

同轴送粉器喷嘴研究进展

彭如意¹, 罗 岚¹, 刘 勇², 王 楠²

¹南昌大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330001;

²南昌大学江西省高性能精确成形重点实验室, 江西 南昌 330001

摘要 作为金属粉末激光快速成型技术中送粉系统的关键部件之一, 送粉喷嘴的送粉效率直接影响金属粉末激光快速成型的效率和精度。国内外对此领域都进行了深入研究, 并研制出多种新型送粉喷嘴, 其中同轴送粉喷嘴能有效提高金属粉末的熔覆效果和利用率。详细介绍了同轴送粉喷嘴的送粉原理及国内外研究现状, 分析及总结了影响光粉耦合效果和粉末利用率的主要因素, 并提出了改进方法。针对激光聚焦、粉末偏聚和反弹、冷却效果不佳等缺陷提出了改进措施, 并对同轴送粉喷嘴的应用前景进行了展望。

关键词 激光技术; 同轴送粉喷嘴; 冷却效率; 光粉耦合; 粉末偏聚

中图分类号 G322.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.080004

Research Progress in Coaxial Powder Feeding Nozzles

Peng Ruyi¹, Luo Lan¹, Liu Yong², Wang Nan²

¹ School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330001, China;

² Key Laboratory of Near Net Forming of Jiangxi Province, Nanchang University,
Nanchang, Jiangxi 330001, China

Abstract As one of key components of powder feeding system in the technology of laser rapid prototyping for metal powder, the powder feeding efficiency of powder feeding nozzles influences directly the laser rapid prototyping efficiency and accuracy of metal powder. The in-depth studies at home and abroad are performed in this field and a variety of new powder feeding nozzles are developed in which the coaxial powder feeding nozzle can effectively improve the metal powder cladding effect and utilization. The feeding principle and the research status at home and abroad of coaxial powder feeding nozzles are introduced, the main factors influencing powder utilization and laser-powder coupling performance are analyzed and summarized, and the improvement methods are proposed. Improvement approaches for laser focusing, powder segregation and bounce, and poor cooling efficiency are proposed, and the applications of coaxial powder feeding nozzles are prospected.

Key words laser technique; coaxial powder feeding nozzle; cooling efficiency; laser-powder coupling; powder segregation

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 120.4610; 220.4610; 140.3325

1 引言

粉料的输送在激光快速成型技术中十分重要, 高效的输送可以提高粉末的利用率, 改善材质的均匀性和表面的平整光滑度等。送粉喷嘴^[1-4]作为送粉系统的关键组成部分之一, 其质量会直接影响零件成型精度。

收稿日期: 2017-01-05; **收到修改稿日期:** 2017-03-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0701201, 2016YFB0701203, 2017YFB1103701)、国家自然科学基金(51671101, 51464034, 51062003, 11564025)、江西省自然科学基金(20161ACB21003, 20132BAB202010, 2010GZW0016)、江西省教育厅重点计划(GJJ150010)

作者简介: 彭如意(1995—), 女, 本科生, 主要从事材料物理性能方面的研究。E-mail: 1164746822@qq.com

导师简介: 罗 岚(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高通量实验技术及材料计算方面的研究。

E-mail: luolan1190@163.com(通信联系人)

根据制备需求,送粉技术主要有预置粉末法和同步送粉法。预置粉末法可大面积熔覆,要求激光具有很大的能量,且制造的熔覆层容易产生气孔,也会出现变形、开裂和脱落等缺陷。同步送粉法分为侧向送粉和同轴送粉两种,侧向送粉是指在激光束的一侧安装送粉喷嘴,粉末出口和激光束出口相距较远,不会出现粉末过早熔化阻塞光口的现象。侧向送粉具有方向性,只能用于二维轨迹的熔覆,不适用于圆形、方形等复杂三维轨迹的熔覆,因此在某些场合无法完成形状复杂工件的熔覆^[4]。同轴送粉^[5]是指激光光束与送粉喷嘴的中轴线在同一条轴上,可通过调整激光聚焦点,使之与粉末的汇聚点重合,得到最大的粉末利用率和最小的稀释率。其基本结构均采用多层同心锥筒形式,包含同轴光路通道、粉路通道和气路通道,粉末流采用三路或四路垂直进入方式,靠近端部有冷却装置^[6]。

目前,同轴喷嘴的主要不足有^[7-8]:1) 喷嘴主要通过螺纹与激光熔覆工作头连接,其中包含了粉、气、水路等许多管路,因此旋转装卸不方便;2) 沿圆周垂直进粉时,粉末流的初始分布不均匀,难以满足精密送粉要求;3) 内锥无法直接冷却,易烧损,受热变形严重时局部熔化,导致喷嘴口堵塞;4) 采用端部水平小挡板结构,不具备二次利用反射激光束和反射粉末的功能;5) 自身不具备调节焦斑直径的能力。

