

超细粉的充填计量技术综述

周丹¹, 王利强^{1,2}, 卢立新^{1,2}, 徐立敏³, 方先其³

(1.江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

3.江苏创新包装科技有限公司, 江苏 扬州 225600)

摘要: **目的** 综述超细粉充填计量相关技术的研究进展, 为进一步研究开发超细粉充填计量包装机械提供科学研究基础。**方法** 通过对国内外研究现状和研究成果进行分析和总结, 介绍超细粉的性质, 概括超细粉体的充填计量包装过程相关工艺技术以及超细粉充填计量过程中影响充填效果的因素, 并对超细粉充填计量新技术及其发展趋势进行总结。**结果** 超细粉体的充填计量机械与普通粉体类似, 使用容积式、称量式计量机械, 称量式计量是市场主流; 超细粉体机械化包装中急需解决的3个方面技术难题是环境污染、包装精度、包装速度。**结论** 超细粉体充填计量机械的清洁化、精确化和高速化是超细粉体机械化包装的发展趋势。

关键词: 超细粉; 充填计量; 称重式; 包装精度; 包装速度

中图分类号: TS04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)17-0159-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.023

Review of Filling and Metering Technology of Superfine Powder

ZHOU Dan¹, WANG Li-qiang^{1,2}, LU Li-xin^{1,2}, XU Li-min³, FANG Xian-qi³

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China;

3.Jiangsu Innovative Packaging Technology Co., Ltd., Yangzhou 225600, China)

ABSTRACT: The work aims to review the research progress of relevant superfine powder filling and metering technology to provide scientific research basis for further research and development of superfine powder filling and metering packaging machinery. Through the analysis and summary of the present research situation and research results at home and abroad, the superfine powder's properties were introduced, the relevant technology of filling, metering and packaging process of superfine powder and the factors affecting the filling effect in the filling and metering process of superfine powder were generalized, and the new filling and metering technology of superfine powder and its development trend were summarized. The filling and metering machinery of superfine powder was similar to that of the ordinary powder. Volumetric and weighing type metering machines were used. Weighing type metering was the mainstream in the market. Three technical problems to be solved urgently in superfine powder mechanical packaging were environmental pollution, packaging precision and packaging speed. Cleaning, precision and high speed of superfine powder filling and metering machinery are the development trends of superfine powder mechanical packaging.

收稿日期: 2019-03-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (JUSRP21115); 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主资助基金 (FMZ201902)

作者简介: 周丹 (1995—), 女, 江南大学硕士生, 主攻包装工艺与机械。

通信作者: 王利强 (1977—), 男, 博士, 江南大学教授, 主要研究方向为包装机械与技术,

KEY WORDS: superfine powder; filling and metering; weighing type; packaging accuracy; packaging speed

自 20 世纪 80 年代以来,随着科技的发展,超细粉体制备技术作为一门新兴学科在国内得以飞速发展。超细粉体具有异于其原固体材料的体积效应及表面效应^[1],其在光学、力学、电学和磁学等方面展现出的优异特性,拓展了新功能复合材料的应用发展前景,并迅速地被应用于国民经济的各个领域^[2-4]。

根据其粒径的大小,超细粉体可分为微米粉体、亚微米粉体和纳米粉体。粒径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的粉体称为微米粉体,粒径处于 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 之间的粉体称为亚微米粉体,粒径处于 $0.001\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间的粉体称为纳米粉体^[5]。由于超细粉体具有极小的粒径,在对其进行包装的过程中易发生多种问题,因此相对飞速发展的超细粉体制备技术,超细粉体的包装技术发展尤显缓慢。1989 年,毋啟中对超细粉的小袋自动化包装进行了研究^[6],指出粉体的粒径是影响超细粉小袋自动化包装的重要因素,并提出了超细粉体机械化包装中急需解决的 3 个方面的技术难题:环境污染、包装精度以及包装速度。在机械化包装中,超细粉合理的充填计量方法是解决上述几大难题的关键,文中综述超细粉体充填计量包装过程的相关工艺技术以及超细粉充填计量过程中影响充填效果的因素,并对超细粉充填计量新技术及其发展趋势进行总结。

1 超细粉体的充填计量包装技术

1.1 超细粉的容积式充填技术

容积式充填法^[7]是把精确容积的物料装进每一个容器,该类充填机每次计量质量取决于每次充填的体积与充填物料的密度。由于容积式充填装置的计量速度快、成本较低、结构简单,且不需要附加称量装置,因此在超细粉包装技术发展初期应用较为广泛。

超细粉容积式充填技术中螺杆式定容装置应用最广,螺杆式定容装置利用螺杆螺旋槽的容腔来计量物料。在超细粉的容积定量过程中,通过控制螺杆转动圈数完成固定容积的充填,从而实现固定质量(质量=容积×密度)的充填。

