



云南民族大学学报(自然科学版)

Journal of Yunnan Minzu University(Natural Sciences Edition)

ISSN 1672-8513,CN 53-1192/N



《云南民族大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目：基于逐步回归法对钢铁企业球团工序二氧化硫的影响因素分析
作者：张静静，马林转，张运瀚，贾丽娟
收稿日期：2021-09-10
网络首发日期：2022-05-16
引用格式：张静静，马林转，张运瀚，贾丽娟. 基于逐步回归法对钢铁企业球团工序二氧化硫的影响因素分析[J/OL]. 云南民族大学学报(自然科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1192.N.20220516.1011.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于逐步回归法对钢铁企业球团工序二氧化硫的影响因素分析

张静静 马林转 张运瀚 贾丽娟

(云南民族大学 化学与环境学院 云南 昆明 650500)

摘要：文章以某钢铁企业球团工序提供的数据为基础，分析了球团矿生产过程及原料中铁精矿、煤粉、粘结剂用量、溶剂用量 4 个因素对二氧化硫排放浓度的影响，运用 SPSS 软件对各影响因素进行逐步法回归分析，建立影响球团工序中二氧化硫平衡的线性回归模型。

关键词：球团工序；SPSS 软件；逐步回归；二氧化硫平衡

Analysis of influencing factors of sulfur dioxide in pelletizing process based on stepwise regression method

ZHANG Jing-jing , MA Lin-zhuan, ZHANG Yun-han, JIA Li-juan

(School of Chemistry and Environment, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China)

Abstract: Based on the data provided by the pelletizing process of an iron and steel enterprise, this paper analyzes the influence of the pelletizing process and the consumption of iron concentrate, pulverized coal, binder and solvent on the emission concentration of sulfur dioxide. The stepwise regression analysis of each influencing factor is carried out by using SPSS software, and a linear regression model affecting the balance of sulfur dioxide in the pellet process is established.

Key words: pelletizing process; SPSS software; Gradually return; Sulfur dioxide balance

SO₂ 是大气的主要污染物之一，其排放到空气中达到一定浓度会对人体呼吸道系统产生严重危害^[1]。据统计，钢铁行业 SO₂ 的排放量约占全国 SO₂ 排放总量的 11%^[2]。钢铁生产过程中，烧结、球团、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等，均会排放出 SO₂。其中，烧结和球团工艺的 SO₂ 排放量占钢铁行业的 40%以上^[3]，和烧结相比，虽然球团工序大都规模较小，但其 SO₂ 排放量不容小觑。为了研究硫在球团工艺过程中的分布和流向，国内的专家学者通过对球团工艺的生产原料、产品、固体

收稿日期：2021-09-10.

基金项目：国家自然科学基金（51968075）。

作者简介：张静静（1998-），女，硕士研究生.主要研究方向为环境污染控制、评价及新能源的开发利用。

通信作者：马林转（1974-），女，博士，教授，硕士生导师.主要研究方向为环境污染控制、评价及新能源的开发利用。

废物、废气中的硫进行检测与分析，计算了硫平衡^[4-5]。然而，这些研究是从物料方面或通过质量守恒等传统计算方法得出硫元素的迁移转化，跟不上我国钢铁企业越来越技术化、信息化的发展步伐。迫切需要用计算机软件快速分析计算硫平衡影响因素。本研究运用 SPSS 软件中的逐步回归法探究球团工序中二氧化硫的影响因素，旨在通过信息技术的手段快速建立硫平衡继而实现二氧化硫从宏观计算到微观控制的改变。

本文以某钢铁企业提供的 2020 年 10 月—12 月球团工序烟气排放的监测数据和物料成分为依据，运用 SPSS 软件进行分析，找出变量间的相互关系，采用逐步回归法建立影响球团工序中二氧化硫平衡的线性回归模型，为后续研究整个钢铁企业生产过程中二氧化硫的平衡提供依据。

1 球团生产过程及原料成分分析

1.1 球团矿生产过程

球团矿是把原料进行人工造块的一种方法，细磨铁精矿粉后再加入粘结剂、添加剂混合均匀，随即加水润湿，通过造球机滚动成粒度均匀的生球。生球团经干燥焙烧后，固结成具有一定强度、冶金性能和高孔隙率的球形铁矿石^[6]。其生产流程如图 1 所示：