2 同轴送粉喷嘴的光粉耦合设计

光粉耦合方式是同轴送粉喷嘴设计的核心问题之一。光粉耦合通常采用对称聚焦方式,根据粉流和光束相对位置的不同,可以大致分为两种类型,即光外同轴送粉(光束居中,粉流包围)和光内同轴送粉(粉流居中,激光包围)。

光外同轴送粉的原理如图1(a)所示,其中 z 为粉末流的轴向距离, $0 < z < f_{p1}$ 为环粉流场区, $f_{p1} < z < f_{p2}$ 为粉流聚焦柱区, $z > f_{p2}$ 为锥形粉流区。张正伟等^[10]研制了图1(a)所示的喷嘴,以激光束为中心轴,4个双层送粉管均匀对称分布(粉末内层输出,气体外层输出形成管状气帘)。由于汇聚气的拘束和汇聚作用,粉末流保持了出口的形态,并且具有较长距离的挺度,离焦量为10 mm,能实现较远距离送粉,有效减少了堵塞送粉出口现象的发生概率,粉末的分散和反弹程度较小,汇聚性、稳定性和利用率较高。王维等^[11-12]设计了类似结构的四孔式同轴送粉喷嘴,该喷嘴中央为激光束及保护气通道,沿中心锥孔轴向均匀分布的4个小孔为粉末通道,粉末由4个送粉管喷出,与基材表面距离较远,避免了出粉口的堵塞。该喷嘴采用双层冷却,在保留原来激光束通道和送粉通道之间内腔冷却层的基础上,又在送粉通道和外锥体之间设计了外腔水冷层,避免了高温使喷嘴变形而堵塞出粉口的情况。该送粉喷嘴粉末利用率为45.5%左右。朱璟等^[13]设计了结构简单紧凑且具有良好的粉末汇聚性能和冷却性能的免装配孔式同轴送粉喷嘴,并且找到了喷嘴设计的最优因素水平组合,即送粉通道锥角为 26° 、出光口直径为4.4 mm、出粉口宽度为1.3 mm。胡晓东等^[14]设计了一种宽带熔覆侧向送粉喷嘴,其粉末利用率可达50%。

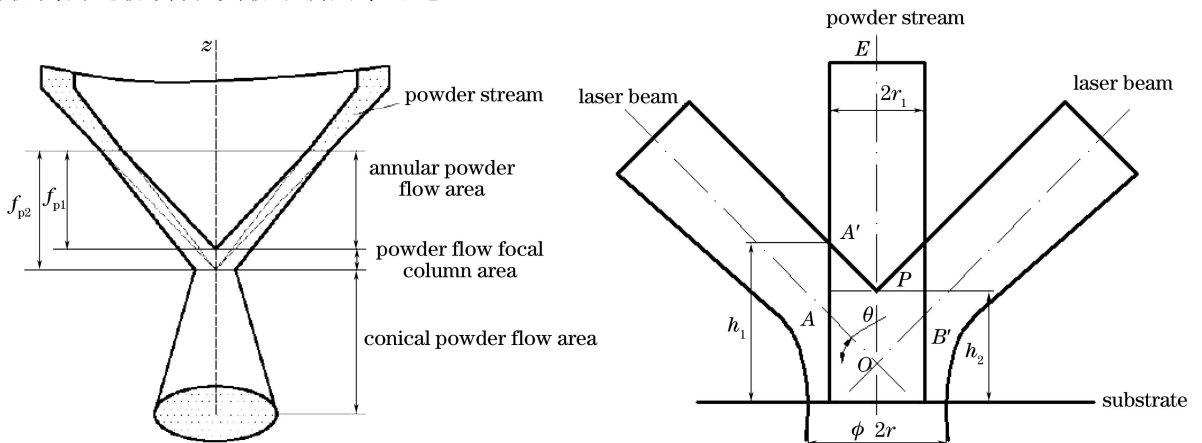


图1 光粉耦合示意图^[9]。(a)光外同轴送粉;(b)光内同轴送粉

Fig. 1 Schematic of laser-powder coupling^[9]. (a) Coaxial powder feeding for outside laser;

(b) coaxial powder feeding for inside laser

光内同轴送粉原理如图 1(b)所示。粉末居中,保护气包围粉末流,一方面起到了保护作用,另一方面将粉末流束缚成很细的一束,可用于精密加工。Suri 等^[15]设计的喷嘴采用计量自重力送粉。崔洪武^[9]通过对光内同轴送粉光粉耦合方式的研究发现,光内送粉利用率可以达到 60%~80%。

