



# 1 绪 论

## 1.1 我国钢铁企业煤气资源及回收利用

钢铁企业煤气资源是在生产钢铁产品时副产的气体燃料，占整个钢铁企业总能耗的 30% 左右，是钢铁企业中重要的二次能源。煤气系统是钢铁企业能源系统的主要组成部分，是一个不仅涉及煤气产生、储存、放散、使用和缓冲等诸多环节，而且还关系到多种工序产品产量和质量提高、原材料成本的降低、环境污染的改善等一系列问题的复杂庞大系统，如图 1.1 所示。通常，煤气柜能够削减由于煤气供需不平衡引起的瞬时波动，自备电厂锅炉作为主要缓冲用户调节吸收本厂的富余煤气，以提高钢铁企业供电的可靠性，降低用电成本，对节能、环保、提高全厂经济效益起到了良好的作用，所以自备电厂往往是钢铁企业的重要组成部分，也是钢铁企业重要的利润增长点<sup>[1]</sup>。

### 1.1.1 煤气资源

钢铁企业副产煤气是在钢铁冶炼过程中产生的具有物理能量和化学能量的气体能源副产品，钢铁企业生产过程如图 1.2 所示。从图中可以看出，在整个生产过程中共产生焦炉煤气（COG）、高炉煤气（BFG）和转炉煤气（LDG）。三种煤气的组成如表 1.1 所示。

（1）焦炉煤气是由洗精煤在焦炉绝氧的状态下炭化或干馏产生的，是焦化过程中的副产品。其主要成分是  $H_2$  和  $CH_4$ ，发热值一般为  $17 \sim 19 \text{ MJ/Nm}^3$ ，在三种煤气中热值最高，吨焦平均产气  $400 \sim 450 \text{ m}^3$ 。其特点是生产相对稳定，各种参数波动小，毒性较小。因此，焦炉煤气回收利用最早，技术发展较完善，主要用户为转炉和其他工业炉窑，如轧钢加热炉、焦炉等，还可以作为民用煤气<sup>[2]</sup>。

（2）高炉煤气是由铁矿石和焦炭在高炉中发生还原反应而产生的，属于高炉炼铁的副产品。其主要成分是  $CO$ 、 $N_2$ ，毒性大，热值低，一般为

3.5 MJ/Nm<sup>3</sup> 左右，吨铁平均产气 1 400 ~ 1 800 m<sup>3</sup>。其特点是产出波动大，燃烧温度较低且气源压力不稳定，在企业中有不同程度的放散。随着炼铁技术的不断提高，高炉燃料比逐步降低，随之热值也降低，这是限制高炉煤气使用的最主要原因<sup>[3]</sup>，主要用户是高炉热风炉、焦炉、蒸汽锅炉，其和焦炉煤气混合后可用于轧钢加热炉。

(3) 转炉煤气是在纯氧顶吹转炉炼钢过程中 1 600 °C 以上高温排出的气体，属于转炉炼钢的副产品。其主要成分是 CO，热值一般为 8.4 ~ 9.2 MJ/Nm<sup>3</sup>，处于焦炉煤气和高炉煤气热值之间，吨钢回收 60 ~ 80 m<sup>3</sup> 的转炉煤气。其特点是毒性大，气源具有间断性、周期性，回收技术要求较高，导致转炉煤气的回收和利用效果相对较差。转炉煤气由于成分和发热值波动较大，主要用户为石灰窑和电厂锅炉<sup>[4]</sup>。

