

天然气废钢熔炼技术

中科院广州能源研究所节能环保技术集成中心副主任

荣咨海

广州好易燃能源科技有限公司总经理

1 概述

目前，很多铸造厂和轧钢厂都采用中频电磁感应熔炼炉，我国电能的绝大多数来源于火力发电，是由煤炭转化而成的二次能源，煤电转化的效率只有 20~30%，发电过程中存在着大量的能源浪费。

天然气熔炼炉是一种以天然气为燃料的工业炉，属于当今世界范围内铸铁熔化的最先进技术。在西气东送、天然气供应相对充分的今天，研发和推广天然气冲天炉具有节省能源、保护环境、有利于我国经济可持续发展等多方面的重大意义：

①天然气燃烧生成二氧化碳和水，燃烧尾气中不存在一氧化碳、不包含化学潜热，天然气冲天炉燃烧效率接近 100%，该炉属于目前节省能源的工业炉。

②天然气属于清洁能源，天然气冲天炉未经处理的尾气中，其粉尘浓度约为 $20\text{mg}/\text{m}^3$ （城市清洁空气中的粉尘浓度约为 $10\text{mg}/\text{m}^3$ ），该炉非常有利于保护大气环境。同时，该炉熔化过程中产生的炉渣量极少，有利于减少工业固态废料填埋与其他处理对环境造成的不利影响。

天然气冲天炉实际上相当于铸造行业的无焦冲天炉，我们这里把它叫做天然气冲天炉。

2 天然气冲天炉的结构

天然气冲天炉的结构见图 1 所示。

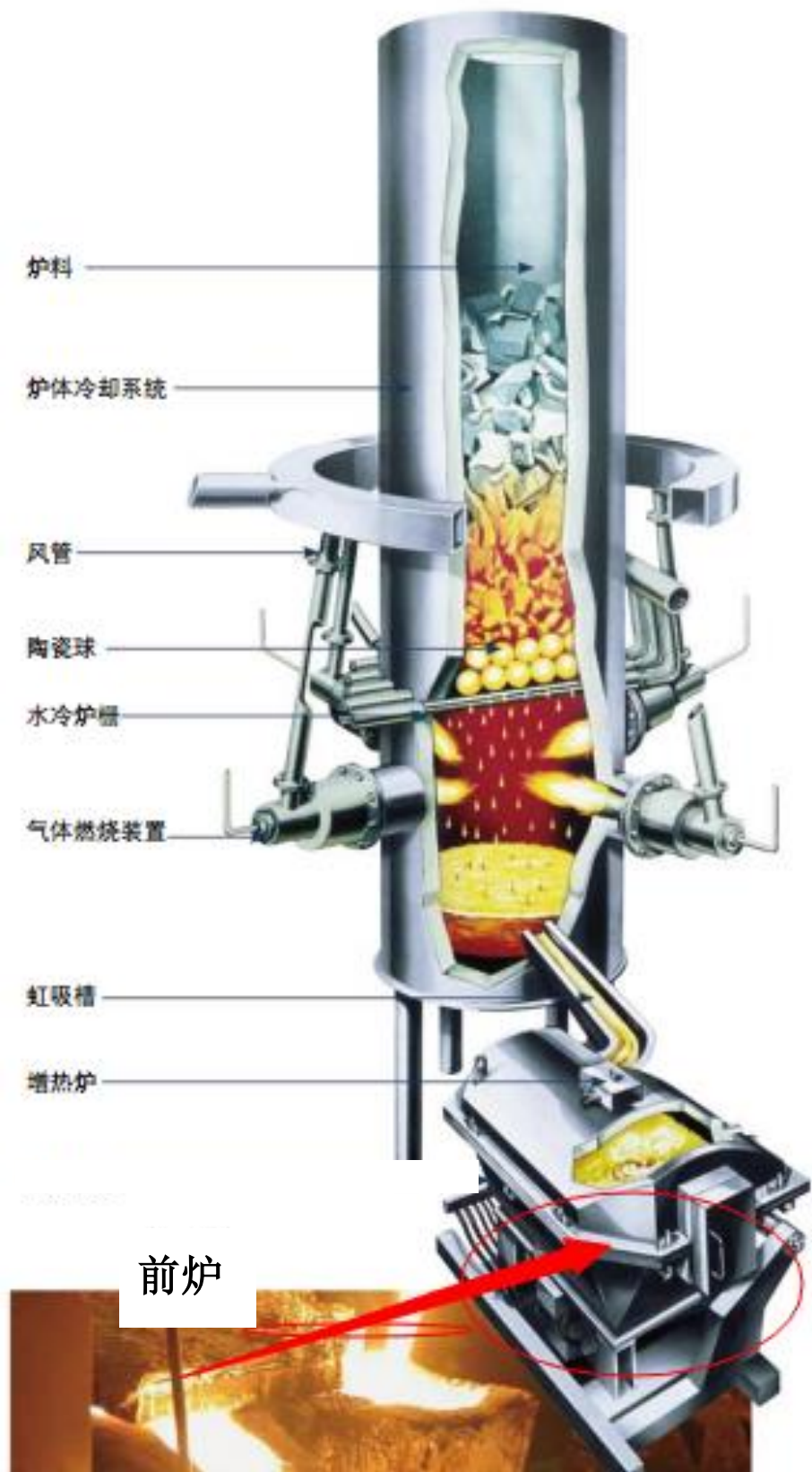


图 1 天然气冲天炉结构示意图

陶瓷球放在水冷的炉箅子上，达到工艺要求的高度之后，对空炉进行预热约 45 分钟，然后将金属炉料和造渣组分加入冲天炉中。

天然气烧嘴燃烧产生的热气流通过并加热陶瓷球层，使热陶瓷球层过热，以确保其上的炉料被充分预热，炉料被熔化变成钢（铁）水，当它通过陶瓷球层时与陶瓷球接触被增热，滴落在炉缸中。通过虹吸式渣钢分离器，渣和钢被分离开。

大约 15 分钟后，第一批钢（铁）水由虹吸式出液口流入增热前炉中，在这里采用天然气燃烧将钢（铁）水调整到所需要的温度，并通过加入适当的合金来调整钢（铁）水的化学成分，熔炼产生的炉气连续排出，通过位于炉子顶部的废气和空气换热器冷却，并由综合湿法净化除尘。

