去除高炉煤气干式除尘中的酸性污染物以减少外排和腐蚀

考虑到改善运行的经济性，以及（在某些地区）缺水或经济性差，钢铁生产商们将关注点转向高炉煤气净化系统的应用，在该系统中，湿式洗涤器已被干式的二次气体处理阶段所取代。在传统系统中，酸性污染物随洗涤水从系统内去除，而干式除尘系统需要采取额外的措施，如喷入吸收剂，来去除酸性化合物。

本文评价了几种干式去除污染物（如盐酸、氟化氢和氰化物）的解决方案。比较了不同方法的去除机理，以及它们在消除和减少对气体净化装置下游的不利后果方面的效率和有效性，如酸加速管道或装置设备的腐蚀和热风系统中的NOx排放。

总的来说，干式煤气除尘技术在净化高炉煤气方面具有巨大的潜力，因为它带来了更高的能源效率、更低的成本、更少的占地空间，并且从根本上消除了水的消耗。使用垂直径向喷射器可确保吸收剂得到最有效的利用，从而将气态污染物的数量降低到安全水平。

作者: Peter Klut 和M Joost Meijers
达涅利康力斯

引言

在钢铁生产流程中，高炉煤气被作为燃料用于各种工艺流程的，尤其是用于加热供给高炉自身的空气。然而，在将其用作燃料之前，需要对其进行调节和净化。

通常使用重力除尘器结合湿式（比肖夫）洗涤器及（轴向）除雾器。但相对较新的发展是向干式煤气净化装置的转变。该系统由旋风除尘器、调节塔和一组过滤模块组成。与湿式净化系统相比，干式气体净化具有一些明显的优点，即：

- TRT可获得更多的热能，且可得到较高热值的煤气用于燃烧
- 消除污泥和水处理厂
- 占地空间更小
- 没有水消耗

然而，这项技术也带来了一些挑战，其中主要的挑战是去除气态污染物。图1显示了干式煤气净化装置布局的简化总图。

干式煤气净化技术在过去的铝行业中已得到验证，整个行业在80年代已转变为干式净化技术。达涅利康力斯拥有30多个高炉煤气净化项目和40多个干式煤气净化项目，具备设计此类系统所需的所有专业知识。

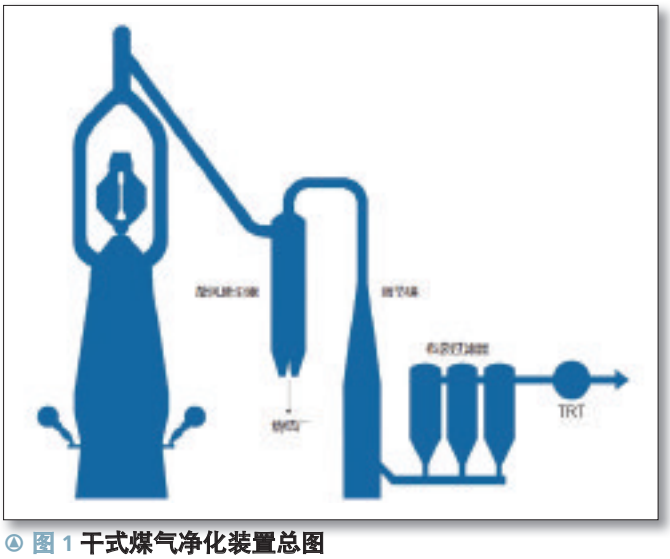

图 1 干式煤气净化装置总图

高炉煤气及其问题

为了理解净化工艺的要求，我们首先需要知道我们从哪里开始。高炉煤气是钢铁生产的副产品，主要由氮气、一氧化碳、二氧化碳和氢气组成。除这些主要成分外，还有以粉尘形式存在的污染物，以及HCl、HF、HCN和CNS等气态污染物。表1概述了高炉煤气的典型成分2。

