# 喷雾干燥技术基本原理与生产控制

蔡飞虎，冯国娟
（佛山市玻尔陶瓷科技有限公司，佛山 528031）

**摘　要**：本文介绍了墙地砖生产过程中的重要环节——喷雾干燥制粉工序，对喷雾干燥的原理、生产过程控制、节能减排等作了详细阐述。

**关键词**：喷雾干燥；原理；工艺参数

## 1　前　言

墙地砖生产过程包括三个重要的工序：制粉、成形与烧成。制粉是最重要也是非常关键的工序，制粉分两部分：原料的球磨和喷雾干燥。在球磨工序控制好泥浆的细度和水分后，喷雾干燥工序则决定了坯体粉料的质量，它直接影响后续工序的质量：粉料的成形性能、坯体均匀性、生坯强度等，进而影响瓷砖产品的性能。

喷雾造粒制备的粉料，一般要求满足以下性能：

（1）具有一定的水分

（2）合理的颗粒度及颗粒级配

（3）良好的流动性

（4）一定的松装密度

满足上述要求的前提下，充分发挥喷雾干燥塔的效率，达到节能减排的目的。本文根据文后所列文献，结合作者的生产实际经验，从喷雾干燥塔的结构开始，介绍喷雾干燥的工作原理，以及生产过程中的控制要点与缺陷克服措施等。

## 2　喷雾干燥塔的结构

喷雾干燥塔的结构有很多种，陶瓷厂常用的喷雾干燥塔如图1所示，它通常包括如下几部分：

（1）料浆供应系统

包括：浆池搅拌机、泥浆泵、料浆筛、输浆管道、流量计等。

作用：向雾化器供应料浆。

（2）雾化器

雾化器是喷雾干燥塔最重要的部件。它的作用是将输入的料浆雾化成微细的液滴，以便干燥。雾化器种类有很多种：旋转式雾化器、喷嘴式雾化器、组合式雾化器。不同的雾化器可以适合不同的料浆类型，提供大小均匀的雾滴。

（3）干燥塔

它是整个工艺过程的主体设备，它的主要作用是容纳雾化后的料浆液滴与热风交汇，完成干燥过程。

（4）热风系统

包括：空气加热器（热风炉）、调温冷风机、分风器、热风管道等。它的作用是为喷雾干燥塔提供热风，作为干燥介质。分风器的作用是均匀分配热风，使热风以一定的角度下旋，使料浆均匀受热。如果分风器倾斜，将导致粉料干湿严重不均。

（5）废气排放和除尘系统

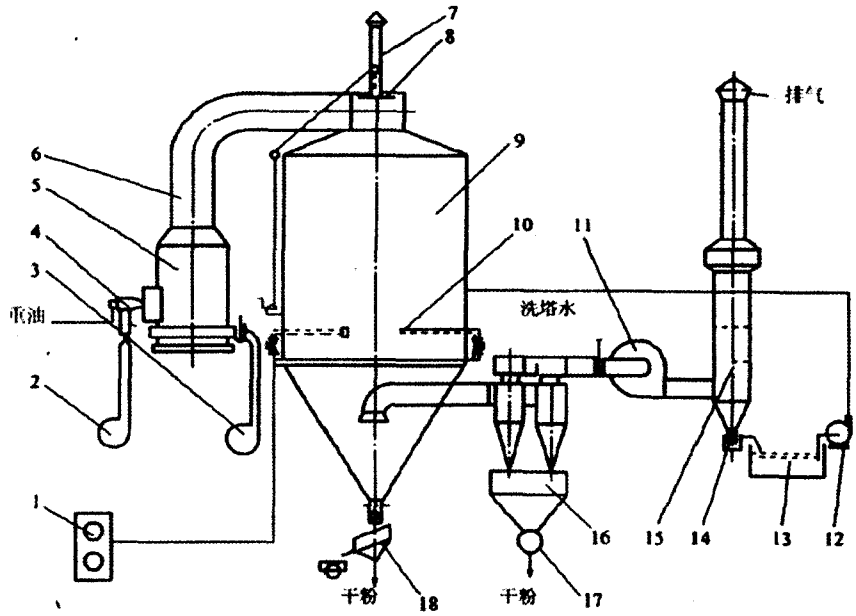
包括：除尘机、排风机、废气烟囱、脱硫机等。

作用：回收废气中的粉料，并且对废气进行处理，使之达到国家规定的排放标准，保护环境。

（6）卸料及粉料输送系统。

## 3　喷雾干燥的工艺过程

喷雾干燥一般可以分为四个阶段：




1——泥浆泵;2——雾化风机;3——调温冷风机;4——烧嘴;5——热风炉;6——热风管道;7——废气烟囱;8——升降阀门;9——干燥塔;10——压力喷嘴式雾化器;11——排风机;12——循环水泵;13——沉淀池;14——水封器;15——洗涤塔;16——旋风分离器;17——叶轮给料机;18——振动筛

图1 采用压力喷嘴式雾化器的喷雾干燥塔的主要结构[1]

(1) 泥浆雾化成雾滴

(2) 雾滴与空气接触(混合和流动)

(3) 雾滴干燥(水分蒸发)

