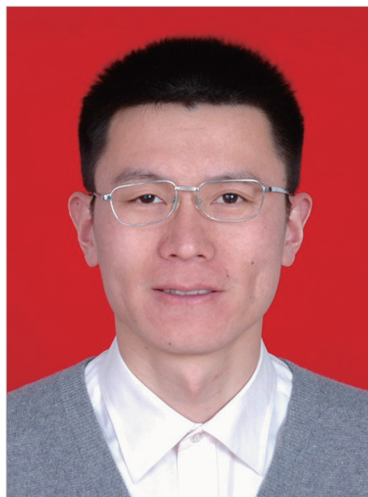


# 激光熔覆同步送粉器的研究现状

## Research Status of Powder Feeder for Laser Cladding

浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部 / 浙江省重点实验室  
浙江工业大学激光加工技术工程研究中心

胡晓冬 马磊 罗铨



胡晓冬

博士,副教授,硕士生导师。1997年7月毕业于西安交通大学锻压工艺及设备专业,获工学学士学位。2003年毕业于西安交通大学机械工程专业,获工学博士学位。自2003年起一直在浙江工业大学机械制造学科从事特种加工技术与装备领域的教学、研究工作。近年来主持浙江省自然科学基金项目1项,浙江省教育厅项目1项,参加国家自然科学基金项目2项、浙江省科技厅项目2项。发表国际国内论文30余篇,主编教材1部,获授权专利5项。

随着激光熔覆技术的快速发展,送粉器作为熔覆设备的核心元件之一,也得到了广泛的研究。目前,国内外对送粉器的研制目标是将送粉器工作时的连续性、均匀性、稳定性和可控性提高到一个更科学,更先进的水平。

激光熔覆技术,是激光直接快速成形和激光绿色再制造的一种重要方法,它是在快速凝固过程中,通过送粉器向工作区域添加熔覆材料,利用高能量密度激光束将不同成分和性能的合金快速熔化,直接堆积形成非常致密的金属零件和在已损坏零件表面形成与零件具有完全相同成分和性能的合金层<sup>[1]</sup>。通过激光熔覆,可以无需借助刀具和模具就能从CAD文件直接制造出各种复杂的近净致密金属零件和在已经损坏的零件表面直接进行修复和再制造,以缩短开发周期,节约成本,降低能源消耗,在航空航天、武器制造和机械电子等行业具有良好的应用前景<sup>[2]</sup>。

激光熔覆加工根据材料的供应

方式不同分为两大类:预置法和同步送粉法。同步送粉法工艺过程简单,合金材料利用率高,可控性好,容易实现自动化,是激光熔覆技术的首选方法,国内外实际生产中采用较多。在激光同步送粉熔覆工艺中,加工质量主要依赖的参数有:加工速度、粉末单位时间输送率、激光功率密度分布、光斑直径和粉末的输送速度<sup>[3]</sup>;其中粉末单位时间输送率和粉末的输送速度是由送粉器的输送特性决定的,送粉器是激光熔覆技术中的核心元件之一,它按照加工工艺向激光熔池输送设定好的粉末。送粉器性能的好坏直接影响熔覆层的质量和加工零件尺寸等,所以开发高性能的送粉器对激光熔覆加工显得尤

为重要。

## 国内外的研究现状

激光熔覆技术在工业应用和科学研究中具有重要的应用前景,送粉器的设计和开发是激光熔覆设备的关键技术之一。随着激光熔覆技术的快速发展,以及对熔覆层的加工精度和质量要求的提高,国内外相继研发了基于不同原理的送粉器。

B.Grunenwald 和 St.Nowotny 设计的转盘式送粉器<sup>[4]</sup>,是用刮板将转盘上的粉末推到凹槽内,再用载流气体将粉末输送走。L. Li 和 W. M. Steen 设计的螺旋式送粉器<sup>[5]</sup>,是把螺杆置于料斗的底部,通过螺纹把粉末送到混合器,再用气体将粉末输送出去。Atsusaka 和 Motohiro Urakaw 设计的毛细管式送粉器<sup>[6]</sup>,是通过毛细管的振动来输送粉末,但是送粉率不可控制。Amit Suri 和 Masayuki Horio 所试验的送粉器<sup>[7]</sup>,一路气体对粉末进行沸腾使之落入下部管道,另一路气体运输降下的颗粒,通过两路气流能够更好地控制送粉量。

