

# 基于产排污系数的产品污染负荷评价方法研究

段 宁<sup>1,2</sup>, 郭庭政<sup>1</sup>, 刘景洋<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学管理学院, 辽宁 大连 116023; 2. 中国环境科学研究院生态工业重点实验室, 北京 100012)

**摘要:**以产品整个生命周期内污染负荷评价为目标,按照原料加工、产品制造、产品使用和报废产品处置及回收4个阶段,将各阶段内所有消耗的物料追溯到最初的天然资源,采用第一次全国污染源普查产排污系数为基本核算依据,核算全部污染负荷,构建出定量计算产品生命周期污染负荷模型,并开发了最终评价清单模式,为分析产品污染负荷成因、寻找降低污染负荷的方向和途径提供了量化依据,最后,以印制电路板为案例,验证了该方法在实践中的可行性。

**关键词:**产排污系数;污染负荷;生命周期;评价方法

中图分类号:X8

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)02-0078-05

## Study on the assessment methods of pollution load for products based on the coefficients of pollutant generation and discharge

DUAN Ning<sup>1,2</sup>, GUO Ting-zheng<sup>1</sup>, LIU Jing-yang<sup>2</sup>

(1. School of management, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. MEP Key Laboratory of Eco-industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Aiming at assessment of products pollution load in the whole life cycle, products life cycle is divided into four stages: raw material producing, products manufacturing, products using and scraps recycling. Materials used in each stage are traced back to the primary natural resources and pollution load in all stages is calculated based on the pollutant generation and discharge coefficients from the Pollution Source Census made for the first time in China. The calculating model and assessment inventory of products pollution load in the whole life cycle are developed, which can provide a quantitative method for analyzing the cause of pollution load and seeking the direction and the approach to reducing it. At last, case study of printed circuit board is made to illustrate the applicability of this method.

**Key words:** pollutant generation and discharge coefficients; products pollution load; life cycle; assessment method

污染负荷是指在一定时间内向环境中排放的污染物数量的总和。目前国内对污染负荷评价的研究,主要集中在对某些具体产品生产过程的污染负荷评价,这些产品的生产过程一般污染负荷较大,如:钢铁、水泥、氧化铝等<sup>[1-4]</sup>。但是有些产品如印制电路板,其生产过程本身污染负荷很小,通常认为是低污染高附加值的行业,但是按照生命周期思想,要求系统设计追溯一种产品或者一个产品体系在生产、使用、废弃的全过程中所需的能量、物料以及废物处理情况<sup>[5]</sup>,由于制造印制电路板所消耗的铜、金、镍、铅等原料生产过程污染负荷较大,将这些原料消耗导致的污染负荷纳入印制电路板生命周期评价后,发现其污染负荷并不低。所以,衡量一个产品的污染负荷,必须将整个生命周期各阶段的污染负

荷全部计入该产品的污染负荷评价结果中。

数据来源和计算方法是决定产品生命周期评价结果质量的关键,通常采用国家层次的统计数据为主要参考源,计算所得到的各项数据才具有较高的可信性和代表性<sup>[6]</sup>。用产排污系数综合核算各类工业行业污染物的产生量和排放量,从总体上反映其污染负荷,是国内外常用的基本技术方法之一。它根据企业的产品生产量或原料使用量,乘以相应的产排污系数得到该企业污染物产排量,该方法也是我国第一次全国污染源普查采用的主要方法<sup>[7]</sup>。因此,本文正是以产品生命周期的视角出发,从数据源和计算方法为切入点,采用第一次全国污染源普查产排污系数为基本核算依据,所依据的数据来源于《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手

收稿日期:2008-12-11

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC02A19),环境保护部公益项目(HBGY200709022)

作者简介:段宁(1949-),男,研究员,教授,博士生导师,主要研究方向为清洁生产、工业污染控制,ningduan@craes.org.cn;郭庭政(1980-),男,博士生,研究方向为清洁生产与循环经济战略,通讯联系人,010-84915040,guotz@craes.org.cn。

册》(以下简称《手册》),其系数代表了我国工业行业2007年的平均技术水平<sup>[8]</sup>,构建定量计算产品全生命周期污染负荷模型,给出产品全生命周期污染负荷评价法,并以印制电路板作为案例,探讨该方法在实践中的可行性。

