**天然气及其在钢铁行业中的应用**

天然气及其在钢铁行业的应用

天然气（NG）是一种环保的不可再生的气态化石燃料，从地球上的矿藏中提取。它是一种清洁和绿色的燃料，具有很高的效率，在帮助许多行业减少排放和改善整体空气质量方面起着重要作用。它通常以以下方式供应：（1）管道天然气（PNG）；（2）压缩天然气（CNG）；以及（3）液化天然气（LNG）。

天然气是一种主要由甲烷（CH4）组成的碳氢化合物混合物，按体积计算的百分比通常超过85%。天然气中的其他碳氢化合物包括不同数量的各种高级烷烃，如乙烷、丙烷和丁烷等。它还含有不同饱和度的水蒸气（H2O），或冷凝水。它还可能包含一些小比例的氮气（N2）、二氧化碳（CO2）和硫化氢（H2S）以及氦气（He）等。

当与必要数量的空气混合并点燃时，天然气燃烧时产生清洁的蓝色发光火焰。它被认为是最清洁的燃烧燃料之一。燃烧时，它主要产生热量、二氧化碳和水蒸气。

天然气是一种以气相形式存在于矿床中的燃料。它无色无味，无毒，并且比空气轻。它不包含烯烃（在破坏性蒸馏或重整过程中产生的碳氢化合物）。它是一种高度易燃和可燃的气体。其CAS号为8006-14-2，联合国编号为1971。

天然气的数量以正常立方米（相当于0摄氏度和1个大气压）或标准立方英尺（相当于16摄氏度和14.73磅/平方英寸绝对压力）为单位。一立方米天然气的较高热值从大约9500大卡到10000大卡不等。其密度约为0.85公斤/立方米。

天然气通常通过管道网络进行远距离运输（长达5000公里）。管道中的天然气压力取决于几个因素，包括（i）要运输的天然气数量，（ii）管道的直径，（iii）涉及的距离，以及（iv）天然气管道和环境的安全。通过管道供应给消费者的天然气是PNG。消费者端的管道压力一般低于16个大气压。

压缩天然气是天然气的一种形式，经过压缩（200个大气压到250个大气压）进入容器，然后再转给那些由于地理和其他原因而无法连接到天然气管道的消费者。压缩天然气是可储存的。与通过管道输送并立即消费的天然气不同（类似于电力），CNG可以用于储存和不连续的使用。NG压缩到容器中会提高风险水平。

LNG是通过将天然气冷却到零下162摄氏度的温度制成的。在这个温度下，NG成为液体，其体积减少了600倍。LNG气体比气态形式更容易储存，因为它占用的空间要小得多。LNG在大气压下储存在设计好的容器中，更容易运输到用户手中。在目的地距离一般在5000公里以上的地方，天然气通常以LNG形式运输。

NG在钢铁行业的用途

NG在钢铁行业的用途（图1）包括（i）作为还原剂，（ii）作为热源或燃料，（iii）用于发电，以及（iii）用于切割和焊接应用。

图1 天然气在钢铁行业的用途

天然气作为还原剂

天然气作为还原剂主要用于炼铁。在以天然气为基础的直接还原铁（DRI）生产过程中，需要将天然气转化为高氢（H2）和一氧化碳（CO）含量的可用还原气体。全球90％以上的DRI工厂使用天然气。在高炉（BF）炼铁的情况下，NG通常与热风鼓风一起注入高炉，在风口处。

在DRI生产中使用NG

NG重整是一种先进和成熟的生产工艺。NG重整生产还原气体的标准工艺是一个热工艺，被称为蒸汽-甲烷重整（SMR）工艺。这是一个使用高温蒸汽（700摄氏度至1000摄氏度）来生产由H2和CO组成的还原气体的工艺。在SMR工艺中，CH4与蒸汽（H2O）在3个大气压到25个大气压的压力下，在催化剂的作用下发生反应，产生H2、CO和相对少量的CO2。蒸汽转化是一个内热过程，这意味着需要向该过程提供热量以使反应得以进行。SMR反应是CH4 + H2O（+热量）= CO + 3H2。

在DRI生产过程中，NG在重整炉中进行重整，重整炉是一个气密性耐火衬里的炉子，里面有充满催化剂的合金钢管。进入转化炉的进气是新鲜的NG与来自竖炉的顶部气体混合，后者正在被回收。这种混合气体被加热并通过充满催化剂的管道。由于催化剂填充管内发生的催化反应，产生了重整的气体。含有约90％至92％的H2+CO（干基）的新重整气体，然后作为还原气体直接送入竖炉。