天然气冲天炉，包含加料口、预热段、水冷熔化段、水冷炉栅、天然气喷嘴、连续出铁槽、前炉等，见图 2。

2.1 炉身

加料口下缘至第一排风口之间的炉体，其内部空腔称为炉膛，其直径决定熔化率。

2.2 炉缸

第一排风口中心线至炉底之间的炉体。炉缸的主要作用：

- ①保护炉底；
- ②汇聚钢液和炉渣使之进入前炉。

2.3 前炉

前炉由前炉体和可分离的炉盖构成。其作用：

- ①储存钢液；
- ②使钢液成分和温度均匀；
- ③降低钢液在炉缸中的增碳与增硫；
- ④分离渣钢，净化钢液。

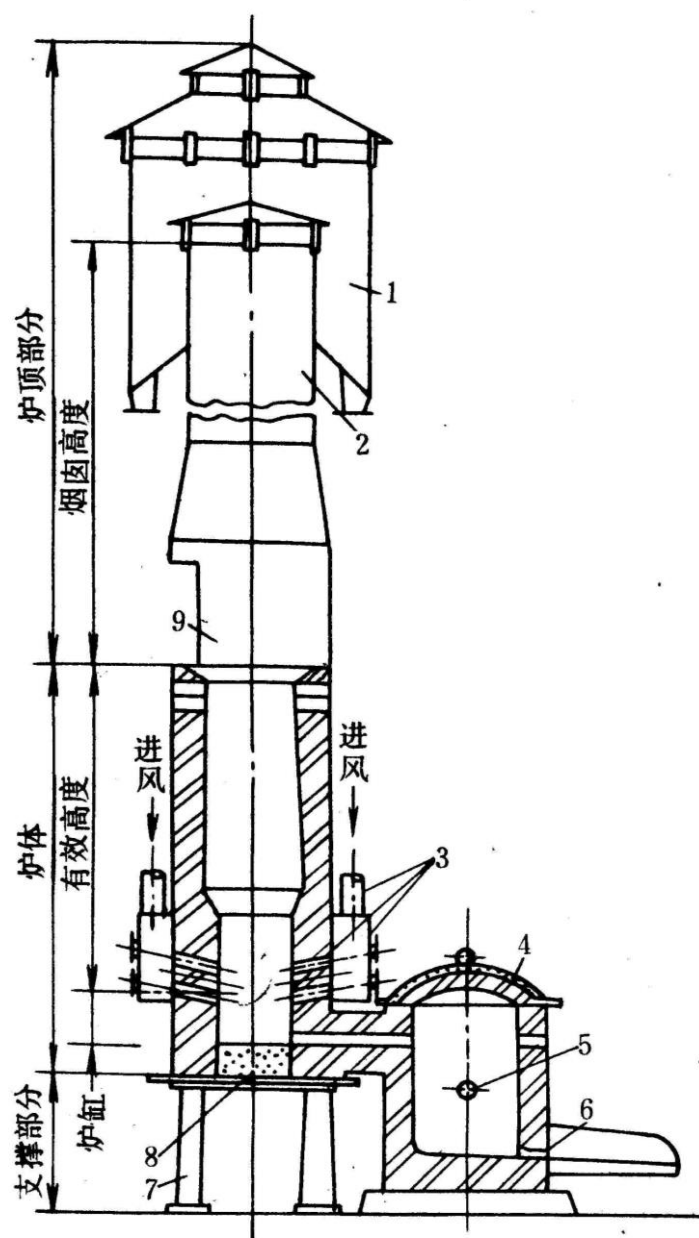


图 2 冲天炉主要结构简图

- 1—除尘器 2—烟囱 3—送风系统 4—前炉
 5—出渣口 6—出铁口 7—支柱
 8—炉底板 9—加料口

2.4 过桥

连接炉缸与前炉的部位，见图 3。

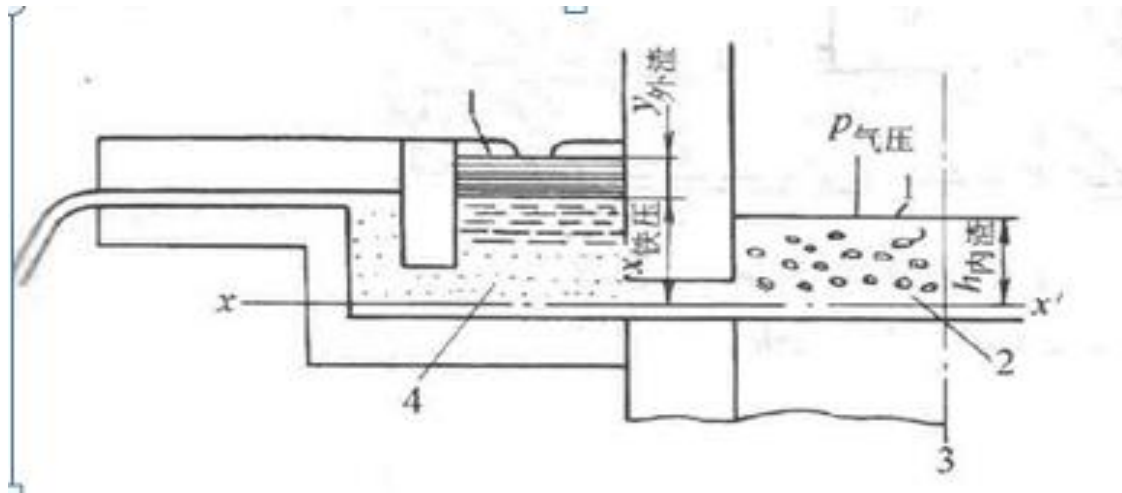


图 3 渣钢分离装置工作示意图

2.5 余热回收系统

见图 4。

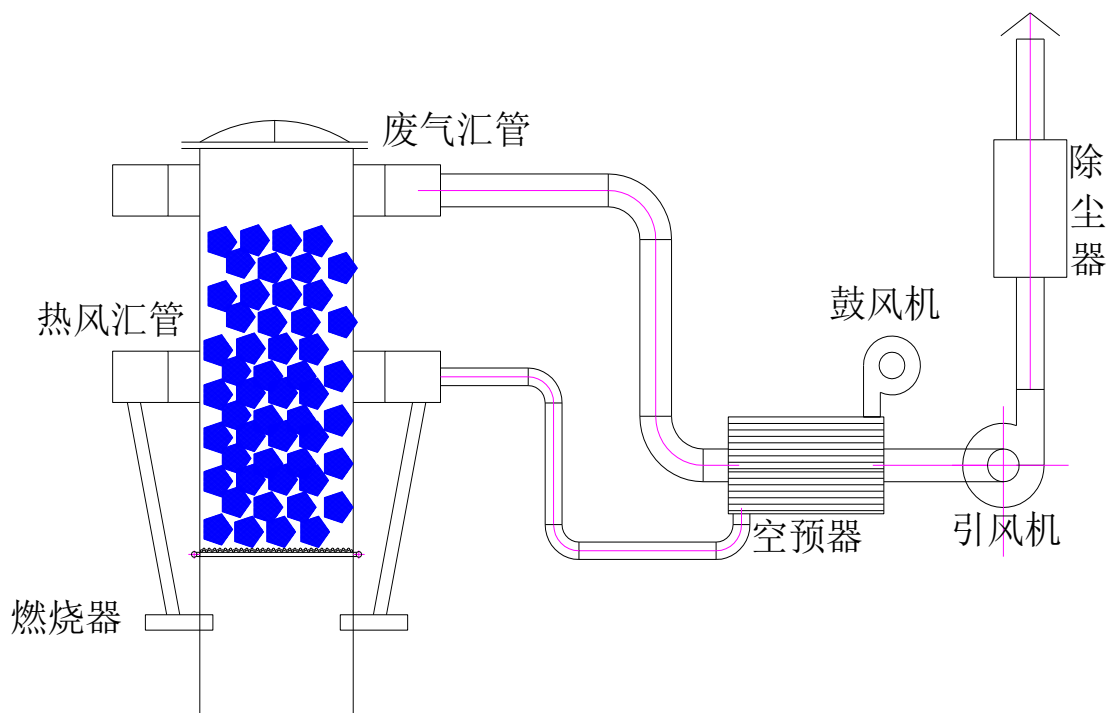


图 4 废气余热回收系统

冲天炉产生的废气温度高达 1100°C ，若直接排放及对环境造成

很大的热污染，也浪费了大量的能源。因此，要对其余热进行回收，以降低天然气消耗，同时，对烟气灰尘进行处理。

空预器采用中科院广州能源所朱冬生教授发明的扭曲管换热器，该换热器传热效率高，压降小，能将排烟温度降低到 150℃ 以下。

除尘系统采用综合湿法除尘器，主要由预湿混合机构、高效文氏管、冲击捕尘机构、二级泡沫净化机构、高效脱水器、水循环系统、弯头脱水器、风机等组成。废气经予湿混合机构进入高效文氏管，（在管口有水膜，在喉部有水雾）使喷水水滴及水膜雾化，由冲击捕尘机构进行一次高效除尘，再经二级泡沫净化机构进行二次充分净化、脱硫、然后，上升气体在除尘器内以较慢流速上升，水汽在重力和高效脱水器的作用下进行汽、水分离，洁净气体由弯头脱水器最后一次脱水由引风机排于大气。