在螺杆定量充填的研究中,张加林^[8]介绍了粉末物料的基本物性,以及在进行充填螺杆设计时针对不同的物料特性,提出了需要注意的问题,并介绍了粉

料充填中螺杆设计的几种方法,提及了粉料输送过程的防静电设计;高鹏^[9]结合粉末物料的物性,对用于粉料定量充填螺杆的充填机理以及螺杆充填的实际与理论功率进行了研究,建立了螺杆充填效率与螺杆几何参数和螺杆转速之间的关系式;李振亮、付长江等^[10]对定量螺旋给料机的工作原理、结构设计特点等进行了详细说明,指明了螺旋定量给料机在完成流动性较差物料的自动定量包装中具有明显优势,同时系统地分析了螺旋下料过程中,由于物料流量不均匀进而影响充填精度的脉动现象,并提出了在螺旋出料口处加设无螺旋空筒或设计双螺旋出料口的解决方案;郝友莉^[11]针对粉体物料含气的特点,为解决包装容器利用率低的问题,提出了一种用于密实粉体物料的变螺距螺杆设计方案;江西广源化工有限责任公司^[12]研发的超细粉体自动计量装置采用了可自动计量的传输螺杆来实现超细粉的充填计量;贵州博典建材公司^[13]开发的粉体添加剂螺旋输送装置,结合齿片计数盘,螺杆输送及 PLC 控制系统,通过计数盘的计数确定输出粉料剂量,并通过 PLC 控制螺杆的转动和停止完成送料。

柱塞式、气流式、插管式等容积定量的方式虽在颗粒状物料及普通粉料中皆有应用,但在超细粉料的定量包装中鲜有报道。

1.2 超细粉的称量式充填技术

容积式定量充填的精度受充填物料视密度影响,因此更适用于物料粒径均匀、视密度稳定、自流动性较好且价格相对便宜的物料充填计量^[14]。超细粉体极小的粒径与极轻的质量使其视密度易受物料种类及环境影响进而产生较大变化,同时其黏附性、流动性以及对称量精度的要求都导致了单纯的使用容积式计量已经不能满足生产实际需求,故称量式充填计量方式是当前超细粉行业完成定量包装的主流方式。

称量式定量^[7]是通过称量来完成对充填物料的定量,虽然其结构相对复杂、成本更高、充填速度慢于容积式定量,但充填精度更高。在超细粉的称量计量过程中,各类型电子秤及称量传感器应用较为广泛^[15-16]。超细粉体结合气吹、泵送、螺杆等^[17]供送充填方式充填进入包装容器,由电子秤或称量传感器获得相应质量信号,再将获得的质量信号反馈至充填控制系统完成定量过程。

在称量定量充填的研究应用中,德国 HaverBoecker 公司^[18]研发了一种用于精细物料敞口袋充填的包装机。该机特点是使用超压进行物料充填,使物料能够快速充填进包装,再用空气安全阀进行物料脱氧处理。日本理光有限公司^[19]研发了一种装置,其可使粉末以最小气体量流化,气吹将粉末充填进容器,容器中引入粉末带入的气体会通过喷嘴和口之间的结构释放,可实现粉末的密集充填。锐派包装技术(上海)有限公司^[20]研发了一种可用于轻质粉料包装的泵送式阀口袋包装机,该机的特点在于使用隔膜泵上端入料,下端出料并与截止阀相连来完成物料充填,其工作精度高、能耗低,适用于轻质粉料的包装。苏州国衡机电有限公司^[21]研发了一种包含有进料装置、送料装置、灌料装置、压紧装置、称量装置、推袋装置的超细粉全自动阀口袋包装机,该机的特点在于通过调节送料装置螺旋转子的大小和直径来控制送料的速度,改变了进料速度完全由电机转速控制的情况,适用于超细粉料、颗粒状物料的充填,具有结构简单、维修方便、送料速度可控制的优点。罗和建^[22]研发的粉体智能散装仓计量装置使用了智能微电脑失重计量技术,采用叠加进料检测、采样,进料静态预计量,终端减量静态计量,提高了计量精度。

2 超细粉包装过程中充填计量技术发展趋势

2.1 充填计量过程的清洁化

超细粉物料粒径小、质量轻,在其充填计量过程中极易悬浮于空气,造成环境污染,威胁作业工人的身体健康。同时,金属类超细粉体材料包装生产中易因“尘逸”导电造成电子产品爆炸等后果难以估计的事故,因此,超细粉清洁化包装,是超细粉充填计量技术发展的必然趋势。针对超细粉充填计量过程中的粉尘污染问题,相关企业采用了充填计量环境密闭和真空处理的技术。美国半散装系统公司^[23]采用了封闭系统使包装容器顶部开口在粉料灌装期间密封地固定在灌装头上,并在灌装头外接负压除尘系统避免了粉尘的飞扬。山东青州微粉有限公司^[24]研发了一种用于碳化硅微粉成品的包装机械,该机的特点是使用真空泵以及吸料管在密封机壳内由真空泵吸料管吸取物料,然后通过物料推进器完成物料的充填,整个充填过程在封闭状态下完成,既降低了物料消耗,又降低了环境污染,还减少了对现场作业工人的健康威