DRI生产过程通常使用固体催化剂进行气相反应。氧化铝（Al2O3）或氧化镁（MgO）是载体材料，使催化剂具有形状和强度。催化剂的活性成分，增加了反应的速度，通常是镍（Ni）。钴（Co）在某些情况下也被使用。硫（S）和卤素是最常见的重整催化剂毒物。

在重整炉中发生的主要蒸汽重整反应是CnH（2n+2）+n H2O=（2n+1）H2+nCO。在蒸汽重整过程中，有可能出现重碳氢化合物的裂解。裂解反应是CnH（2n+2）=（n+1）H2+nC。这也被称为碳（C）沉积反应。在实际操作中，在DRI生产过程中，由于来自竖炉的炉顶气体被循环使用，它含有二氧化碳和氧气（O2）。这些气体也参与了NG的重整反应。下面给出了CH4的重整反应，该反应产生由CO和H2组成的还原气体。

CH4 + CO2 = 2CO + 2H2

CH4 + H2O = Co + 3H2

2CH4 + O2 = 2CO + 4H2

Co + H2O = Co2 + H2

CH4 = C(S) + 2H2 (碳沉积反应)

改质器和催化剂的设计应使其在促进改质反应的同时，不允许发生碳沉积反应。对于蒸汽转化器，NG气体需要被脱硫。

DRI的生产过程通常使用化学计量重整器。在这种转化器中，化学计量比是一个重要参数。随机比例是指氧化剂与碳氢化合物的摩尔或体积比，如果反应完成，通常会导致碳氢化合物的消耗，没有氧化剂剩余。在蒸汽转化器中，它是蒸汽与碳的比率。

以天然气为基础的DRI生产的能耗是众所周知的，并确定为每吨DRI消耗10.4千兆焦耳。基于NG的DRI生产也导致了较低的二氧化碳排放量，从每吨钢0.77吨二氧化碳到每吨钢0.92吨二氧化碳，这取决于使用的电力类型。

在BF中注入NG

NG作为一种辅助燃料被注入到BF的壶嘴中。它与富含O2的热鼓风一起注入。注入NG作为辅助燃料的目的是为了减少焦炭的具体消耗。在BF中注入NG气体实现的焦炭替代率在1.3到1.4之间。注入BF的NG为炉子提供由H2和CO组成的还原性气体，这些气体在炉轴上移动并参与铁氧化物的还原反应。

明显更高的NG注入率（通过水口）是不可行的，因为在水口注入NG会对流道绝热火焰温度（RAFT）产生内热效应。这极大地限制了可以通过分水器注入的NG数量。为了补偿火焰温度的降低，热鼓风需要富含O2。然而，鼓风中O2含量的增加降低了N2含量，这反过来又导致顶部气体温度下降。顶层气体温度必须始终高于露点，以防止在BF的上部出现任何不良的冷凝现象。

质量和能量平衡的计算表明，在BF喷口的NG注入率不能超过每吨热金属150公斤（kg/tHM）。这可以通过计算不同的NG注入率所允许的热风O2富集水平来证明，这样就可以满足顶部气体温度大于最小值和RAFT大于最小值的条件。这两个条件定义了BF的 "操作窗口"。因此，要保持最低RAFT（通常在1700摄氏度到1900摄氏度之间）和最低气体温度（通常平均高于100摄氏度）以确保BF的稳定运行。

由于火焰温度和顶部气体温度的双重限制，可以在喷口注入的天然气数量受到限制。如果要提高天然气在BF中的利用率，就必须采取不同的方法。根据这种方法，需要在BF轴的高处注入NG，即分水口的上方。在炉轴上注入NG预计会导致CH4在铁/氧化铁上的裂解，众所周知，铁/氧化铁可以作为C沉积的催化剂。目前，在HYL直接还原工艺中利用了将NG直接注入氧化铁轴的做法。HYL零改造（ZR）工艺（也被称为Energiron工艺）通过结合高还原温度（高于1050摄氏度）和竖炉内的 "原位 "改造，优化了其整体能源效率。

将NG注入BF的竖炉，预计将导致CH4在高温下裂解，通常高于800摄氏度（开尔文）。此外，在这些地区存在的CO2和H2O预计会对CH4进行改造，并产生CO和H2。预计CO、CO2、H2和H2O的浓度将被水-气体转换反应所控制。将天然气注入BF的预期反应如下：