(4) 干燥产品与空气分离

其中最重要的是雾化与干燥，直接影响产品质量。

### 3.1 泥浆的雾化

泥浆雾化即将泥浆分散为微细的雾滴。雾滴的平均直径约为150～350μm,按粉料的不同用途,确定雾滴大小。雾滴大小和均匀度对产品的质量影响很大,其中的雾化器是关键部件,将在后面专门讨论。

雾化的雾滴很细小,它的比表面积大,与热空气接触时,极易发生传质和传热,使雾滴迅速汽化干燥。

### 3.2 雾滴与空气混合

雾滴与热空气混合,取决于热空气入口和雾化器的相对位置,雾滴与热空气的接触方式分为:(1)并流式,分为向下并流、向上并流和水平并流;(2)逆流式;(3)混流式。其原理如图2所示。

#### 3.2.1 并流运动

热空气与雾滴在塔内以相同方向运动,如图2a～c所示。最热空气先与含水最高的雾滴接触,水分迅速蒸发,空气温度迅速降低。整个过程,物料温度不高,因而对热敏性物料干燥有利。由于水份蒸发迅速,雾滴容易膨胀甚至破碎,所得粉料多为非球形的多孔颗粒,粉料容重低。

#### 3.2.2 逆流运动

热空气与雾滴的运动方向相反,如图2d所示。由于热空气向上,雾滴向下,延缓了颗粒和雾滴的下降速度,在干燥室内停留时间长,有利于干燥。此方式只适用于非热敏性材料。

#### 3.2.3 混流运动

这种方式既有并流,又有逆流的运动,适合生产流动性好的粗粉,即陶瓷厂广泛使用的喷雾干燥塔类型。

混流有两种情况:

(1) 喷嘴安装在干燥塔底部，热风从顶部进入。雾滴先作逆流运动,到达最高点后下降,作并流运动。

(2) 喷嘴安装在塔的中部,物料向上喷雾,与塔顶进入的高温空气接触,使水分迅速蒸发。这种方式热效率高。雾滴先逆流运动,干燥到一定程度后,又与已经大幅降温的热空气向下并流，干燥的物料和已经降低到出口温度的空气接触，避免了物料的过热变质,

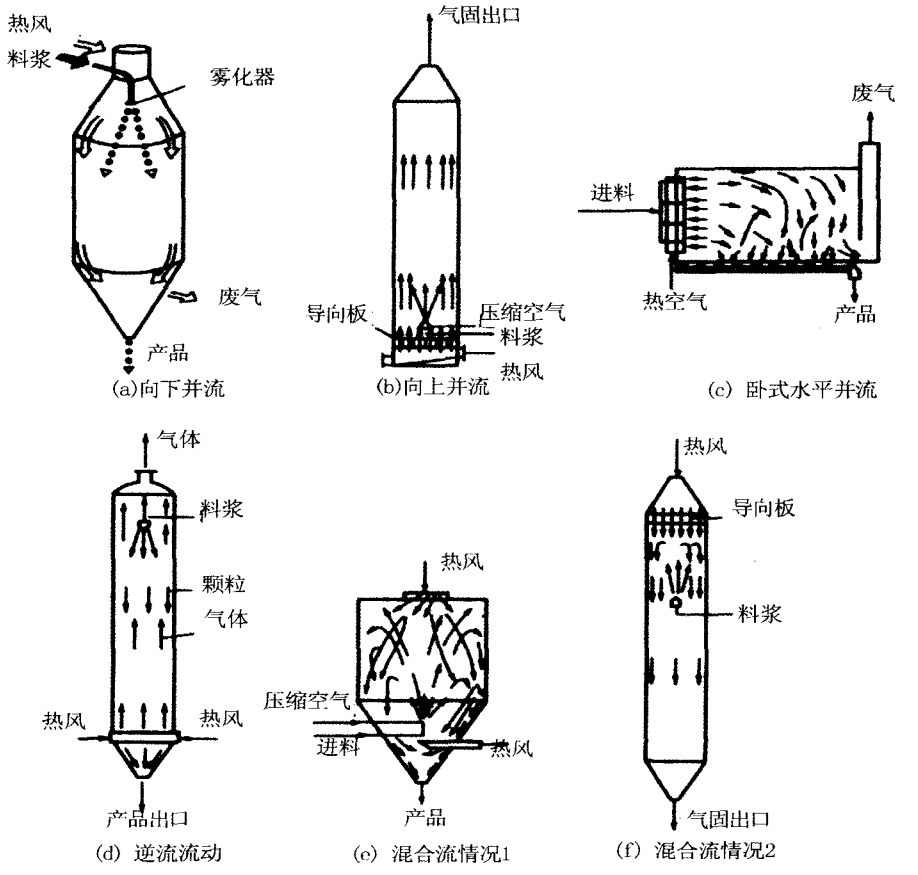



图 2 喷雾造粒系统气液两相流向示意图

适用于热敏性原料,陶瓷企业就是使用这种干燥塔。

### 3.3 雾滴的干燥

雾滴的干燥,与坯体的干燥原理相似,分为两个过程:恒速(第一阶段)和降速(第二阶段)。雾滴一遇到热空气,雾滴中的水即汽化进入到空气中。

(1) 恒速阶段:雾滴中有足够的水分,可以保持表面的湿润状态,蒸发恒速进行。

(2) 降速阶段:当雾滴水分不能保持表面的湿润状态,即到达临界点后,雾滴表面形成干壳。干壳的厚度随着时间而增加,蒸发速率也逐渐降低。

(3) 干燥时间。雾滴干燥所需的时间,决定了喷雾干燥塔的高度。对于固定的喷雾干燥塔,干燥时间还与产品的组成有关。要对不同的产品,进行不同的操作。例如,微粉砖坯体的底料、面料成分不同,制粉操作时应有所区别。