胁。法国的 Robert, Henri^[25]为解决在使用敞口袋包装粉状物料时,袋口易沾染粉末物料进而影响后续封合工艺的问题,研发了一种用于粉状物料充填的包装机,其特点在于物料经由充填管进行充填,其充填出料口伸进袋内,包装袋口被紧紧密封于出料管之上以避免物料的沾染。安徽远鸿机械自动化有限公司^[26]以及上海陆达包装机械有限公司^[27]针对超细粉料包装过程中粉尘悬浮于空气而延长灌装时间、降低包装袋空间利用率的问题对超细粉充填过程的抱袋升降机构进行了设计,其设计的关键在于使用升降抱/提袋机构在超细粉的充填过程中,始终保持包装袋口紧贴于下料口,并将袋动态提升以减少物料与包装袋的落差,确保灌装过程中物料不与空气过多接触,减少超细粉料的悬浮扬尘出现。

2.2 充填计量过程的精确化

超细粉物料的综合成本相对较高,如何减少超细粉物料在包装过程中的浪费、提高其包装精度是企业的实际需求。超细粉物料的包装精度关键在于充填计量的精度,其精度提高的方法主要分为3种类型。

1) 超细粉的称量装置——电子秤,称量传感器及其配套称量器械本身称量精度的提高。Yamato 技术^[28]开发的 ADw—S1H01S 型自动定量装料秤采用无级调速、鸭嘴颚板式夹袋机构及单双弧面双气缸的出料闸门处理等方式提高了其包装精度。苏州国衡机电有限公司^[29]研发的用于敞口袋的包装机称量装置,包含秤支架以及称量传感器,秤支架一端为带有秤砣以及微调秤砣的秤杆,另一端与物料出料嘴相连并连有称量传感器,装置可完成对敞口袋的准确称量,提高称量精度。南京中大建材设备制造有限公司^[30]研发了适用于超细粉阀口袋包装的称量计量机构,该机构特点在于传感器为单点传感器,可根据称量机构选择安装数量,解决了传统弹性传感器因摆动而造成较大计量误差的问题,其结构简单、制造方便、适用范围广。

2) 设计超细粉充填的过程以提高计量精度。英国的 Bates International Bag 公司^[31]于1940年在粉料供送充填过程中加入搅拌装置,使物料搅拌更为均匀,随后再进行充填计量以提高计量精度。上海陆达包装机械有限公司^[27]研发的新型超细粉包装机,通过加压缩物料使其顺利排出,并将加料分为粗加料和精补料2个过程以提高充填精度。德国 HaverBoecker 公司^[18]的超细粉料包装机在充填管道上装有剪刀阀,可降低充填后段的充填速度,用变速充填来提高充填

计量的精度。河南中联节能工程有限公司^[32]开发了一种粉体物料计量控制装置,其在储料仓下料口处设有同步稳流装置,保证了粉体物料流的稳定性,进而使计量更准确。

3) 优化充填计量机械结构设计,提高计量精度。郑州长城机器制造公司^[33]开发的粉末定量上料系统在使用搅拌机搅拌物料的同时,设置有可用于搅拌机的非接触隔振导通下料口,粉料称量装置独立于一个支架,保证了搅拌产生的振动不会对称量的精度产生影响。赵翠莲等^[34]就无轴和有轴 2 种螺旋粉料输送装置的粉料传送精度,运用 EDEM 离散元软件仿真分析以及实验验证进行对比,结果表明有轴螺旋输送装置的送料稳定性优于无轴螺旋输送,即其送料精度较高。王国军等^[35]针对流动性差、易结块的精细化工原料对螺旋给料的方式进行了研究,开发了大、小双螺旋的给料螺旋机构,并使用变频器控制小螺杆转速,提高计量精度。

2.3 充填计量过程的高速化

超细粉物料由于其独特的物性,充填包装速度一直相对较低,提高包装充填速度是超细粉生产企业实现规模化生产的重要需求。充填计量装置作为超细粉包装机的关键设备,提高充填计量的速度是充填计量技术发展的必然要求。充填计量速度的提高,主要通过以下 4 种途径。

1) 改善超细粉物料的流动性,提高充填速度。俄罗斯的 Kopylov^[36]以及天津工业大学的宋国治、于长清等^[37]都通过增加搅拌扇叶并提高搅拌速度的方式来增加物料的流动性,使其能更快速地实现充填,进而提高充填效率。