- **氯化氢：** HCl会增加金属的腐蚀，从而缩 3

主要成分	化学式	mol%
氮气	N_2	45-58
一氧化碳	CO	20-25
二氧化碳	CO_2	17-25
氢气	H_2	1-5

其他成分	化学式	数量
粉尘	–	20-40g/Nm³
温度	H_2O	20-115g/Nm³
氯化氢	HCl	< 800mg/Nm³
氟化氢	HF	< 80mg/Nm³
氰化氢	HCN	< 150mg/Nm³
硫化碳	COS	< 70mg/Nm³
硫化氢	H_2S	< 50mg/Nm³

表 1 高炉煤气的主要成分

- **氟化氢**：HF将具有与HCl相似的效果，尽管因其含量稍低因此影响稍小
- **氰化氢：**由于其分解产物，HCN将增加NOX排放
- **硫化碳：**由于其 S0x

虽然污染物的数量相对较小，但如果不缓解，对净化系统其余部分的潜在影响可能是灾难性的。Chen等人4进行的一项研究发现，在运行四年后，干式洗涤器下游管道的壁厚已从8 mm降至3.4 mm以下。他们测试的系统所在的高炉是使用一套干式除尘系统，后接一个喷雾塔，在喷雾塔中，他们在气流中喷入（一种未公开的）碱性介质。该测量的位置位于该喷淋塔的下游。

最近，欧盟推出了一项针对NOx排放的法规。在传统的湿气净化系统中，氰化物的去除非常有限，典型的去除率低于50%。氰化物将在热风炉燃烧器中分解为NOx排放物。限制作为燃烧器中氰化物副产物形成的NOx的数量，将允许热风炉在更高的温度下运行，因为增加的NOx生成物将得到补偿。这反过来可能会提高整个系统的效率。

在钢铁生产的BAT参考文件中，热风炉的以下排放水平有详细说明5：

粉尘：　< 10 mg/Nm³
SOx：　< 200mg/Nm³
NOx：　< 100mg/Nm³

虽然本文件本身不是法规，但它经常被作为不同国家法规的基础，可以被视为技术必须遵守的标准。提供的系统将确保向热风炉所供煤气中的污染物水平足够低，且达到这些目标。

另一个有趣的研究领域是从废气流中去除二氧化碳。这也主要是由越来越多的法规推动的，比如二氧化碳税。达涅利康力斯目前正在研究不同的CO_2去除方法（即CO_2矿化），但在本文中，我们将重点关注酸性污染物的去除。

干式煤气净化工艺说明

如引言中所述，干法气体清洗工艺包括三个主要工艺步骤。

- 旋风除尘
- 调节塔，以确保过滤器模块的安全温度，而不会在下游系统中产生过多水分
- 过滤器模块用于剩余的除尘和使用吸收剂去除其

下面将简要概述这些要素。

a) 旋风除尘器

旋风除尘器是干式煤气净化过程的第一步。与传统的重力式除尘器相比，除尘效率从50%提高到85%。去除的灰尘相对较粗，主要含有氧化铁和碳。该部分无需进一步处理可直接由烧结厂回收。未被（有意）捕获的较细粉尘部分含有锌和铅等元素，将首先引至调节过程，然后引至细粉尘去除步骤。表2展示了旋风分离器的最重要设计参数。

b) 调节塔

如果高炉煤气温度超过180°C或低于100°C，则需要对高炉煤气进行调节。这种高温主要是由高炉内炉料的偏行或滑料引起的。在设计中可设置一个调节塔，其中高炉煤气从塔顶进入，水以平行流向喷入。与氮气一起喷入的水产生直径约为150μm的水雾。塔内的停留时间应确保所有液滴在调节塔出口处完全蒸发。离开调节塔的高炉煤气温度约为150°C。

如果高炉煤气的温度低于100°C，燃烧器将提供燃烧后的热烟气体，并与高炉煤气混合后以保持130°C的温度。该加热是非常必要的，以防止装置中水分进一步凝结。在高炉正常运行条件下，则无需冷却或加热。

用于雾化水的喷嘴设置为在入口管道中的整个圆周方向。喷枪的结构材料为哈氏合金，以能承受高炉煤气的恶劣条件。

在不影响液滴直径的情况下，喷嘴的调节比为1:6。此外，喷嘴可以独立打开，允许更大的调节比。如果喷枪未运行，则少量氮气流可防止灰尘堵塞喷嘴。喷枪可以很容易地从塔的外部拆除。提供平台和检查口。

