

工业窑炉节能技术

一、概述

在工业生产中，利用燃料燃烧产生的热量，或将电能转化为热能，从而实现对工件或物料进行熔炼、加热、烘干、烧结、裂解和蒸馏等各种加工工艺所用的热工设备，称为工业炉窑。工业窑炉主要由炉衬、炉架、供热装置（如燃烧装置、电加热元件）、预热器、炉前管道、排烟系统、炉用机械等部分组成。

目前，工业炉窑广泛应用于国民经济各行各业，如冶金、建材、化工、轻工、食品和陶瓷等行业。其品种多、耗能高、影响大，是工业加热的关键设备。其加热技术的发展与高效节能技术的采用，对于提高产品质量、降低生产成本、合理利用能源、改善劳动条件、实现文明生产等都有很大影响。

工业窑炉的类型繁多，在不同的行业需要满足不同的应用背景和生产工艺要求。工业窑炉一般应满足如下要求：

- (1) 炉温、气氛易于控制，保证热加工产品质量达到工艺要求；
- (2) 炉子生产率高；
- (3) 热效率高，单位产品能耗低；
- (4) 使用寿命长，砌筑和维护方便，筑炉材料消耗少；
- (5) 机械化、自动化程度高；
- (6) 基建投资少，占地面积小、便于布置；
- (7) 对环境污染少，劳动条件好。

在实际应用中，应根据不同的工业窑炉和具体生产工艺要求，从设计、施工、运行操作和维护管理等各方面综合考虑，力求尽可能达到上述的基本要求。

目前，我国工业窑炉年耗煤达 3 亿多吨，约占我国工业用煤的 40%。水泥、墙体材料窑炉每年消耗煤炭约 2.24 亿 t，其中水泥窑约 7 800 座，年耗煤 1.6 亿 t，平均能效比国外先进水平低 20% 以上；墙体材料窑炉约 10 万座，年耗煤 6 400 万 t，平均能效比国外先进水平低 30% 以上。钢铁工业窑炉每年消耗煤炭约 6 600 万 t，其中球团工序回转窑生产线 20 多条，平均能效比国外先进水平低 50% 以上；石灰热工窑炉约 350 座，平均能效比国外先进水平低 10%；耐火材料热工窑炉约 1 900 余座，平均能效比国外先进水平低 10%~20%。

我国工业窑炉存在的主要问题是：技术水平低，装备陈旧落后、规模小；能耗高，大部分缺乏除尘脱硫污染控制设施，污染严重；运行管理水平低，管理粗放。

我国工业窑炉的节能潜力巨大，例如：钢铁厂余热资源据估计相当于 1 000 多万吨标准煤，其中 65% 是可以回收的，而目前只回收了总量的 10%，仍有约 500 多万吨标准煤的能量可以回收利用。因此，如果全国的工业窑炉能够平均节能 10%，则年节约的能源相当于 1 亿 tce。

随着全球经济、资源和环境一体化趋势的发展，我国的工业炉窑技术及装置水平面临极

大挑战，节能减排更是势在必行。因此，工业炉窑的发展必须走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少的可持续发展道路。其主要趋势可概括如下：

(1) 燃料方面

- ①合理组织工业窑炉气体燃料；
- ②合理使用西气东输工程给东部、中部地区送来的可观天然气；
- ③大力开发水电资源，有效地优化我国能源结构；
- ④大力实施洁净煤技术，其中煤气化是洁净煤燃烧的核心技术。

(2) 技术方面

- ①选择合适炉型结构，提高机械化程度；
- ②不断改善燃料燃烧状况；
- ③采用新型炉用材料，优化炉衬结构；
- ④应用高效余热回收技术及装置。

(3) 能源方面

应把握开源节流两手抓。根据我国能源形势，工业窑炉节能势在必行。

(4) 环保方面

- ①调整燃料结构，尽可能选用天然气、油或煤转成气作燃料，或选用各种煤的清洁燃烧技术；
- ②采用先进燃烧技术，降低 NO_x 的生成；
- ③节约能源、减少能耗，减少工业窑炉燃料消耗量。