在国内,陈德善等研制了一种 GL 型辊轮式送粉器<sup>[8]</sup>,它是一种机械定量式送粉器,可以使粉末按着“先定量堆积而后输出”的基本程序进行输送,送粉量稳定,送粉粒度为 320 目以下,送粉进度可达  $\pm 0.5\%$ ; 闫江松等研制了一种容积式送粉器<sup>[9]</sup>,在 200 目 FNi07B 材料输送的实验中,送粉量为 0~40g/min,送粉误差为 1.67%; 田凤杰等设计的同轴送粉系统,能够输送功能梯度材料<sup>[10]</sup>,在粉末充分混合后运用刮吸式送粉机构将粉末输送,颗粒度为 100~350 目的粉末,其送粉量为 2~25g/min,送粉误差 3% 以下; 冯立伟等研究的双料斗载气式送粉器<sup>[11]</sup>,可实现单料斗运粉或双料斗同时送粉,且可实现 2 种粉末的混合输送,150 目的 Ni25 与 320 目的 WC 混合粉末输送试验中,送粉量为 5~20g/min; 李艳丽等设计

的螺旋送粉器<sup>[12]</sup>可实现 7~60g/min 的送粉量。

## 送粉器的结构原理和特性

送粉器的功能是将粉末按照加工工艺要求精确的送入激光熔池,并确保加工过程中,粉末能连续、均匀、稳定地输送。针对不同类型的粉末要求,目前国内外已经研制的送粉器主要可以分为:螺旋式送粉器、转盘式送粉器、刮板式送粉器<sup>[13]</sup>、毛细管式送粉器、鼓轮式送粉器<sup>[14]</sup>、电磁振动送粉器<sup>[15]</sup>和沸腾式送粉器。其工作原理包括:重力场、气体动力学和机械力学等。各种送粉器的具体工作过程如下。

### 1 螺旋式送粉器

螺旋式送粉器主要是基于机械力学原理,如图 1 所示,它主要由粉末存储仓斗、螺旋杆、振动器和混合器等组成。工作时,电机带动螺杆旋转,使粉末沿着桶壁输送至混合器,然后混合器中的载流气体将粉末以流体的方式输送至加工区域。为了使粉末充满螺纹间隙,粉末存储仓斗底部加有振动器,能提高送粉量的精度。送粉量的大小可以由电机的转速调节。这种送粉器能传送粒度大于  $15\mu\text{m}$  的粉末,粉末的输送速率为 10~150g/min。

### 2 转盘式送粉器

转盘式送粉器是基于气体动力学原理,其结构如图 2 所示,主要由粉斗、粉盘和吸粉嘴组成。粉盘上带有凹槽,整个装置处于密闭环境中,粉末由粉斗通过自身重

力落入转盘凹槽,并且电机带动粉盘转动,将粉末运至吸粉嘴,密闭装置中由进气管充入保护性气体,通过气体压力将粉末从吸粉嘴处送出,然后在经过出粉管到达激光加工区域。

### 3 刮板式送粉器

刮板式送粉器,如图 3 所示,它主要由存储粉末的粉斗、转盘、刮板、接粉斗等组成。工作时粉末从粉斗经过漏粉孔靠自身的重力和载流气体的压力流至转盘,在转盘上方固定一个与转盘表面紧密接触的刮板,当转盘转动时,不断将粉末刮下至接粉斗,在载流气体作用下,通过送粉管送至激光加工区域。送粉量大小是通过转盘的转速来决定的,通过对转盘转速的调节便可以控制送粉量的大小,同时调节粉斗和转盘的高度和漏粉孔的大小,可以使送粉量的调节达到更宽的范围。刮板式送粉器适用于颗粒直径大于  $20\mu\text{m}$  的粉末输送。