(4) 喷雾干燥过程

喷雾干燥过程如图 3 所示。

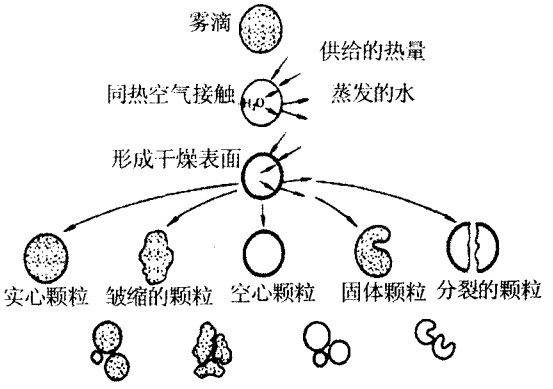



图 3 喷雾干燥过程中雾滴干燥示意图

## 4 雾化器的种类和特点[2]

雾化器是喷雾干燥塔的核心,有以下三种类型:气流式雾化器、旋转式雾化器和压力式雾化器。目前陶瓷行业广泛使用的是压力式雾化器。

### 4.1 气流式雾化器

采用压缩空气以很高的速度（300m/s 或更高）从喷嘴喷出，利用气液二相的速度差产生的摩擦力，使液滴分裂为雾滴。雾滴大小取决于相对速度和料液的粘度。料雾的分散度取决于气体的喷射速度、料液的物理性质、雾化器的几何尺寸、气液量之比。陶瓷厂辊道窑的烧油喷嘴即是一种气流式雾化器。

**4.2 旋转式雾化器**

料液从中心输入到高速旋转（圆周速度达 90～140m/s）的转轮或转盘，然后在轮或盘的表面加速流向边缘，在离开边缘时分散成由微细的雾滴组成的料雾。甩釉机就是一种旋转式雾化器。

特点：可以通过控制轮的转速调节颗粒的大小。平均粒度与进料速度、料液粘度成正比，与转轮速度和转轮半径成反比。

**4.3 压力式雾化器**

料浆用泵以较高压力沿切线槽进入旋流室，在旋流室内，料浆高速旋转，形成近似的自由涡流。在压力作用下，料液从小孔喷出，形成锥形料雾。

由于压力式雾化器中，料浆的压力达到 2MPa 以上，很容量磨损喷嘴材料，尤其是喷嘴孔板，因此，喷嘴孔板一般采用硬质合金。

4.3.1 雾锥形状

压力式喷嘴产生的料雾，有两种形状：实心雾锥和空心雾锥（如图 4 所示）。在生产中，应尽量形成实心雾锥。

实心雾锥：干燥空气与雾锥全面接触，干燥均匀。并且，实心雾锥可以使雾滴在干燥塔中心位置到达行程的最高点。实心锥喷雾适合先逆流后并流的喷雾干燥系统，可以有效减少粘壁现象，其含有较大比例的大液滴。

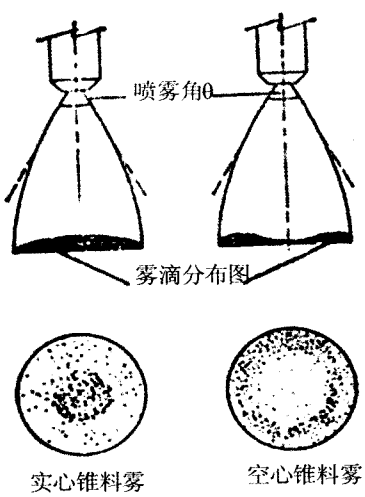



图 4　雾锥形象示意图

空心雾锥：颗粒偏小，产量低，容易形成粘壁料，严重影响喷雾干燥粉料的质量。空心锥喷雾特别适合并流喷雾干燥系统。

空心雾锥与实心雾锥可以相互转换。旋流室中，当轴向液体速度分量增大，足以抵消旋转运动时，空气芯消失，空心锥喷雾变为实心锥喷雾。所以旋流室和旋流片的尺寸很重要，对此后面将专门讨论。

4.3.2 喷雾角

喷雾角也称雾化角，是压力式喷嘴的重要参数。下面的一些因素会对雾化角产生影响。

（1）压力对雾化角的影响

压力增大，雾化角变小。

（2）粘度对雾化角的影响

粘度增大，雾化角缩小。粘度很大的液体，将变成一条射束，难以雾化。

（3）雾化角与喷嘴流量的关系

雾化角与喷嘴流量呈反比例关系，雾化角越大，喷嘴流量越小。

（4）雾化角对粉料质量的影响

雾化角过大，整个雾化面偏低，易粘塔壁，且不能有效利用塔顶部热空气均匀分布的优势。雾化角过小，雾化面增高，料浆可能射向塔顶，也会造成粘塔。两种情况都会产生较多的塔壁料，严重影响粉料质量。