二、工业窑炉的分类与简介

常见工业窑炉及其用途见表 1.2-1。工业窑炉的类型繁多，用途各异。工业窑炉的分类方法很多，实际应用中一般是按其某些主要特征来进行分类的。如按工艺特点分为加热炉和熔炼炉；按所使用能源种类分为燃料炉和电加热炉；按工作温度高低分为高温炉、中温炉、低温炉；按热工操作制度分为连续式工作窑炉和间歇式工作窑炉；按炉型特点分为室燃炉、步进炉、竖炉等；按工作制度分为辐射式工作制度窑炉、对流式工作制度窑炉和层式工作制度窑炉。

表 1.2-1 常见工业窑炉及其用途

炉型		炉种	用途	热源
加热炉	金属加热炉	推钢式连续加热炉	金属轧制	煤气、油
		步进式炉	金属轧制	煤气、油
		环形加热炉	金属轧制	煤气、油
加热炉	焙烧加热炉	罩式炉、辊底式炉	轧材热处理	煤气、油、电
		井式炉、室式炉	热处理	电、煤气、油
		车台式加热炉	热处理、大型锻件	煤气、油
加热炉	干燥加热炉	均热炉	金属轧制	煤气、油
		倒粉炉、轮窑	烧砖、瓦、陶瓷	煤
		隧道窑	砖、瓦、陶瓷	油、煤、煤气
加热炉	干燥加热炉	立窑、回转窑	水泥	煤、油
		蚀头窑、龙窑	陶瓷、砖、瓦	木柴、炭、煤
		室式、立式、链带式干燥炉	铸型、泥芯、油漆	煤、热风
加热炉	干燥加热炉	滚筒式、沸腾式干燥炉	沙子等散料	煤气、煤
		悬链式干燥式	油漆	煤气、煤
		高炉	炼铁	焦炭
熔炼炉	提取金属	冲天炉	加热铁水	焦炭、煤粉
精炼金属	精炼金属	平炉	炼钢	煤气、油
		转炉	炼钢	化学热反应
		电弧炉	钢、有色金属	电
		感应电炉	钢、有色金属	电
		反射炉	有色金属	煤气、油
		炼铜炉	有色金属	电、油、煤气
		坩埚炉	有色金属	焦炭
		电阻炉	钢、有色金属	电
下续工序需要	下续工序需要	坩埚炉	玻璃	煤、油
		池窑	玻璃	油、煤
		链式炉	玻璃	煤气、油、煤

下面对工业窑炉的分类和用途简单介绍如下。

(一) 按工艺特点分

工业窑炉按工艺特点可分为加热炉和熔炼炉两类。加热炉主要是用于完成物料的加热，提高物料的温度，改变物料的物理机械性能，而物料物态并没有改变。主要包括加热炉、步进炉、室状炉、罩式炉、辊底炉、干燥炉，石灰石、白云石的焙烧炉等。熔炼炉主要用于碳

金属、合金、特种金属的熔炼和提温。

（二）按使用能源种类分

工业窑炉按所使用能源种类可分为燃料炉和电炉两种。燃料炉（又称火焰炉）是指借燃料燃烧释放的热量，对物料进行热加工的设备，一般分为燃煤窑炉、燃油窑炉和燃气窑炉等，在各种工业窑炉中燃料炉应用较为普遍。电炉是将电能转化为热能，从而用来加热物料的设备，一般分为电弧炉、电阻炉、感应炉、电子束炉和等离子炉等。

（三）按工作温度分

工业窑炉按工作温度可分为高温炉、中温炉和低温炉三种。高温炉的工作温度在 1 000℃ 以上，炉内物料与周围介质热交换以辐射传热为主。钢铁冶金企业中的各种熔炼炉和加热炉大多属于此类。中温炉的工作温度在 650~1 000℃ 间，炉内物料与周围介质的热交换，辐射和对流各占一定比例。金属热处理过程的诸多炉子多属于中温炉。低温炉的工作温度低于 650℃，炉内物料和周围介质热交换以对流换热为主。低温炉多用于干燥、有色金属及其合金的加热，钢铁及有色金属的回火处理等。