天然气冲天炉烟气粉尘含量仅为 20mg/L，经过综合湿法除尘器处理后，含量可以低于 5mg/l，大大低于国家排放标准。工艺流程见图 5。

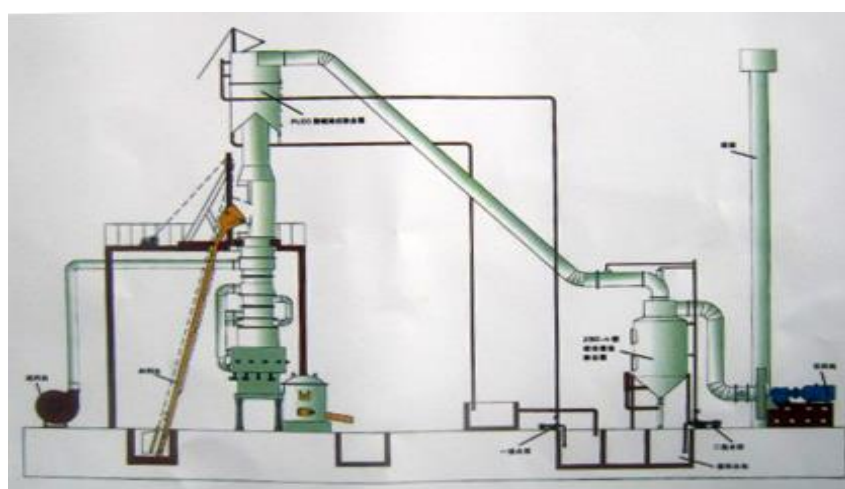


图 5 综合湿法除尘系统工艺流程图

3.天然气冲天炉的燃料费用与其他优越性

3.1 天然气的质量标准

天然气是地下岩层中以烃为主的混合气体的统称，包括油田气、气田气、煤层气、泥火山气和生物生成气等，其主要成分甲烷的体积分数约为 93~98%，另外包含少量的乙烷、丙烷、丁烷、氢气、二氧化碳、氮气、硫化氢等。天然气的质量标准见表 1。

表 1 天然气的质量标准（GB17820-99）

项目	单位	一类（民用）	二类（民用）	三类（工业用）
发热量	KJ/Nm ³	31400	31400	31400
总硫（以硫计）	mg/m ³	≤100	≤200	≤460
硫化氢	mg/m ³	≤6	≤20	≤460
二氧化碳	体积分数%	≤3	≤3	-
其他要求		1. 天然气的水露点比最低环境温度低 5℃ 2. 天然气中无游离水		

3.2 焦炭与天然气的当量关系

燃焦与燃气冲天炉的热能对比见表 2，在该表中可以看出两种燃料的当量关系。

表 2 燃焦与天然气冲天炉的热能对比

对比项目		焦炭	天然气	备注
完全燃烧产生的热量		28912KJ/kg	≥31400 KJ/Nm ³	焦炭固定碳含量取 85%
非完全燃烧产生的热量		19870KJ/kg	≥31400 KJ/Nm ³	焦炭的燃烧比 取 55%
燃料的当量关系	焦炭/天然气	1kg	0. 63Nm ³	19870÷31400=0. 63
	天然气/焦炭	1. 58kg	1Nm ³	31400÷19870=1. 58

3.3 几种熔化方式的燃料费用

燃气冲天炉、燃焦冲天炉、感应电炉熔化，每吨钢液熔化的燃料成本见表 3。在表 3 中可以看出，在燃气单价低的一些地区（例如陕西西安、河南新密、山西太原），燃气冲天炉的燃料费用大大低于燃

焦冲天炉，而在高气价地区（例如广东），其燃料费用低于或接近于燃焦冲天炉，但总是大大低于感应电炉。

表 3 天然气、燃焦冲天炉、电炉三种熔化方式的燃料费用对比

对比项目	天然气冲天炉	燃焦冲天炉	感应电炉	备注
燃料消耗指标	65Nm ³ /t 钢	125kg/t 铁	640 度/t 铁	
燃料单价	1.8~4.8 元/Nm ³ 天然气	2.5 元/kg 焦炭	0.55 元/度	按全国燃料单价计
吨铁熔化燃料费用	117~312 元/t 铁	313 元/t 铁	357 元/t 铁	
吨铁燃料差价	-196~-1 元/t 铁	0	+44~+240 元/t 铁	以燃焦冲天炉为准

天然气如果按照 4.5 元/m³ 计算，比用电节约，64.5 元/t，以年处理 50 万吨螺纹钢连铸连轧的企业来说，节能费用可高达 3225 万元。

以上是单纯燃料更换的节能效益，本设计具体节能效益见 5 章节。

3.4 燃气冲天炉的其它优越性

除了节省能源、清洁生产外，同时燃气竖炉还有以下优势：

①炼性能可调范围大。熔化率、钢液温度调节范围很大。

②工作场地整齐干净。使用管道输送的天然气，避免了焦炭存储、运输和挑选的烦恼，使用方便、容易调节和控制，工厂环境整洁。

③污染物排放量少。燃气竖炉的尾气中不包含 SO₂、无异味，CO 含量很低，对空气的污染程度低；炉渣量少于燃焦冲天炉，炉渣中的有害物质少；固态废渣少，有利于保护环境。

④有利于除尘系统。由于炉气中的粉尘含量低，因此除尘系统负荷小、投资低、运行费用低。

⑤钢液不受炉料污染。碳、硅、锰等元素的烧损率稳定，不增硫，生产球铁不需要进行脱硫，铁液化学成分稳定。

4 天然气冲天炉在连铸连轧生产线的具体实施

4.1 钢铁生产工艺

现代钢铁生产流程是将铁矿石在高炉中冶炼成生铁，将铁水注入转炉或电炉冶炼成钢，再将钢（铁）水铸成连铸坯，经轧制等塑性变形方法加工成各种用途的钢材。

一个钢铁联合企业一般包括原料处理、炼铁、炼钢、轧钢、能源供应、交通运输等生产环节，是一个复杂而庞大的生产体系。我国的钢铁企业一般都是这样的全流程联合企业。流程见图 6。