2) 降低超细粉物料的含气量,保证其更顺利的充填。周怡、周海南^[38]在超细粉包装机的给料控制器上装设真空装置对物料进行抽气处理,解决了超细粉料含气量大不利于灌装的问题,提高了包装效率;王浩先、王宝琨^[39]对用于粉料阀口袋包装机的自动排气装置进行了研发,自动排气装置设置于进料嘴,进料口为圆孔,出料口为斜切口,靠近出料口上端倾斜设置有气粉分离板,板上设置有排气管,排气管另一端与压缩气源连通形成排气管路,降低了阀口袋内气压,使物料得以顺利灌装;中山市华明泰化工材料科技有限公司^[40]使用动静压缩套桶完成了物料的供送充填,其设计的关键是超细粉物料称量之后通过进料口落入压缩静桶,在气缸作用下,压缩动桶向上压缩排除空气,再打开压缩动桶上截止阀进行出料,完成物料充填,这种设计使用了高于传统包装机

的压力,所以拥有更高的气体逸散能力,其效率高、操作方便;江苏创新包装有限公司^[41]开发了上下双螺杆密实排气的超细粉充填装置,超细粉料在上下双螺杆的供送充填过程中通过压缩比进行压缩排气,使物料更顺利地充填。

3) 加入中间储料装置,缩短下料充填时间提高充填计量速度。天津工业大学的宋国治、于长清等^[37]对包装机粉剂物料下料传动系统进行了研发设计,其中包括储料仓、搅拌电机、搅拌扇叶和下料充储泵,其特点在于使用下料储存泵,缩短下料充填时间提高包装速度。

4) 增加充填以及称量工位提升充填计量速度。英国学者^[42]研发了一种旋转式粉料阀口袋包装机,其特点在于采用了多个灌装头灌装及旋转称量,以提高包装效率;江苏创新包装有限公司^[43]开发了双工位的超细粉阀口袋包装机,实现了双工位的超细粉充填计量,提高了包装速度。

3 超细粉充填计量效果的影响因素

超细粉充填计量的影响因素主要有以下几方面。

1) 超细粉物性本身的影响^[44],与超细粉的粒径、视密度、粘性和流动性等基本物性相关。一般来说,超细粉的粒径越小^[45],就越具有扬尘悬浮性。视密度越小,粘性越大,流动性越差的超细粉体其充填计量精度更难以控制。

2) 充填计量工艺过程的影响^[46]。通常来说,称量式计量方式的计量精度高于容积式计量,计量速度低于容积式定量。此外,在供送充填的过程中进行搅拌振动^[47]或者抽气等工艺处理,对充填称量定量的过程实行反馈式闭环的控制都有助于提升超细粉包装充填计量的质量。

3) 充填计量装置本身机械结构的影响^[48]。螺杆式充填螺杆自身的机械参数、称量式器械本身的结构参数^[49]等都会对超细粉的充填计量过程和效果产生影响。

4 超细粉体材料充填计量过程的研究

由于计算流体力学、离散元分析等软件的发展,人们结合超细粉体充填计量机械结构开始研究超细粉体充填计量过程的状态,并建立了相关模型表示超细粉体充填计量过程的包装速度、包装精度和扬尘量等参数,以得到最佳机械设计参数。

王培敬^[50]基于粉尘沉降对提高粉状物料的包装速度进行探讨时,提出了粉末颗粒的半径以及密度会影响粉尘沉降速度,包装袋内的空气阻力会导致粉尘云产生的观点。

张桂芹、刘泽常等^[51]为研究物料下落过程中随机粉尘的产生特性,在实验室开发并设计了一套自由下落装置,并根据实验数据建立了空气湿度及质量流量与粉尘产生率之间的数学模型,用以定量评价不同质量流量下及不同空气湿度下的粉尘产生率。

叶涛^[52]对粉体颗粒的气固多相流数值模拟模型进行了总结,包含有连续介质模型、离散颗粒模型和流体拟颗粒模型,并介绍了 Fluent 软件中的相关模型,指出了 Fluent 在粉体颗粒混合领域中潜在的应用前景,利用该软件可以获得在实验室中较难以测定和描述的流场规律。

高鹏^[53]基于计算流体力学理论,为粉料螺杆计量充填设计提供了方法,借助 Fluent 软件对粉末物料的螺杆旋转充填内部流场进行了模拟,对比发现模拟所得的粉末颗粒在螺杆内部螺旋槽的速度方向分布与通过对单个颗粒建立数学模型分析所得的速度方向有区别。

樊航^[54]对自由下落颗粒流卷吸空气量以及颗粒运动的特性进行了研究。研究发现,空气速度在不同下料口径、不同颗粒粒径、不同颗粒密度条件下的变化趋势相同;下料口径越大、颗粒粒径及密度越小,卷吸空气量越大。

冯彬彬、唐正宁^[55]研究了粉体材料在不同充填高度下引起扬尘的规律。研究基于气固耦合的机理,分析了粉体在充填过程中与空气之间的相互作用,并利用 Fluent 软件进行模拟,确定了粉体充填过程中最小扬尘的高度。

Hemeon^[56]建立了静止空气中的单个粒子在重力作用下下降时所卷吸空气量模型。模型基于以下假设:静止空气中,由静止加速到末速度的下落粒子所受阻力所做的功等于将卷吸空气加速到末速度所需要的功。