## 5　雾滴粒径的影响因素

雾滴粒径的大小，直接影响喷雾干燥粉料颗粒的大小和分布。雾滴粒度的大小，与雾化器的运行参数密切相关，此外还与泥浆的性能相关，如粘度等。生产中要根据产品种类的不同需要，确定喷雾干燥的各项参数。

**5.1 运行参数对雾滴尺寸的影响**

（1）压力对雾滴粒度的影响

压力增大，雾滴减小。雾滴粒度与压力的 -0.3 次方成比例。在很高压力下，压力的变化对雾滴粒度无明显影响。

（2）粘度对粒度的影响

粉料的粒度与泥浆粘度的 0.17～0.2 次方成比

例，提高料浆粘度，将产生粗颗粒的雾滴。当粘度很大时，不能用压力喷嘴雾化。

生产过程中，适当控制和稳定泥浆的流动性，可以控制喷雾料的颗粒大小。例如，生产色斑耐磨砖，为增加着色效果，色粒要大，这就要调大色料浆的粘度，有需要时加 CMC。为了改善坯体成形时的排气效果，可以适当提高喷雾干燥粉料的粒径，也可通过提高泥浆的粘度来实现。

(3) 喷嘴孔径对雾滴粒径的影响

在其他参数不变时，雾滴尺寸随喷嘴直径的平方而增加。这一因素影响非常大，生产中常用此法调节粒径，按照粉料的不同用途，配置不同的喷嘴口径。

### 5.2 雾滴的粒径分布

压力喷嘴获得的粒径范围较宽，粒径分布决定于喷嘴尺寸、操作压力和料液条件。粒径的分布范围，要根据压机的成形要求来进行调节[16]。

## 6 热风炉[1,14]

陶瓷厂使用的热风炉，根据燃料不同，主要有四种加热设备：

(1) 重油炉

(2) 水煤气炉

(3) 水煤浆炉

(4) 链排炉

每种炉各有特点，张润禄[14]的文章中详细介绍了各种燃煤热风炉。

### 6.1 重油炉

生产过程中，对重油热风炉，主要控制以下几方面：

(1) 重油过筛，把渣子去除；

(2) 油温温度控制，温度过低，影响燃烧；

(3) 控制烧嘴结焦。

抛光砖中的黑点，有很多就是由于重油结焦引起的。

### 6.2 水煤气炉

(1) 冷煤气

正常使用，效果很好。

(2) 热煤气

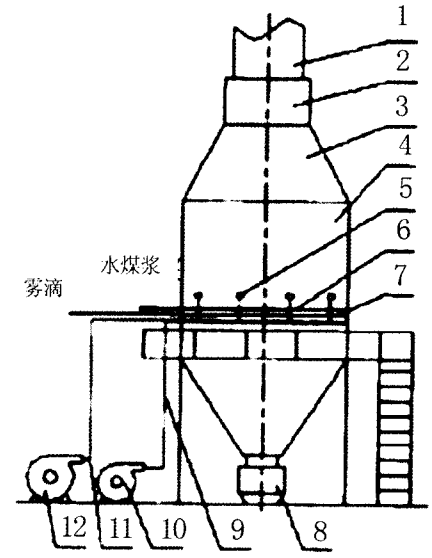
热煤气中的煤粉含量高，会影响抛光砖的质量，因而不主张使用，但对有釉产品的影响稍小一些。

### 6.3 水煤浆炉

(1) 水煤浆的要求

水煤浆由 70%的煤、29%的水和 1%的添加剂组成。其煤质要求如下：热值大于 6500 大卡；杂质含量小于 10%；挥发分大于 30%。水煤浆要求静止 24h 后只能有少量沉淀。

使用水煤浆的优点是可以充分利用把酚水及煤焦油等污染物，减少环境污染。水煤浆旋风热风炉示意图见图 5。




1——热风管道；2——配风室；3——除尘室；4——炉膛；5——喷嘴；6——水煤浆管；7——输油管道；8——出渣器；9——阻燃风管；10——阻燃风机；11——雾化风管；12——雾化风机

图 5 水煤浆旋风燃烧炉示意图

(2) 特点

优点：操作简单、燃烧效率高。

缺点：

1) 建造成本高；

2) 点火要烧油，备有燃油系统，结构复杂；

3) 水煤浆喷嘴易堵塞和磨损；

4) 炉膛易结焦，混入粉料中，影响产品质量；

5) 自身含有 30%水分，影响热效率。

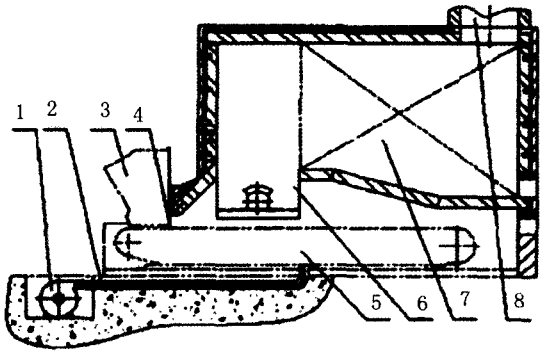
### 6.4 链排炉

链排炉全称为链条炉排热风炉，其结构示意图如图 6 所示。

(1) 优点

1) 直接燃烧原煤，结构简单、供热稳定、自动化程度高；

2) 可以把制水煤气的酚水、煤焦油一起加入烧




1——助燃风机;2——助燃风管;3——煤斗;4——煤闸门;
5——炉排;6——炉膛;7——除尘室;8——热风管道

图6 链排炉结构示意图

掉,解决环保问题。

(2) 缺点

1) 燃烧效率较低,约75%左右;