采用CFD模型确保水和气体之间的最佳接触，并防止水接触侧壁而导致腐蚀。喷枪在高炉运行期间可伸缩，以便在线维护/更换喷嘴，而不会中断高炉操作。当调节塔不运行时，用少量氮气吹扫喷嘴，以防止喷嘴堵塞。喷嘴由哈氏合金制成，可承受恶劣的高炉煤气条件。

参数	典型值	原因
除尘效率	85%	超过85%的除尘效率会显著增加回收干粉尘中的锌含量，从而导致高炉中与锌相关的工艺问题。
下降角	>40°	时，下降管中会沉积灰尘，造成堵塞
存灰量	72hr	旋风分离器下方的料斗可储存最多3天的灰尘，以适应恶劣天气条件/跨周末生产能力
卸灰高度	5m	排灰口应具有足够的高度，以允许列车车厢进入其下方

表 2 旋风分离器的设计参数

调节塔的设计基于铝行业中干式洗涤系统的丰富实践经验，以及对高炉工艺的深刻理解；该系统已经证实其能够将气体温度保持在过滤布袋的工作范围内，且不存在下游水分聚积的风险。

c) 吸收剂的喷入

为了去除气态污染物，必须喷入吸收剂。这是通过使用垂直径向喷射器（VRI）在过滤器模块底部完成的。VRI确保吸收剂在气体中均匀分布，并使接触面积最大化。

大部分吸收剂（与捕集的灰尘结合）通过VRI回收，同时喷射器保持新鲜物料的稳定供应。将新鲜物料加入到VRI上方，例如沿着流向加入，以确保新鲜物料能够吸收末端的污染物。

用于吸收的物料是碱（其中最常用的是石灰）。这是去除所有酸性成分的最佳结果。盐酸的在线气体监测仪控制新鲜吸收剂的进料速度，因为这是主要污染物。这样可以确保不会浪费新鲜的吸收剂，并有助于降低系统的运行成本。预计使用该系统的HCN去除效率比湿式系统高得多，从而显著降低NOx排放。图6显示了包括吸收剂喷入和再循环系统的过滤器模块。

目前正在进行测试，以测量不同吸收剂的有效性。测试设备与TNO和LHOIST一起持续开发，见图4。最新的进展是向工艺流中人工添加HCl，因为塔塔钢铁艾默依登厂的污染物含量太低，无法进行准确的测试。

d) 低压脉冲布袋模块

经过处理的高炉煤气和喷入的吸收剂被引至多个过滤器模块，其中过滤器布袋负责粉尘和干净气体的分离。滤棒的配置为圆形阵列，以便在圆形压力容器中安装尽可能多的滤袋。这使每个模块有更大的过滤面积。由于使用了低压（LP）脉冲净化系统，相比标准的高压（HP）脉冲净化系统，滤袋长度可以设计的更长。这些较长的滤袋也有助于增加每个模块内的面积。因此，DC设计需要的过滤器模块比其他公司设计的要少得多。

设计中的另一个限制因素是Can速度（滤袋之间向上的气体速度），其必须足够低，以防止脉冲粉尘被即将到来的气流捕获并重新沉积到干净的过滤器袋上。在DC设计中，进入的气体在（空