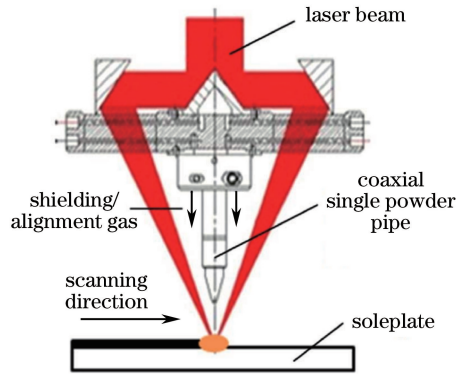


图 2 单喷嘴和屏蔽气幕的空心激光束原理^[16]

Fig. 2 Schematic of hollow laser beam with single powder nozzle and shielding gas curtain^[16]

Shi 等^[16]通过对两种供粉方式的研究发现,采用中空激光束内部进粉技术进行激光金属沉积实验,如图 2 所示。实验中送粉器的粉末束喷涂时又细又直,而后进入熔池,同时校准气体可以避免熔池斜底板的粉末流滴落下来。实验结果表明,成型部分壁厚均匀,最佳表面粗糙度 $R_a = 3.864 \mu\text{m}$,粉末利用率达 62%;熔化区晶粒粗大且松散,硬度相对较低,具有较好的显微组织。在这项研究中,HLB-IPF 技术实现了非水平层和沉积的悬挑结构,其主要技术特点有:1) 粉末通过一个单一的粉末管喷涂在同轴单粉管空心激光束中,粉末管末端具有一定的锥度,减小了重力对粉末流的影响;2) 熔覆头在沉积零件表面轮廓切线的法线方向上;3) 具有沉积高度反馈控制系统。

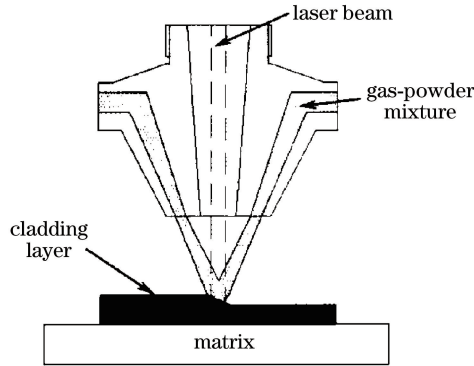
光外送粉和光内送粉具有各自的优势,其中光外送粉由于送粉通道具有一定倾角,因此粉末流具有一定的汇聚性,且能在一定程度上减少重力对粉末流的影响,可很好地通过载气达到对粉末流量的精确控制。光内送粉是粉末居中的结构,保护气包围粉末流,一方面起到了保护作用,另一方面将粉末流束缚成很细的一束,可用于精密加工。虽然粉末的利用率很高,但粉末居中的结构可能会导致成型件力学性能的下降。

3 同轴送粉喷嘴部件的设计

3.1 光束聚焦系统

为了提高光粉耦合的效率,需要在喷嘴处增加激光光斑调节器或粉流汇聚调节器,通过对光束汇聚光斑大小的调节来提高光斑与粉流聚焦焦斑的耦合性。在不影响光粉耦合性能的基础上,结合激光聚焦后的光斑直径越小则能量密度越高的特点,采用焦距较小的聚焦镜,得到较小的聚焦光斑和较大的焦点功率密度,从而得到致密度更高、力学性能更好、尺寸精度更高和表面粗糙度更好的成型零件。张红军等^[17]研制的高汇聚温度显示同轴送粉喷嘴增加了调节光斑大小的功能,确保激光束能从喷嘴的中央出射,使光束与粉末流完全同轴,熔覆道的最小宽度达 0.8 mm,提高了光粉耦合效率。周余^[18]设计的孔式同轴送粉喷嘴,如图 3 所示,中心为一圆锥孔,是激光束通道;送粉孔呈锥状,对称均匀分布于激光束通道外侧,同时聚焦于光束轴上。该结构有效地避免了现有同轴送粉喷嘴在大倾角熔覆时重力作用造成的粉末偏聚现象,确保了粉末汇聚的均匀性,提高了光粉耦合效率。

王方等^[19]设计的环状送粉喷嘴在激光头不动的情况下,通过调节高度调整块来改变粉末汇聚点处光斑的大小,变焦范围大,并且只需通过更改送粉外环和送粉内环之间的间隙,便可以改变粉末汇聚的宽度以满足产品多样化要求,提高了光粉耦合效率。朱萍等^[20]设计的激光熔覆喷嘴可以轻松调节横向和纵向位置,在一定圆周区域内对喷嘴进行微小调整,最终使从喷嘴喷出的金属粉末流与聚焦激光束中心同轴,真正实现同轴同步送粉,保证了激光熔覆质量,同时提高了光粉耦合效率。杨永强等^[5,21]设计了一种环式同轴激光熔覆喷嘴和孔式同轴激光熔覆喷嘴,喷嘴内均设有粉末汇聚点与激光聚焦点调节重合装置;粉末汇聚点相对于激