2) 如果灰分熔点低,则易结焦;

3) 煤粉易混入粉料中,影响产品的质量。

经改进后的链排炉效果很好,能把抛光砖中的杂质控制在0.5%以下。广东某抛光砖厂使用改进后的链排炉,生产成本比水煤浆炉低很多,而杂质率在0.5%以下。

## 7 影响粉料质量的工艺参数

### 7.1 选择合适的雾化角,保证料浆充分雾化

由前面的讨论可知,雾化角过大或过小都会产生粘壁料,影响粉料的流动性和成形性能。

若雾化不均,有较大液滴存在,此液滴干燥相对较慢,在运动过程中会形成许多孪生颗粒;若颗粒较大,来不及干燥而导致粘壁的可能性显著增大。另外,粉料颗粒粗细不均匀,分布不合理等,均会影响粉料的流动性。生产中,雾化角还要与旋流室的高度合理配合。

下面以蒸发量为200kg/h的喷雾干燥塔为例,探讨雾化角的合理调配。

#### 7.1.1 雾化器喷嘴孔径与旋流室合理组合

喷嘴片孔径与旋流室高度对雾化角的影响如图7所示(泵压为2MPa)。图中,斜直线代表喷嘴片孔径,曲线代表雾化角等值线。结论:旋流室高度减少、喷嘴片孔径增大,使雾化角增大。反之,雾化角减少。

#### 7.1.2 雾化器与泵压的合理组合

旋流室高度与泵压的关系如图8所示。图中的参

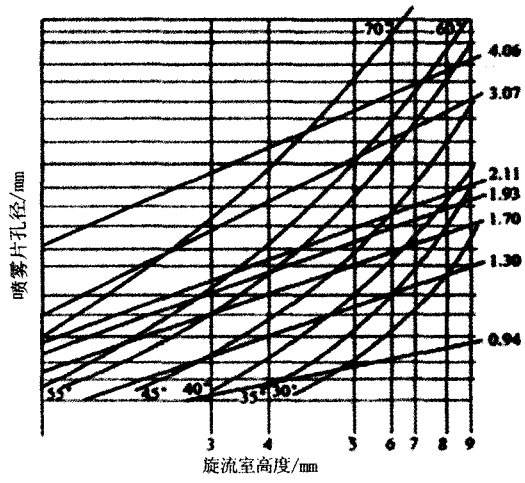



图7 雾化角与旋流室高度、喷嘴片孔径之间的关系

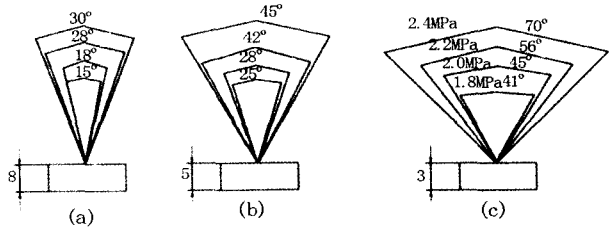



图8 泥浆压力与旋流室高度对雾化角的影响

数是在孔径1.0mm的条件下测定的。固定泵压1.8MPa,调节旋流室高度由8mm、5mm到3mm,同时,调节泵压由1.8MPa到2.0、2.2、2.4MPa,分别测量雾化角的变化。结果如图8(a)、(b)、(c)所示。

图中压力一定时,雾化角随旋流室高度的减小而增大,反之亦然;旋流室高度一定时,雾化角随压力的增大而增大,反之亦然。

因此,为保证充分稳定雾化,必须:

(1) 泵压不能太低;

(2) 泵压要稳定;

(3) 防止泥浆搅拌过程中产生湍流或大量旋涡,否则会降低泥浆流动性,使泥浆不易雾化。

### 7.2 粒度分布的影响因素[5,8]

王晓兰等人[5]系统研究了影响喷雾干燥各项参数对粒度分布的影响,他们的试验条件是:2500型喷雾干燥塔、1700t自动压机。所用泥浆的基本参数如下:

比重:1.45~1.55g/mL

含水率:36.2%

粘度:18.5s

细度:万孔筛小于 1%

7.2.1 泥浆含水率对粉料粒度分布的影响

泥浆粘度为 18s,喷雾压力 1MPa,喷片孔径 1.5～1.8mm,改变泥浆含水率,测得粉料的粒径分布如表 1 所示。

从表 1 可见,在其他条件不变的情况下,随着泥浆水分的增加,粉料中的细粉比例增加,成形排气困难。水分越低,大颗粒越多,越利于成形。所以试验配方时,要让料浆水分尽量低。

7.2.2 泥浆粘度对粉料粒度分布的影响

泥浆水分 36%,喷雾压力 1MPa,喷片孔径 1.5～1.8mm,改变泥浆粘度,测得粉料的粒径分布如表 2 所示。

从表 2 可见,泥浆粘度大,粉料中粗颗粒就相应多一些;泥浆粘度小,粉料中细颗粒就相应多一些。生产中,泥浆粘度过大,容易造成塞枪;粘度过小,容易导致粘塔和塌壁料产生,所以,要适当控制泥浆粘度。