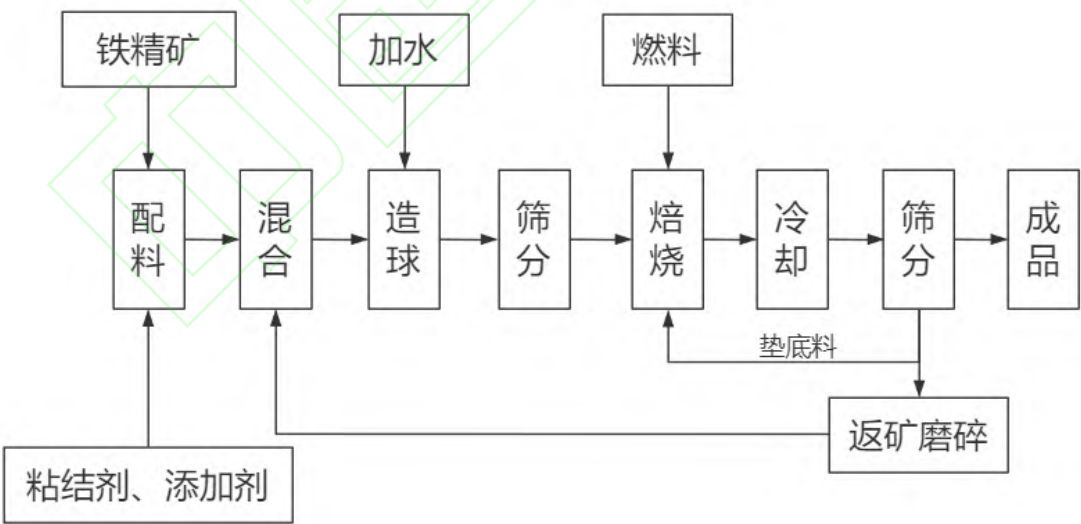


图 1 球团矿生产流程图

由图 1 可知，经过细磨和混合后，原料先在造球机中被水润湿，通过毛细管力和机械力形成球。由于颗粒之间的相互吸引和摩擦，使得生球具有一定的机械强度。然后将造球机的生球输送至筛分设备，根据不同的球径筛除返球，达标的

生球送至焙烧.生球进入焙烧室之前要在表面附着一层固体燃料，焙烧后送至冷却系统，最后，冷却球团经过筛分，分为成品矿、垫底料和返矿.垫底料直接添加到焙烧炉中，返矿再次经过磨碎后加入混料中进行造球^[7].通过相关资料查阅及生产流程图可以得出球团工艺中硫元素的带入主要源于球团原料和固体燃料.但二氧化硫的浓度具体与哪个因素有关，呈现怎样的关系，需根据原料的成分进行分析.

1.2 球团原料化学成分

球团矿的原料主要有 2 种：含铁原料、粘合剂和添加剂.煤粉作为固体燃料，为球团焙烧提供了高温环境，一般在 1200~1250℃之间^[8].本文数据来自某钢铁企业球团工序，球团原料可概括为铁精矿，熔剂，粘结剂，固体燃料 4 大类.

(1) 含铁原料

造球的原料基本上是经过选矿后的精矿.该企业使用的铁精矿可简化为矿 1、矿 2、矿 3 等 3 类，化学成分如表 1.

表 1 铁精矿化学成分/%

项目	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	P
铁精矿 1	60~65	3~5	0.2~0.5	0.04~0.07	1.2~1.5	0.01~0.015	0.08~0.15
铁精矿 2	54~60	8~11	3~4	0.1~0.3	2~2.5	0.015~0.025	1~2
铁精矿 3	62~67	6~9	0.5~0.8	0.5~1	2~2.5	0.01~0.02	0.01~0.02

(2) 粘结剂

粘结剂可以改善物料的成球性及生球、干球和焙烧球团的特性.在球团工艺过程中，粘结剂使用最多的是膨润土（皂土），该企业使用的皂土化学成分如下.

表 2 皂土化学成分/%

项目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	NaO	烧损
皂土	60±2	14±1.5	2±0.1	2.5±0.1	1.25±0.1	0.8±0.1	2.5±0.1	≤8

(3) 固体燃料

将煤粉作燃料进行球团焙烧，一定细度的煤粉被气力输送至回转窑，其燃烧反应在运动过程中完成，形成轮廓明显的火焰^[8]，化学成分如表 3.