甲烷裂解 - CH4 = C + 2H2，在298摄氏度时，Delta H = +75.6千焦耳/每摩尔（kJ/mol）的CH4

甲烷的二氧化碳转化 - CH4 + CO2 - 2CO + 2H2，在298度K时的Delta H = 247千焦/摩尔的CH4

甲烷的蒸汽重整--CH4 + H2O = CO + 3H2，在298度时的Delta H = 206 kJ/mol的CH4

水气转移反应--CO + H2O = CO2 + H2，在298度K时的Delta H = -41.1 kJ/mol

由上述反应产生的H2和CO气体在BF轴上移动并参与还原反应。需要注意的是，水气转移反应在高温下是动力学上有利的，在低温下是热力学上有利的，因为反应的平衡常数随着温度的升高而降低。由于从反应物到产品的体积没有变化，反应平衡不受压力变化的影响。

同样，还原性气体的轴注入是欧洲 "超低二氧化碳炼钢（ULCOS）计划 "中考虑的选项之一。炉顶气体循环BF工艺（ULCOS-TGRBF）（已经在试验阶段进行了测试）从炉顶气体中去除CO2，并在熔炉的壶嘴和下部轴区重新注入剩余的CO和H2。

天然气作为炉内燃料

天然气是主要的能源之一，可用于满足钢铁行业的加热要求。它是一种极其重要的能源，可以减少污染，保持清洁和健康的环境。与其他能源，特别是其他化石燃料相比，使用天然气还具有许多环境优势。

基本上，需要能源的工业应用，特别是供暖，都是利用化石燃料的燃烧来获得能源。由于其清洁燃烧的性质，尽可能使用天然气，无论是与其他化石燃料一起使用，还是替代它们，都有助于减少有害污染物的排放。

NG主要由CH4组成，其燃烧的主要产品是CO2和水蒸气。CH4的燃烧过程包括CH4和O2之间的反应。当这个反应发生时，结果是CO2、H2O和大量的能量。显示CH4燃烧的反应由方程式CH4[g] + 2O2[g] = CO2[g] + 2H2O[l] + 891 kJ表示。

作为最清洁的化石燃料，天然气可以在许多方面被用来帮助减少排放到大气中的污染物。燃烧NG代替其他化石燃料排放的有害污染物较少，增加对NG的依赖可能会减少许多这些最有害的污染物的排放。另一方面，天然气的燃烧释放出非常少量的硫氧化物（SOx）和氮氧化物（NOx），几乎没有灰烬或颗粒物，以及较低水平的二氧化碳、一氧化碳和其他反应性碳氢化合物。

基于天然气的发电

基于天然气的发电厂通过燃烧天然气作为其燃料来发电。有许多类型的基于天然气的发电厂，它们都能发电，但用途不同。天然气发电厂价格便宜，建造速度快。与其他发电厂相比，它们的热力学效率也非常高。天然气可用于发电的方式多种多样，如下所示。

传统的锅炉式发电 - 最基本的天然气发电包括一个蒸汽发电装置，其中天然气在锅炉中燃烧以加热水并产生蒸汽，然后使涡轮机转动以发电。尽管这些基本的蒸汽装置在大型煤炭或核能发电设施中更为典型，但天然气也可用于这一过程。这些基本的蒸汽发电装置的能源效率相当低。通常情况下，在这些类型的机组中，只有33%到35%的用于产生蒸汽的热能被转化为电能。

联合循环机组 - 许多新的燃气发电厂被称为 "联合循环 "机组。在这些类型的发电设施中，有一个燃气轮机和一个蒸汽装置，都是一体的。燃气轮机的运行方式与普通燃气轮机基本相同，利用天然气燃烧后释放的热气来转动涡轮机并发电。在联合循环电厂中，燃气轮机过程中的废热被用于产生蒸汽，然后像蒸汽装置一样用于发电。由于这种对天然气释放的热能的有效利用，联合循环电厂比单独的蒸汽装置或燃气轮机的效率要高很多。事实上，联合循环电厂的热效率可以达到50％至60％。

集中式燃气轮机发电厂 - 所有这些发电厂都使用燃气轮机和内燃机来发电。在这些类型的机组中，不是加热蒸汽来驱动涡轮机，而是利用燃烧天然气产生的热气来驱动涡轮机并发电。燃气轮机和内燃机工厂传统上主要用于高峰负荷需求，因为可以快速和容易地打开它们。由于技术的进步和有天然气的地方，这些工厂已经越来越受欢迎。然而，它们在传统上仍然比大型蒸汽驱动的发电厂效率略低。

在气焊和气割作业中使用NG

NG气体由于其高CV值而被用于气焊和气割操作，这取决于它的可用性。对于钢的氧燃料气割，NG被用于手动气割炬和自动机器安装的气割装置中。它也被用于小方坯、大方坯和板坯连铸机的气割设备中。