7.2.3 泥浆压力对粉料粒度分布的影响

泥浆水分 36%,喷雾压力 1MPa,喷片孔径 1.5～1.8mm,改变泥浆压力,测得粉料的粒径分布如表 3 所示。

泥浆压力越大,粉料中细颗粒所占比例越大;泥浆压力越小, 粉料中粗颗粒所占比例逐渐增多。压力过低,喷雾干燥塔制粉能力下降,制粉成本大幅度上升。泥浆压力过大,则会导致泥浆雾化不好,部分泥浆可能碰到塔壁。因此,要根据工厂的喷雾干燥塔的大小,确定泥浆的压力,同时要考虑压机所需的粉料颗粒级配。

7.2.4 喷片孔径对粉料粒度分布的影响

泥浆水分 36%,喷雾压力 1MPa,改变喷片孔径,测得粉料的粒径分布如表 4 所示。从表 4 可见,喷片孔

表 1 泥浆含水率变化对粉料粒度分布的影响

| 含水率(%) | 粒度(目) | | | | | 成形效果 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | <20 | 20～40 | 40～60 | 60～80 | >80 | |
| 34 | 2.4 | 13.1 | 24.7 | 31.9 | 27.9 | 中等 |
| 36 | 2.1 | 12 | 21.5 | 34.3 | 30 | 中等 |
| 38 | 1.3 | 9.8 | 10.5 | 39.5 | 32.1 | 差 |
| 40 | 0.5 | 8.3 | 20.1 | 40.7 | 30.4 | 差 |

表 2 泥浆粘度变化对粉料粒度分布的影响

| 粘度(s) | 粒度(目) | | | | | 成形效果 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | <20 | 20～40 | 40～60 | 60～80 | >80 | |
| 16 | 1.4 | 10.2 | 23.7 | 38.7 | 25.8 | 差 |
| 18 | 2.3 | 12.9 | 25.3 | 31.9 | 27.5 | 中 |
| 20 | 4.7 | 18.4 | 28.6 | 29.8 | 18.6 | 良 |
| 22 | 9.1 | 21.3 | 37 | 22.6 | 9.9 | 良 |

表 3 泥浆压力变化对粉料粒度分布的影响

| 压力(MPa) | 粒度(目) | | | | | 成形效果 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | <20 | 20～40 | 40～60 | 60～80 | >80 | |
| 1.2 | 0.9 | 8.9 | 19.7 | 37.3 | 33.1 | 差 |
| 1.0 | 2.6 | 13.1 | 24.6 | 33.8 | 25.9 | 中 |
| 0.8 | 5.8 | 18.7 | 31.6 | 24.9 | 18 | 良 |
| 0.6 | 15.2 | 30.7 | 30.7 | 17.3 | 7.9 | 优 |

表 4 喷片孔径变化对粉料粒度分布的影响

| 孔径(mm) | 粒度(目) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | <20 | 20～40 | 40～60 | 60～80 | >80 | 成形效果 |
| 2.2 | 8.1 | 27.8 | 26.3 | 25.8 | 12.1 | 差 |
| 2.4 | 10.7 | 30.4 | 28 | 22.6 | 8.4 | 中 |
| 2.6 | 13.8 | 25.2 | 27.5 | 16.9 | 6.5 | 良 |
| 2.8 | 15.4 | 26.1 | 23.6 | 17.7 | 7.2 | 良 |

径的增大显著改变粉料的粒径分布,随孔径增大,粉料中粗颗粒所占比例明显增大,适合成形的粉料比例由 80%～90%提高到 92%以上。因此,要增加大颗粒的含量和喷雾干燥塔的产量,增大孔径为最有效快捷的方法。

7.2.5 几种因素的比较

比较上面几种影响因素,对粉料粒度分布影响的大小关系为:喷片孔径>喷雾压力>泥浆粘度>泥浆含水率。

## 7.3 粉料的流动性

7.3.1 粉料流动性的作用

粉料的流动性反映了压机成形时粉料均匀填满模具的能力。粉料流动性好,能使压制成形布料时颗粒间的内摩擦力减小,粉料能在较短的时间内均匀地填满模具的各个角落,以保证坯体的致密度和加压速度。因此,粉料的流动性直接影响压机的成形情况及产品的表面质量。

7.3.2 测试方法

粉料流动性的测定方法如下:用直径 30mm、高 50mm的圆筒放在玻璃板或瓷板上,将坯料装满刮平。然后提起圆筒,让粉料自然流散开来,再测量料堆的高度 H(mm)。

粉料的流动性 f=50-H(mm)。H 的值越小,粉料的流动性越大,粉料越容易填满模具。

各种制粉方式获得的粉料流动性如下:

离心雾化的粉料流动性为:31～33s;

压力雾化的粉料流动性为:32.5～35s;