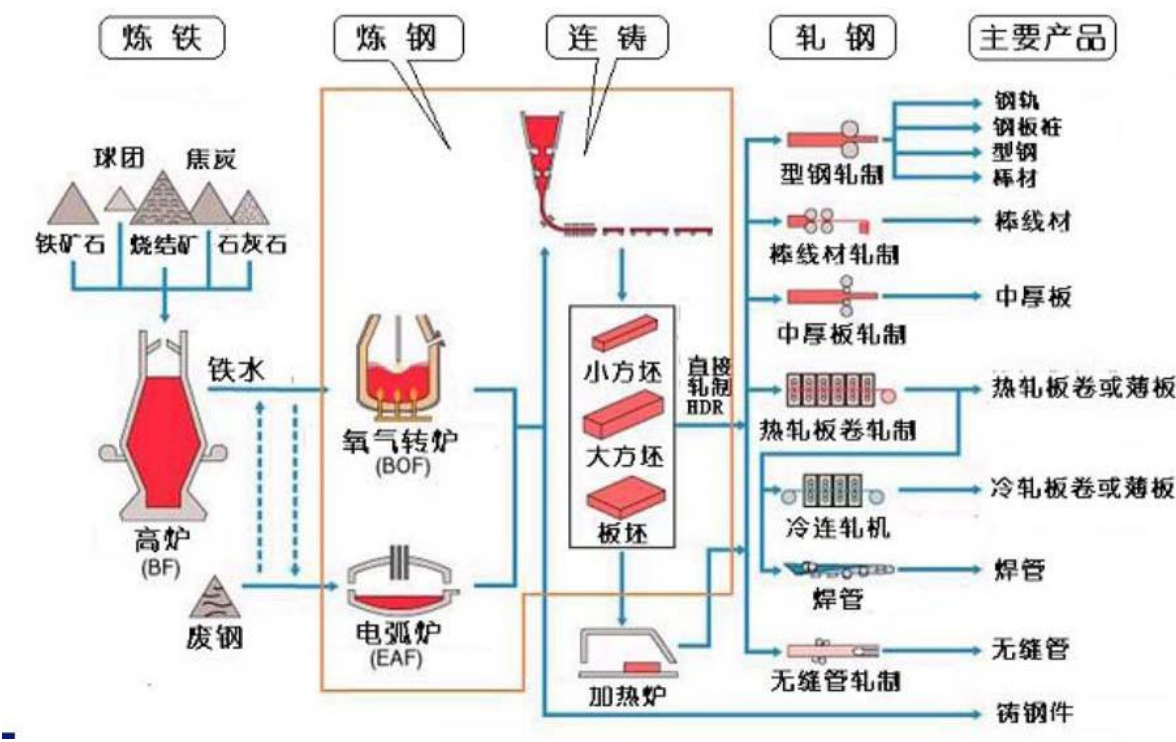


图 6 钢铁生产工艺流程

本设计不涉及冶炼部分，只考虑废钢熔化以及连铸工艺要求。即只设计冲天炉机组。

钢铁连铸温度需要 1650℃ 以上，因此，要确保钢（铁）水流出前炉的温度最低不能低于 1650℃。

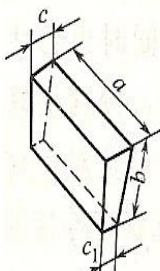
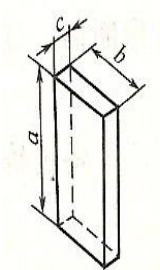
4.2 冲天炉制造技术

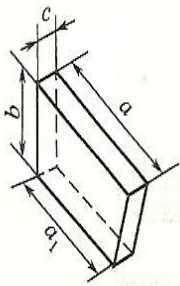
4.2.1 冲天炉用耐火材料

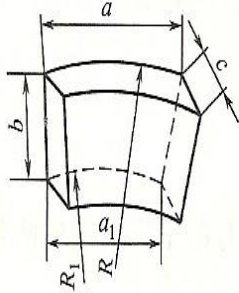
(1) 冲天炉用粘土质耐火砖技术要求

冲天炉用粘土质耐火砖技术要求			
牌 号		(HN)-35	(HN)-30
Al ₂ O ₃ 含量/%	不小于	35	30
SiO ₂ 含量/%	不小于	—	—
耐火度/℃	不小于	1690	1670
在 19.6N/cm ² 荷重下软化开始温度/℃	不低于	1320	1250
重烧线收缩/%(100℃,2h)	不大于	0.3	0.5
气孔率/%	不大于	24	24
常温耐压强度/MPa	不大于	24.5	19.6

注：HN 表示化铁炉用黏土砖。

粘土质和半硅质冲天炉耐火砖规格							
耐火砖形状	砖 号	尺寸/mm				体积 /cm ³	质量 /kg
		a	b	c	c ₁		
	H-1	230	113	65	45	1430	3.1
	H-2	230	113	65	55	1560	3.4
	H-3	230	113	65	—	1690	3.6

	H-4	a	b	c	a ₁	1990	4.3
		230	125	75	195		
	H-5	210	125	75	170	1780	3.8

	H-6	a	a ₁	c	b	R	R ₁	3520	7.6
		311	276	120	98	900	802		
	H-7	276	224	120	150	800	650		
	H-8	298	233	100	250	1150	900		
	H-9	337	298	100	148	1300	1152		
	H-10	311	282	100	118	1200	1082		
	H-11	298	272	100	98	1150	1052		
	H-12	282	235	100	180	1080	900		
								4830	10.4

(2) 耐火混合料

冲天炉砌砖可用粘土质耐火泥。耐火泥一般由耐火材料厂生产，但国内冲天炉砌砖多使用自配耐火砂浆乃将 60%~75%的石英砂或耐火砖末（粒度在 1~1.5mm 以下）和 25%~40%的耐火黏土加水混制而成。选料时，石英砂粒度不要过大，否则会使砖缝过宽而影响炉衬寿命。

捣制和修补炉衬用的耐火材料一般用较粗的耐火砖末（粒度 1~3mm）或石英砂（粒度 0.5~3mm）加耐火粘土配制而成。粘土加入量约为混合剂总重的 15%~25%。这种混合剂水分一般可控制在 5%~8%范围内。混合料配制可在碾轮式混砂机中进行。要求先干混 5~10min 左右，加水后湿混 5~10min 左右，以充分发挥粘土的粘结作用。