（四）按热工操作分

工业窑炉按热工操作可分为连续式炉和间歇式炉两种。连续式炉的热工特点是炉子连续生产，一般炉内沿炉长方向炉温连续变化，正常生产条件下，炉子各点温度不随时间变化。料坯在炉内运动，从装料门进入炉内，通过炉子不同温度区域完成加热过程，最后从出料门出炉。如推钢式连续加热炉、步进炉、环形炉、链式炉等。也有沿炉长方向炉温基本不变的，为直通式炉。间歇式炉（又称周期炉）的工艺特点是炉膛内不划分温度区段，炉子间歇生产；炉子成批装料进行加热或熔炼，在炉内完成加热或熔炼工艺后，成批出料。炉料在炉内不运动，炉温随时间变化，如均热炉、台车炉、罩式炉、井式炉等。

（五）按工作制度分

工业炉窑按工作制度可分为辐射式工作制度炉窑、对流式工作制度炉窑和层式工作制度炉窑三种。辐射式工作制度炉窑中辐射传热起主要作用，钢铁企业绝大部分高温火焰炉都属于辐射式工作制度炉窑，该炉窑的火焰黑度和炉墙在热交换中起重要作用。对流式工作制度炉窑中对流传热起主要作用。650℃ 以下的低温炉，炉内传热方式以对流为主。此类炉子特点为燃烧室：和炉膛分开，因此，组织好炉内气体再循环，是提高此类炉窑效率的重要途径。层式工作制度炉窑加热块状散料时，炉料充满整个炉膛空间，热气体在物料间通过，散料加热表面大小是变化的，气体辐射层很薄，在温度变化较大范围内很难严格区分辐射和对流传热各占多少。实际工作中，把这种热气体通过散料的炉子工作制度叫做层式工作制度，相应炉窑称层式工作制度炉窑，其中包括竖炉和流化态炉，后者又可分为沸腾料层炉和悬浮料层炉两种；炼铁高炉属层式工作制度中的竖炉。

（六）按：炉型特点分

这一分类方法包括室式炉、双室式炉、贯通炉、推杆炉、台车式炉、转底炉、环形炉、

步进炉、链式炉、振底式炉、马弗炉、坩埚炉、井式炉、辊筒式炉、平炉、电弧炉、冲天炉和热风炉等。

由以上分类可看出，各种窑炉都是按其某方面特点进行分类的，对某一特定窑炉来说，不只具有一个特点。因此，对同一窑炉由于分类着眼点不同，它可隶属于几种类型，如连续加热炉可既属加热炉，又属火焰炉、高温炉、连续式炉等。

通常根据哪种分类法来称呼一个炉窑也不完全相同，实际工作中，一般采用习惯叫法。根据炉子结构特点称呼一个炉子较多，如高炉、环形炉、辊底炉、车底炉、链式炉，也有根据炉子用途来称呼，如退火炉、渗碳炉、干燥炉等。

三、工业窑炉的节能技术途径

工业窑炉的类型繁多、用途多样。因此，工业窑炉的节能技术改造途径很多。在实际应用中，对于不同类型的窑炉需要根据具体情况采取合理的节能技术改造方案。

（一）工业窑炉的节能改造

目前，对现有工业窑炉进行节能改造是工业窑炉节能最主要和最有效的措施之一。其节能改造的内容很多，主要有热源改造、燃烧系统改造、窑炉结构改造、窑炉保温改造、控制系统节能改造以及烟气余热回收利用改造等。

1. 热源改造

通过改造工业窑炉的热源可以有效减少其能源消耗，其改造内容可因窑炉种类的不同而异。例如，将窑炉的燃料由燃油改为燃用工艺过程回收的燃气，有的将燃油、燃气改造为电加热等。