轮碾打粉的粉料流动性为:25～26s。

简易测试方法,直接用涂 4 杯装一杯粉料,看能否自动流完,能流完则流动性好,反之流动性差。

7.3.3 粉料流动性的影响因素

(1) 粉料的颗粒级配

粉料中细粉过多时,严重影响流动性。

(2) 颗粒的球形度

球形和椭球形的粉料流动性相对较好。选择合适的添加剂,对喷雾干燥的粉料形状影响很大。

(3) 粉料的强度

粉料在输送过程中挤压受力,如果颗粒的强度不够,会导致颗粒破碎,细粉增加,粉料的流动性就差。在坯体配方中添加 CMC 或坯体增强剂,可以提高颗粒的强度。

(4) 避免形成空心颗粒,因空心颗粒容易破碎成小颗粒。

## 7.4 粘壁料产生的原因和解决措施[6、15]

7.4.1 粘壁问题

粘壁是指被干燥的物料粘附在喷雾干燥塔的内壁上,这是喷雾干燥塔操作中的一个大难点,有时粘壁料的厚度达到 10～15cm。有的喷雾干燥塔因设计或操作不当,产生严重粘壁,甚至使喷雾干燥塔不能正常投入使用。粘壁会产生如下问题:

(1) 粘壁后的粉料由于长时间停留在内壁上,有可能被烧焦或变质,在抛光砖中产生色点。

(2) 粘壁后的粉料进入产品中,使粉料水分不合格;结块的粉料使产品产生鸡爪裂。

(3) 影响能耗。很多的粘壁料(塌壁料)要回池重喷。

(4) 有的喷雾干燥塔要中途停止运行,才能清除粘壁料,影响喷雾干燥塔的产量。

粘壁可分为三种类型:半湿物料粘壁、干粉表面吸附、低熔点物料的热熔性粘壁。陶瓷企业最常见的是半湿物料粘壁,低熔物很少产生。下面简要分析半湿物料粘壁现象的产生原因与对应的解决办法。

7.4.2 粘壁料的产生原因[15]

概括起来有以下一些原因：

(1) 泥浆振动筛损坏，大颗粒泥浆通过柱塞泵进入喷枪，堵塞喷片造成不能雾化或雾化效果差，泥浆在塔中不能很快干燥，造成粘壁。

(2) 喷枪中的喷片过度磨损，没有及时更换，造成雾化效果差，导致粘壁。喷嘴孔因磨损不圆时，产生的雾锥就不对称，这时易产生粘壁现象。

(3) 进风温度过低，雾化的泥浆不能迅速干燥，造成粘壁。

(4) 塔门处和喷枪处没有严格密封，冷风进入塔内，造成局部温度下降过多，导致粘壁。塔下锥翻板下料器漏风，导致塔下锥处粘壁。

(5) 喷枪安装不正，喷头斜向上喷泥浆，直接喷到塔壁处，导致粘壁。喷枪长时间使用后造成变形，也会导致粘壁。

(6) 分风器设计不合理，塔内热风温度不均，温度低的地方会造成粘壁。

(7) 塔体保温效果差，也会造成粘壁。

(8) 塔内负压过大，未来得及完全干燥的物料被风机抽下，造成粘壁。

(9) 柱塞泵压力波动过大，也容易造成粘壁。

总结起来，温度过低、喷枪堵塞和磨损是造成粘壁的主要原因。生产过程中应根据喷雾干燥塔的实际运行情况，找到问题的根源，有针对性地予以解决。

### 7.5 粉料水分

粉料的水分对压机的成形有很大影响。要根据成形工序的要求来确定粉料的水分。注意水分的测试方法和标准必须统一，成形工序和制粉工序的测量标准要一致。

粉料水分的调节主要依靠调整进风温度和泥浆泵压力。注意废气温度变化时，可能表明粉料的水分有所波动。

### 7.6 粉料中的杂质

使用水煤浆、煤粉、重油等作燃料，都有可能结焦，在粉料中产生黑点，要定期抽查。例如：每 4h 取喷雾干燥粉料 5kg，用 120 目筛淘洗，观察筛余，根据筛余中的黑粒，及时检查热风炉情况。根据筛余，还可以知道振动筛是否有损坏，是否有高温塌壁料。

还有一种检测方法，对测试粉料中的煤灰类杂质很有帮助。分别抽取泥浆池浆料和喷雾干燥后的粉料，检测其高温灼烧量。如果喷雾干燥后的烧失量增加，则意味着喷雾干燥过程中有可燃性杂质混入，要检查热风炉的燃烧情况。抛光砖的变形有些正是由于粉料中混入过多的煤粉或煤灰引起的。

## 8 喷雾干燥的节能措施

为提高喷雾干燥塔的能效，蔡祖光[11]研究了喷雾干燥塔的各项数据，通过实验得出节能降耗的七条措施。

(1) 提高热风的进塔温度

在离塔温度不变的情况下，热风的进塔温度越高，传递给泥浆雾滴的热量越多，单位热风蒸发的水分越多。在生产能力恒定的情况下，所需热风量减少(即减少了热风离塔时带走的热量)，降低了喷雾干燥制粉的热量消耗。

(2) 降低热风的离塔温度

在热风的进塔温度恒定不变的情况下，降低热风的离塔温度，可以减少热风离塔时所带走的热量，能最大限度地利用热风的热量来干燥泥浆雾滴。

(3) 增大进塔热风与离塔热风之间的温度差

通过提高热风的进塔温度或降低热风的离塔温度，增大进塔热风与离塔热风之间的温度差，充分利用热风的热量蒸发泥浆雾滴的水分，以达到提高喷雾干燥塔的热效率、降低能耗的目的。