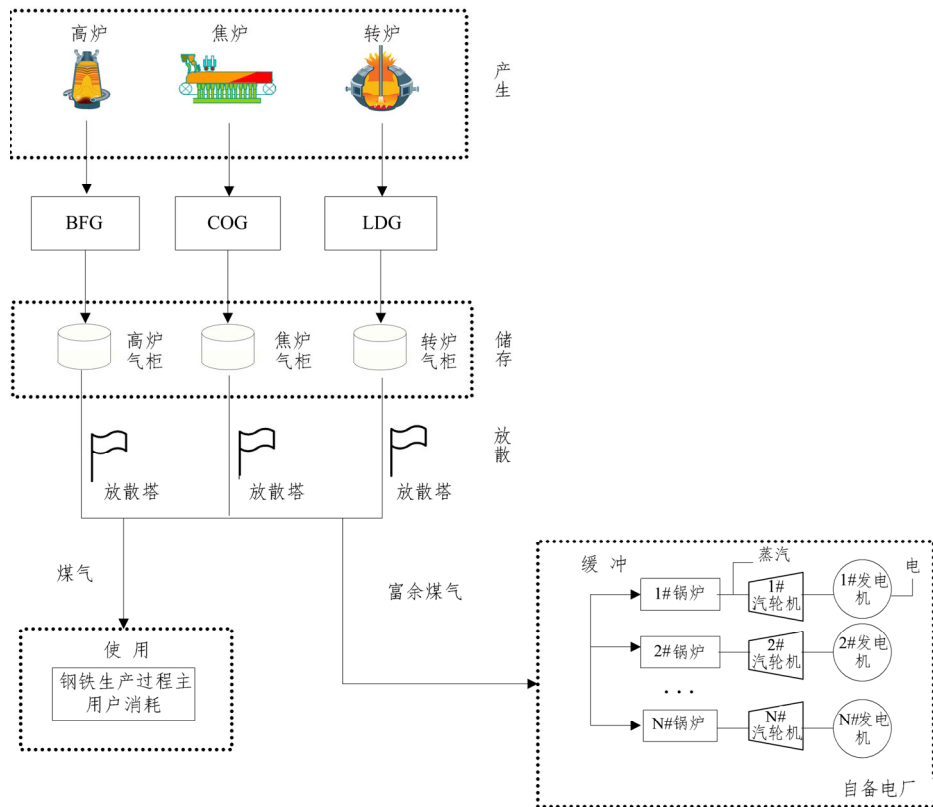


图 1.1 钢铁企业煤气系统示意图

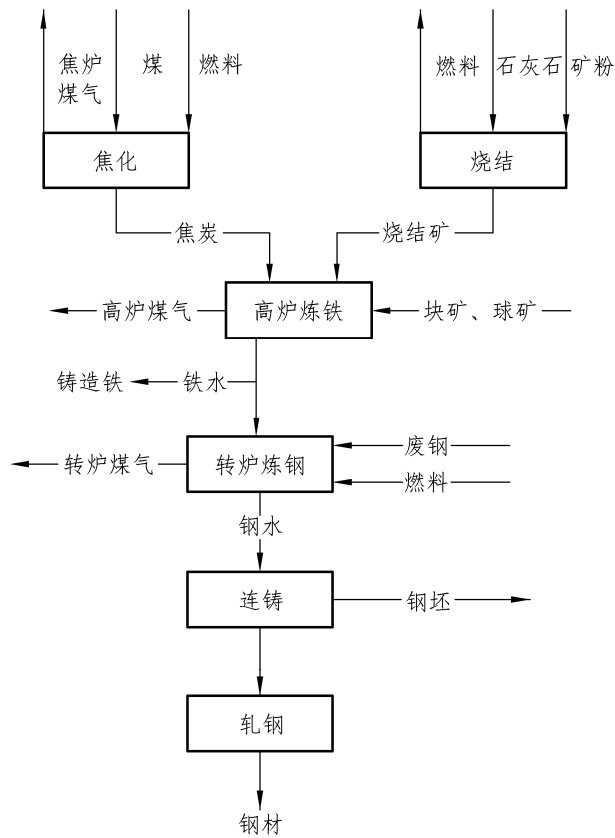


图 1.2 钢铁企业生产过程示意图

表 1.1 三种煤气的组成

煤气组成	焦炉煤气/%	高炉煤气/%	转炉煤气/%
H <sub>2</sub>	55 ~ 60	1.5 ~ 3.0	5 ~ 6
CO	5 ~ 8	25 ~ 30	80 ~ 86
CH <sub>4</sub>	23 ~ 27	0.2 ~ 0.5	0.7 ~ 1.6
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	2-4	1	0.3
CO <sub>2</sub>	1.5 ~ 3	9 ~ 12	10
N <sub>2</sub>	3 ~ 7	55 ~ 60	3.5
O <sub>2</sub>	0.3 ~ 0.8	0.2 ~ 0.4	0.5