2. 燃烧系统改造

对于燃油和燃气窑炉，燃烧系统改造主要是采用新型燃烧器取代老式燃烧器。例如，采用平焰、双火焰、高速、可调焰等新型烧嘴，可节能5%~10%；有条件时可利用回收烟气的余热来预热助燃空气，采用机械化加煤或煤粉燃烧对燃煤窑炉进行改造等。

3. 窑炉结构改造

工业窑炉的种类繁多，其结构也因行业、工艺的不同而异。随着科技的进步和能源环保政策的实施与市场要求，工业窑炉的结构也在不断改进与更新。通过工业窑炉的结构改造，可以有效改善燃烧状况、缩小散热面积、增大窑炉的有效容积，从而达到减少能源消耗和提高产品质量和产能的目的。

4. 窑炉保温改造

工业窑炉的保温状况与其能源消耗直接相关，特别是对于运行温度在数百甚至上千摄氏度以上的窑炉尤为重要。因此，采用新型保温材料或改善窑炉的保温状况是一项非常重要的节能措施，达到既减少燃料消耗，又改善操作环境的目的。例如，可将炉膛改造为由耐火砖或轻质耐火砖加耐火纤维和保温材料构成的复合结构；采用复合浇注料吊挂炉顶，减少炉顶散热等。以玻璃熔窑为例，由于玻璃熔窑的散热面积大、外表面温度高，其散热量约为总热

量的 20%~30%，尤其在用重油作燃料和使用电熔耐火材料后，散热损失更大。采用窑体保温后，燃料可节省 15%~20%，火焰温度可提高 20~30℃。

5.窑炉烟气余热利用改造

窑炉烟气余热的回收利用改造的途径很多，如采用合适的烟道换热器和余热锅炉等回收烟气的余热，根据烟气余热的不同温度水平，可利用烟气预热助燃空气或利用余热发电等，既可有效降低排烟温度，也可收到良好的节能效果。

6.窑炉密封改造

窑炉密封改造的目的是提高其密封性以减少冷空气的渗入和热空气的泄漏所造成的热损失。例如可以尽可能减少开孔与炉门数量，采用浇注料炉衬结构外加炉墙钢板等。

7.控制系统改造

控制系统改造主要是将采用手动控制或半自动控制系统改造成自动控制系统或对已有自动控制系统进行升级改造和优化，按产品工艺要求，对窑炉的运行过程进行自动控制，使窑炉在良好的工况下运行，可以取得良好的节能效果。

(二) 工业窑炉的主要节能技术

工业窑炉类型繁多、应用领域很广。因此，其节能技术涉及众多的技术领域。在实际应用中，只有根据各种炉型的特点和具体工艺要求，采用合理的节能技术方案，才能取得预期的节能效果。为了提高我国的能效水平，我国在“十一五”期间已将工业窑炉节能新技术开发列为节能工作的重点工程。其内容可概括如下：

(1) 工业窑炉的高温空气燃烧技术 (High Temperature Air Combustion, 简称 HTAC)；

(2) 纯氧或富氧燃烧节能技术；

(3) 高固气比悬浮预热预分解水泥生产技术；

(4) 包括大型高炉炉顶煤气压差发电综合节能技术，焦炉煤气和转炉煤气干法回收利用技术，化工与炼油工业可燃废气回收利用技术等余热（废气）资源综合利用技术。

该重点节能工程的预期目标是解决蓄热式高温空气燃烧和脉冲燃烧关键技术，熔炼炉和

烧成窑的余热高效利用技术，窑炉长寿化工工艺技术等一批工业窑炉关键节能技术，使工业窑炉热效率提高 10% 以上。下面对工业窑炉领域的几个通用节能技术进行简单介绍。

1.提高燃烧效率

提高工业窑炉的燃烧效率，有效地利用燃料自身的能量是工业窑炉节能的主要方向之一。提高窑炉燃烧效率的措施主要包括：采用低空气系数的燃烧方式、富氧燃烧和提高助燃空气的温度等。