表 3 煤粉化学成分/%

项目	水分	挥发分	灰分	S	固定碳
----	----	-----	----	---	-----

煤粉	0.2~1.3	7~11	6~12	0.3~0.7	67~78
----	---------	------	------	---------	-------

(4) 熔剂

为了改善球团矿的化学成分，特别是结渣成分，改善球团的冶金性能，降低还原粉化率和还原膨胀率等，在球团生产过程中加入熔剂^[9]，如：石灰石.其化学成分如表 4.

表 4 石灰石化学成分/%

项目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	烧失量
石灰石	0.2~10	0.2~2.5	0.1~2	45~55	0.1~2.5	36~43

2 逐步回归过程及结果分析

逐步回归分析通常用于建立最优或最合适的回归模型，以便更深入地研究变量之间的相关性^[10].根据企业提供的球团工艺的相关数据，初步分析出铁精矿、煤粉、熔剂用量、粘结剂与球团焙烧机 SO₂ 的产生浓度有关，通过逐步回归分析更加准确地模拟出了 4 个变量与 SO₂ 产生浓度之间的关系式.

2.1 回归过程

将铁精矿、煤粉、熔剂用量、粘结剂分别设定为变量 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ，SO₂ 产生浓度则设定 Y ， Y 由 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 共同决定，回归分析采用逐步回归法.逐步回归的基本思想是：在模型中逐个引入变量，引入每个解释变量后，进行 F 检验，以检验假设的因变量 Y 与总体回归方程中解释变量 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 之间的线性关系是否显著，并对已经选入的解释变量逐个进行 t 检验，用来推论差异发生的概率，以便比较 2 个平均值之间的差异是否显著.当原来引入的解释变量由于后面解释变量的引入变得不再显著时，则将其删除^[11].逐步回归分析可以揭示因变量和解释变量之间的关系中哪些变量是重要的.通过将模型的决定系数与预先设定的显著性水平进行比较，选择重要的输入变量^[12].重复这个回归过程，以确保最终的解释变量集是最优的.

2.2 回归结果与分析

本次回归采用 SPSS 26.0 首先对原始数据的相关性进行分析，然后用逐步回归分析方法建立多个模型，从中选取最优的模型来描述分析球团工序中二氧化硫的影响因素.

2.2.1 相关性分析

对因变量 Y 和所有解释变量 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 进行相关性的分析，相关分析是在回归分析中用来观察 2 个变量之间关系的一种方法^[13].相关性系数矩阵表如表 5 所示：

表 5 相关性系数表						
		Y	X_1	X_2	X_3	X_4
皮尔逊相关性	Y	1.000	0.956	0.936	0.470	0.527
	X_1	0.956	1.000	0.898	0.473	0.428
	X_2	0.936	0.898	1.000	0.617	0.586
	X_3	0.470	0.473	0.617	1.000	-0.036
	X_4	0.527	0.428	0.586	-0.036	1.000

从表 5 中可以看出因变量二氧化硫浓度与 4 个解释变量的相关性系数分别为：0.956、0.936、0.470、0.527，数据结果还显示出这 4 个因素之间有一定的多重共线性.为了得出最主要的影响因素，即可采用逐步回归法，剔除影响不显著的变量，保留影响显著的变量，获得最优的模型.

2.2.2 逐步回归分析

运用逐步回归方法对 4 个解释变量进行分析，结果见表 6.结果显示：回归分析的决定系数 $R^2=0.945$ ，说明逐步回归方程的因变量（球团焙烧机二氧化硫的产生浓度）能被自变量解释的占比为 94.5%，其他因素占 5.5%. R^2 越高，模型越适合该数据.由表 7 可知，用线性回归方法得到变量的基本回归方程，并生成 2 个模型.其最优回归方程是： $y=0.035x_1+0.034x_2-533.273$.

表 6 模型概述				
模型	R	R 方	调整后 R 方	标准估算的错误
1	0.956 ^a	0.913	0.906	159.184 90
2	0.972 ^b	0.945	0.935	132.757 33

注：a. 预测变量：(常量)、 X_1 ；b. 预测变量：(常量), X_1 , X_2

表 7 回归系数						
模型		未标准化系数		标准化系数	t	显著性
		B	标准错误			
1	(常量)	217.786	62.741		3.471	0.005
	X_1	0.057	0.005	0.956	11.242	0.000

	(常量)	-533.273	304.872		-1.749	0.108
2	X ₁	0.035	0.010	0.593	3.675	0.004
	X ₂	0.034	0.014	0.404	2.501	0.029