4.2.2 水冷炉算

水冷炉算是天然气冲天炉的关键部件，其作用为支持炉料，应该有一定的强度和抗弯曲能力，同时应该结构简单、性能可靠、便于检修、更换，制造成本低。

根据对轧钢加热炉的改造得出一条很重要的经验，那就是用蒸汽取热比用水取热效果好、能耗低很多，所以，本设计将水冷炉算设计为蒸汽取热式炉算。见图 7。

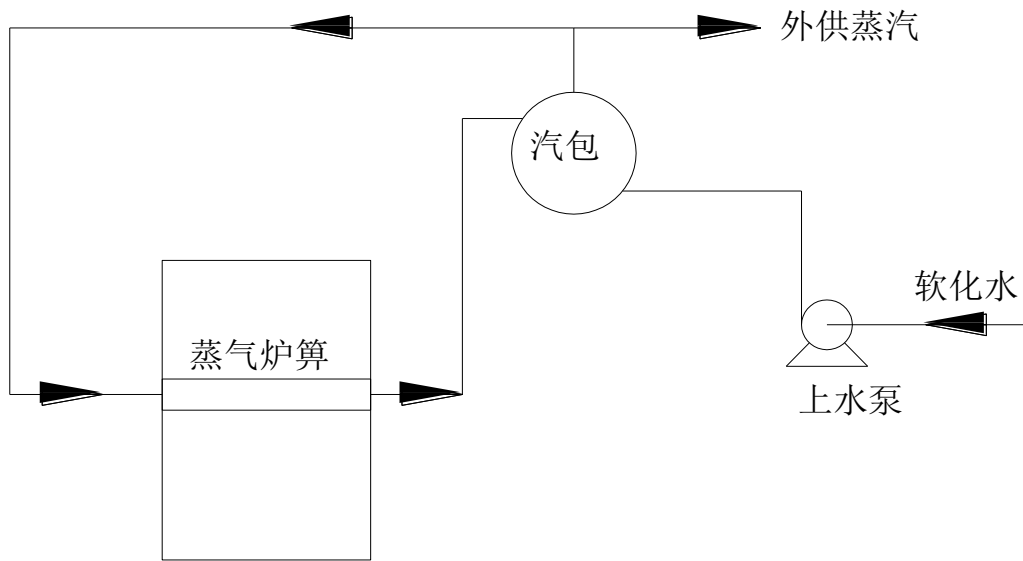


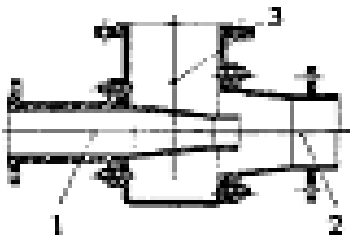
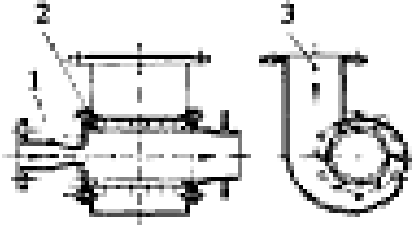
图 7 余热锅炉冷却炉算系统流程图

4.2.3 天然气喷嘴

天然气喷嘴也称天然气烧嘴，其性能参数包括：天然气流量、火焰长度、火焰角度等，分有焰喷嘴与无焰喷嘴两类，其中有焰喷嘴的基本结构见表 4。

根据对各类窑炉进行节能改造的实践经验，认为表 4 中的各种天然气烧嘴都不如高速燃烧器效率高，冲天炉需要高温、高速气流的燃烧器，不仅提高辐射传热效率，还要增加对流传热效率，而高速燃烧器正符合这种需要。高速燃烧器见图 8 所示。

表 4 各类天然气烧嘴

烧嘴类型	基本结构示意图	原理与性能特点
套管式	 1.天然气进口 2.混合室 3.空气进口	结构最简单,容易制造,天然气与空气横向平行混合,天然气与空气的混合效果较差,火焰长度较大
半喷射式	 1.天然气进口 2.一次风调风盘 3.一次风旋转叶片 4.一次混合室 5.空气主进口 6.主空气旋转叶片 7.主混合室	天然气或空气在螺旋叶片的作用下,在旋转中混合,混合效果较好,结构较复杂 左图喷嘴的助燃空气包含一次风与主空气两部分,一次风量可以通过调风盘调节
涡流式	 1.天然气进口 2.涡流混合室 3.空气进口	空气进入蜗壳后,通过切向流通旋转进入混合室与天然气混合,混合效果最好,但结构最复杂

高速燃烧器具有如下优势:

- a) 精确组织燃烧,燃烧效率 99.9%;
- b) 宽运行工况:热负荷调节比 1:20, 空气系数 0.5~10;
- c) 采用分级燃烧,有害气体 (NO_x) 排放符合国家环保标准;
- d) 具有烟气引射回流功能,可以将废烟气从炉后引回重新投入

炉内。

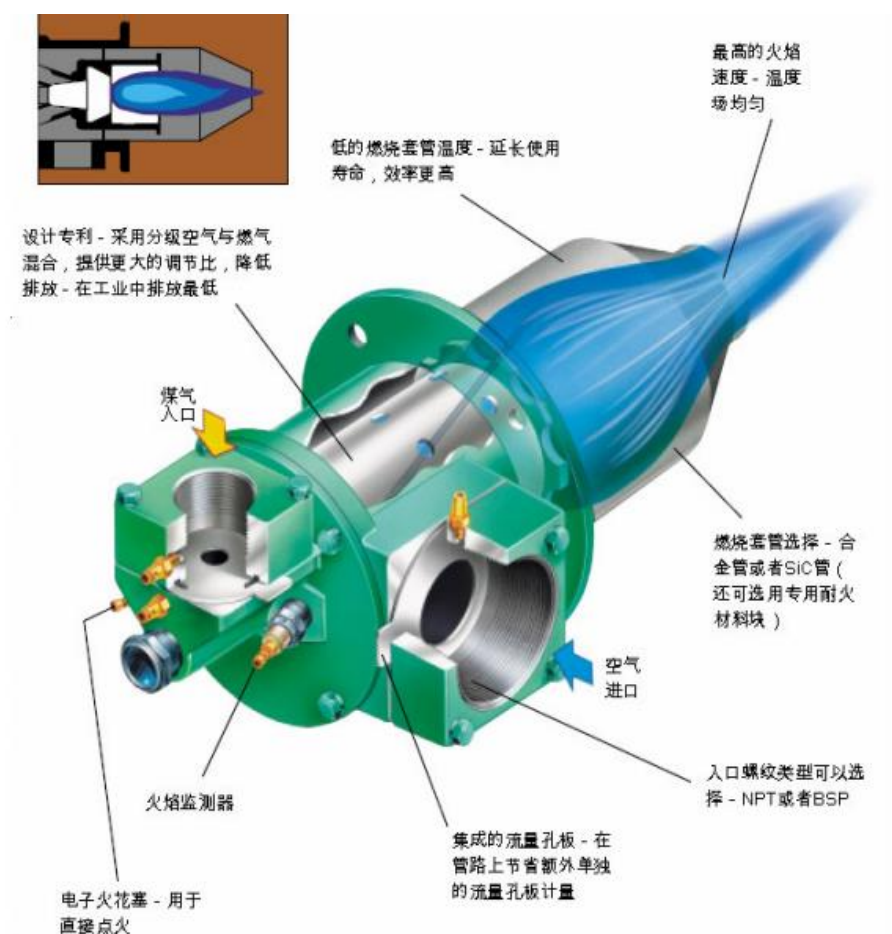


图 8 高速燃烧器结构示意图

4.2.4 耐火球

耐火球也有人称之为瓷球、石墨球。耐火球包含碳素材料与硅酸盐成分，耐火度高，起均热、传热和铺垫作用。炉算上铺垫有耐火球，每批炉料中也需添加一定量的耐火球，以补充耐火球的消耗。

本设计采用高铝（ Al_2O_3 含量 $>90\%$ ）陶瓷球，性状见表 5。

表 5 耐火材料球的性状

直径 mm	质量 kg	密度 kg/dm^3	颜色	加入量 %
150	3.5	1.98	白	批铁质量的 1.05~1.4

4.2.5 富氧燃烧系统

富氧燃烧技术是近代燃烧技术的一大飞跃式进步，富氧燃烧也就是提高燃料燃烧所需空气中氧气含量的比例高于 20.94%，常规燃烧中由于局部缺氧，产生不完全燃烧，造成燃烧效率低下，同时造成火焰温度偏低也会产生不完全燃烧，可燃物质变成烟尘排掉，浪费能源，造成大气污染。富氧燃烧能够使燃烧充分，火焰温度提高，辐射强度大幅提升，从而使热能的利用率大幅提升。

若将助燃空气的含氧量提高到 28%，理论燃烧温度比用空气助燃高出 14.5%。

由于富氧燃烧，提高燃烧温度，燃烧更加完全，减少了因局部缺氧而导致的不完全燃烧，同时富氧燃烧能够使火焰变短，提高燃烧强度，加快燃烧速度，获得较好的热传导，同时由于温度提高了，将有利于燃烧反应完全，因而从燃料燃烧不完全会产生环境污染现象的源头上降低和消除了污染排放的指数，通过上面计算得到，燃烧产物减少 $0.25L_n$ ，对大气的排放量进而减少了 $0.25L_n$ ，这样不仅减少了烟气的排放量，同时还提高了烟气排放的质量，达到了减排的效果。