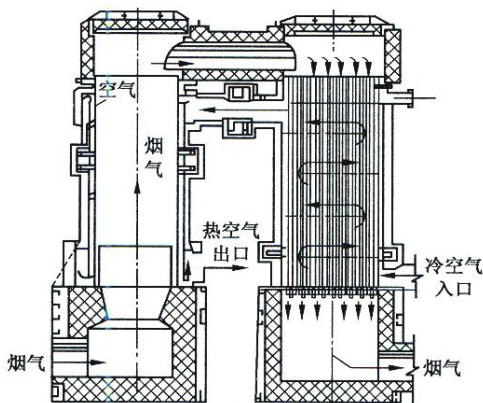


图 1.2-1 环境式换热器和光管列管式对流换热器的组合

在工业窑炉中，有将近 50%~70%的热量是以高温烟气的形式直接排入大气。利用这部分热量来加热助燃空气是提高窑炉热效率最简单又最有效的途径。例如废气温度为 900℃ 时，废气带走的热损失约为 50%。如果用此废气把空气预热到 200℃，则可节约 15%的燃料，使 22%的废气显热得到回收。因此，尽可能提高助燃空气的温度是工业窑炉节能的主要措施之一。图 1.2-1 给出的是工业窑炉中采用环缝式换热器和光管列管式对流换热器的组合方式，从而充分利用两种不同类型换热器在不同温度段的各自特点和优势，实现了窑炉烟气余热的高效利用。

2.减少炉体的散热损失

工业窑炉炉体的散热损失是排烟损失之外的另一项主要的热损失，例如，间歇运行的锻造炉的散热损失可高达 45%。因此加强工业窑炉的保温隔热是一项非常有效的节能方法。

为了减少炉体的散热损失，可以采用轻质隔热和耐火纤维等保温隔热性能良好的保温材料。另外，减少窑炉的表面积也是减少加热炉散热损失的有效途径之一。

3.减少水冷件热损失

为减少水冷件的热损失，除了通过少用或不用水冷件减少热损失外。对必须设置的炉内水冷件进行隔热，或采用汽化冷却来回收水冷件的热损失，这样既可得到可以利用的蒸汽，也可节约水源。

4.采用高辐射陶瓷涂料

在窑炉内的高温条件下，辐射是其传热的主要方式。因此，采取有效措施强化窑炉的辐射换热是提高窑炉热效率的重要途径之一。高温辐射陶瓷涂料可在不改变窑炉结构的条件下，使炉壁的辐射率由 0.3~0.5 提高到 0.9~0.95。因此，在工业窑炉内及加热管外表面涂刷高辐射陶瓷涂料，可强化窑炉内的辐射换热，是一种投资少、见效快、施工简便的工业窑炉节能新技术。

5.采用先进的炉型和工艺

随着科技的不断进步和节能减排工作的需要，工业窑炉行业发展了许多先进的炉型和先进的工艺。其中最具有代表性的是干法熄焦工艺、明焰裸烧方法以及低温快烧技术等。

四、工业窑炉节能技术应用实例

(一) 富氧燃烧技术

2.富氧燃烧及其原理

富氧燃烧技术是以氧含量高于 21%的富氧空气或纯氧代替空气作为助燃气体的一种高效强化燃烧技术。富氧燃烧降低了烟气生产量，燃烧产物中的 NO_x 含量降低，水蒸气和二氧化碳的含量和分压增大，火焰黑度增加，燃烧速度加快，火焰温度提高。提高了火焰向配料或玻璃液的辐射传热和对流传热，结果使熔化率提高。富氧燃烧在提高火焰传热效率同时，也对其燃烧设备（小炉）提出了与普通燃烧设备不同的要求。

2.富氧燃烧熔窑熔制技术的优越性

(1) 采用富氧燃烧可提高熔化质量，特别是在熔窑化料区有明显效果。在玻璃熔窑生产中，油的燃烧状态最好分为三个区域：火焰上部为缺氧区.这样可以防止大碓过热；中部为普通燃烧区；下部尽量形成高温区，以加强对玻璃配合料的熔化。在油烧嘴下方的适当位置安装富氧喷（枪）嘴，加快了燃烧速度，增加了火焰刚性且火焰贴近料层，提高了火焰的热效率，火焰辐射玻璃液温度可提高 100~200℃左右，配合料熔融速度加快，提高熔化率 10%以上。