## 1 研究目标与边界

本文的研究目标是将产品的生命周期划分为4个阶段:原材料加工阶段、产品制造阶段、产品使用阶段和报废产品处置及回用阶段,利用产排污系数方法,核算出各阶段的污染负荷,并最终汇总得到产品在其整个生命周期内的污染负荷。而产品在其生命周期各阶段所涉及的所有原料、辅料以及耗材,最终都可以追溯到某种天然资源,本文按照产品→原料、辅料及耗材→天然资源的主线,以最终天然资源为研究边界,来评价产品生命周期污染负荷。另外,污染负荷的产生原因主要有2种:一种是由资源消耗引起的,一种是由能源消耗引起的,根据产排污系数的核算原理,本文将研究目标放在所有资源消耗引起的污染负荷,对于由直接或间接的能源消耗所导致的污染负荷,暂不纳入本文的研究范畴。

产排污系数包括产污系数和排污系数,其中排污系数包含了不同末端治理设施对污染物产生量的削减水平,但从清洁生产观点看,只要生命周期内产生的污染物,即使采取末端治理手段,也都是增加了对环境的负荷。因此,从更广义的环境污染负荷角度,我们选择产污系数核算产污量作为评价指标。

## 2 评价模型研究

### 2.1 产品污染负荷 BOM 结构图

BOM(Bill of Material)物料清单,是企业信息管理系统中的概念,它是一种描述产品装配关系和装配数量结构化的零件表,其中包括所有的子装配件、

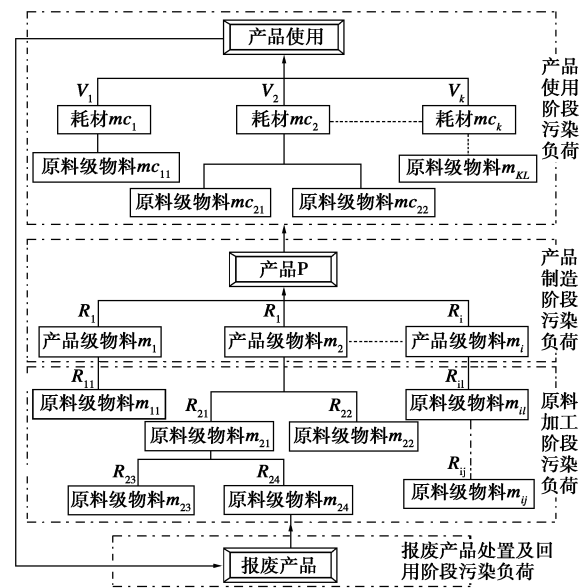


图1 产品污染负荷 BOM 结构图

零件、原材料的清单,以及各物料的相应装配数量,是一个典型的树状结构表<sup>[9]</sup>。本文借鉴 BOM 结构图的构建方法和原理来描述产品生命周期污染负荷,如图1所示,产品污染负荷 BOM 结构图可以清晰地表示出每个生命周期阶段的物料消耗及其相应的数量,为产品生命周期污染负荷的评价提供了一个清晰的框架。图中所涉及的概念和符号标识定义如下:(其中  $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ )

①产品级物料  $m_i$  指直接投入到产品 P 的制造环节使用的原料。

②原料级物料  $m_{ij}$  指用来生产产品级物料  $m_i$  所需要的各级原料。

③耗材  $mc_k$  指产品 P 在使用过程中必须消耗的材料。比如,对于打印机来说,墨盒和打印纸则是其使用阶段的耗材,由这些耗材产生的污染负荷也应纳入打印机生命周期的污染负荷。

④产品级折算系数  $R_i$  指生产每单位产品 P 所

(上接第77页)

- [2] 元荣彬,李继定,朱慎林. 渗透汽化汽油脱硫技术研究进展[J]. 现代化工, 2005, 25(10): 21-24.
- [3] 柯明,周爱国,赵振盛. FCC 汽油烷基化脱硫技术进展[J]. 化工进展, 2006, 25(4): 357-361.
- [4] 潘光成,吴明清,陶志平,等. 催化裂化汽油重馏分催化氧化脱硫醇的实验室研究[J]. 石油炼制与化工, 2005, 36(12): 11-13.
- [5] 刘海超,杨锡尧,冉国朋,等. 固体碱负载硫醇氧化催化剂的研究[J]. 石油化工, 2000, 29(10): 742-744.
- [6] 胡平,张昭. 汽油脱硫醇新型活化剂的应用[J]. 炼油技术与工程, 2006, 36(10): 47-48.