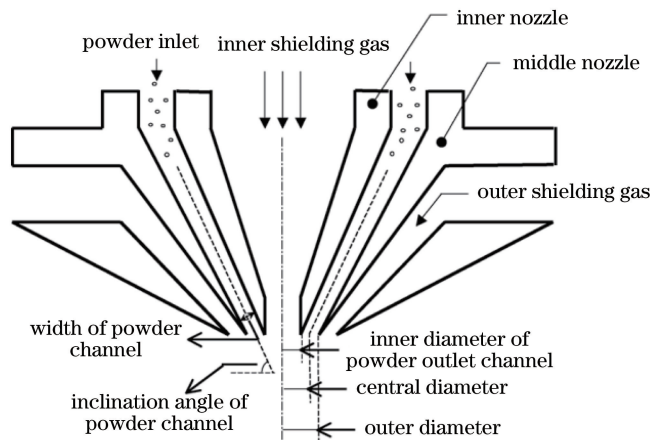
图 3 同轴送粉示意图^[18]Fig. 3 Schematic of coaxial powder feeding^[18]

光光束焦点的轴向调节量为 ± 5 mm,可调节粉末流束与激光束焦点汇聚于同一点,提高了粉末利用率^[22]。

许多研究机构在提高光粉耦合效率方面进行了深入研究,其中美国 3Dsystems 公司生产的双激光金属 3D 打印机(ProX 400)采用了双激光系统,该系统具有很高的光粉耦合效率,可在短短 15 min 内完成打印的后续工作并进入新的打印作业,且该打印机的重复精度达到 $20 \mu\text{m}$,但其价格相对较高。瑞通公司 SLM-200 金属激光 3D 打印机系统采用了选区激光熔化(SLM)技术,激光聚焦半径可在 $20 \sim 200 \mu\text{m}$ 范围内调节,可有效提高光粉耦合效率,通过 SLM 技术可得到完全冶金结合的金属实体,致密度接近 100%;工件的拉伸强度高,表面粗糙度为 $30 \sim 50 \mu\text{m}$,尺寸精度小于 0.1 mm ,价格相对较低。

3.2 粉流聚焦系统

在激光快速成型过程中,粉流的形状在很大程度上影响加工零件的质量。Pan 等^[23]研究了同轴送粉喷嘴中通过重力驱动输送金属粉末,发现粉流形状与粉末性能、喷嘴的形状以及保护气体的设置有关。Pan 等^[24]的研究表明,重力送粉系统的粉流形状同样受粉末特性、喷嘴几何形状(图 4)、屏蔽气体设置等的影响,同时粉流聚焦受喷嘴几何形状和气体设置影响显著。Peng 等^[25]提出了一种四管激光金属直接成形喷嘴,其粉末出口为倾斜且汇聚于一点的四个小孔,但喷嘴加工失败率高,且不具备粉末入射角度的调节能力,使用范围具有很大的局限性。在美国 Sandia 国家实验室四管式同轴送粉喷嘴^[26]、德国 Fraunhofer 研究所采用的环隙式同轴送粉喷嘴^[27]、华南理工大学研制的孔式同轴送粉喷嘴^[21]、清华大学采用的垂直装卸的分体式激光熔覆同轴送粉喷嘴^[28]中,也都存在不同程度的粉流聚焦问题。

图 4 沉积过程同轴喷嘴示意图^[24]Fig. 4 Schematic of coaxial nozzle in deposition process^[24]

针对送粉喷嘴的粉末偏聚、粉末输送问题,目前改进的结构设计主要有环形孔状送粉口结构和多孔送粉通道等。杨永强等^[21]研制出一种孔式同轴激光熔覆喷嘴,可以实现同轴和粉末聚焦与激光聚焦重合,在大角度倾斜时仍然可保持粉末的均匀性。喷嘴下缘端面呈锥状,能够将部分飞散的粉末重新汇聚,提高粉末的