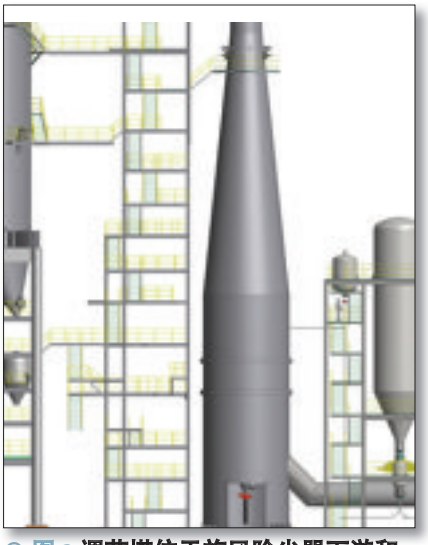

图 2 调节塔位于旋风除尘器下游和袋式除尘器模块上游

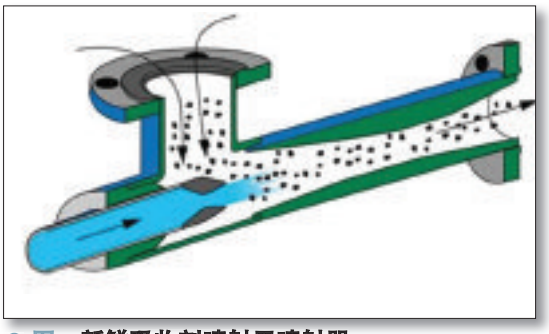

图 3 新鲜吸收剂喷射用喷射器

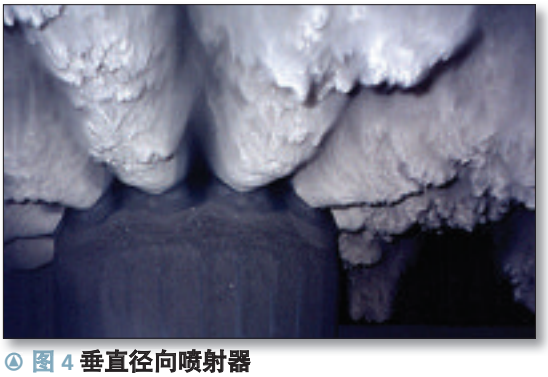

图 4 垂直径向喷射器

图 5 吸收测试装置

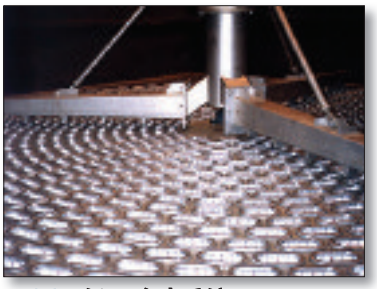

图 6 低压脉冲系统

的）中心和靠近侧壁的开放区域上升，确保料斗中的沉积物不受干扰。

每个模块都配有一个进口和出口眼镜阀，以便在生产过程中对模块进行维护。N-1设计允许在不影响气体质量或高炉操作的情况下，使一个模块停止运行以进行维护/换袋。通过在每个模块的出口使用破损布袋探测器可以发现破损布袋。在滤袋的上游注入荧光粉使寻找破损布袋变得容易。紫外线灯直接检测破损的袋子。每个模块还配有氮气冲洗装置，以便模块在进入前可以安全打开和通风。

低压脉冲净化系统

过滤器模块内的滤袋需要经常清洁，以清除在运行过程中沉积的粉尘层。使用低压（LP）脉冲净化系统，大量气体进入滤袋使其“膨胀”。由于这种膨胀，袋子外部的灰尘从袋子上脱落。用于脉冲的气体是加压至约0.8 bar的清洁高炉煤气。使用高炉煤气作为脉冲气体不会造成像使用（昂贵）氮气的竞争技术好样，使高炉煤气被稀释。这些竞争的技术使用中压或高压脉冲，利用产生的冲击波在布袋中向下传播，以清除灰尘。然而，当冲击波向下传播时能量损失较大。因此，采用中压或高压脉冲净化的有效滤袋长度在4－4.5 m范围内。DC低压脉冲净化使用8米长的滤袋。在水泥应用中，已使用10 m的低压脉冲净化过滤器。

高炉脉冲气体的分配由一个缓慢旋转的装置完成，该装置有三个臂，在臂上放置气体喷嘴。使用旋转臂可以方便地检修滤袋。如果旋转臂下有一个破的布袋，旋转臂可以被很容易地推开。因此，本设计不需要拆除脉冲管即可检修

净化后的高炉煤气通过出口眼镜阀从模块出口至出口总管，即来自所有模块的气体在此汇集。一部分净煤气从净煤气总管输送至高炉煤气加压器；该加压高炉煤气用于过滤模块的脉冲和VRI喷射器的流化。如果需要，这种加压高炉煤气也可用于再加热燃烧器，以防高炉煤气太冷。

在此步骤后，高炉煤气被送入炉顶煤气回收透平机(TRT）进行膨胀/能量回收。由于高炉温度较高，与湿式洗涤器相比，TRT的输出大约高出25－35%。图7显示了包括吸收剂喷入和循环的过滤器模块的概况。