### 4 毛细管式送粉器

这种方法主要是使用一个振动

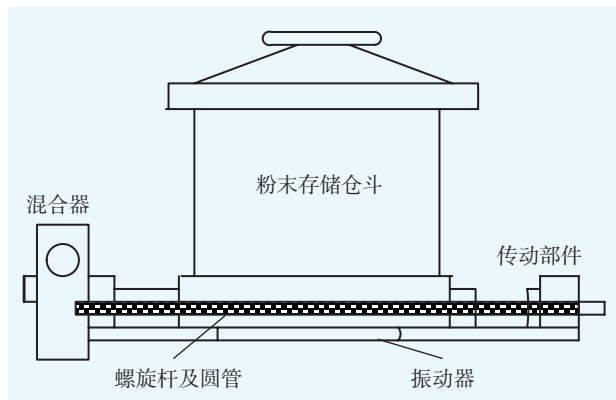


图1 螺旋式送粉器原理图

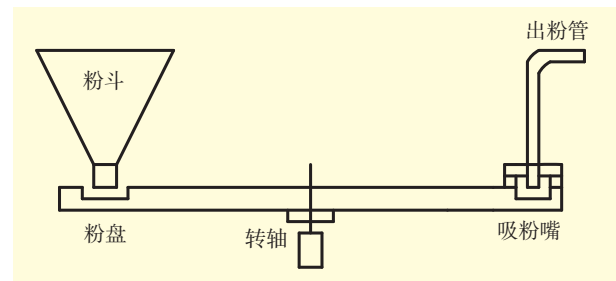


图2 刮吸式送粉器原理图

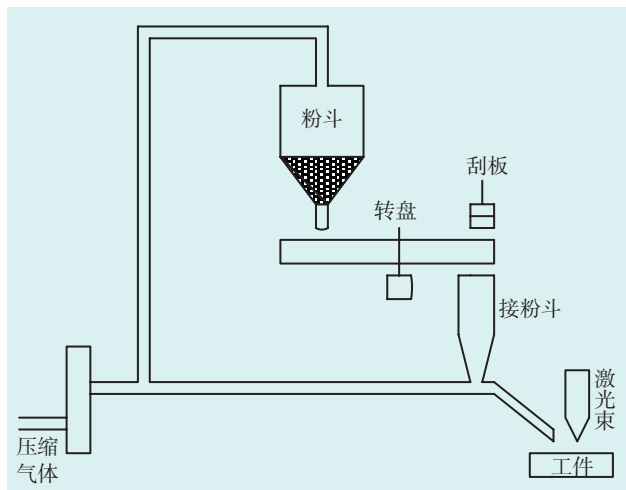


图3 刮板式送粉器原理图

的毛细管来送粉,振动是为了粉末微粒的分离,该送粉器由1个超声波振荡器、1个带贮粉斗的毛细管和1个盛水的容器组成(见图4)。电源驱动超声波发生器产生超声波,用水来传送超声波。粉末存储在毛细管上面的漏斗里,毛细管在水面下面,下端漏在容器外面,通过产生的振动将粉末打散开,由重力场传送。送粉颗粒最小直径约 $0.4\mu\text{m}$ 。

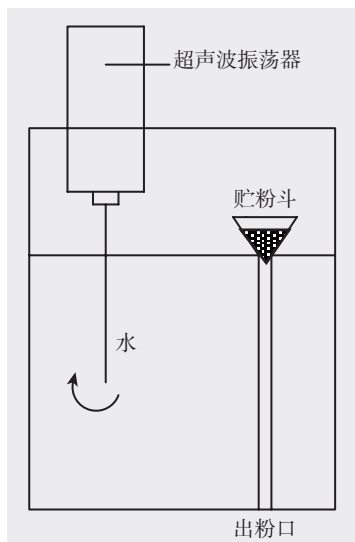


图4 毛细管式送粉器原理图

### 5 鼓轮式送粉器

鼓轮式送粉器的主要结构如图5所示,主要有贮粉斗,粉槽和送粉轮组成。粉末从贮粉斗落入下面的粉槽,利用大气压强和粉槽内的气压

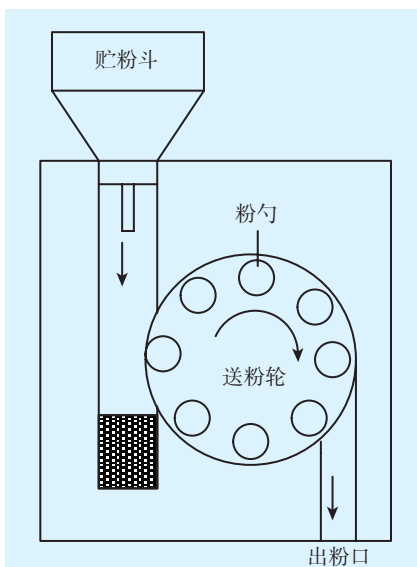


图5 鼓轮式送粉器原理图

维持粉末堆积量在一定范围内的动态平衡。鼓轮匀速转动,其上均匀分布的粉勺不断从粉槽舀取粉末,又从右侧倒出粉末,粉末由于重力从出粉口送出。通过调节鼓轮的转速和更换不同大小的粉勺来实现送粉率的控制。