利用率^[22],粉末汇聚于距喷嘴下缘 14.5 mm 处,汇聚点直径约为 1.89 mm,尤其适合喷嘴不与工件垂直时的激光熔覆。宋立军等^[29]发明了一种环孔式激光同轴送粉喷嘴,粉末流汇聚性高,在喷嘴倾斜时仍能获得均匀的粉末流,且激光熔覆效率高。王方等^[19]所设计的环状送粉喷嘴只需要通过更改送粉外环和送粉内环之间的间隙便可以改变汇聚粉末的宽度,在送粉内环上加工出多个粉末输出孔,使粉末的分布更为均匀,粉末汇聚更为集中。钟敏霖等^[28]设计了一种垂直装卸的分体式激光熔覆同轴送粉喷嘴,如图 5 所示,具有很多优点,比如内锥筒强化冷却及三层锥体同时冷却、灵活方便的垂直装卸、粉末流主动均匀化、光斑直径灵活可调、内锥头部可更换、喷嘴端部抗激光反射和粉末反射回收等。王维等^[13]设计了一种四孔式同轴送粉喷嘴,该送粉喷嘴汇聚焦点在出粉口下端约 14 mm 处。在焦点位置,绝大部分粉末汇聚在直径为 4 mm 的圆内,汇聚性较好,该送粉喷嘴粉末利用率为 45.5% 左右。高淑英^[30]设计了一种同轴送粉喷嘴,激光吸收率约为 90%,粉末利用率高达 75%。

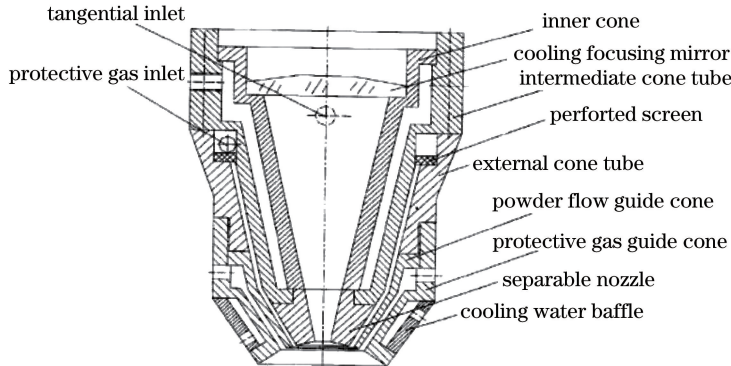


图 5 垂直装卸的分体式激光熔覆同轴送粉喷嘴示意图^[28]

Fig. 5 Schematic of coaxial powder feeding nozzle of split-type laser cladding for vertical loading and unloading^[28]

除此之外,在喷嘴设计上设计气固分离装置使粉末进入喷嘴前进行气固分离也可以提高粉末的汇聚性能。如田凤杰等^[31]设计的卸载式激光同轴送粉喷嘴,随着载气卸载量的增大,汇聚效果越来越好,当载气卸载量超过 75% 后,粉末流的汇聚效果很明显,汇聚挺度可达 25 mm 左右,汇聚半径为 2 mm,汇聚性能良好,粉末利用率可达 70% 以上。

针对粉末反弹问题有许多解决措施。俞亮亮^[32]在喷嘴下端设计了防粘连斜面,能够较好地解决反弹堵粉的问题。杨光等^[33]设计的激光快速成形同轴送粉喷嘴(图 6)具有结构紧凑、送粉均匀、粉末汇聚性好等优点,同时防粘连斜面可防止半熔状态的粉末颗粒反弹堵塞送粉通道。此外,为送粉通道设计合适的收缩角度和孔径可以进一步提高粉流稳定性,减小粉流束垂直方向上的速度,降低粒子反弹率。

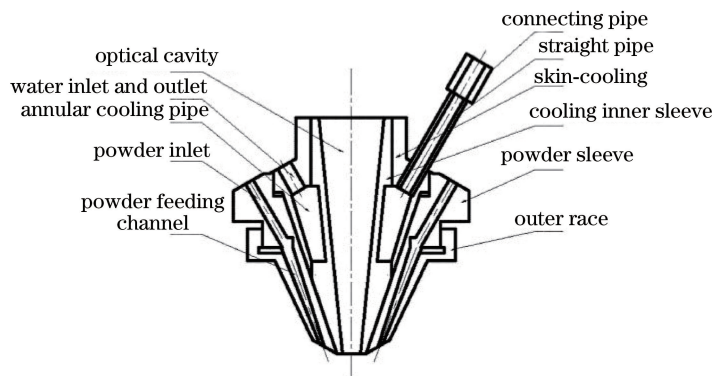


图 6 同轴送粉喷嘴示意图^[33]

Fig. 6 Schematic of coaxial powder feeding nozzle^[33]

在快速成型过程中,粒度过小的粉末在激光作用下极易气化,对熔池形成反向作用力,导致熔体发生飞溅,且在固态下易发生团聚,从而影响粉末铺展的均匀性;而对于粒度过大的粉末,在铺展过程中铺粉层厚的均匀性难以控制。可通过控制粉末流的粒度和均匀性来确保制造零件的精度,且进一步提高粉末的利用率。