此外，钢铁企业为了提高煤气的使用效率，通常将三种热值不同的煤



基本不回收，钢铁企业所用燃料除了煤气以外以购重油为主。

第二阶段：1978—2000年。这一阶段，煤气资源的回收与利用工作逐渐完善起来。从1978年开始，我国开始重视节能工作，采用各种节能新技术，开展一系列相关系统的节能工作。焦炉煤气除了供给企业内部用户使用，还用于附近的生活区作为民用煤气和工业燃料。因此，在低热值煤气燃烧技术未开发之前，高炉煤气由于其自身特点，钢铁企业中均有不同程度的放散，其利用一直处于“食之无味，弃之可惜”的尴尬境地。进入20世纪80年代后，针对高炉煤气热值逐渐降低的问题，各企业按照生产工艺和热工设备对煤气热值的不同要求，开始使用高、焦或高、焦、转混合煤气，大大减少了高炉煤气的放散，使煤气的产、消平衡得到了调节。直到20世纪90年代，高温蓄热燃烧技术、高炉煤气发电技术的兴起，才使高炉煤气得到了普遍应用，大大减少了高炉煤气的放散，同时也将高热值的焦炉煤气置换出来，使焦炉煤气逐步开始富余，并用于钢铁企业附近的生活区民用煤气和工业燃料。随着炼钢平炉的淘汰，转炉逐渐成为炼钢的主要设备，转炉煤气的回收利用也逐步受到重视。我国回收转炉煤气虽有多年的历史，但回收量一直较低，与技术先进国家相比，差距甚大。1996年，我国钢铁企业平均转炉煤气的回收量只有 $47 \text{ m}^3/\text{t}^{[7]}$ ，而日本1995年吨钢转炉煤气回收量已经达到 $108 \text{ m}^3/\text{t}^{[8]}$ 。

第三阶段：2000年至今。2000年以来，钢产量的增加、现有技术的成熟和新技术的应用使钢铁企业煤气富余量逐渐增多，许多钢铁企业存在着大量的煤气放散问题，不仅严重污染了周边的环境，同时也造成了能源的巨大浪费。在日本、德国等发达国家，钢铁企业所产生的煤气基本上被全部回收并再利用，而我国钢铁工业吨钢能耗和各重点工序的工序能耗均高于这些国家<sup>[9]</sup>。近年来，统计我国不同规模钢铁联合企业高炉-转炉流程煤气回收、利用及放散情况分别如表1.2、1.3所示<sup>[10]</sup>（煤气消耗计算到热轧工序）。

表 1.2 我国不同规模钢铁企业煤气回收与利用情况

规模 (万吨/年)	代表性 产品	煤气产率 /(GJ/t 钢)	煤气燃耗 /(GJ/t 钢)	煤气 富余量/ (GJ/t 钢)	富余率/%
900 ~ 1 000	以板、卷材为主， 兼有棒线型材	9.08	5.22	3.86	42.5
600 ~ 800	棒线、型、管材 及板卷材	8.85	5.56	3.29	37.2



总是过剩的。因此，钢铁企业煤气系统的回收量总是大于主生产工序的煤气需求量，从而造成煤气富余。同时，在钢铁企业生产过程中存在的非计划性停产、检修、事件等工况，以及季节性变化等非可控因素的出现也会引起煤气富余<sup>[11]</sup>。

从企业自身内部来看，近几年我国钢产量逐年增加，从而使生产过程中使用的焦炭、生铁等产品增加，因此，焦化过程以及炼铁过程中能量流也不断变大，致使焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气的产量越来越多，即钢铁企业煤气产生量大幅增加。同时，钢铁企业为了提高自身的竞争力，越来越重视装备的提升改造以及生产工艺的优化改进，与传统的钢铁联合企业不同，生产设备逐步向大型化迈进，连铸技术等关键共性技术也已经普及应用，冗余生产工序大大减少，提高了能源利用率<sup>[12-13]</sup>。尽管企业产品深加工比例的提高、热处理工序的增加，使煤气消耗量增加，但是企业采用各种先进燃烧节能技术来提高燃烧的热效率，降低系统本身消耗的煤气量，总体来讲，煤气的总消耗量是下降的，富余量又将增加。