- [7] 黄祖娟. 纤维膜接触器在脱硫装置中的应用[J]. 化工进展, 2003, 22(2): 191-193.
- [8] 张建伟,董群,费春光. 载体对 FCC 汽油加氢脱硫催化剂性能的影响[J]. 工业催化, 2005, 13(12): 6-9.
- [9] 郑丁杰,贾悦,吕晓龙. 中空纤维支撑液膜稳定性的研究[J]. 天津工业大学学报, 2008, 27(3): 29-31.
- [10] 王志,龚彦文,袁力,等. 中空纤维膜吸收器中  $\text{CO}_2$  吸收过程模拟[J]. 化工学报, 2003, 54(11): 1563-1568.
- [11] Gong Y W, Wang Z, Wang S C. Experiments and simulation of  $\text{CO}_2$  removal by mixed amines in a hollow fiber membrane module[J]. Chemical Engineering and Processing, 2006(45): 652-660. ■

需要的产品级物料  $m_i$  的量。

⑤原料级折算系数  $R_{ij}$  指生产每单位产品级物料  $m_i$ , 在其各个加工环节所需投入的原料级物料量。例如, 生产 1 t 精炼铜, 冶炼环节需投入 5 t 铜精矿, 这 5 t 铜精矿又需要 115 t 铜矿石采选得到, 所以铜的原料级折算系数分别为铜冶炼环节为 5, 铜采选环节为 115。

⑥耗材级折算系数  $V_k$  指每单位产品在其整个使用阶段所需要使用的耗材  $mc_k$  的总量。

## 2.2 产品污染负荷评价模型构建

### 2.2.1 原料加工阶段污染负荷评价模型

根据 BOM 结构图所示, 对原料加工阶段逐级核算每个物料加工环节的产污量, 最终汇总核算出生产单位产品, 在原料加工阶段总的污染负荷。其具体核算模型和步骤如下: 先查出每个原料级物料相应加工环节某污染物指标的产污系数  $Cpm_{ij}^{[pi]}$  ( $[pi]$  代表污染物指标), 按照公式(1)用原料级折算系数与产污系数相乘, 核算出生产每单位产品级物料  $m_i$  所消耗的各个原料级物料  $m_{ij}$  在其加工环节产污量  $Pm_{ij}^{[pi]}$ ; 然后按照公式(2)将  $Pm_{ij}^{[pi]}$  加和汇总核算出生产每单位产品级物料  $m_i$  产污量  $Pm_i^{[pi]}$ ; 最后按照公式(3)用产品级折算系数  $Rm_i$  与  $Pm_i^{[pi]}$  相乘并加和汇总, 核算出生产每单位产品在原料加工阶段总的污染负荷  $Pm^{[pi]}$ 。

$$Pm_{ij}^{[pi]} = Rm_{ij} \times Cpm_{ij}^{[pi]} \quad (1)$$

$$Pm_i^{[pi]} = \sum_{j=1}^n Pm_{ij}^{[pi]} \quad (2)$$

$$Pm^{[pi]} = \sum_{i=1}^n Rm_i \times Pm_i^{[pi]} \quad (3)$$

其中:  $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

$Rm_{ij}$  代表第  $i$  种产品级物料  $m_i$  第  $j$  个原料级物料  $m_{ij}$  的折算系数。单位为原料级物料  $m_{ij}$  的量纲。

$Cpm_{ij}^{[pi]}$  代表第  $i$  种产品级物料  $m_i$ , 第  $j$  个原料级物料  $m_{ij}$  加工环节, 污染物指标  $[pi]$  的产污系数, 其单位为污染物质量(体积)/单位产品(原料)。

$Pm_{ij}^{[pi]}$  代表第  $i$  种产品级物料  $m_i$ , 第  $j$  个原料级物料  $m_{ij}$  加工环节, 污染物指标  $[pi]$  的产污量。其单位为污染物质量(体积)。

### 2.2.2 产品制造阶段污染负荷评价模型

产品制造阶段是采用产品级物料生产出产品的过程。由于要核算的是单位产品制造阶段的产污量, 而产污系数恰恰是代表生产单位产品的产污量, 所以产品制造阶段的污染负荷模型即为:

$$Pp^{[pi]} = Cpp^{[pi]} \quad (4)$$

### 2.2.3 产品使用阶段污染负荷评价模型

产品使用阶段的污染负荷主要来自 2 个方面, 其一是来自于耗材的使用时而产生的污染负荷  $Pmc^{[pi]}$ , 对于耗材污染负荷的核算与产品所需原料加工阶段的核算过程相同, 同样要逆向追溯到天然资源, 其计算公式可套用公式(1)、(2)、(3); 其二是来源于产品使用时所产生的污染负荷  $Puc^{[pi]}$ , 比如, 汽车使用时要产生  $CO_2$ 、 $NO_x$  等污染物。其核算公式与产品制造阶段污染负荷核算同理:

$$Puc^{[pi]} = Cpu^{[pi]} \quad (5)$$

则产品使用阶段污染负荷总的评价模型为:

$$Pu^{[pi]} = Pmc^{[pi]} + Puc^{[pi]} \quad (6)$$

### 2.2.4 报废产品处置及回用阶段污染负荷评价模型

报废产品处置及回用阶段污染负荷评价模型与产品制造阶段的模型相似, 如下所示:

$$Pr^{[pi]} = Cpr^{[pi]} \quad (7)$$

### 2.2.5 产品全生命周期污染负荷总体模型

联立上述 4 个阶段的污染负荷核算模型, 可以得到产品全生命周期污染负荷总体模型:

$$P^{[pi]} = Pm^{[pi]} + Pp^{[pi]} + Pu^{[pi]} + Pr^{[pi]} \quad (8)$$

## 2.3 评价清单开发

根据前文所述的评价模型, 逐个阶段核算产品污染负荷, 编制产品生命周期污染负荷评价清单。清单模式详见案例分析的评价清单表 1。

通过该清单, 逐行分析可以综合比较某个污染物指标在每个生命周期阶段的产生量、所消耗的每种物料所导致的产生量以及在整个生命周期的总污染负荷; 逐列分析可以综合比较出某一生命周期阶段或是所消耗的某种物料, 导致了哪些污染物指标的产生, 另外, 按照本文所述的评价办法, 也可以对不同产品的污染负荷分别进行评价, 然后再做对比分析。

## 3 案例研究

### 3.1 PCB 行业描述

印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)指在绝缘基材上, 按预定设计形成从点到点间连接导线及印制元件的印制板。PCB 是基础电子元件产品之一, 已成为电子设备必不可少的电子元器件类产品。从收音机、电视机到手机、数码照相机等各种消费类电子设备到工业自动化控制系统和仪器仪表, 以及航空航天或军事装备都应用到 PCB, 围绕着 PCB 制造已形成了完整的印制电路产业。我国 PCB 产量

表1 PCB生命周期污染负荷评价清单

污染物指标	原料加工阶段									PCB制造阶段	报废PCB处置及回收阶段	全生命周期总计
	铜	金	铅	镍	锡	铋	塑料	硅及其他	合计			
工业废水量/t	77.539	7136.584	30.304	17.807	91.935	28.448	23.685	0	7406.303	366.3	0.44	7773.043
COD/kg	8.096	61.101	4.204	2.156	11.484	13.533	7.164	0	107.738	20.766	0.064	128.568
汞排放量/g	0.026	0.999	0.002	0.006	0.390	0.942	0.427	0	2.793	0	0	2.793
镉排放量/g	16.179	6.268	10.008	0.150	0.203	0.092	0	0	32.901	0	0	32.901
铅排放量/g	10.647	55.620	15.637	0.252	0.795	0.195	0	0	83.146	0	0	83.146
砷排放量/g	163.679	3.770	10.964	1.035	16.577	1.389	0	0	197.414	0	0	197.414
六价铬排放量/g	0	3.803	0	0	0.021	0.016	0	0	3.839	0	0	3.839
石油类排放量/m <sup>3</sup>	20.335	0	0	0	0	0	41.032	0	61.367	0	0	61.367
氰化物排放量/kg	0	2.822	0	0	0	0	1.050	0	3.872	0	0	3.872
工业废气量/m <sup>3</sup>	3406.689	4266	4127.175	3536.64	1534.104	2431.78	6120.09	6023.214	31445.692	24841.8	0	56287.492
烟尘量/kg	42.512	46.755	22.446	36.037	9.654	8.935	0	0.196	166.536	0	0	166.536
工业粉尘量/t	2.995	34.650	3.039	0.432	0.392	0.243	9.550	0	51.301	0.006	0	51.307
二氧化硫量/t	273.359	36.135	29.390	206.289	1.430	70.235	7.390	0.481	624.709	0	0	624.709
一般固体废物量/g	11.356	12.015	4.016	3.567	7.914	2.502	1.140	0	42.509	0.070	0	42.579
危险废物量/g	0.003	11.610	0.010	0.009	0	0.004	0.487	0	12.123	0.600	0	12.723