(2) 减轻对熔窑的烧损

富氧燃烧加速了燃烧，燃烧过程在窑内基本完成，进入蓄热室的可燃气体减少，减轻对格子砖的烧损。采用喷枪下部安装富氧喷嘴可使火焰分为两个区域，在火焰下部由于富氧的喷入克服了缺氧现象，使火焰下部温度提高，而火焰上部的温度有所降低，使熔窑碓顶温度下降约 20~30℃，减轻对大碓的烧损。延长了熔窑使用寿命，特别是为大碓保温创造有利条件。

(3) 节能降耗

燃料燃烧时需要氧气，它通常是由空气中的氧来提供，在助燃空气中氧仅占 21%参加燃烧，而其余 79% 的大部分氮气不参加燃烧，带走了大量热量，降低了燃料的有效利用率，相应增加一燃料消耗。用 27% 的富氧空气进行燃烧时，废气所带走热量减少约 20%，相应

减少了热损失。再则，富氧燃烧使重油燃烧比较完全，减少了重油消耗。用含氧量大于 21% 的富氧空气，参与燃烧将具有明显的节能效果。炉温越高，利用富氧助燃技术的节能效果越明显，例如炉温在 1 600℃ 时，用含氧量 23% 的富氧空气助燃，可节能 25%。浮法玻璃厂都有副产品纯氧，可制作富氧空气，这为富氧燃烧技术的应用创造了有利条件。

(二) 蓄热式高温燃烧技术

1. 原理介绍

蓄热式高温燃烧 (HTAC) 技术是一种全新的燃烧技术，它将回收烟气余热与高效燃烧、降低 NO_x 排放等技术有机地结合起来，实现了余热回收和降低 NO_x 排放量的双重目的。

图 1.2-2 是 HTAC 技术的节能原理示意图。一个高温 (预热) 空气燃烧单元至少由二个烧嘴、二套蓄热体、一台气体切换阀和相关控制系统组成。其中烧嘴及蓄热体成对出现，当烧嘴 A 工作时，烧嘴 B 及同侧蓄热体充当排烟通道，烧嘴 R 同

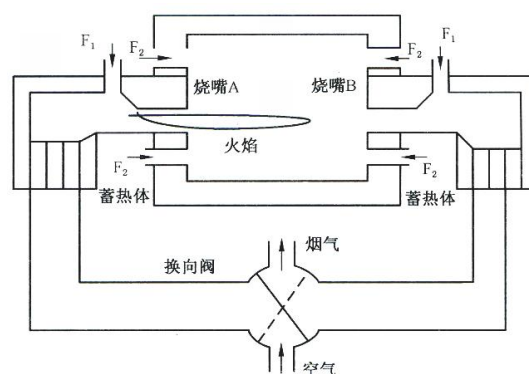


图 1.2-2 HTAC 技术的节能原理示意图

侧蓄热体被烟气预热；一定时间后控制切换系统，使二个烧嘴交替工作，烧嘴 A、B 两侧蓄热体轮流地被排出的高温烟气预热，助燃空气被预热到较高温度 (仅比高温烟气低 50~100

($^{\circ}\text{C}$)。最终经四通换向阀排出的废烟气的温度为 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，大大地提高了烟气物理显热的回收利用率，降低了有害燃烧物的排放量，减少大气污染。

HTAC 技术是通过分离空气与燃料的供应通道，使两股射流之间被烟气所阻隔并被掺混稀释，从而延缓了二者扩散混合的速度，把局部扩散燃烧扩展到更广大的空间范围中进行，削弱了局部燃烧的热强度，避免出现局部高温区，从而抑制了因高温燃烧和存在局部炽热点而导致的 NO_x 生成。为了进一步稀释燃烧初期混合气体中氧的浓度，燃料分两次进入炉内，其中 F_1 远少于 F_2 ，所以 F_1 属高氧燃烧，在高氧下快速完成，形成高速烟气射流和卷吸回流流动，此时大量燃料通过下射入，使混合气体含氧量降低至 15% （有时 $<5\%$ 以下）。大量燃料在高温低氧条件下燃烧，大大降低了 NO_x 的生成，从而达到低 NO_x 排放的目的。

