

激光金属增材制造同轴送粉喷嘴的研究进展

赵亮¹, 王丽芳^{2*}, 李广琪¹, 朱刚贤¹, 石世宏¹

¹苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215021;

²苏州大学工程训练中心, 江苏 苏州 215021

摘要 同轴送粉喷嘴是激光金属增材制造系统装备的核心部件之一, 直接影响着激光增材制造零件的成形精度及性能。因其重要性, 国内外学者们已开发出多种新型送粉喷嘴。简要从“光外送粉”和“光内送粉”两种光粉相对位置不同的送粉方式概括了国内外对同轴送粉喷嘴的研究, 并从激光束和粉末束是否可变焦的角度进行了分析, 指明了现有同轴送粉喷嘴的特点, 对未来同轴送粉喷嘴的发展进行了展望。

关键词 激光增材制造; 同轴送粉喷嘴; 送粉方式; 会聚性

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050002

Research Progress on Coaxial Powder Feeding Nozzle for Laser Metal Additive Manufacturing

Zhao Liang¹, Wang Lifang^{2*}, Li Guangqi¹, Zhu Gangxian¹, Shi Shihong¹

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

²Engineering Training Center, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract Coaxial powder feeding nozzle, as one of key components in laser metal additive manufacturing system equipment, directly affects the forming accuracy and performance of parts. Because of its importance, a variety of new powder delivery nozzles have been developed by scholars at home and abroad. In this paper, the research on coaxial powder feeding nozzles is briefly summarized from two different powder feeding methods of "powder feeding by light outside" and "powder feeding by light inside", whether the laser beam and powder beam can vary focal length or not is analyzed, the characteristics of coaxial powder feeding nozzles are pointed out, and the development of the coaxial powder feeding nozzles in the future is provided.

Key words laser additive manufacturing; coaxial powder feeding nozzle; powder feeding method; convergent characteristics

OCIS codes 140.3390; 350.3250

1 引言

激光金属增材制造技术兴起于 20 世纪 80 年代, 是一种能直接制造出全致密且力学性能优异的金属零件先进制造技术, 在航空航天、汽车船舶等领域具有广阔的应用前景^[1-2]。在激光增材制造的过程中, 粉末的输送至关重要, 良好的粉末输送性能是提高粉末利用率和获得较高质量熔覆层的保障^[3-4]。其送粉过程采用同步送粉法, 分为同轴送粉和侧向

送粉两种。侧向送粉表示送粉喷嘴轴线和激光束轴线之间存在夹角, 该方法结构简单, 使用方便, 适用于激光平面增材制造。但在成形复杂形状零件时存在方向性限制, 不适用于圆形、方形等复杂构件的成形。同轴送粉表示通过同轴送粉喷嘴使粉末流几何中心轴线与激光束几何中轴线重合, 该方法喷嘴不受方向性限制, 也不受零件复杂程度的约束, 因此得到广泛的应用^[5-6], 本文重点阐述同轴送粉喷嘴的研究现状及未来发展方向。

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-06-24; 录用日期: 2019-08-20

基金项目: 国家重点研究计划(2016YFB1100300)、苏州市科技计划项目(SYG201643)

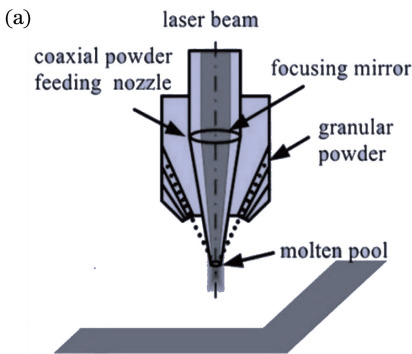
* E-mail: lfwang@suda.edu.cn

2 同轴送粉喷嘴的送粉方式

同轴送粉喷嘴的一个核心功能就是实现光粉的精确耦合,使粉末具有良好的聚焦性能。根据粉末流和激光束相对位置不同,将同轴送粉喷嘴分为两种类型:光外同轴送粉和光内同轴送粉。

2.1 光外同轴送粉

光外同轴送粉原理为激光束处于中央,送粉喷嘴位于激光束外部,粉末流送入中央的激光束中,激光束为实心光束,送粉喷嘴分布于光束周围,向熔池送粉,如图 1(a)所示。光外送粉可分为环式和多路式。环式送粉指粉末进入圆环型粉末腔后再会聚成锥形流出,环式送粉方式粉末流会聚性好,但其交点



在激光束焦点附近,粉斑聚集发散角大,导致粉末利用率低^[7]。多路式一般可分为三路式和四路式,原理类似,都是沿喷嘴圆周方向上均匀设置送粉管。多路送粉管的设置可实现送粉量不同配比的调节,以完成材料的梯度输送,粉末流聚焦点距离基材表面较远,避免了粉末出口的堵塞。

