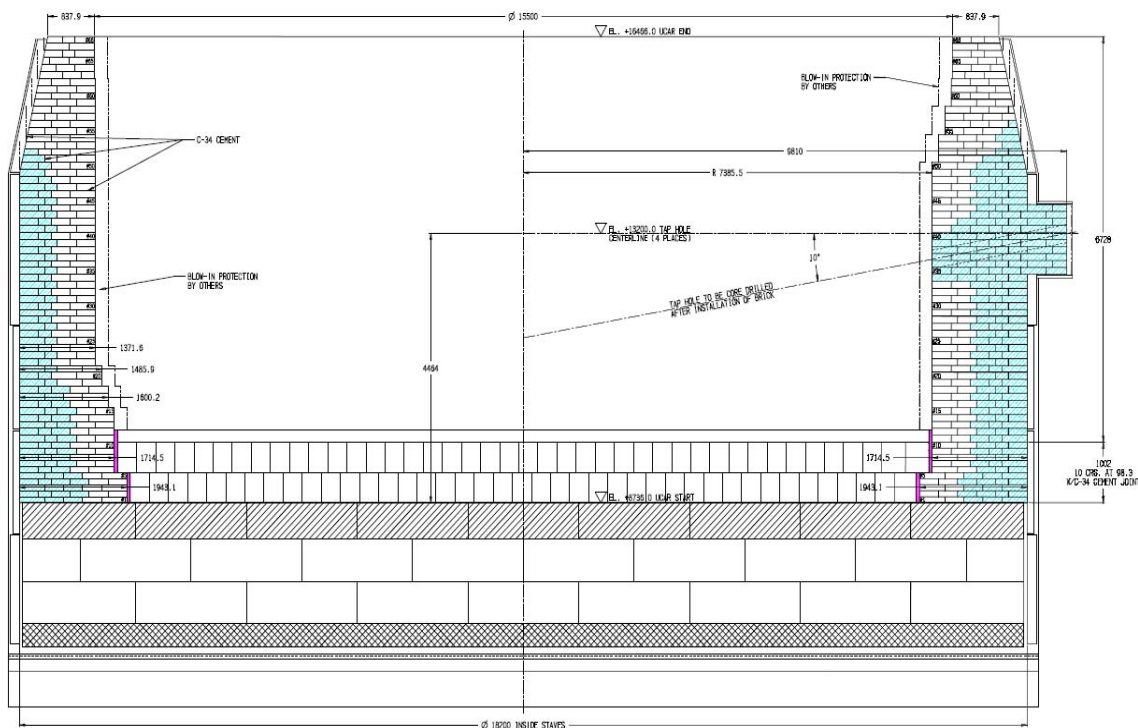


图 8. 采用 UCAR[®] 炉缸衬里 (NMA[™] and NMD[™] 热压砖) 的京唐 1 号高炉

4. 首钢高炉炉役 – 目前中国最长寿高炉的纪录

图 8 是在 2008 年砌筑的首钢京唐 1 号高炉炉缸衬里。首钢京唐公司位于中国华北的河北省曹妃甸港口，京唐 1 号高炉是一座拥有 15.5m 炉缸直径、高生产率的巨型高炉，年产生铁 450 万吨。该炉采用了 UCAR[®] 炉缸衬里，于 2009 年 5 月开炉。如在本文介绍部分提到，京唐 1 号采用这种体系是基于首钢炼铁操作者的实际经验。该炉缸体系在首钢的长期的生产实践中取得了卓越表现。并且首钢也报告了他们的三个高炉已经从高炉服役年限和单位炉容产铁两方面打破了中国纪录。炉缸使用热压炭砖无疑是正确的选择。下面是首钢这些高炉的数据 (截止 2010 年 7 月底)：

- 首钢 1 号 (2,536 m³), 1994 年 8 月开炉, 单位炉容产铁量: 13004 MT/m³。目前仍在满负荷生产。

- 首钢 3 号 (2,536 m³), 1993 年 6 月开炉, 单位炉容产铁量: 13,673 MT/m³. 目前仍在满荷生产。
- 首钢 4 号 (2,100 m³), 1992 年 5 月开炉, 单位炉容产铁量: 12,467 MT/m³, 2007 年底因首钢压缩产量停炉。

首钢在 2009 年发表的文章中总结为“首钢 1、3、4 高炉均已连续安全生产 15 年以上 (4 号高炉受搬迁调整要求被迫提前停炉), 且目前高炉长寿状况良好”。文中提到“炉缸砖衬设计采用全美联炭 (UCAR) 小块热压炭砖 (NMA、NMD), 其具备良好的导热性能、抗渣性、抗铁水冲刷等性能, 解决了当时国产炭砖性能指标偏低、不稳定的问题。同时小块炭砖的高热导性降低了炉缸砖衬的热梯度, 砖型小尺寸设计减少了由于炉缸热应力造成的砖衬裂纹、收缩而损坏现象, 确保了炉缸安全。”

首钢京唐 2 号高炉已于 2010 年 6 月 26 日点火送风。京唐公司粗钢总产能到今年底也将达到近 1000 万吨。京唐 2 号高炉与 1 号炉容相同 (5,500 m³), 也采用了可靠的 UCAR[®]热压砖体系。