同轴送粉系统自带闭环粉末流率反馈系统,可提供稳定、连续和精确的粉末流率,通过对送粉通道收缩角度和孔径的改进,使粉末流汇聚在激光光斑内,从而提高粉末的利用率。

目前,许多已有商业应用的激光熔覆头在粉流聚焦方面都取得了较大的进步。例如德国 Precitec 公司的 YC30 和 YC52 熔覆头,其最大激光功率分别为 2 kW 和 6 kW,粉末汇聚的焦半径分别为 0.7 mm(环状间隙喷嘴)和 2.0 mm(4 喷嘴);南京中科煜宸激光技术有限公司的 RC65 和 RC30 熔覆头,其最大激光功率分别为 6 kW 和 4.5 kW,激光聚焦直径约为 18 mm,粉末汇聚的焦半径分别为 1.6 mm 和 2.0 mm。

3.3 冷却系统

早期的喷嘴一般只有内腔和外腔,内腔是激光束通道,安装有聚焦镜,并且可通入稀有气体来避免粉末飞溅污染聚焦镜;外腔由内腔外围的圆锥和喷嘴的圆锥外廓形成的环形圆锥腔即粉末输送通道组成。粉末由气体通过外腔上端带有小孔的金属圆盘均匀送入;外喷嘴和中间喷嘴之间形成的空腔为水冷腔,可避免喷嘴过热导致的送粉出口堵塞^[4]。改进后送粉喷嘴的典型结构如图 7 所示,喷嘴芯内孔为与激光束夹角相同的锥形通孔,是光束及保护气的共用通道。喷嘴芯与中间套之间的环锥形间隙构成了送粉通道,中间套上沿切向设三个入粉口。外套在这两部分上对称地开有两个直孔,分别为入水口和出水口。当冷却水由入水口流入时,在隔板的分隔作用下,只能从隔板下端的间隙流过,再由出水口流出,从而实现对接嘴末端的强制循环冷却,有效冷却喷嘴。

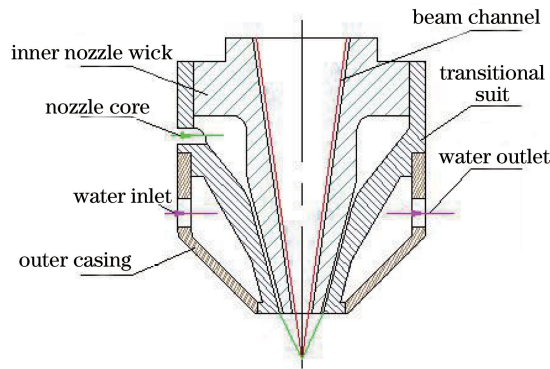


图 7 环式同轴送粉喷嘴原理示意图^[18]

Fig. 7 Schematic of ring coaxial powder feeding nozzle^[18]

王方等^[34]设计的喷嘴在高度调整块的外侧壁上开设冷却槽,下部分包括送粉头及送粉管。送粉头密封套设在高度调整块上,在送粉头上开设有相互间隔的送粉通道及水冷通道,送粉管设置在送粉通道内,水冷通道与冷却槽连通并密封设置,使水冷通道内的冷却介质密封于水冷通道与该冷却槽内,以满足激光熔覆或打印时对喷嘴冷却性能的要求。杨永强等^[35]设计了一种既可保证送粉均匀性又具有高效冷却效果,且无需进行装配的便于冷却的激光熔覆喷嘴。高淑英^[30]设计的同轴送粉喷嘴采用循环水冷却,当水流量最小为 $0.15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,可保证喷嘴的温升小于 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。朱璟^[14]设计的喷嘴采用激光束通道内的内壁焊接冷却腔,将冷却腔作为喷嘴的内部结构,直接实现冷却功能,除外部粉料通道外,其余设计成中空结构,从而增加冷却腔体积,改善冷却效果。魏振华^[36]发明了一种双层冷却喷嘴,冷却速度快(高达 $106 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$),涂层稀释率低(一般小于 5%)。张红军等^[17]研制了高汇聚温度显示同轴送粉喷嘴,加装了温度传感器,可随时监测喷嘴温度,一旦温度超过设定值,便发出报警信号,通过增加水流量加速冷却。Bi 等^[37]研制的送粉喷嘴带有监测系统,可以实时监测激光熔覆系统中送粉喷嘴的温度,通过增加水流量来提高冷却速度,以避免连续长时间工作对送粉喷嘴的损害。

喷嘴的外锥端部能够通过水冷降温,而内锥无法直接冷却,因此内锥易被烧毁,内锥受热变形严重时局部熔化将导致堵塞。为此可设计多层水冷套,但是喷嘴本身体积不能太大,因此可采用双层冷却喷嘴,利用循环水对喷嘴进行强制冷却,可在很大程度上降低送粉口堵塞的概率。目前,商业上具有高效冷却效果的送粉喷嘴有很多,如江苏中科四象激光科技有限公司激光同轴熔覆头(型号为 ZKXS-LCP200C)的水冷却环路流量大于等于 $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,达到了很好的冷却效果,且运行温度可控制在 $15 \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4 结 论