光外送粉方式得到的熔覆层外观形貌良好,无明显裂纹和气孔等冶金缺陷^[8-9],但会受到光粉耦合精度的影响,在熔覆过程中会出现沾粉现象,使熔覆层表面变粗糙。如图 1(b)所示,从微观角度看,光外送粉方式得到的熔覆层晶粒细密,但整体组织不均匀,基体与熔覆层结合效果差且熔覆层稀释率较大^[10]。

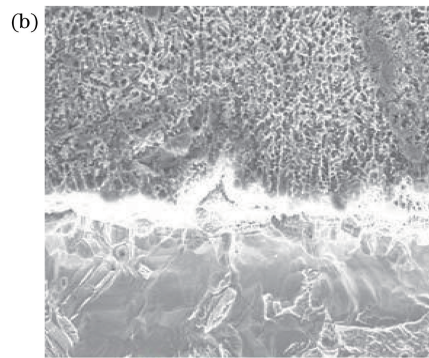


图 1 光外同轴送粉^[10-11]。(a)原理图;(b)熔覆层与基体结合面

Fig. 1 Coaxial outside-beam powder feeding^[10-11]. (a) Schematic diagram; (b) interface of laser cladding layer and matrix

2.2 光内同轴送粉

光内同轴送粉原理为送粉嘴处于中央,激光束位于粉末流外部,为空心光束,粉嘴周围被激光束包裹,如图 2(a)所示。光内送粉的送粉管一般是单独一路处于空心激光束中央,由于仅有一路垂直正向送粉,所以,粉斑聚集效果好,粉末利用率高,同时可以实现光粉准确耦合,成形精度相对

较高^[12]。

基于光粉耦合精度的优势,光内送粉喷嘴减少了粉末飞溅、爆燃等现象,降低了熔覆层表面的粗糙度,使成形件表面光滑,消除了“台阶效应”^[13]。从微观组织上看,如图 2(b)所示,光内送粉方式得到的覆层组织细小,显微硬度整体分布均匀^[9]、稀释率低,同时与基体的结合效果较佳^[14]。

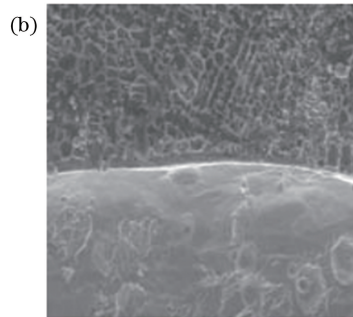
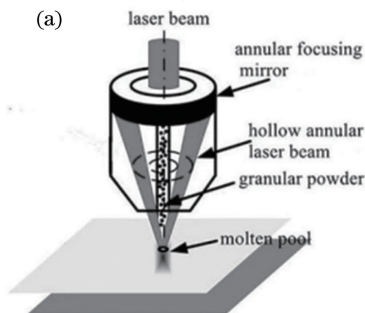


图 2 光内同轴送粉^[10-11]。(a)原理图;(b)熔覆层与基体结合面

Fig. 2 Coaxial inside-beam powder feeding^[10-11]. (a) Schematic diagram; (b) interface of laser cladding layer and matrix

3 同轴送粉喷嘴的研究现状

3.1 光外送粉方式

光外同轴送粉喷嘴的研究较早,随着激光增材制造技术的兴起,光外送粉喷嘴就一直在迭代更新。主要组成部分为激光光路、粉末通道、冷却部分等^[6],激光光路和粉末通道的结构决定光粉的精确耦合程度,也直接影响增材制造零件的成形质量与效率。光外同轴送粉喷嘴大致可以分为两类,即不可变焦喷嘴和可变焦喷嘴。

3.1.1 不可变焦喷嘴

不可变焦式喷嘴是在成形送粉过程中,激光束聚焦焦距和粉末流束聚焦焦距不可变化,设计喷嘴时需要考虑好粉斑和光斑的匹配问题。早期的光外同轴送粉喷嘴的结构主要分为两个腔:内腔和外腔。内腔是激光束通道,在其中安装聚焦镜对激光束进行聚焦,同时通道内有保护气体可避免粉末飞溅污染聚焦镜。外腔是由内腔外围的圆锥和喷嘴圆锥内

廓形成的环形圆锥腔,作为粉末输送通道。粉末经由外腔上端小孔采用载气方式输送,由于粉末通道出口热量不能及时散发出去,容易造成堵塞^[15]。为了提高喷嘴持续工作的稳定性,及时散去激光束产生熔池反射到喷嘴上的热量,送粉喷嘴由两腔改为三腔:激光腔、送粉腔和水冷腔^[16],在激光增材制造的过程中对喷嘴进行冷却,提高送粉喷嘴连续工作的能力。改进后的送粉喷嘴仍存在粉末聚集性差、粉末流发散严重等问题,导致粉末利用率较低,Eschau 等^[17]设计的同轴送粉喷嘴在典型的三腔结构基础上,增加了水冷腔外围保护气体腔,在粉腔外围设置保护气来提高粉末流的会聚性能,即四腔结构。图 3(a)为典型四腔同轴送粉喷嘴的系统结构示意图,目前光外同轴送粉喷嘴原理大多基于此结构,为更好对喷嘴进行冷却,防止激光产生的辐射对聚焦镜造成危害,田凤杰^[18]设计了一种双冷却通道的五腔同轴送粉喷嘴,如图 3(b)所示。