2. 适用范围

HTAC 技术主要应用于冶金机械行业的各种推钢式加热炉、步进式加热炉、热处理炉、锻造炉、熔化炉、钢包烘烤器、均热炉、辐射管燃烧器、罩式炉、高炉、热风炉等，建材行业的各种陶瓷窑炉、玻璃窑炉等，石化行业的各种管式加热炉、裂解炉等。

3. 节能效果分析

以蜂窝陶瓷为蓄热体的 HTAC 技术优点为：①采用蓄热式烟气余热回收装置，通过交替切换烟气和空气/燃气，使之流经蓄热体，最大限度地回收高温烟气中的物理显热，大幅度节约能源（一般节能 $10\%\sim 70\%$ ），提高热工设备的热效率，同时减少 CO 排放量（减少 $10\%\sim 70\%$ ）。②通过组织贫氧燃烧，扩展火焰燃烧区域，火焰边界几乎扩展到炉膛边界，使炉内温度分布更均匀，同时烟气中 NO_x 的量可减少 40% 以上。③炉内平均温度升高，加强了炉内的传热，导致相同规格的热工设备，其产量可提高 20% 以上，降低了设备的造价。④低热值燃料借助高温预热的助燃空气或高温预热的燃气可获得较高的炉温，扩展了低热值燃料的应用范围。

4. 发展方向

HTAC 技术能最大限度地回收炉窑烟气中的物理显热，降低能耗，使工业炉节能技术发展到一个新的阶段。该技术在冶金、机械、建材等行业工业窑炉上具有相当广阔的应用前景。

（三）水泥窑余热发电技术

余热发电技术被认为是一项很有价值和前景的节能技术，具有节能降耗和有利于保护环境的双重效果。水泥窑余热发电技术主要有三种型式：

（1）带补燃锅炉的中低温余热发电系统，如鲁南水泥厂 1#和 2#2000 t/d 生产线；

（2）不带补燃锅炉的中低温余热发电系统，如宁国水泥厂 4 000 t/d 生产线；

（3）在中空窑后加流态化分解炉预热器配备的余热发电系统，如呼和浩特水泥厂和抚顺水泥厂等。

图 1.2-3 所示的是带补燃锅炉的水泥窑余热发电系统。该技术利用窑头篦冷机排出的低温废气和窑尾余热器排出的中温废气在余热锅炉中生产低压蒸汽或高温水，再经补燃锅炉加

热升压来提高蒸汽参数，带动汽轮机发电。

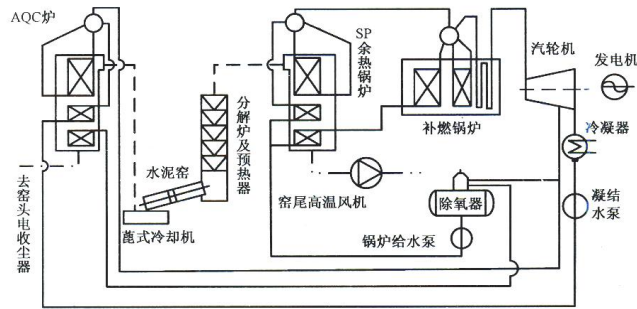


图 1.2-3 带补燃锅炉的中低温

图 1.2-4 所示的是不带补燃锅炉的中低温余热发电系统。该系统主要由 AQC 直流锅炉（无锅筒）、扩容器、SP 炉、汽轮发电机组等组成。利用窑头篦冷机热空气在 AQC 直流锅炉中制备的汽水混合物进入一级扩容器，生产的蒸汽进入汽轮机一级补汽口，一级扩容器排出的余压高温水再进入二级扩容器，产生的较低压力蒸汽再进入汽机的二级补汽口，从窑尾 SP 炉出来的较高压力蒸汽进入汽机主汽口。在这三股蒸汽流的共同作用下，带动汽机发电。既可充分利用余热，又使系统配置简单。由于汽机是补汽式汽轮机，汽轮机自身的自动控制相对复杂些，要求也较高。