(4) 降低陶瓷泥浆的含水率

陶瓷泥浆流动性好、易于雾化，可有效缩短喷雾干燥时间、提高生产效率。在陶瓷泥浆中添加适宜的减水剂，可降低泥浆的含水率。

(5) 提高陶瓷泥浆的温度

通过提高泥浆的温度，能有效降低泥浆的粘度，改善泥浆的雾化性能及预防泥浆堵塞雾化器等。泥浆的温度提高后，泥浆在喷雾干燥塔内不需预热就能直接蒸发水分，降低了喷雾干燥制粉的热量消耗。

(6) 循环利用部分离塔热风(废气)

陶瓷泥浆经喷雾干燥制粉后，离塔热风(废气)通常经除尘后直接排入大气中，这样大约损失喷雾干燥制粉生产工序总热量消耗的 10%～20%；当离塔热风(废气)的温度较高时，其热量损失就更大。实

际测试表明，若热风离塔温度高于100℃时，采用部分废气循环利用技术（如循环利用50%的废气），喷雾干燥器可以节约15%左右的燃料消耗。

（7）利用热交换器回收废气余热

利用余热交换器，可以显著节省能源。板式换热器的散热面积大、换热效率高，目前国内外喷雾干燥塔通常利用空气－液体－空气型板式换热器回收废气余热。

## 9 废气治理

喷雾干燥的废气治理，主要是粉尘和二氧化硫的去除。粉尘主要采用旋风分离除尘、布袋除尘。脱硫主要采用脱硫剂，如石灰（CaO）和纯碱（$Na_2CO_3$）。石灰浆与废气中的$SO_2$反应：

$$Ca(OH)_2+SO_2=CaSO_3+H_2O \quad (1)$$

在氧化气氛中，部分$CaSO_3$转变为$CaSO_4$，产生的$CaSO_4$和$CaSO_3$沉淀物经压滤后，作为废物填埋。

还有一种方法，在泥浆中添加纯碱，喷雾干燥时，碱液与热风中的$SO_2$发生中和反应而将$SO_2$从废气中脱除，脱硫产物与大部分粉料一起由排料器排出。

采用纯碱脱硫的反应[13]如下

$$Na_2CO_3+SO_2=Na_2SO_3\downarrow+CO_2\uparrow \quad (2)$$

在高温、碱性条件下，上述反应瞬间完成，产物$Na_2SO_3$在高温有氧条件下迅速氧化为$Na_2SO_4$，同时被还原成$Na_2S$。

$$4Na_2SO_3(\text{有氧环境下加热})=3Na_2SO_4+Na_2S \quad (3)$$

$Na_2SO_4$和$Na_2S$比较稳定，熔点分别为884℃和1180℃，一般条件下不发生分解。

纯碱本身就是良好的减水剂，使用纯碱作为脱硫剂，一举两得，经济效果显著。产生的反应产物$Na_2SO_4$和$Na_2S$可以留在坯体中，不必专门处理。佛山西樵某公司的4000型喷雾干燥塔，使用该技术后脱硫效果良好。

使用该方法时要注意以下问题

（1）严格控制泥浆的pH值。泥浆的pH值必须控制在10以上，方可获得最佳的脱硫效果。

（2）根据燃料的含硫量，计算出泥浆中纯碱的加入量。

（3）注意纯碱若转化为$NaHCO_3$，将严重影响各种效果，因此应注意包装袋的密封性。

（4）$Na_2SO_4$和$Na_2S$对产品有多大影响还未有定论。

**参考文献**


[1] 曾令可. 陶瓷工业实用干燥技术与应用[M]. 化学工业出版社，2008.

[2] 王喜忠. 喷雾干燥[M]. 化学工业出版社，2003.

[3] K·马斯托思，黄照柏. 喷雾干燥手册[M]. 中国建筑工业出版社，1983.

[4] 刘勇，童申勇，张祥. 粉料对压制成形的影响[J]. 现代技术陶瓷，2003，24(4)：35.

[5] 王晓兰，刘智刚. 喷雾干燥粉料粒度分布的影响因素探讨[J]. 佛山陶瓷，2001，7.

[6] 杨光华，傅朝毅. 喷雾干燥机的故障树分析[J]. 中国陶瓷工业，1996，3(4)：21.

[7] 张润录. 雾干燥塔节能降耗途径探索[J]. 陶瓷，2005，3.

[8] 康智勇. 压力式喷雾干燥塔喷嘴孔径对粉料的影响[J]. 佛山陶瓷，2001，6.

[9] 王志辉. 墙地砖生产过程中喷雾干燥的工艺控制及节能[J]. 中国建材装备，1999，5.

[10] 贾玉宝. 水煤浆技术在陶瓷工业中的应用[J]. 陶瓷，2003，5.

[11] 蔡祖光. 喷雾干燥塔的节能措施[J]. 佛山陶瓷，2004，9.

[12] 刘兴国. 喷雾干燥塔的节能方法[J]. 佛山陶瓷，2004，11.

[13] 谭建文，唐灿坚，吴建勋. 陶瓷厂喷雾干燥塔废气治理技术研究[J]. 环境与可持续发展，2006，2.

[14] 张润录. 喷雾干燥四种燃煤热风炉的比较[J]. 陶瓷，2005，4.

[15] 康智勇. 喷雾干燥器粘壁产生的原因[J]. 中国陶瓷，2007，(43)1.

[16] 蔡飞虎，冯国娟. 实用墙地砖生产技术[J]. 佛山陶瓷，2003.