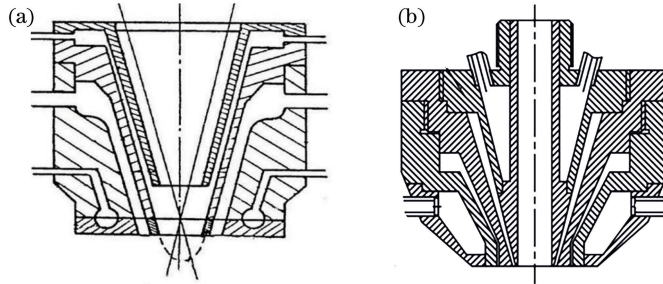


图 3 同轴送粉喷嘴结构示意图。(a) 四腔^[17]; (b) 五腔^[18]

Fig. 3 Schematic of coaxial powder feeding nozzle structure. (a) Four-cavity^[17]; (b) five-cavity^[18]

同轴送粉喷嘴采用气动送粉的方式,载气容易在粉末离开喷嘴后对粉末聚集造成扰动,影响粉末流的会聚效果,同时会加大粉末所受的惯性力,在粉末会聚后出现分叉现象,使焦柱区变短^[19]。田凤杰^[20]设计了一种卸载式送粉喷嘴,当气体卸载量超过 75%后,极大地改善了粉末会聚性,形成一条细长的会聚粉末流柱体,会聚挺度可达 25 mm,会聚半径为 2 mm,粉末的利用率可达 70%,并且气体卸载量越大,会聚效果越好。

对于大尺寸的构件而言,采用圆形小光斑及环形喷嘴耦合成形效率较低。郭翔宇等^[21]设计了一种宽带激光同轴送粉喷嘴,适用于大功率半导体激光器,配合 2.5 mm×14 mm 的矩形光斑,极大提高了成形效率。但送粉过程波动较大,成形质量相对较差。为提高增材制造熔覆层成形质量及获得稳定的送粉速率,Bi 等^[22]设计了一种同轴送粉喷嘴,

在喷嘴增加针对送粉质量的闭环控制系统来监控送粉喷嘴的工作状态,同时对送粉喷嘴的同轴性进行检测,极大提高了零件成形质量。由于同轴送粉喷嘴在增材制造时难以实时判断熔覆效果,Arrizubieta 等^[23]在喷嘴增加了光学传感器来获得实时的熔覆层信息,根据所获得的信息调节工艺参数。

3.1.2 可变焦喷嘴

激光增材制造技术飞速发展的同时,成形零件的结构也日益复杂,不可变焦的送粉喷嘴难以满足加工要求,可变焦的送粉喷嘴应运而生。同轴送粉喷嘴中,主要是通过调节激光束的离焦量和粉末会聚点的离焦量实现变焦。

3.1.2.1 激光束离焦量可调

在激光增材制造的过程中,将金属粉末准确、连续、均匀地投入到聚焦光斑内,实现光粉的准确耦合

是保证成形质量的关键^[24]。为提高增材制造熔覆层成形质量和效率,希望通过一次扫描而非多道搭接直接成形不等宽构件^[25],就需要在成形过程中,激光束光斑直径能够实时变化。秦训鹏等^[26]设计了一种可调式激光同轴送粉喷嘴,带有激光离焦量调整装置,通过升降法兰与调节螺母配合实现上下10 mm的激光离焦量无级调节,如图4(a)所示。但该喷嘴离焦尺寸较小而无法在大范围调节,郝敬宾等^[27]设计了一种能够连续改变激光光斑直径大小和送粉位置的同轴送粉喷嘴,放弃了传统的离焦法改变光斑直径大小的设计思路,而是通过安装的两个凸透镜和扩束镜来改变光路。适当调节扩束镜与凸透镜或者两凸透镜间的相对位置,可连续改变光斑直径的大小和位置,实现金属粉末与激光

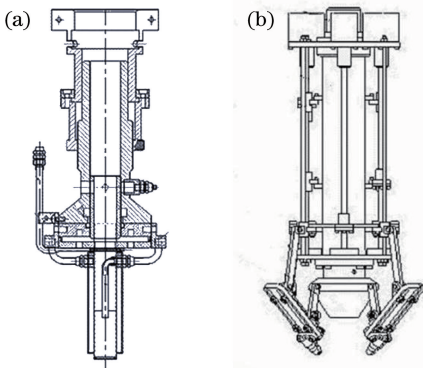


图4 同轴送粉喷嘴结构示意图。(a)可变离焦量^[26];
(b)可调离焦量及送粉位置^[27]

Fig. 4 Schematic of coaxial powder feeding nozzle structure. (a) Variable laser defocusing^[26];
(b) adjustable laser defocusing and powder feeding position^[27]