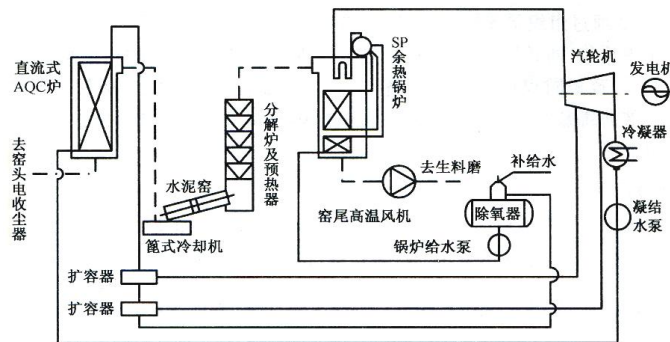


图 1.2-4 不带补燃锅炉的中低温余热发电系统

余热发电技术的投资与效益分析。按装机容量估算，中空窑余热发电系统投资为 4 000 元/kW；不带补燃锅炉的纯中低温余热发电系统投资为 7 000 元/kW，原因是锅炉受热面大、低汽汽轮机价格高等；带补燃锅炉的纯中低温余热发电系统投资为 7 000~8 000 元/kW，发电量也大为增加。在中空窑余热发电系统中投资的比例为：土建费 15%~21%，设备费 40%~45%，安装费 17%~20%。因此，水泥窑余热发电技术具有良好的经济效益和发展前景。

（四）高炉煤气余压发电技术

如图 1.2-5 所示，高炉煤气余压发电技术首先将高炉煤气净化之后经蝶阀、插板阀、紧急切断阀进入透平，再经透平膨胀做功。此技术是利用高炉炉顶煤气压力能和气体显热，把煤气导入膨胀透平做功，使气体原有的压力能经过不可逆绝热膨胀而变为速度能。

若将透平与发电机联接，即构成高炉煤气顶压回收透平发电装置（Top Gas Pressure Recovery Turbine，简称 TRT）。该装置带动发电机，使速度能变成电能输送出去。

目前国内多用湿式装置，但未来的发展趋势是干式 TRT。这样系统排出的煤气温度高，所含热量多、水分低、煤气的理论燃烧温度高，用于烧热风炉，高炉热风温度可提高 40~90℃，每炼 1t 铁少用焦炭 8~16 kg。

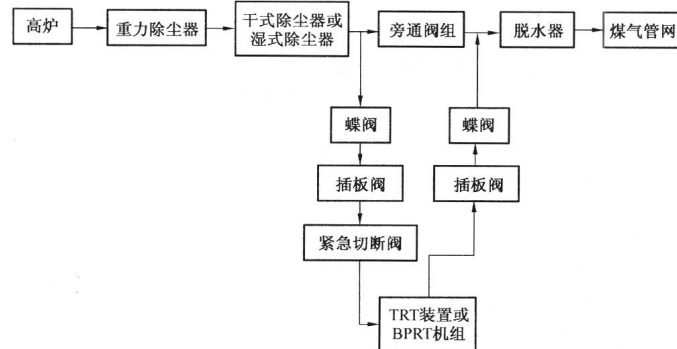


图 1.2-5 高炉炉顶煤气余压透平发电流程

若将透平与高炉鼓风机串联在同一根轴系上，驱动高炉鼓风机运转，即构成煤气透平和高炉鼓风机同轴系的高炉能量回收机组(Blast Furnace Power Recovery Turbine, 简称 BPRT)，从而将机械能直接补充在轴系上，之后经过回收、利用的煤气最后进入低压管网。

高炉煤气发电技术中主要包括两方面的关键工艺技术，一方面是煤气净化；另一方面是透平发电。这方面的内容可参阅有关文献资料，此处不再赘述。