位居世界第一,占到世界总产量26%。据2006年的统计数据,我国印制电路板生产企业约有1000家,总产值近1000亿元。我国PCB产值从2003年到2006年增长率平均为26.27%,今后几年仍将保持约15%的年均增长率。印制电路板行业,通常认为是低污染高附加值的行业,然而由于制造印制电路板所消耗的铜、金、镍、铅等原料污染负荷较大,从它整个生命周期来看,印制电路板行业的污染负荷并不乐观。

3.2 PCB生命周期污染负荷总体分析

PCB的生命周期4个阶段中,使用阶段并不产生污染负荷;制造阶段和报废PCB处置及回收阶段污染负荷不大,这2个阶段的产排污系数可以直接从《手册》中查得,直接代入公式计算。而PCB生命周期的主要污染负荷发生在原料加工阶段,生产PCB所需的原料种类繁多,因此核算过程也很复杂。

根据相关估算数据,1t随意收集的印制电路板含黄金0.9kg、塑料270kg、铜128.7kg、铅58.5kg、锡39.6kg、镍36kg、铋39.8kg,硅及其他难熔金属氧化物426kg,此外还有少量的钨、钼等贵金属,在核算中忽略不计。而生产PCB所用的这些原料本身并不是天然资源,因此分别针对这些原料的加工过程,沿其生产流程逆向追溯到最初的天然资源,构建PCB原料加工阶段的污染负荷BOM结构图,如图2所示。

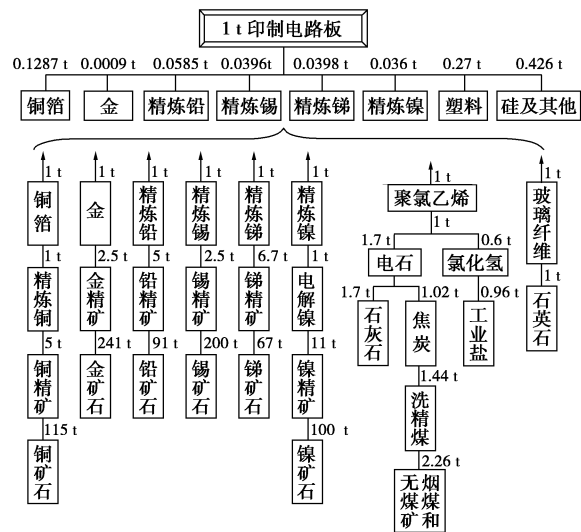


图2 PCB原料加工阶段污染负荷BOM结构图

3.3 PCB生命周期污染负荷评价

基于前文对PCB生命周期污染负荷的总体分析,对照污染负荷BOM结构图,将各级数据代入污染负荷评价模型,根据核算结果编制PCB生命周期污染负荷评价清单,如表1所示,通过对清单的分析,可以得出如下结论:

- (1) PCB在其整个生命周期内产生了大量的工业废水、COD、工业废气、烟尘、二氧化硫,而且还会产生汞、铅、镉、砷等重金属和氰化物等有毒污染物。综合评价,其污染负荷比较大。
- (2) 从PCB产品的生命周期阶段分析来看,原

材料加工阶段的污染物产排量远远高于 PCB 的加工制造阶段和处置及回收阶段,且污染物种类多。在原材料加工阶段主要污染物产生量占整个生命周期的比例分别为工业废水 95.28%、COD 83.8%、工业粉尘 99.9%、一般固体废物 99.83%、危险废物 95.28%,而二氧化硫、汞、铅、镉、砷等重金属和氰化物等有毒污染物全部产生在原材料加工阶段。

(3)从 PCB 的各原材料产生的污染负荷分析,主要污染负荷是由金和铜这 2 种原材料引起的。在 PCB 制造中金的使用量仅占 0.9%,但其导致的污染物产生量在 PCB 整个生命周期污染物产生总量的比例却非常大,分别为六价铬 99.04%、工业废水 96.36%、危险废物 95.76%、氰化物 72.89%、烟尘 67.54%、COD 56.7%。铜是有色金属原料中使用最多的,产污量也比较大,占总量的比例分别是砷 82.91%、镉 49.18%、SO<sub>2</sub> 43.76%、石油类 33.14%。

#### 4 结论与展望

本文将产排污系数应用于产品生命周期污染负荷评价,构建了评价模型和分析清单,评价结果代表了产品生命周期污染负荷的综合水平。该方法分析框架和边界清晰,核算过程简单,结果便于比较分析,既可以适用于同种产品但采用不同原料或技术路线的污染负荷比较分析,又可以适用于不同种产品间的比较分析,是一种提供定量化决策分析的有效方法。