束的精确耦合,如图4(b)所示。

3.1.2.2 粉末流会聚点焦距可调

粉末输送系统是送粉喷嘴中极其重要的一环,直接影响零件成形效率和质量。为获得良好的光粉耦合效果及成形质量,需要通过调整送粉管的角度来改变粉末的入射角和粉末聚集点与激光束聚集点间相对位置。宋立军等^[28]设计的焦距可调的四管式同轴送粉喷嘴可在不同的加工条件下实现合适的粉光配合,如图5(a)所示。四根送粉管分别安装在摆动销上并可绕安装轴摆动,从而调节送粉管的送粉角度得到一个与激光束匹配的最佳会聚角度,实现粉末流会聚点焦距在一定范围内的无级调节,实验证明,喷嘴粉末流会聚点焦距的可调范围为20~40 mm。当成形件的高度起伏较大时,单独依靠改变送粉管的入射角来调节粉末会聚焦距难以达到要求,纪楠等^[29]设计了一种四路可调同轴送粉喷嘴。该喷嘴在四管基础上增设了Z轴调节块,使送粉管在绕X轴、Y轴任意旋转的同时可以沿Z轴方向任意移动,实现可调粉末会聚点焦距的进一步加大。图5(b)为该多角度调节的送粉喷嘴。实际加工过程中,已调节的送粉喷嘴在移动中容易发生调节位置偏移,Nowotny等^[30]在实验过程中也应用了一种粉末流稳定的同轴送粉喷嘴,保留X、Y、Z三轴调节系统外并设有锁紧装置,达到粉末流与激光束的稳定耦合。为了配合半导体激光器的矩形光斑,Hayhurst等^[31]设计了应用于半导体激光器的同轴送粉喷嘴,可匹配激光器的矩形光斑形成所需要的矩形粉末区域。同时具有可调焦的功能,可以改变粉末流的角度,对粉斑宽度进行动态调节。

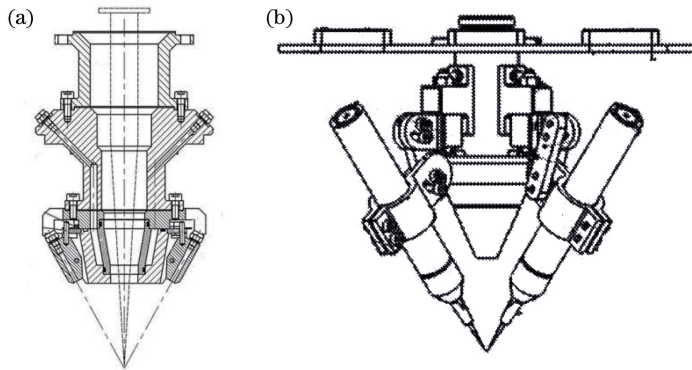


图5 多角度粉末聚集点可调的送粉喷嘴。(a)四管式^[28];(b)可调节Z向移动^[29]

Fig. 5 Multi-angle adjustable powder feeding nozzles. (a) Four-tubes^[28] (b) adjustable Z direction movement^[29]

粉末流会聚点焦距可调的同轴送粉喷嘴在商用领域大放异彩,满足了多种加工需求,实现了喷嘴功能的多样化。例如在制造大型零件时,为兼顾沉积

质量和效率,在沉积零件边缘轮廓时,粉末流会聚焦距可调大以提高零件的精度;在零件内部填充扫描加工时,粉末流会聚焦距可调小以提高沉积效率,同

时提高激光增材制造效率与精度。

3.1.2.3 激光束离焦量和粉末会聚点焦距同步调节

当激光光斑尺寸大于粉斑尺寸时,激光束能量密度过大容易产生气孔等缺陷,影响成形质量;小于粉斑尺寸时,又会造成粉末流无法完全输送到熔池,粉末的利用率低,影响激光增材制造的效率^[32]。面对这一难题,可通过在竖直方向移动喷嘴头来改变激光光束聚焦的位置,从而改变光斑大小。同时为了得到高精度、高质量的熔覆层,粉末会聚点的直径也要随光斑改变。白倩等^[33]设计了激光直接形成的光粉主动调节同轴送粉喷嘴,可以单独调节光斑和粉斑,一方面通过旋转螺套带动两镜座做上下垂直运动,调节激光离焦量;另一方面,喷嘴还带有粉末离焦调节机构,达到激光离焦量和粉末离焦量主动调节,实现光斑尺寸和粉斑尺寸的匹配,如图6所示。

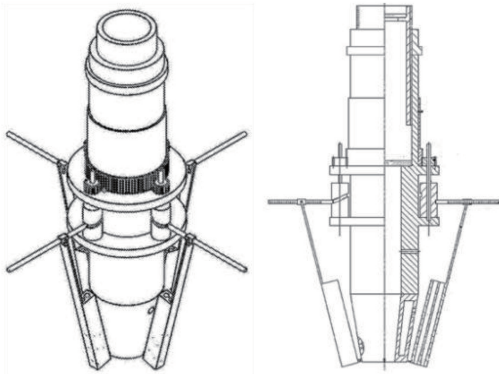


图6 光粉焦点分别可调的送粉喷嘴^[33]