4.2.6 全炉控制系统

由于冲天炉熔化过程具有连续和不可逆两个特点，自动控制系统是保证冲天炉安全生产和产品质量的必备措施。主要包括温度监测、化学成分控制、加料精度控制、燃烧器空燃比控制、纯氧比例控制等。在这个过程中，金属液体对热电偶套管的侵蚀是必须考虑的重要因素，不能采用直接检测而采用间接比较法对温度进行控制。

熔化质量控制流程图见图 9 所示。

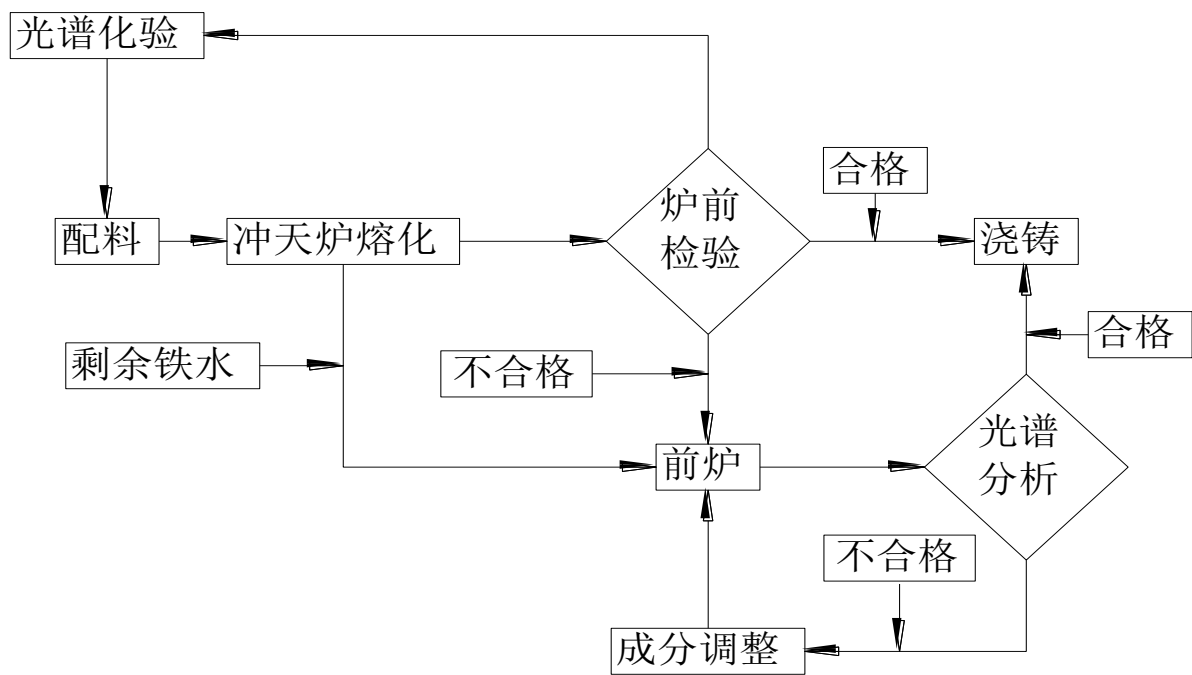


图 9 铁水熔化质量控制流程图

4.2.7 冲天炉熔炼装置结构

冲天炉水冷算、熔化段炉衬较易损坏，长炉龄冲天炉连续工作时间可达到 500 小时，需要经常检修。因此，要对炉体和装置结构进行合理设计，以达到节约成本、确保生产之目的。

(1) 炉体结构

冲天炉炉体采用分段式，风冷段、水冷算、熔化段、炉缸均为外部螺栓连接结构，哪一段出现问题，将其与下段连接解除，利用顶部吊车将其吊起，再与上段连接解除，将损坏段运至车间进行修复后，安装。

(2) 装置结构

这里说的装置是指熔化装置总成。通常配置两台冲天炉组成一开一备的装置，一台维修另一台运行。见附图。

5 天然气冲天炉经济技术指标

5.1 天然气冲天炉技术参数

天然气冲天炉的规格型号见表 6。

序号	参数/规格	HYR-2	HYR-3	HYR-5	HYR-10	HYR-20
1	额定出液量 t/h	2	3	5	10	20
2	额定供风量 m ³ /min	40	60	100	200	400
3	额定风压 KPa	20	22	23	25	30
4	有效高度 m	2.3	2.8	3.5	4	4.5
5	供风温度 ℃	450~550				
6	出液温度 ℃	1450~1550				

5.2 天然气冲天炉能耗指标

天然气冲天炉能耗指标见表 7。

能源消耗	单位	单耗/t	能源单价 元	能源费用 元
天然气	m ³	45~50	4.5	202.5~225
电力消耗	KWh	25	0.55	13.75
耐火材料消耗	Kg	9	5	45
水消耗	m ³	0.4	3	1.2
纯氧消耗	m ³	30	0.6	18
合金及辅助材料				
增碳剂	% t	1.1	7	6.65
硅铁	% t	0.8		
陶瓷球	% t	0.95		
造渣材料	% t	0.3		

5.3 与感应电炉能源消耗的对比

对比项目	天然气冲天炉	感应电炉	备注
燃料消耗指标	50Nm ³ /t 钢	640 度/t 铁	
燃料单价	1.8~4.8 元/Nm ³ 天然气	0.55 元/度	按全国燃料单价计
吨铁熔化燃料费用	90~240 元/t 铁	357 元/t 铁	
吨铁燃料差价	0 元/t 铁	+117~+267 元/t 铁	

若按照天然气价格 4.5 元/m³ 计算,天然气冲天炉运行费用约为:
310 元/t, 电价按 0.65 元/KWh 计算, 电炉运行费用为 416 元/t, 可节