基于 Hemeon 的假设,其模型计算所得到的卷吸空气量会远高于实际经验所测得的卷吸空气量,这是因为模型是基于单个粒子建立的,实际上粒子流间相互作用会使空气的卷吸量降低,因此,Tooker 等^[57]提出需要在此模型上加入经验修正参数。Cooper^[58]提出了 2 种分析自由下落粒子柱行为的极端模型。

1) 第 1 种极端情况是大量的粒子从料斗中掉落,假设所有的粒子以重力常数 g 加速。

2) 第 2 种情况是大型粒子流(约 $500\ \mu\text{m}$)采用

含固体颗粒的自由湍流气体流动的涡团法研究,该方法采用拉格朗日法同时计算涡流单元的行为、气场离散化和粒子运动。

Glutz^[59]通过相关实验研究比较了 Hemeon 和 Cooper 提出的理论模型,发现 Cooper 提出的羽流理论模型更适用于粒子下落时卷吸空气量的计算。基于以上研究,Liu^[60]开发了一个两相流模型,用其描述自由下落粒子流的连续性、粒子动量通量和空气动量通量特征。该模型的不足在于模型计算依赖通过拟合实验确定的卷吸常数 α 模型。

为避免对卷吸常数的依赖,Ansart 等^[61]建立了一个新的描述自由下落粒子动力学的两相流模型。该模型不依赖于卷吸常数,很好地描述了料斗出口颗粒体积分数的影响,并且在小落差高度下得到了比较理想的预测结果。

Klippel 等^[62]对筒仓装料过程中的粉尘浓度测量及超过爆炸下限的装料过程进行了 CFD 模拟研究。模拟过程使用两种充填方式,气动输送顶部填充及加压空气,使用 8 个同样的喷嘴均匀喷射充填,模拟结果表明气动输送顶部的填充方式重现性更差。

Rani 等^[63]用 CFD 模拟分析筒仓轴流充填过程中粉尘的分布,对粉尘爆炸的可能性进行评估,并与实验数据进行对比,具有很好的一致性。研究中表明了粉尘浓度受平均流速和湍流流动的影响。

5 结语

超细粉体技术虽发展于 20 世纪八九十年代,但相应的包装自动化技术一度难以跟进,手工粗放式的充填计量包装体系是当时的主流包装方式,以至当前国内仍有少许的超细粉加工企业采用较为原始的包装手段。21 世纪初,为迎合市场需求、人工成本的上升以及环保政策的要求,普通粉料颗粒料所使用的螺杆式容积定量机构因其充填计量速度快,开始应用于超细粉的半自动化包装。随着企业的扩大化生产,容积式计量的精度已经不能满足实际生产需求,称量式计量逐渐替代了容积定量,成为市场主流。同时,为进一步提高计量的精度以及速度,超细粉的供送充填方式、称量计量系统成为了研究热点,称量式定量与气吹、螺杆等多种供送充填方式的结合技术在当前实际应用中较为广泛,结合机械结构参数、计算机模拟技术是超细粉充填计量技术研究中经常使用的方法。近十年来,为响应国家政策,超细粉清洁化、全自动化包装成为超细粉充填计量技术发展的新方向。

虽然超细粉充填计量过程的清洁化、精确化和高速化是当前学术界和工业界研究的热点,但针对不同超细粉体自身物性进行的研究及结合物料特性对其充填计量机械进行优化设计的研究较少。考虑不同物料特性,并对机械结构参数进行微调以实现更好的超细粉包装是超细粉充填计量技术研究的一个新趋势。同时,在超细粉全自动化包装的进程中,实现整机的模块化设计,使各工位模块间可独立使用亦可对接成整机使用,是利于超细粉生产企业和包装机械企业发展的新趋势。随着工业 4.0 改革的深入,利用互联网技术搭建一个虚拟的中心管理平台,对超细粉包装机的运行参数实现远程在线采集、诊断和预警,可以有效提高包装机械生产企业及使用企业的管理效率,互联网的融入是智能化发展的要求,也是超细粉充填计量技术发展的必然趋势。

参考文献:

- [1] 铁生年, 李星. 超细粉体表面改性研究进展[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(2): 16—21.
TIE Sheng-nian, LI Xing. Progress in Surface Modification of Ultrafine Powders[J]. Journal of Qinghai University (Natural Science Edition), 2010, 28(2): 16—21.
- [2] 毋伟, 陈建峰, 卢寿慈. 超细粉体表面修饰[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
WU Wei, CHEN Jian-feng, LU Shou-ci. Ultrafine Powder Surface Modification[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] 铁生年, 李星, 李昀珺. 超细粉体材料的制备技术及应用[J]. 中国粉体技术, 2009, 15(3): 68—72.
TIE Sheng-nian, LI Xing, LI Yun-jun. Preparation Technology and Application of Ultrafine Powder Materials[J]. Chinese Powder Technology, 2009, 15(3): 68—72.
- [4] 房永广, 梁志诚, 彭会清. 超细粉体材料的制备技术现状及应用形势[J]. 化工矿物与加工, 2005, 34(3): 34—36.
FANG Yong-guang, LIANG Zhi-cheng, PENG Hui-qing. The Present Situation of Preparation Technology and Application Situation of Ultrafine Powder Materials[J]. Chemical Minerals and Processing, 2005, 34(3): 34—36.
- [5] 李凤生. 超细粉体技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
LI Feng-sheng. Ultrafine Powder Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [6] 毋敏中. 超细粉体小袋自动包装[J]. 包装工程, 1989, 10(4): 40—43.
WU Qi-zhong. Automatic Packaging of Ultra-fine Powder Bags[J]. Packaging Engineering, 1989, 10(4): 40—43.
- [7] 卢立新. 包装机械概论[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.
LU Li-xin. An Introduction to Packaging Machinery[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2011.
- [8] 张加林, 李荣兰. 粉末物料的螺旋输送与充填[C]//中国西部农产品加工及产业化发展战略研讨会, 2001: 355—360.
ZHANG Jia-lin, LI Rong-lan. Seminar on Spiral Transport and Filling of Powder Materials[C]// Strategies for the Development of Agricultural Products Processing and Industrialization in Western China, 2001: 355—360.
- [9] 高鹏, 周一届. 螺杆式粉料计量包装机粉料流动分析与数值仿真[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 79—82.
GAO Peng, ZHOU Yi-jie. Powder Flow Analysis and Numerical Simulation of Screw Powder Metering Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 79—82.
- [10] 李振亮, 付长江, 李亚. 定量螺旋给料机的结构研究[J]. 盐业与化工, 2010, 39(1): 27—29.
LI Zhen-liang, FU Chang-jiang, LI Ya. Structural Study of Quantitative Spiral Feeder[J]. Salt Industry and Chemical Industry, 2010, 39(1): 27—29.
- [11] 郝友莉, 唐正宁, 季婷婷. 粉体包装机密实输送螺杆的设计[J]. 轻工机械, 2017, 35(5): 12—15.
HAO You-li, TANG Zheng-ning, JI Ting-ting. Design of Confidential Conveying Screw for Powder Packaging[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(5): 12—15.
- [12] 黄磊, 李海滨, 宋建强, 等. 一种超细粉体自动计量包装装置: 中国, 201520699749X[P]. 2016-01-06.
HUANG Lei, LI Hai-bin, SONG Jian-qiang, et al. An Automatic Metering and Packaging Device for Ultra-fine Powder: CN, 201520699749X[P]. 2016-01-06.
- [13] 谢怀宇. 粉体添加剂螺旋计量输送方法: 中国, 102674023A[P]. 2012-09-19.
XIE Huai-yu. Spiral-metering Conveying Method of Powder Additive: CN, 102674023A[P]. 2012-09-19.
- [14] 张西良, 毛翠云. 固体物料定量充填技术综述[J]. 包装工程, 2002, 23(5): 18—20.
ZHANG Xi-liang, MAO Cui-yun. Summary of Quantitative Filling Technology for Solid Materials[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 18—20.