在激光快速成型过程中,粉末材料的输送非常重要。同轴送粉喷嘴的核心问题是光粉耦合效率、粉末汇聚性和喷嘴的冷却效率,尽管相关研究取得了一定成果,但是光粉耦合效率低、粉末的汇聚性差、粉末利用率低、喷嘴的出粉口易堵塞等问题仍亟待解决。同时,喷嘴的冷却效率也需要进一步提高,以满足激光快速成型的要求。如今商业应用的喷嘴与实验室的送粉喷嘴有较大差距,如何将实验室先进的送粉喷嘴商业化是一个重大的挑战。

参 考 文 献

- [1] Yang Yongqiang, Su Xubin, Wang Di. A laser cladding nozzle convenient for cooling: CN201020547283[P]. 2011-04-13.
杨永强, 苏旭彬, 王 迪. 一种便于冷却的激光熔覆喷嘴: CN201020547283.9[P]. 2011-04-13.
- [2] Zhang Xiancheng, Xuan Fuzhen, Liu Zhiyong, *et al.* A coaxial powder feeding nozzle for laser cladding with guide protection airflow: CN201823642U[P]. 2011-05-11.
张显程, 轩福贞, 刘志勇, 等. 一种包含导向保护气流的激光熔覆同轴送粉喷嘴: CN201823642U[P]. 2011-05-11.
- [3] Zhang Yongzhong, Shi Likai, Xing Jifeng, *et al.* Laser cladding coaxial powder feeding nozzle: CN2510502Y[P]. 2002-09-11.
张永忠, 石力开, 邢吉丰, 等. 激光熔覆同轴送粉喷嘴: CN2510502Y[P]. 2002-09-11.
- [4] Xue Fei, Wang Yaomin, Liu Shuangyu. Research on coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(2): 13-16.
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.
- [5] Yang Yongqiang, Huang Yong. Ring coaxial laser cladding nozzle: CN2707772[P]. 2005-07-06.
杨永强, 黄 勇. 环式同轴激光熔覆喷嘴: CN2707772[P]. 2005-07-06.
- [6] Chen Guoxiong. Split laser cladding coaxial powder feeding nozzle: CN101138755[P]. 2008-03-12.
陈国雄. 分体式激光熔覆同轴送粉喷嘴: CN101138755[P]. 2008-03-12.
- [7] Wang Chen, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.* Fans of coaxial feed laser cladding nozzle structure: CN202297781U[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: CN202297781U[P]. 2012-07-04.
- [8] Zhang Anfeng, Li Dichen, Yang Hongtao, *et al.* Angle adjustable nozzle for laser direct forming: CN102554471A[P]. 2012-07-11.
张安峰, 李涤尘, 杨洪涛, 等. 用于激光直接成形的角度可调式四管送粉喷嘴: CN102554471A[P]. 2012-07-11.
- [9] Cui Hongwu. Study on the coupling of laser beam and powder and high-level accumulate technology based on inside-laser coaxial powder feeding[D]. Suzhou: Soochow University, 2009.
崔洪武. 基于光内同轴送粉光粉耦合及高层成形技术的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2009.
- [10] Zhang Zhengwei, Yang Wuxiong, Chen Kai, *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.
- [11] Wang Wei, Cai Lei, Yang Guang, *et al.* Research on the key parameters of power-feeding nozzle for laser cladding forming[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 021402.
王 维, 才 磊, 杨 光, 等. 激光熔覆成形送粉喷嘴关键参数的探究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 021402.
- [12] Wang Wei, Cai Lei, Yang Guang, *et al.* Research on the coaxial powder nozzle for laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0403003.
王 维, 才 磊, 杨 光, 等. 激光熔覆同轴送粉喷嘴研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0403003.
- [13] Zhu Jing. Coaxial laser cladding powder feeding nozzle design and finite element analysis[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2016(9): 6-8.
朱 璟. 激光熔覆同轴送粉喷嘴的设计及有限元分析[J]. *现代制造技术与装备*, 2016(9): 6-8.
- [14] Hu Xiaodong, Zhu Liqiang, Yao Jianhua. Design of lateral powder nozzle for broad beam laser cladding[J]. *Light*