约燃料费用 106 元/t，比用电节约燃料费用 25.5%。

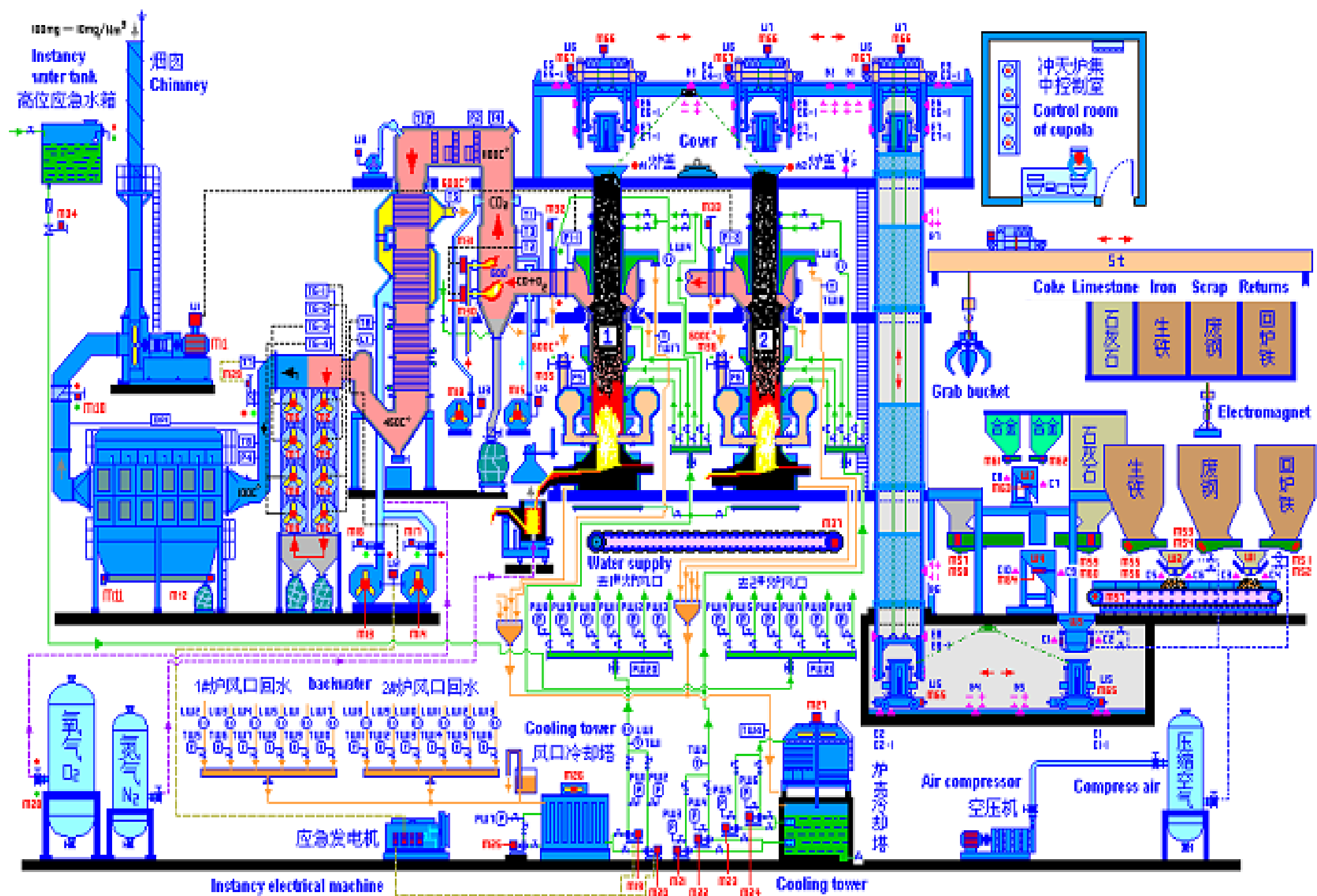
6 投资预算

采用 5t/h 天然气冲天炉替代 2500KW 中频感应炉，其投资预算见表 8。

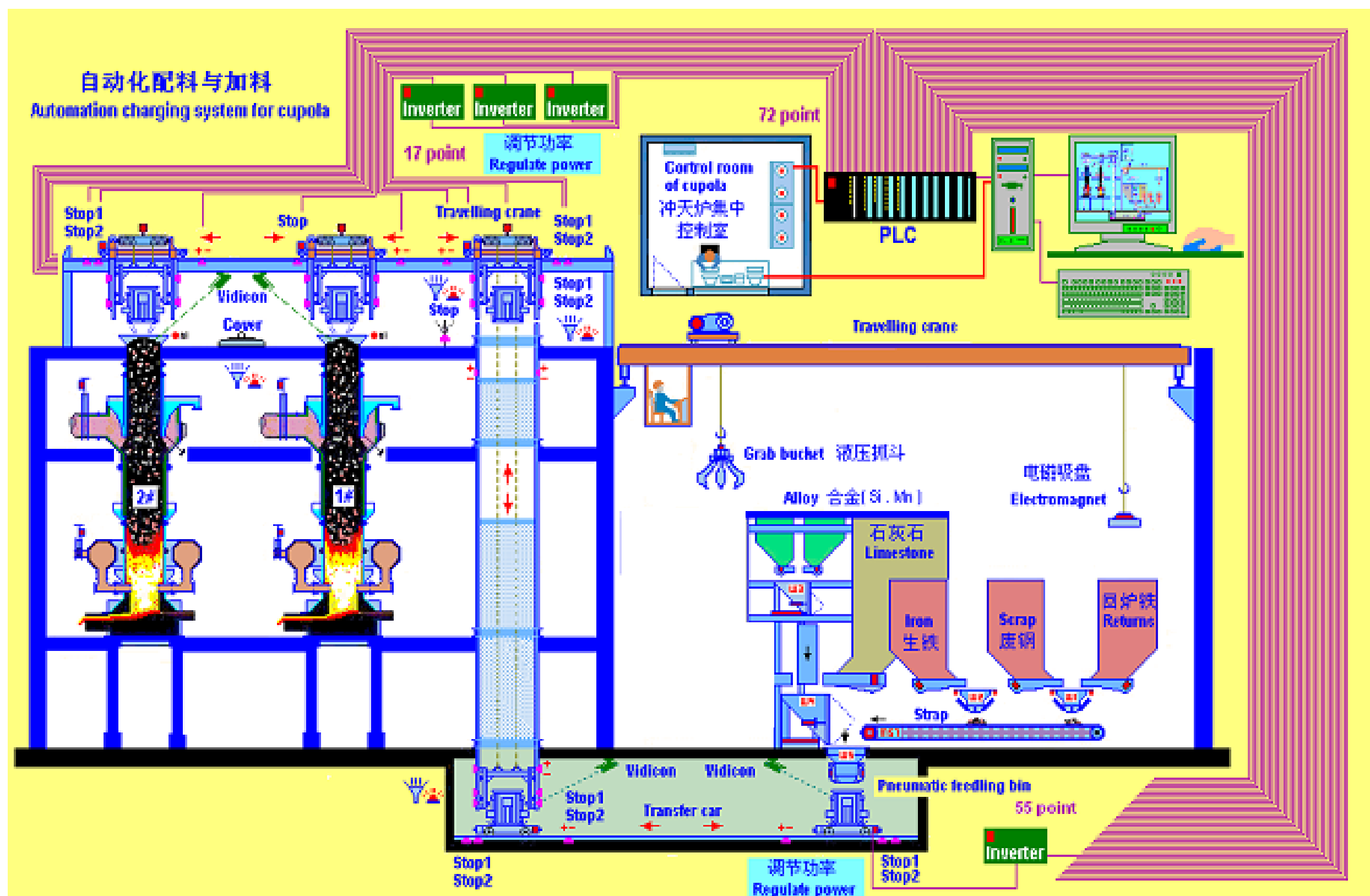
表 8 5t/h 天然气冲天炉装置投资概算表

序号	项目名称	数量	单价 万元	金额 万元	备注
1	冲天炉	2	75	150	可以用一台
2	配料系统	1	25	25	
3	上料系统	1	8	8	
4	控制系统	1	8.5	8.5	含现场检测仪表
5	水冷系统	1	7.5	7.5	含蒸汽包一台
6	余热回收系统	1	35	35	含专利换热器
7	除尘系统	1	28	28	综合湿法
8	循环水系统	1	38	38	
9	建设费用	45			含材料费
	合计	345			若一台为 270 万元