### 6 电磁振动送粉器

电磁振动送粉器的原理图如图6所示,在电磁振动器的推动下,阻分器振动,储藏在贮粉仓内的粉末沿着螺旋槽逐渐上升到出粉口,由气流送出。阻分器还有阻止粉末分离的作用。电磁振动器实质上是一块电磁铁,通过调节电磁铁线圈电压的频

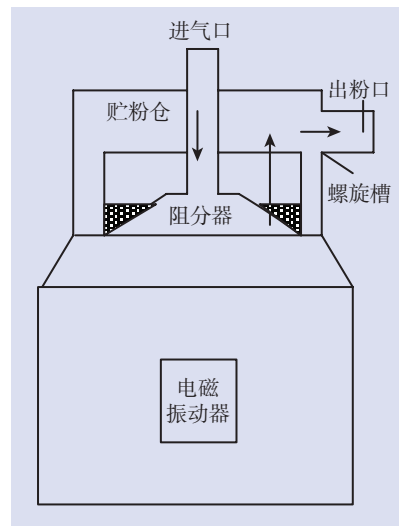


图6 电磁振动送粉器原理图

率和大小就可实现送粉率的控制。

### 7 沸腾式送粉器

沸腾式送粉器用气流将粉末流化或达到临界流化,由气体将这些流化或临界流化的粉末吹送运输的一种送粉装置(见图7)。底部和上部的两个进气道使粉末流化或达到临界流化。中部的载流气体将流化的粉末送出。沸腾式送粉器能使气体与粉末混合均匀,不易发生堵塞;送粉量大小由气体调节,可靠方便;并且不像刮吸式与螺旋式等机械式送粉器,粉末输送过程中与送粉器内部发生机械挤压和摩擦容易发生粉末堵塞现象,造成送粉量的不稳定。

### 送粉器的性能分析比较

几种送粉器的原理不同,在实际应用加工中,表现出的优缺点也不同。

(1)螺旋式送粉器:这种送粉器比较适合小颗粒粉末输送,工作中输送均匀,连续性和稳定性高,并且这种送粉方式,对粉末的干湿度没有要求,可以输送稍微潮湿的粉末。但是不适用于大颗粒粉末的输送,容易堵塞。由于是靠螺纹的间隙送粉,送粉量不能太小,所以很难实现精密激光熔覆加工中所要求的微量送粉,并且不适合输送不同材料的粉末。

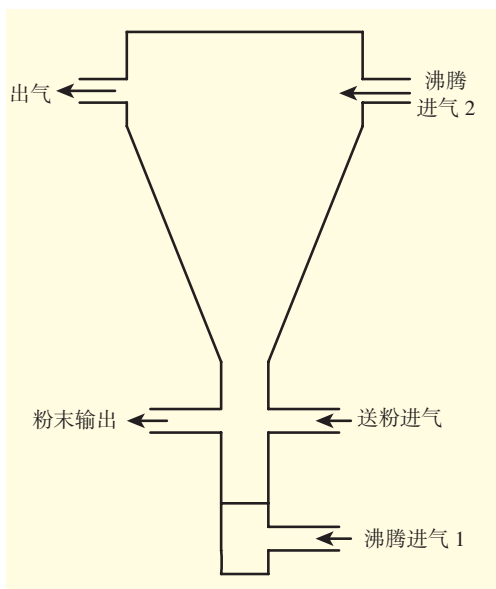


图7 沸腾式送粉器原理图

(2) 转盘式送粉器：是基于气体动力学原理，通入的气体作为载流气体进行粉末输送，这种送粉器适合球形粉末的输送，并且不同材料的粉末可以混合输送，最小粉末输送率可 $1\text{g}/\text{min}$ 。但是对其他形状的粉末输送效果不好，工作时送粉率不可控，并且对粉末的干燥程度要求高，稍微潮湿的粉末，会使送粉的连续性和均匀性降低。