- [15] 郭彩守, 宋旭, 吴雪莹. 定量给料机和微粉称在矿山充填中的实践与应用[J]. 采矿技术, 2015(3): 19—21.
GUO Cai-shou, SONG Xu, WU Xue-ying. Practice and Application of Quantitative Feeder and Micro Powder Scale in Mine Filling[J]. Mining Technology, 2015(3): 19—21.
- [16] 李宇. PLC 在粉体物料动态计量领域中的应用[J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2008(1): 55—57.
LI Bei. Application of PLC in Dynamic Measurement of Powder Materials[J]. Programmable Controller and Factory Automation, 2008(1): 55—57.
- [17] 宫跃文. 机电一体化粉体精密计量装置及控制系统的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2005.
GONG Yue-wen. Research on Precise Metering Device and Control System of Mechatronics Powder[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2005.
- [18] MARK W. Packing Machine and Method for Filling Open Sacks: US, 9650161B2[P]. 2017-05-16.
- [19] KUNIO M, HIROSATO A. Powder Packing Method and Apparatus Therefor: US, 6679301B2[P]. 2004-01-20.
- [20] 邹浩波. 一种泵送式阀口袋包装机: 中国, 104859875A[P]. 2015-08-26.
ZOU Hao-bo. A Pumping Valve Pocket Packaging Machine: CN, 104859875A[P]. 2015-08-26.
- [21] 特雷弗·贝利. 全自动阀口袋包装机: 中国, 103496454A[P]. 2014-01-08.
BAILEY T. Automatic Valve Pocket Packer: CN, 103496454A[P]. 2014-01-08.
- [22] 罗和建. 一种粉体智能散装仓计量装置: 中国, 202631073U[P]. 2012-12-26.
LUO He-jian. A Metering Device for Powder Intelligent Bulk Storage: CN, 202631073U[P]. 2012-12-26.
- [23] CHARLES S. Closed System and Container for Dust Free Loading and Unloading of Powdered Materials: US, 4182386A[P]. 1980-01-08.
- [24] ZHANG H F. Silicon Carbide Micro Powder Finished Product Packaging Machine: CN, 103213708A[P]. 2013-07-24.
- [25] ROBERT C, HENRI J. Bag Filling Machine for Pulverulent Materials: EP, 0001025B1[P]. 1981-12-30.
- [26] GU W J, WANG X X, ZUO T. Ultrafine Powder Heavy Bag Packaging Machine: CN, 103523284A[P]. 2014-01-22.
- [27] XU M, CAI X L, XU J, et al. Novel Ultrafine-powder Packing Machine: CN, 103921964A[P]. 2014-07-16.
- [28] 陈日兴. 粉体计量电子秤在化工粉体工程中的最新应用[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2002(3): 29—31.
CHEN Ri-xing. The Latest Application of Electronic Scale for Powder Measurement in Chemical Powder Engineering[J]. Sulfur and Phosphorus Design and Powder Engineering, 2002(3): 29—31.
- [29] 特雷弗·贝利. 一种敞口袋包装机的称重装置: 中国, 103482095A[P]. 2014-01-01.
BAILEY T. A Weighing Device for An Open-pocket Packer: CN, 103482095A[P]. 2014-01-01.
- [30] 徐忠奎, 刘冬宝, 许德荣. 阀口袋包装机用称重机构: 中国, 2771102Y[P]. 2006-04-12.
XU Zhong-kui, LIU Dong-bao, XU De-rong. Weighing Mechanism for Valve Pocket Packing Machine: CN, 2771102Y[P]. 2006-04-12.
- [31] BATES I B. Improvements in Machines for Filling Valved Bags with Cement or Like Powdered Material: GB, 518929A[P]. 1940-03-12.
- [32] 王明生, 甘爱均, 甘露, 等. 粉体物料计量控制装置: 中国, 203877541U[P]. 2014-10-15.
WANG Ming-sheng, GAN Ai-jun, GAN Lu, et al. Measurement and Control Device for Powder Material: CN, 203877541U[P]. 2014-10-15.
- [33] 蒲强军, 张中凯, 张金玉. 粉料定量上料系统: 中国, 103707416A[P]. 2014-04-09.
PU Qiang-jun, ZHANG Zhong-kai, ZHANG Jin-yu. Powder Quantitative Feeding System: CN, 103707416A[P]. 2014-04-09.
- [34] 赵翠莲, 张坤峰, 李博宇, 等. 两种螺旋输送装置的粉料传送精度分析[J]. 机械设计与制造, 2016(3): 18—21.
ZHAO Cui-lian, ZHANG Kun-feng, LI Bo-yu, et al. Analysis of Powder Conveying Accuracy of Two Kinds of Screw Conveyors[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2016(3): 18—21.
- [35] 王国军. 螺旋给料在粉体定量计量中的应用[J]. 中国粉体工业, 2013(2): 11—14.
WANG Guo-jun. Application of Spiral Feeding in Powder Quantitative Measurement[J]. China Powder Industry, 2013(2): 11—14.
- [36] KOPYLOV J V, KOPYLOV D J V. Device for Packing Loose Materials in Valve Bags: RU, 2120891C1[P]. 1998-10-27.
- [37] SONG G Z, YU C Q, LIU M Z, et al. Powder Material Discharging Transmission System for Intermittent Packing Machine: CN, 202574694U[P]. 2012-12-05.
- [38] ZHOU Y, ZHOU H N. Ultrafine Powder Packing Machine: CN, 203410635U[P]. 2014-01-29.
- [39] 王浩先, 王宝琨. 一种阀口袋包装机自动排气装置及阀口袋包装机: 中国, 207225724U[P]. 2018-04-13.