- Industry Machinery, 2014, 32(3): 10-12.
- 胡晓冬, 祝立强, 姚建华. 激光宽带熔覆侧向送粉喷嘴设计[J]. 轻工机械, 2014, 32(3): 10-12.
- [15] Suri A, Horio M. A novel cartridge type powder feeder[J]. Powder Technology, 2009, 189(3): 497-507.
- [16] Shi T, Lu B H, Shi S H, *et al.* Laser metal deposition with spatial variable orientation based on hollow-laser beam with internal powder feeding technology[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 88: 234-241.
- [17] Zhang Hongjun, Zhong Minlin, Liu Wenjin, *et al.* Develop of high convergent coaxial feeding nozzle with temperature display for laser rapid manufacturing[J]. Applied Laser, 2004, 24(6): 380-382.
- 张红军, 钟敏霖, 刘文今, 等. 高汇聚温度显示激光快速制造同轴送粉喷嘴的研制[J]. 应用激光, 2004, 24(6): 380-382.
- [18] Zhou Yu. Design and experiment of new powder feeding nozzles used in laser cladding[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- 周 余. 新型激光熔覆喷嘴设计及实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [19] Wang Fang, Yin Fu, Tang Jinglong, *et al.* Annular powder nozzle: CN105798303A[P]. 2016-07-27.
- 王 方, 尹 傅, 唐景龙, 等. 环状送粉喷嘴: CN105798303A[P]. 2016-07-27.
- [20] Zhu Ping, Shi Shihong, Fu Geyan, *et al.* A light coaxial powder feeding laser cladding nozzle: CN202898544U[P]. 2013-04-24.
- 朱 萍, 石世宏, 傅戈雁, 等. 一种光内同轴送粉激光熔覆喷嘴: CN202898544U[P]. 2013-04-24.
- [21] Yang Yongqiang, Huang Yong. Hole coaxial laser cladding nozzle: CN2707773[P]. 2005-07-06.
- 杨永强, 黄 勇. 孔式同轴激光熔覆喷嘴: CN2707773[P]. 2005-07-06.
- [22] Huang Yong. Design and manufacture of coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2004.
- 黄 勇. 激光熔覆同轴送粉喷嘴的设计制造及工艺实验[D]. 广州: 华南理工大学, 2004.
- [23] Pan H, Sparks T, Thakar Y D, *et al.* The investigation of gravity-driven metal powder flow in coaxial nozzle for laser-aided direct metal deposition process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(2): 541-553.
- [24] Pan H, Liou F, Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(2): 230-244.
- [25] Peng Z X, Azer M N, Li Y M, *et al.* Nozzle for laser net shaped manufacturing: US7358457[P]. 2008-04-15.
- [26] Jeantette F P, Keicher D M, Romero J A, *et al.* Method and system for producing complex-shape objects: US6046426 [P]. 2000-04-04.
- [27] Nowotny S, Scharek S. Machining head and process for the surface machining of workpieces by means of a laser beam: US6316744[P]. 2001-11-13.
- [28] Zhong Minlin, Liu Wenjin. Split-type coaxial powder-feeding nozzle for laser fusion and coating: CN1255411A[P]. 2000-06-07.
- 钟敏霖, 刘文今. 垂直装卸的分体式激光熔覆同轴送粉喷嘴: CN1255411A[P]. 2000-06-07.
- [29] Song Lijun, Zhang Yi, Hu Zhongxun, *et al.* A ring hole laser coaxial powder feeding nozzle: CN104694922A[P]. 2015-06-10.
- 宋立军, 张 屹, 胡仲勋, 等. 一种环孔式激光同轴送粉喷嘴: CN104694922A[P]. 2015-06-10.
- [30] Gao Shuying. Design and research of coaxial powder feeding nozzle for laser cladding[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2002.
- 高淑英. 用于激光熔覆的同轴送粉喷嘴的设计及研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2002.
- [31] Tian Fengjie. 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.
- [32] Yu Liangliang. Research of single-road cladding process based in inside-beam powder feeding and nozzle optimization [D]. Suzhou: Soochow University, 2014.
- 俞亮亮. 激光光内送粉单道熔覆工艺及喷嘴优化研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [33] Yang Guang, Cai Lei, Wang Wei, *et al.* Coaxial powder feeding nozzle for laser rapid forming: CN202989279U[P]. 2013-06-12.

- 杨光, 才磊, 王维, 等. 激光快速成形同轴送粉喷嘴: CN202989279U[P]. 2013-06-12.
- [34] Wang Fang, Zhang Ying, Yin Bo, *et al.* Powder feeding mechanism: CN105290399A[P]. 2016-02-03.
王方, 张莹, 尹博, 等. 送粉机构: CN105290399A[P]. 2016-02-03.
- [35] Yang Yongqiang, Su Xubin, Wang Di. A laser cooling nozzle with easy cooling and its 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.
- [36] Wei Zhenhua. A coaxial laser cladding nozzle: CN105862029A[P]. 2016-08-17.
魏振华. 一种同轴激光熔覆喷嘴: CN105862029A[P]. 2016-11-30.
- [37] 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.