2.2.3 回归方程的显著性检验

通过逐步回归分析中的 F 检验检验回归方程中假设的因变量球团焙烧机二氧化硫的产生浓度与解释变量铁精矿、煤粉、熔剂用量、粘结剂的线性关系是否显著，由表 8 可知： $F=93.976$ ， $P=0.000<0.05$ 。结果表明，当显著性水平为 0.05 时，回归方程通过 F 检验，逐步回归方程 $y=0.035x_1+0.034x_2-533.273$ 具有统计学意义，即二氧化硫产生浓度与 X_1 铁精矿和 X_2 煤粉的线性回归效果显著。

表 8 方差结果分析

模型		F	P (显著性)
1	回归	126.375	0.000 ^b
	残差		
	总计		
2	回归	93.975	0.000 ^c
	残差		
	总计		

注：^b 预测变量：(常量), X_1

^c 预测变量：(常量), X_1 , X_2

最终具体分析可知：

铁精矿的回归系数值为 0.035($t=3.675$ ， $P=0.004<0.05$)，意味着铁精矿会对球团焙烧机 SO_2 的产生浓度呈正向的影响关系。

煤粉的回归系数值为 0.034($t=2.501$ ， $P=0.029<0.05$)，意味着煤粉会对球团焙烧机 SO_2 的产生浓度呈正向的影响关系。

3 结语

(1) 根据某一钢铁企业球团工艺生产数据进行了系统的硫平衡分析，其中球团焙烧机二氧化硫的产生浓度与铁精矿、煤粉、熔剂用量、粘结剂有关。

(2) 经 SPSS 相关性分析，球团矿生产过程中二氧化硫浓度变化主要与球团矿生产原料有关，且与铁精矿、煤粉、熔剂用量、粘结剂 4 个因素之间有一定的多重共线性。

(3) 逐步回归分析显示单一元素对球团焙烧机二氧化硫的产生浓度的影响权重依次是铁精矿、煤粉，熔剂用量与粘结剂用量影响不显著；回归的最终方程为 $y = 0.035x_1 + 0.034x_2 - 533.273$ ，硫主要来源于铁精矿和煤粉中硫的氧化。

(4) 采用逐步回归分析对变量之间的关系进行统计分析与建模，建立了影响二氧化硫平衡的线性回归模型，可以对许多变量进行评估以调整模型，在今后研究中能够根据实际值与模型对需要的变量做出预判。

参考文献：

- [1] VELASQUEZ H, RAMÍREZ H, DIAZ J, et al. Determination of atmospheric sulfur dioxide by ion chromatography in the city of Cabimas, Venezuela[J]. Journal of Chromatography A, 1996, 739(1-2): 295-299.
- [2] 许艳玲,杨金田,蒋春来.我国钢铁行业二氧化硫总量减排对策研究[J].环境与可持续发展,2013,38(02):30-34.
- [3] 赵凤源.烧结球团烟气脱硫工艺的研究[J].科技创新导报,2017,14(02):74-75.
- [4] 齐枫,李玉然,朱廷钰,等.球团及球团烟气的硫平衡对比研究[J].河北冶金,2019(S1):58-61.
- [5] 关少杰,张玲玲,苍大强,等.钢铁厂球团矿制备工艺硫平衡及物料对 SO_2 排放影响的研究[J].冶金能源,2018,37(01):61-64.
- [6] 球团理论与工艺[M]. 冶金工业出版社, 张一敏编著, 1997.
- [7] 铁矿球团法[M]. 冶金工业出版社,[德]梅耶尔 (Meyer K.) 著, 1986.
- [8] 张波,马立涛,胡维强,等.不同粒径煤粉的煤质分析实验研究[J].煤化工,2019,47(04):69-71.
- [9] 张汉泉.熔剂性球团的生产及发展[J].中国矿业,2009,18(04):89-92.
- [10] 游士兵,严研.逐步回归分析法及其应用[J].统计与决策,2017(14):31-35.
- [11] 张盛友,孙伟,李金鑫.基于逐步回归分析法的炉渣-水泥-全尾砂胶结充填体强度影响分析[J].硅酸盐通报,2020,39(12):3866-3873.
- [12] LEE J, KIM J, HWANG H, et al. Modeling of slag foaming height of electric arc furnace using stepwise regression analysis[J]. Metallurgical Research & Technology, 2020, 117(1): 114.
- [13] GHANI I M M, AHMAD S. Stepwise multiple regression method to forecast fish landing[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2010, 8: 549-554.