Fig. 6 Powder feeding nozzles with adjustable powder and laser focusing points^[33]

3.2 光内送粉方式

相比于光外同轴送粉喷嘴,光内同轴送粉喷嘴在光粉的耦合精度与金属粉末受热均匀度上有优势。送粉装置设置在喷嘴内部,四周被激光束包裹。光内同轴送粉喷嘴同样分为可变焦与不可变焦喷嘴^[6]。

3.2.1 不可变焦喷嘴

为解决光外送粉光粉耦合精度难调节、粉末聚集性差导致粉末利用率低等问题,石世宏等^[34]研制了光内送粉喷嘴。通过圆锥反射镜-圆环聚集反射镜扩束变换的方法,获得中空环形激光束,粉末通过送粉管垂直送入加工面上的聚集光斑中,实现光内送粉。由于粉管垂直安装,可实现真正意义上的光粉同轴,光粉耦合精度高。由于是单粉束管,粉末聚集性好、利用率高,具体结构如图7(a)所示。与光外送粉一样,粉末通过气载方式输送,粉末流在出

喷嘴后具有一定的压力,导致粉末有些发散,为进一步提高粉末聚集性能,程炳敖等^[35]设计了一种新型的激光熔覆光内同轴送粉喷嘴,送粉结构如图7(b)所示,其可以在粉末出喷嘴后及时卸载掉输送粉末的压力,降低了粉末速度,极大提高了粉末聚集性能。

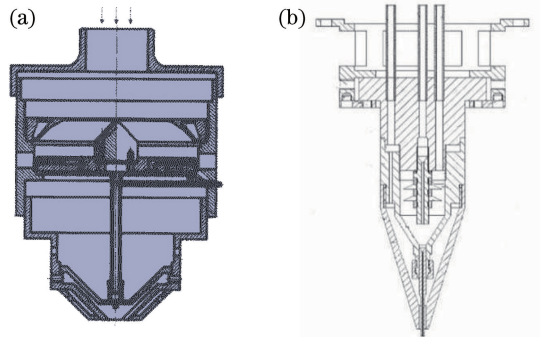


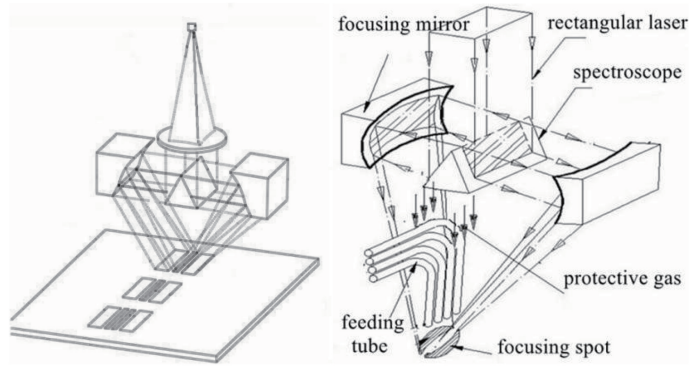
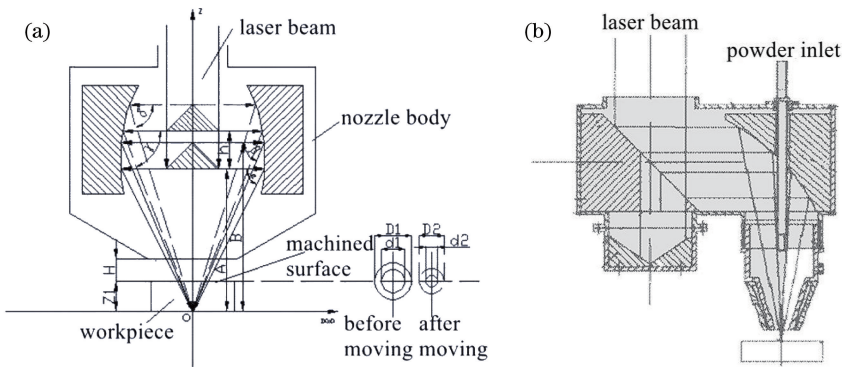
图7 光内送粉喷嘴示意图。(a)气载式^[34];(b)卸气式^[35]

Fig. 7 Schematic of inside-beam powder feeding nozzles. (a) Carrying gas^[34]; (b) discharging gas^[35]

随着工业化应用的发展,单粉管送粉不能满足激光增材制造效率要求。为提高光内送粉激光增材制造的成形效率,石拓等^[36]发明了一种激光宽带熔覆装置,采用分光棱镜将入射激光一分为二,分别投射到聚光面镜上再将两束激光会聚到一点,满足了入射激光束的先分再合的要求。一分为二的激光束中间的中空空间可以设置送粉装置,在送粉喷嘴内部并列设置多根送粉管,同时内部送粉通道采用一分二、二分四的粉管结构,中空粉束较为稳定,具有良好的方向性,使矩形熔池中的粉末分布较为均匀,粉斑和光斑的尺寸一致,满足了光粉耦合的精度要求。该喷嘴一次扫描可达到10~40 mm,极大提高了成形效率,图8为宽带熔覆喷嘴结构示意图。