从外部环境看，随着人们环保意识的不断加强、环境保护法律法规的不断健全，迫使钢铁企业必须采取相应的措施以减少企业煤气的放散。并且作为耗能大户，钢铁企业在节能减排方面的压力也越来越大，因此，钢铁企业采取了各种措施对三种煤气进行回收利用。

综上所述，近年来我国钢铁企业富余煤气在内外两种环境的影响下呈明显上升趋势。

### 1.2.2 富余煤气的利用现状

近年来，我国钢铁企业煤气富余量大，如果不合理利用，煤气就会放散，造成资源严重浪费，对企业而言也是严重的损失。如何利用这些富余的煤气资源，并通过有效的措施使其发挥最大的作用，降低企业能耗并创造最大的经济效益、环境效益和社会效益，成为我们亟待解决的问题。目前，对于富余煤气的利用，主要有以下几个途径：发电；焦炉煤气直接还原铁；作为城市燃气；作为工业燃料；焦炉煤气变压吸附制氢；煤气合成甲醇以及生产其他化学产品等。其中，煤气用于发电是煤气回收利用最常用的方法。我国大、中型钢铁企业一般都建有自备电厂，作为钢铁企业煤气系统的主要缓冲用户调节吸收富余煤气，为企业提供蒸汽和电力，降低了用电成本，在节能、环保、提高经济效益上都起到了良

好的作用。目前，钢铁联合企业煤气发电的主要方式有：纯烧煤气锅炉-蒸汽轮机发电方式、掺烧煤气燃煤锅炉-蒸汽轮机发电方式和燃气轮机-蒸汽联合循环发电方式（CCPP）<sup>[14]</sup>。有的企业单独采用其中的一种，有的由多种组成，不同的发电方式缓冲的煤气量不同，产生的效益也不同。

### 1. 纯烧煤气锅炉-蒸汽轮机发电方式

这种发电技术是将钢铁企业中产生的大量低发热值煤气全部用于发电的一项技术，此技术已在鞍钢、马钢、武钢、沙钢、梅钢、安钢等企业广泛使用。

其特点为：燃料均为煤气，投资维修成本低，操作与维护简单。生产过程中当煤气消耗量减小时，锅炉的出力会低于额定的蒸发量，从而使锅炉内传热发生变化，只有当锅炉负荷在额定蒸发量的 85%~100%，燃气锅炉热效率最佳；锅炉在低于 80% 的负荷下或短时超出 100% 的负荷下运行，锅炉效率都会急剧下降。在实际生产过程中，面对燃气锅炉作为煤气缓冲用户的缓冲能力有限、煤气富余量波动又非常大的现实情况，必然要求有相当负荷的燃气锅炉做缓冲用户。而对于锅炉操作而言，负荷频繁变化对燃气锅炉发电的效率影响极大，机组发电能力极低，所以这种利用方式必然是低效的，其热效率只有 25%~30%。其次，由于燃气锅炉容量有限，国内最大的燃气锅炉仅为 220 t/h，负荷调节有限，所以煤气消耗量调节范围不大，当煤气波动较大时，必然导致煤气的大量放散<sup>[15-17]</sup>。

### 2. 掺烧煤气燃煤锅炉-蒸汽轮机发电方式

这种发电方式燃料以煤为主、煤气为辅，运行可靠，不受供热内部资源的影响，方式灵活，可适应能源的相互替代。其发电机组装机容量都比较大，煤气消耗量的调节范围为 0%~30%（有的设计值达 65%，如宝钢的 1#、2# 锅炉，但实际运行中基本在 30% 以下），发电效率为 35%~40%，是钢铁企业可靠的煤气缓冲用户，且掺烧煤气后对发电效率影响不大。以宝钢 3# 发电机组为例，当掺烧高炉煤气比例为 0%、20% 和 40% 时，发电效率为 39.3%、38.5%、37.4%。但是发电煤耗相对较高，成本较高<sup>[18-20]</sup>。

### 3. 燃气轮机-蒸汽联合循环发电方式

燃气轮机-蒸汽联合循环发电（Combined Cycle Power Plant，CCPP）技术在西方已有 50 多年的历史，目前已成为一种成熟的动力系统并被全世界所接受。