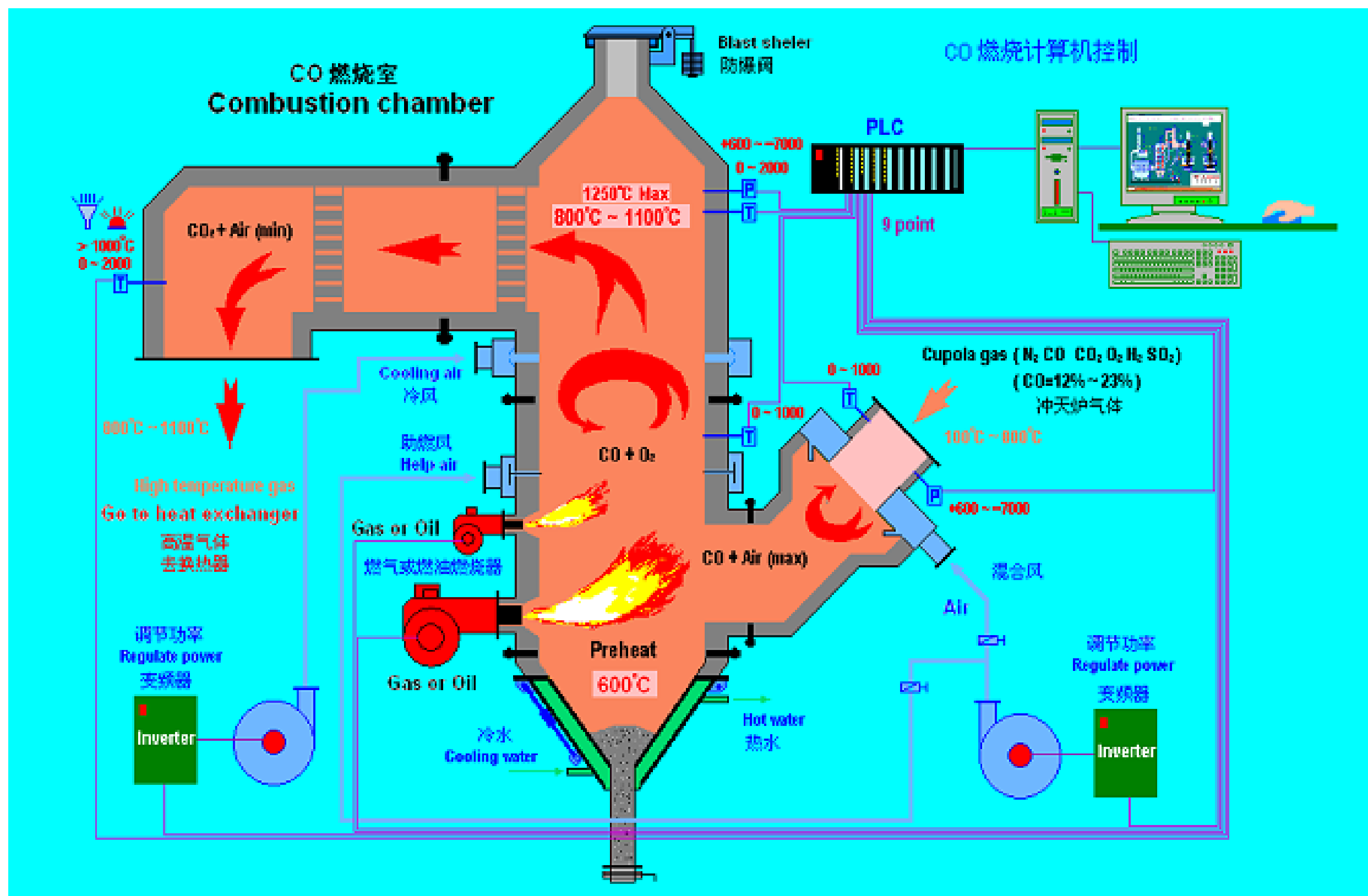
附图 1：总装置图



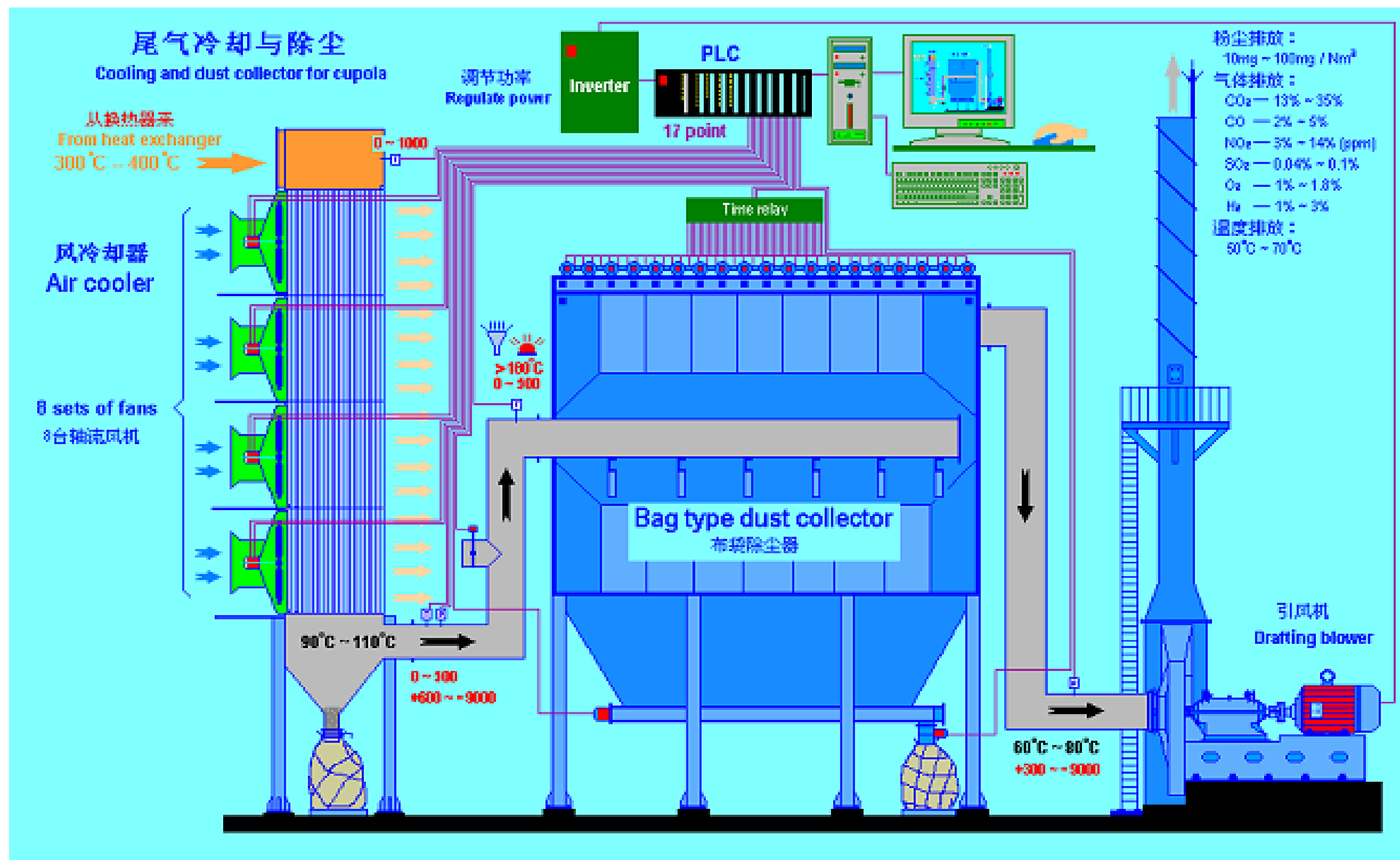
附图 2：全自动称重系统



附图 3：燃烧与余热回收系统



附图 4：除尘系统



附图 5：工控系统