- WANG Hao-xian, WANG Bao-kun. An Automatic Exhaust Device and Valve Pocket Packing Machine for Valve Pocket Packing Machine: CN, 207225724U[P]. 2018-04-13.
- [40] ZHOU M S, ZHANG H M, WANG H, et al. Compression Type Quantitative Packing Machine of Super Micropowder Light Powder and Packing Method Thereof: CN, 101850856B[P]. 2012-07-04.
- [41] 方先其. 一种抽气式给料螺旋: 中国, 102120524A[P]. 2011-07-13.
FANG Xian-qi. A Kind of Suction Feeding Screw: CN, 102120524A[P]. 2011-07-13.
- [42] MIDDELBOEI K. Process and Apparatus for Packing Definite Quantities by Weight of Pulverous Material: GB, 346985A[P]. 1931-04-23.
- [43] 方先其. 江苏创新包装攻克钛白粉等粘性粉体包装难题[J]. 中国粉体工业, 2017(2): 49.
FANG Xian-qi. Jiangsu Innovative Packaging Overcomes the Sticky Powder Packaging Problem Such as Titanium Dioxide[J]. China Powder Industry, 2017(2): 49.
- [44] 冯彬彬. 粉体装袋扬尘的动态研究及除尘优化[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
FENG Bin-bin. Dynamic Study and Dust Removal Optimization of Powder Bagging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [45] 张正德. 粒级对粉体流动性及下料特性的影响[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
ZHANG Zheng-de. Effects of Grain Size on Powder Fluidity and Feeding Characteristics[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015.
- [46] 高德. 包装机械设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
GAO De. Packaging Machinery Design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [47] 章波, 冯怡, 徐德生, 等. 粉体流动性的研究及其在中药制剂中的应用[J]. 中成药, 2008, 30(6): 904—907.
ZHANG Bo, FENG Yi, XU De-sheng, et al. Study on Powder Fluidity and Its Application in Traditional Chinese Medicine Preparation[J]. Chinese Patent Medicine, 2008, 30(6): 904—907.
- [48] 张昱生. 自动定量充填机控制系统研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
ZHANG Yu-sheng. Research on the Control System of Automatic Quantitative Filling Machine[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [49] 杨瑞姣. 粉体物料动态计量设备浅析[J]. 衡器, 2010, 39(11): 37—38.
YANG Rui-jiao. Analysis of Dynamic Metering Equipment for Powder Materials[J]. Weighing Apparatus, 2010, 39(11): 37—38.
- [50] 王培敬. 从粉尘的沉降探讨提高粉状物料的包装速度——采用聚乙烯薄膜进行包装[J]. 中国包装, 1986(4): 7—8.
WANG Pei-jing. Discussion on Improving the Packing Speed of Powdery Material from the Deposition of Dust-Packing with Polyethylene Film[J]. China Packing, 1986(4): 7—8.
- [51] 张桂芹, 刘泽常. 物料下落过程中随机性粉尘的产生特性及其数学模型[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2008, 39(1): 114—118.
ZHANG Gui-qin, LIU Ze-chang. Generation Characteristics and Mathematical Model of Random Dust during Material Falling[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2008, 39(1): 114—118.
- [52] 叶涛. FLUENT 软件在粉体颗粒混合领域中的应用[J]. 中国粉体技术, 2009, 15(3): 73—76.
YE Tao. Application of FLUENT Software in the Field of Powder-particle Mixing[J]. China Powder Technology, 2009, 15(3): 73—76.
- [53] 高鹏, 周一届. 螺杆式粉料计量包装机粉料流动分析与数值仿真[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 79—82.
GAO Peng, ZHOU Yi-jie. Powder Flow Analysis and Numerical Simulation of Screw Powder Metering Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 79—82.
- [54] 樊航. 自由下落颗粒流卷吸空气量及颗粒运动特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
FAN Hang. Study on the Entrainment Air Volume and Particle Motion Characteristics of Free Falling Particle Flow[D]. Xi'an: Xi'an University of Architectural Science and Technology, 2015.
- [55] 冯彬彬, 唐正宁. 粉体在袋装充填过程中的扬尘规律[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 105—109.
FENG Bin-bin, TANG Zheng-ning. Dust-raising Law of Powder in Bag Filling Process[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 105—109.
- [56] PINEY M. Hemeon's Plant and Process Ventilation, Third Edition[J]. Annals of Occupational Hygiene, 2001, 45(2): 167—168.
- [57] PWYPYCH P, COOK D, COOPER P. Controlling Dust Emissions and Explosion Hazards in Powder Handling Plants[J]. Chemical Engineering & Processing Process

- Intensification, 2005, 44(2): 323—326.
- [58] COOPER P, ARNOLD P C. Air Entrainment and Dust Generation from a Falling Stream of Bulk Material[J]. Kona, 1995, 13: 125—134.
- [59] GIUTZ A. Air Entrainment in Falling Streams of Material[D]. Wulungong City: University of Wollongong, 1995.
- [60] LIU Z Q. Air Entrainment in Free Falling Bulk Materials[D]. Wulungong City: University of Wollongong, 2001.
- [61] ANSART R, RYCK A D, DODDS J A, et al. Dust Emission by Powder Handling: Comparison Between Numerical Analysis and Experimental Results[J]. Powder Technology, 2009, 190(1): 274—281.
- [62] KLIPPEL A, SCHMIDT M, MUECKE O, et al. Dust Concentration Measurements During Filling of a Silo and CFD Modeling of Filling Processes Regarding Exceeding the Lower Explosion Limit[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29(1): 122—137.
- [63] RANI S I, AZIZ B A, GIMBUN J. Analysis of Dust Distribution in Silo During Axial Filling Using Computational Fluid Dynamics: Assessment on Dust Explosion Likelihood[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 96: 14—21.