(3) 刮板式送粉器：对于颗粒较大的粉末流动性好，易于传输。但在输送颗粒较小的粉末时，容易团聚，流动性较差，送粉的连续性和均匀性差，容易造成出粉管口堵塞。

(4) 毛细管送粉器：这种送粉器能输送的粉末直径大于 $0.4\mu\text{m}$ 。粉末输送率可以达到 $\leq 1\text{g}/\text{min}$ 。能够在一定程度上实现精密熔覆中要求的微量送粉，但是它是靠自身的重力输送粉末，必须是干燥的粉末，否则容易堵塞，送粉的重复性和稳定性差，对于不规则的粉末输送，输送时在毛细管中容易堵，所以只适合于球形粉末的输送。

(5) 鼓轮式送粉器：其工作原理是基于重力场，对于颗粒比较大的粉末，因其流动性好能够连续送粉，并

且机构简单。由于它是通过送粉轮上的粉勺输送粉末，对粉末的干燥度要求高，微湿的粉末和超细粉末容易堵塞粉勺，使送粉不稳定，精度降低。

(6) 电磁振动送粉器：是基于机械力学和气体动力学原理工作的，反应灵敏，由于是用气体做为载流体将粉末输出，所以对粉末的干燥程度要求高，微湿粉末会造成送粉的重复性差。并且对于超细粉末的输送不稳定，在出粉管处超细粉末容易团聚，发生堵塞。

(7) 沸腾式送粉器：是基于气固两相流原理设计的。工作时，载流气体在气体流化区域直接将粉末吹出送至激光熔池。但同样要求所送粉末干燥。沸腾式送粉器对于粉末的流化和吹送都是通过气体来完成的，所以避免了前面螺旋式、刮板式等粉末与送粉器元件的机械摩擦，对粉末的粒度和形状有较宽的适用范围。

### 激光熔覆送粉器的发展特点

随着激光熔覆技术的快速发展，送粉器作为熔覆设备的核心元件之一，也得到了广泛的研究。目前，国内外对送粉器的研制目标是将送粉器工作时的连续性、均匀性、稳定性和可控性提高到一个更科学，更先进的水平。对国内外文献资料的整理和分析可以看出送粉器发展的特点：

(1) 多功能化。现有的送粉器基本都能够对单一的粉末进行连续送粉，以后送粉器的发展向着混合送粉、多方式送粉和高精度方向发展，目前已先后研制出多料仓混合的送粉器<sup>[16]</sup>，熔覆材料组成及配比连续可调的送粉器以及高度集成带有信息反馈附件的送粉器等。

(2) 微量量化。现有的送粉器都

是连续送粉，送粉量都比较大，仅适合大面积熔覆应用和三维快速制造。目前的激光熔覆技术已经开始应用于精密熔覆和微成形，在这种加工过程中，需要对激光熔覆加工区域进行微量输送，这对送粉器的性能要求很高。当进行零件的激光熔覆精密修复时，大送粉量的送粉器根本无法满足工作的要求

(3) 超细化。现在的送粉器能够对较大尺寸粉末，进行连续稳定的送粉，因为其流动性好，易于传输。然而，对于尺寸在毫米级以下的微细熔覆粉末，现有送粉器的输送粉末颗粒比较大，特别是对于有些工件表面的缺陷特别微小（如小的磨损坑、裂痕、小孔洞和腐蚀坑等）无法满足加工的要求。

### 结束语

随着激光技术的发展，经过多种尝试，国内外已经研制出很多类型的送粉器。一般情况下，较大尺寸的粉末（颗粒直径 $>100\mu\text{m}$ ）流动性较好，易于传送，而颗粒直径较小的粉末（颗粒直径 $<1\mu\text{m}$ ）容易团聚和粘滞，流动性较差，通常传送这样尺寸的粉末是非常困难的<sup>[17]</sup>，所以，在同步送粉器中，流动性差是超细粉末输送的难点，由于细粉末的团聚和粘滞，而导致送粉不连续和送粉量不均匀，得到的熔覆层厚度不均匀、表面质量差、严重精密熔覆和微成型的质量。比如对于纳米相粉这类超细粉末在输送中容易发生团聚，目前的送粉器还没有得到很好的解决。所以，对于超细粉末的输送和实现微量输送将是以后送粉器研究的重点。并且对于送粉器综合化的研究，将更有利于实现激光熔覆加工成套设备的集成化和一体化。

本文共有参考文献 17 篇，因篇幅有限，未能一一列出，如有需要，请向本刊编辑部索取。（责编 小城）