3.2.2 可变焦喷嘴

随着激光增材制造技术日益成熟,成形零件结构日趋复杂,特别是在成形壁厚不均匀零件时,常规采用多道搭接方式不仅生产效率低,还容易造成熔覆层内部冷却不均匀而导致搭接处的冶金缺陷。为解决冶金缺陷问题,石世宏等^[37]发明了一种激光聚集装置,在成形过程中光斑大小可调,宽熔道采用大光斑扫描熔覆,窄熔道采用小光斑扫描熔覆,在扫描熔覆中根据熔道宽窄变化而实时改变光斑大小,提高了成形质量及效率,具体结构如图9(a)所示。为提高增材制造成形效率及成形精度,石世宏等^[38]也开发了一种激光变斑熔覆成型工艺用于该工艺的同轴喷头,用轮廓法规划成形零件每一层扫描路径,用

图8 宽带熔覆喷嘴结构图^[36]Fig. 8 Schematic of wide-band cladding nozzle structure^[36]图9 光内送粉喷嘴结构示意图。(a)光斑可调^[37]；(b)光粉可调^[38]Fig. 9 Schematic of inside-beam powder feeding nozzles. (a) Adjusting laser beam^[37];(b) adjusting laser and powder beam^[38]

小光斑和小口径管送粉进行层片轮廓的熔覆,用大光斑和大口径管送粉进行层片内区域的熔覆,小光斑直径 $0.5\sim 2\text{ mm}$,大光斑直径 $2\sim 10\text{ mm}$,且粉斑直径略大于光斑直径,具体结构如图9(b)所示。光内可变焦送粉喷嘴的出现改变了传统光内送粉使用小粉斑的情况,将粉斑的大小提高了数倍,在保留光内送粉较高光粉耦合精度优势的同时大大提高了成形效率。

4 结束语

同轴送粉喷嘴,正逐步由不可变焦变为可变焦喷嘴,对光路和粉路进行调节,改善了不可变焦喷嘴单一的应用场景。相较于不可变焦喷嘴,可变焦喷嘴的最大缺陷就是其光粉耦合的稳定性较差。无论是不可变焦喷嘴还是可变焦喷嘴,与早期的同轴送粉喷嘴相比,在粉末均匀性、会聚性、利用率以及冷却效果上都得到了较好的改善^[39-41]。但仍有一些问题需要解决:首先在成形精度上与铺粉增材制造相比存在明显劣势;其次,是同轴送粉喷嘴在激光增材制造过程中的可控性相对较差,例如,无法精准控制

粉末的输送量和输送速度;最后,同轴送粉喷嘴在光粉耦合精度上仍旧难以满足高精度加工要求,也降低了熔覆层成形精度及粉末利用率,这些都是同轴送粉喷嘴将要改进的问题及发展方向。

为了解决同轴送粉喷嘴存在的一系列问题,就要求整个成形过程中所有参数必须能够实现实时准确监控,具备实时调节功能。结合现有检测方法,如热像仪、位置传感器及CCD,能够实现熔池温度、成形参数和熔覆层尺寸实时监控,可实时调整成形参数以实现增材制造熔覆层质量可控。同时随着智能制造的发展,将增材制造过程中的过程参数和成形信息集成到一个共同界面进行统一处理,通过集成界面就可以清楚地监测并控制整个制造过程,实现整个系统集成化、可控化及可视化,这也是激光增材制造系统的发展趋势。

参 考 文 献

- [1] Guan Z Z. Laser processing manual [M]. Beijing: China Metrology Press, 1998: 254-258.
关振中. 激光加工手册[M]. 北京: 中国计量出版