资本支出/运营支出

表3给出了干式煤气净化系统的潜在年节约量。它基于一个产生600,000Nm^3/h高炉煤气的工厂。一些注意事项是水价，在本表中，水价设定为10ct/m^3。这是一个现实的价格，当水随时可用时，但水并不总是随时可用，在某些地方，价格可能高达10倍，这进一步增加了商业应用的价值。给出了能源价格的三种不同情况：一种是基于35欧元/

描述	数值		每年节省	
		@€35/MWh	@€60/MWh	@€85/MWh
提高高炉煤气温度	4100 kW	€1,435,000	€2,440,000	€3,445,000
降低高炉煤气湿度	80 kW	€30,000	€50,000	€70,000
汽化	400 kW	€140,000	€240,000	€335,000
低功率冷风	120 kW	€40,000	€70,000	€95,000
TRT	3900 kW	€1,365,000	€2,320,000	€3,275,000
减少水消耗 @ 10ct/m³	Approx. 225 m³/h	€200,000	€200,000	€200,000
无水化学物质 (2ppm @ 1,200m³/h @€10/kg)	-	€200,000	€200,000	€200,000
吸收剂	100kg/h	-€100,000	-€100,000	-€100,000
总计		€3,310,000	€5,420,000	€7,520,000

表 3 干式和湿式煤气净化系统的成本比较

MWh的极低价格点，例如附近的其他行业提供电力或现场发电；一个为60欧元/MWh，代表例如美国；最后是85欧元/MWh，这是欧洲国家的近似价格。很明显，即使水价相对较低并且取最低能源价格，与湿式煤气净化装置相比，选择或改用干式煤气净化装置可以显著节约成本。预计干式煤气净化系统的投资回报约为2年，在某些情况下甚至更短。

结论

与更传统的煤气净化技术相比，干气煤气净化技术具有许多优势。它更节能，更具成本效益，占地面积更小——尤其是考虑到水处理设施和污泥处理设备，几乎完全消除了水的消耗。虽然酸加速腐蚀是一个问题，但使用垂直径向喷射器去除气态污染物，以及不会造成水分聚积且设计良好并经验证的调节塔煤气温度控制，可消除此风险。MS

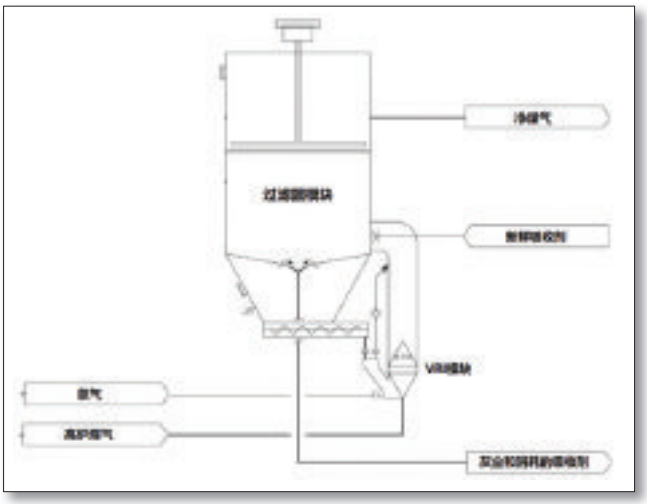

图 7 包括吸收剂喷入系统的过滤器模块概况

联系方式: peter.klut@danieli-corus.com

参考文献

[1] http://millennium-steel.com/wp-content/uploads/2016/10/pp031-035_msi16.pdf

[2] http://ispatguru.com/blast-furnace-gas-its-characteristics-and-safety-requirements/

[3] http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/eecnawtec/nawtec16/nawtec16-1916.pdf

[4] H. Chen, J. Zhao, Z. Ma, H. Liang, W. Wang, J. Wu, P. Zheng, J. Sun, & W. Liu (2018). *Evaluation on Dechlorination Effect for Alkali Liquor Spray Scrubber after BF Dry Dust-catch*, Shougang Research Institute of Technology, Beijing China

[5] Joint Research Center Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau (2010). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production*