由于该方法以产排污系数为依据,只从资源消

耗的主线分析了产品生命周期污染负荷,并没有将生命周期过程的直接或间接的能源消耗导致的污染负荷纳入评价结果中,也是这种方法进一步完善的方向。另外,在分析产品不同生命周期阶段的污染负荷时,所得到的过程数据也是非常有价值的,如果通过合理的归类汇总,会成为环境领域很重要的基础数据。

#### 参考文献

- [1] 蔡九菊,等.钢铁生产流程环境负荷评价体系的研究方法[J].钢铁,2002,37(8):66-70.
- [2] 吴红,等.中国水泥工业环境负荷分析[J].中国建材科技,2006,3:50-54.
- [3] 杜涛,蔡九菊.典型钢铁生产流程的环境负荷分析[J].中国冶金,2006,16(12):38-41.
- [4] 宋丹娜,等.氧化铝生产环境负荷指标及评价模型研究[J].环境科学与管理,2007,32(4):178-182.
- [5] 贾小平,项曙光,韩方煜.生命周期评价及其在过程系统工程中的应用[J].现代化工,2007,27(增刊1):355-358.
- [6] 袁宝荣,聂祥仁,狄向华,等.中国石化能源生产的产品生命周期清单(I)[J].现代化工,2006,26(3):59-64.
- [7] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室.第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册[EB/OL][2008-07-08].北京:国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室.<http://cp-sc.mep.gov.cn/>
- [8] 中国环境科学研究院.第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数核算项目技术报告[R].北京:中国环境科学研究院,2008.1.
- [9] 贾振元,郭庭政,王林平.面向中小制造企业多种 BOM 并行的构建和应用[J].CAD/CAM 与制造业信息化,2006,12:24-26. ■

### 空气产品公司为中国石化扬子石油化工有限公司 建造具世界级规模的一氧化碳冷箱

全球领先的气体和设备生产商——空气化工产品公司日前宣布,其上海漕泾深冷设备制造工厂为中国石化扬子石油化工有限公司建造的世界级规模的一氧化碳冷箱正式完工。这台冷箱也是空气产品公司在全球范围内为客户建造的最大规模一氧化碳冷箱,及在厂区内建造的最大规模一氧化碳冷箱。

空气产品公司在上海漕泾的制造工厂举行了完工庆典。中国石化扬子石油化工有限公司工程部高级项目经理王永宏先生、上海化工区奉贤分区发展有限公司董事长黄祖光先生,以及其他嘉宾和空气产品公司员工共同出席了这一庆典。

此次为中国石化扬子石油化工有限公司制造的大型设备一氧化碳冷箱重达 300 t,体积超过 2 000 m<sup>3</sup>,采用了空气产品公司世界一流的深冷技术进行设计,并在上海漕泾制造工厂制造。该工厂为空气产品公司在全球建立的多种工业气体分离设备的 3 个生产中心之一。在厂区内制造冷箱可以提高制造过程的安全性、可靠性和质量,并增强设备性能。

空气产品公司漕泾制造工厂总经理李兵先生表示:“漕

泾制造工厂是空气产品公司的全球战略业务蓝图的一部分。我们引进了世界级的先进技术和标准,利用强大的本地生产能力,使我们能更好地服务中国和亚洲客户。我们已经为遍布亚洲的客户制造了很多氧气和氮气冷箱。此次为中国石化扬子石油化工有限公司建造的一氧化碳冷箱是我们在规模、范围和技术上的一个新的里程碑”。

该冷箱一氧化碳年产量为 33 万 t,将用于扬子石化公司年产量 50 万 t 的醋酸工厂(位于南京)的原料。同时该冷箱还生产氢气和碳基合成气(一氧化碳和氢气的混合气体)产品,用于生产甲醇、燃料、醋酸以及其他产品。

空气产品公司将通过长江运输一氧化碳冷箱到达扬子石化公司码头,再与扬子石化公司合作再由陆路将冷箱运至其位于南京的芳烃联合装置厂区,全程共计 250 km。空气产品公司将在南京现场指导一氧化碳冷箱的安装。

空气产品公司漕泾制造工厂毗邻上海化学工业园区,连接港口和高速公路,主要生产多种设备来支持空气产品公司在大陆和台湾地区、韩国、东南亚、印度和世界其他地方的项目。该工厂是空气产品公司 3 个全球分馏塔和冷箱的生产中心之一。(常东升)