- 社, 1998: 254-258.
- [2] Wang H M. Open defence manufacturing high performance metal components to add material manufacturing technology a new chapter[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013, 6(3): 5-7.
王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013, 6(3): 5-7.
- [3] Lin J, Steen W M. Design characteristics and development of a nozzle for coaxial laser cladding[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(2): 55-63.
- [4] Huang S M, Li H C. Application and developments of laser cladding technology in industry [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2007 (6): 118-120.
黄尚猛, 李华川. 激光熔覆技术在工业中的应用及其发展[J]. 装备制造技术, 2007(6): 118-120.
- [5] Jin X S, Yang X C, Wang Y S, et al. Research on the coaxial powder feeder nozzle in 3D direct manufacturing and Re-manufacturing [J]. Applied Laser, 2008, 28(4): 266-270.
靳晓曙, 杨洗陈, 王云山, 等. 激光三维直接制造和再制造新型同轴送粉喷嘴的研究[J]. 应用激光, 2008, 28(4): 266-270.
- [6] Huang W D, Lin X, Chen J, et al. Laser stereo forming [M]. Xi'an: Northwest University of Technology Press, 2007: 38-39.
黄卫东, 林鑫, 陈静, 等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 38-39.
- [7] Govekar E, Jeromen A, Kuznetsov A, et al. Study of an annular laser beam based axially-fed powder cladding process [J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 241-244.
- [8] Cheng G D, Wan J H. Wear characteristics of TiC/Ni60 nickel based coating by laser cladding [J]. Welding Technology, 2018, 47(12): 28-30.
程国东, 万举惠. 激光熔覆 TiC/Ni60 镍基涂层磨损特征[J]. 焊接技术, 2018, 47(12): 28-30.
- [9] Yao Y S, Wang J, Chen Q B, et al. Research status of defects and defect treatment technology for laser additive manufactured products [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100004.
姚燕生, 汪俊, 陈庆波, 等. 激光增材制造产品缺陷及其处理技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100004.
- [10] Xiao J Y. Study on the characteristics of molten pool based on inside-ring laser coaxial powder feeding and properties of cladding layers[D]. Suzhou: Soochow University, 2009: 53-63.
- 肖军艳. 环形激光光内送粉熔池特征与熔层性能[D]. 苏州: 苏州大学, 2009: 53-63.
- [11] Lei D Z, Shi S H, Fu G Y. Research on inside-laser powder feeding nozzle for broadband laser cladding [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(22): 3076-3081.
雷定中, 石世宏, 傅戈雁. 激光宽带熔覆光内送粉喷嘴研制[J]. 中国机械工程, 2015, 26(22): 3076-3081.
- [12] Wang C, Shi S H, Fu G Y, et al. Fan with coaxial feeding laser cladding nozzle structure: 201120408652.0[P]. 2012-07-04.
王晨, 石世宏, 傅戈雁, 等. 同轴粉丝复合送料激光熔覆喷嘴结构: 201120408652.0[P]. 2012-07-04.
- [13] Shi T, Wang Y Q, Lu B H, et al. Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1003003.
石拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003003.
- [14] Wang C, Shi S H, Fang Q Q, et al. Research on laser cladding forming of close-packed multivariant twisty thin-wall parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0602004.
王聪, 石世宏, 方琴琴, 等. 空间多元密排扭曲薄壁件的激光熔覆成形研究[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0602004.
- [15] Wu R D, Xu G X, Yan Y N. Jetting technique for direct forming of metal deposition [J]. Journal of Machine Design, 2005, 22(1): 5-8.
吴任东, 徐国贤, 颜永年. 直接金属成形喷射技术[J]. 机械设计, 2005, 22(1): 5-8.
- [16] Yang Y Q, Su X B, Wang D. Laser cladding nozzle convenient for cooling and manufacturing method: CN101942659A[P]. 2011-01-12.
杨永强, 苏旭彬, 王迪. 一种便于冷却的激光熔覆喷嘴及其制造方法: CN101942659A[P]. 2011-01-12.
- [17] Eschau O F, Lingolsheim J B P, Ottrott O L, et al. Coaxial nozzle for surface treatment by laser irradiation with supply of materials in power form: US005418350A[P]. 1995-05-23.
- [18] Tian F J. Development on coaxial feeding nozzle with unloading carrier gas for laser manufacturing [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(19): 2298-2302.
田凤杰. 卸载式激光同轴送粉喷嘴的研制[J]. 中国