图 9. 宝钢 3 号高炉, 1994 年 9 月开炉

另一个中国领先的高炉生产者宝钢也于最近报告其 3 号高炉在去年夏天也全面突破高炉生产的纪录。宝钢在 2009 年发表了关于 3 号高炉 (4,360 m³) 的文章, 下列引文出自宝钢的这篇文章:

- “...宝钢 3 号高炉投产于 1994 年 9 月，至今已稳定运行了 14 年多，累计产铁量达到 5075 万吨，单位炉容产铁量达到了 $11666\text{t}/\text{m}^3$ ，创造了宝钢的最好水平。...”
- “...自投产以来，3 号高炉炉缸状态一直良好，侧壁温度安全受控。...”
- “...2004 年以来，连续 4 年在喷煤比 $200\text{kg}/\text{t}$ 左右的条件下，利用系数达到了 2.4 以上，年产铁水 385 万吨以上。其中，2004 年 11 月到 2005 年 4 月利用系数稳定在 2.6 以上，2005 年 3 月月均最高达到 2.636。...”
- “...根据目前炉体炉缸的状态，3 号高炉炉役寿命有望达到 17~18 年，届时单位炉容产铁量将超过 $14500\text{t}/\text{m}^3$ ，有望创造国内高炉炉役寿命最高记录...”

在 1994 年砌筑的 3 号高炉炉缸壁采用的是 NMA™ 和 NMD™ 热压砖以及 C34™ 胶泥，炉底采用的是 GradeD™ 炭块和 RP4™ 捣料及 GrafTech™ 石墨块。

此前另外一个在中国的大型钢厂-本钢也报告了破记录的高炉炉役和高生产率。对更高生产率和延长高炉寿命的要求导致了本钢在 5 号高炉于 1991 年砌筑了 UCAR® 炉衬。本钢在上一届国际炼铁大会 (ICSTI) 发表的论文介绍说在 1991 年以前，本钢高炉寿命最长只有 5.5 年，炉缸炭块形成典型的“象脚”形侵蚀线，炉缸壁耐材厚度只剩下很少一点 (“50mm”)。目前本钢所有的四座高炉都使用了 UCAR® 炉衬，包括 NMA™ 和 NMD™ 砖。本钢 4 号和 5 号取得了 13 年和 11 年的炉役寿命 (非炉缸原因停炉) 并且没有发现“象脚”侵蚀。与以前的大炭块炉缸体系相比，你会认识到本钢高炉操作者对此非常满意。总而言之，对于计划推动大型高炉更加长寿的炼铁工作者来说，UCAR® 炉缸衬里已经被证实是一个卓越的耐火材料解决方案。

5. 结论

高炉操作是一门艺术。在高生产率下如何保持运行和在影响运行结果的永远变化的参数间保持平衡的知识要花费许多年才能获得。这种知识已经在全球的炼铁工作者中代代相传，并在科学、经验以及彼此之间继续学习。许多炼铁工作者都宣称大高炉中最为关键的部分就是炉缸衬里，因为它决定一代炉龄的长短。对炉缸衬里的信心可以使高炉操作者能够集中精力来追求产量及合格的产品。本文讨论了现代高炉

里最为常见的两种炉缸衬里概念的主要区别。解释了为什么 UCAR[®]冷却型衬里概念采用了被遍布全球的众多高炉操作者包括在中国运行超大型高炉的首钢和宝钢的实践证明的独有小块热压砖。作者谨此祝贺首钢、宝钢及本钢在高炉寿命方面取得了破纪录的成绩，也希望其知识和经验能够对新一代炼铁工作者有所裨益。

6. 参考文献

- 1) P. Duncanson and P. Sylvén, "A Financial Model for Investment in Hearth Technology", SAIL Equipment Manufacturers Conference, Ranchi (2007)
- 2) Dr.-ing. Jürgen Pethke, Salzgitter Flachstahl, Germany, Dr.-ing. Tatjana Stišović, Salzgitter Flachstahl, Germany, Dipl.-ing. Peter Sylvén, Graftech International, USA "New Hearth Lining Direction at Salzgitter Flachstahl Blast Furnace B, 5th European Coke and Ironmaking Conference, Jernkontoret, Stockholm (2005)
- 3) Peter Sylvén, "The Truths and Myths of Freeze Lining Technology for Blast Furnaces", the Moscow Institute of Steel and Alloys, Moscow (2004)
- 4) Peter Sylvén, "The UCAR Refractory Advantage for Modern Blast Furnaces", 19th National Convention of Metallurgical and Materials Engineers, Ranchi (2006)
- 5) Yingsheng Wang, Tao Wang, Jihua Shan, "Improvement of Campaign life of No.2 Blast Furnace at Capital Iron and Steel Group Co", China (2002)
- 6) 炼铁, 2009 年第 6 期, 21-24 页, "首钢高炉长寿维护实践", 张贺顺, 温太阳, 陈军, 首钢总公司
- 7) 炼铁, 2009 年第 3 期, 1-4 页, "宝钢 3 号高炉炉役后期稳产高产生实践", 梁利生, 陈俊, 张龙来, 宝钢股份宝钢分公司
- 8) Liu Qing-ye, "Long Life Technology of Hearth Area for Blast Furnace at BenGang, Benxi Iron and Steel, ICSTI congress, China (2009)

© 2010 GrafTech International Holdings Inc. GrafTech, GradeD, RP4, C34, UCAR, NMA, NMD and HotPressed are trademarks of GrafTech International Holdings Inc.