- 机械工程, 2011, 22(19): 2298-2302.
- [19] Liu L F, Dong L Y, Dong L, et al. Research of coaxial powder stream field in laser manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 081405.
刘立峰, 董丽莹, 董玲, 等. 激光制造中同轴粉末流场分析与检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 081405.
- [20] Tian F J. Development on separating and sharing device for laser coaxial feeding powder [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2012(9): 66-70.
田凤杰. 激光同轴送粉气固分离均分器的研制 [J]. *制造技术与机床*, 2012(9): 66-70.
- [21] Guo X Y, Ni M, Liu H M, et al. Design and numerical simulation of broad coaxial powder feeding nozzles for laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(3): 362-368.
郭翔宇, 倪茂, 刘华明, 等. 宽带激光熔覆同轴送粉喷嘴的设计与数值模拟 [J]. *激光技术*, 2018, 42(3): 362-368.
- [22] Bi G J, Schürmann B, Gasser A, et al. Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(3/4): 555-561.
- [23] Arrizubieta J I, Ruiz J E, Martinez S, et al. Intelligent nozzle design for the Laser Metal Deposition process in the Industry 4.0 [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 13: 1237-1244.
- [24] Hu X D, Zhu X H, YAO J H, et al. A hinged slider laser coaxial powder feeding nozzle with adjustable powder focus: 201710139886.1 [P]. 2017-06-06.
胡晓冬, 朱秀晖, 姚建华, 等. 一种粉末焦点可调的铰链滑块式激光同轴送粉喷嘴: 201710139886.1 [P]. 2017-06-06.
- [25] Zhu G X, Shi S H, Fu G Y, et al. Realization and research of unequal-width cladding layers by using variable laser spot with the inside-laser powder feeding [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(1): 25-28.
朱刚贤, 石世宏, 傅戈雁, 等. 激光变斑熔覆不等宽熔道的工艺实现及实验研究 [J]. *应用激光*, 2015, 35(1): 25-28.
- [26] Qin X P, Ni M, Hua L, et al. An adjustable spatter-proof coaxial powder feeding nozzle for laser cladding and its fabrication method: CN107604355A [P]. 2018-01-19.
秦训鹏, 倪茂, 华林, 等. 一种可调式防飞溅的宽度激光熔覆同轴送粉喷嘴及制作方法: CN107604355A [P]. 2018-01-19.
- [27] Hao J B, Ma G S, Liu H, et al. Coaxial powder feeding nozzle with automatic adjustment of spot and powder feeding position: 201611159063.7 [P]. 2017-05-10.
郝敬宾, 马国帅, 刘昊, 等. 可自动调节光斑和送粉位置的同轴送粉头: 201611159063.7 [P]. 2017-05-10.
- [28] Song L J, Liang D S, Xiao X F, et al. A four-tube coaxial powder feeding nozzle with adjustable focus: 201510142896.1 [P]. 2015-06-10.
宋立军, 梁东生, 肖先锋, 等. 一种会聚焦距可调的四管式同轴送粉喷嘴: 201510142896.1 [P]. 2015-06-10.
- [29] Ji N, Liu X Y, Chang L L, et al. A powder feeding nozzle for laser cladding: 201810925297.0 [P]. 2018-10-26.
纪楠, 刘祥宇, 唱丽丽, 等. 一种激光熔覆用送粉喷嘴: 201810925297.0 [P]. 2018-10-26.
- [30] Nowotny S, Scharek S, Beyer E, et al. Laser beam build-up welding: precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, 16(3): 344-348.
- [31] Hayhurst P, Tuominen J, Vuoristo P, et al. Coaxial laser cladding nozzle for use with a high power diode laser [C] // *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Scottsdale, Arizona, USA. [S.l.: s.n.], 2002.
- [32] Zhang Z W, Yang W X, Chen K, et al. Develop of feeding nozzle for laser cladding rapid prototyping [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(1): 79-80.
张正伟, 杨武雄, 陈铠, 等. 激光熔覆快速成形技术送粉喷嘴的研制 [J]. *激光杂志*, 2007, 28(1): 79-80.
- [33] Bai Q, Zhang Q, Feng H, et al. Coaxial powder feeding nozzle actively adjusted by laser direct forming: 201710680838.3 [P]. 2017-10-24.
白倩, 张琦, 封衡, 等. 激光直接成型的光粉主动调节同轴送粉喷嘴: 201710680838.3 [P]. 2017-10-24.
- [34] Shi S H, Fu G Y, Wang A J, et al. Laser processing and forming in-light powder feeding process and optical internal powder feeding head: 101148760A [P]. 2008-03-26.
石世宏, 傅戈雁, 王安军, 等. 激光加工成形制造光内送粉工艺与光内送粉头: 101148760A [P]. 2008-03-26.

- [35] Cheng B A, Wang C, Shi S H, et al. A coaxial powder feeding device for laser cladding: 201120408651.6[P]. 2012-07-04.
程炳敖, 王晨, 石世宏, 等. 一种激光熔覆光内同轴送粉装置: 201120408651.6[P]. 2012-07-04.
- [36] Shi T, Shi S H, Shi J J, et al. Laser broadband cladding device: 201610879013.X[P]. 2017-02-22.
石拓, 石世宏, 史建军, 等. 激光宽带熔覆装置: 201610879013.X[P]. 2017-02-22.
- [37] Shi S H, Yu J L, Fu G Y, et al. A laser focusing device: CN103197420BA[P]. 2015-10-07.
石世宏, 郁佳莉, 傅戈雁, 等. 一种激光聚焦装置: CN103197420BA[P]. 2015-10-07.
- [38] Shi S H, Fu G Y. A laser spotting and cladding forming process and a coaxial nozzle for the same process: 200610024264.6[P]. 2006-08-09.
石世宏, 傅戈雁. 一种激光变斑熔覆成型工艺及用于该工艺的同轴喷头: 200610024264.6[P]. 2006-08-09.
- [39] Hu X D, Ma L, Luo C. Research status of powderfeeder for laser cladding [J]. Aeronautical Manufacturing Gechnology, 2011(9): 46-49.
胡晓冬, 马磊, 罗铖. 激光熔覆同步送粉器的研究现状[J]. 航空制造技术, 2011(9): 46-49.
- [40] Peng R Y, Luo L, Liu Y, et al. Research progress in coaxial powder feeding nozzles [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 080004.
彭如意, 罗岚, 刘勇, 等. 同轴送粉器喷嘴研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 080004.
- [41] Xue F, Wang Y M, Liu S Y. Research on coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(2): 13-16, 26.
薛菲, 王耀民, 刘双宇. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研究[J]. 光电技术应用, 2014, 29(2): 13-16, 26.