

激光熔覆专用合金粉末雾化喷嘴的设计

吴涵锋^{1,2,3} 楼程华^{1,2,3} 姚建华^{1,2,3} 陈智君^{1,2,3} 郭士锐^{1,2,3}

¹ 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014
² 浙江省特种装备制造与先进加工技术重点实验室, 浙江 杭州 310014
³ 浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014

摘要 为了制备适合激光熔覆的球形合金粉末, 针对传统雾化喷嘴效率不高、粉末球形度不高且易堵嘴的情况, 设计出一种气流出口处为 laval 型, 带有辅助风孔和导液管的气雾化喷嘴。对喷嘴出口处进行气流仿真并用毕托管总压法进行测速, 用 U 型水压力计在喷嘴中心线上进行气压分布测量, 进行雾化实验, 最后用扫描电镜 (SEM) 和霍尔流量计对粉末进行分析。结果表明, 与传统喷嘴相比, 设计喷嘴能在出口处产生超音速气流, 且雾化过程中不易堵嘴, 雾化效率明显提高。而且制取的粉末有较好的粒度分布, 绝大部分呈球形, 有良好的流动性, 符合激光熔覆的要求。

关键词 激光技术; 激光熔覆粉末; 气雾化; 喷嘴设计; 制粉

中图分类号 TN429; TG174.44 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.101404

Design of Atomizing Nozzle for Laser Cladding Alloy Powder

Wu Hanfeng^{1,2,3} Lou Chenghua^{1,2,3} Yao Jianhua^{1,2,3} Chen Zhijun^{1,2,3}
Guo Shirui^{1,2,3}

¹ Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

² Zhejiang Special Equipment Manufacturing and Advanced Processing Technology Laboratory, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

³ Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract As to the low efficiency and low degree of sphericity with frequently impeded in atomizing process of traditional gas-atomizing nozzle, a new nozzle with laval outlet accompanied by ventilation hole and guiding pipe is designed to prepare spherical alloy powders for laser cladding. The gas velocity at the outlet of nozzle is simulated and measured by pitot tube total pressure method, and the air pressure on the nozzle centerline is tested by U-shaped water pressure gauge. After the atomization experiments, the powder achieved is analyzed by scanning electron microscope (SEM) and Hall flowmeter. The results show that compared with the traditional nozzle, the innovative nozzle can produce supersonic flow at the outlet, the process of atomization is unimpeded, and the efficiency of atomization is improved significantly. With excellent characteristics of good liquidity and granularity distribution, the spherical powder can meet the requirement of laser cladding.

Key words laser technique; laser cladding powder; gas-atomizing; nozzle designing; powdering

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 350.3850

1 引言

激光熔覆技术可以提高金属材料的表面性能, 降低能源消耗, 适于局部易磨损、冲击、剥蚀、氧化及腐蚀

收稿日期: 2011-03-21; **收到修改稿日期**: 2011-04-26; **网络出版日期**: 2011-08-20

作者简介: 吴涵锋(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光表面改性材料制取方面的研究。

E-mail: melodywhf@163.com

导师简介: 姚建华(1965—), 男, 教授, 主要从事激光表面改性与激光制造等方面的研究。

E-mail: laser@zjut.edu.cn(通信联系人)

等零部件,具有广阔的发展前景。因此,20世纪80年代以来,激光熔覆技术在很多工业领域得到应用^[1~4]。

尽管激光熔覆技术得到大量的应用,但是激光熔覆材料一直是制约其发展的最重要因素。激光熔覆所用的粉末体系一直都是沿用热喷涂粉末,众多学者指出为了防止喷涂时由于温度的微小变化而发生流淌,热喷涂合金的成分由于热喷涂需要,往往被设计成具有较宽的凝固温度区间,用于激光熔覆中会因流动性不好而带来气孔问题^[5,6]。因此对激光熔覆专用粉末的研究将是对激光熔覆研究的重要方向之一。国内一些学者对粉末的成分配比进行研究,在熔覆层的润湿性提高和裂纹倾向减少方面取得了一定的进展^[6,7]。除了粉末的配比之外,激光熔覆对合金粉末的使用性能、流动性及粒度范围都有特定的要求^[8],而且目前用于激光熔覆的材料主要有Fe基,Ni基和Co基三大系列合金粉末^[9]。然而世界上大多数合金粉末都是由气雾化制得,但雾化工艺参数因雾化材料及对粉末的需求的不同而不同,至今没有一种“万能”气雾化设备,也没有一套通用的雾化工艺^[10],很少有涉及到用气雾化制取激光熔覆合金粉末的研究。据此,在实验室反复的材料成分设计和熔覆实验基础之上,结合原有气雾化喷嘴,设计出一种结构简单,气流出口处为laval型,带有辅助风孔和导液管的气雾化喷嘴,旨在研制出有合适的粒度和窄的粒度分布范围,并且流动性好的激光熔覆合金粉末。

2 雾化喷嘴设计的理论分析

合金粉末的制取主要是通过雾化喷嘴产生的高速高压流体介质(本文流体介质是氮气),将熔体流粉碎成很细的液滴,然后再通过对流传热的方式迅速冷凝而形成金属粉末。通过实验室反复熔覆实验及相关文献^[11,12],认为激光熔覆粉末对合金粉末的颗粒度一般在 $-140\sim+320$ 目($46.9\sim109\mu\text{m}$)之间,对熔体雾化尺寸的描述中,Lubanska^[13]提出的半经验公式为

$$\frac{d_m}{D} = \beta \left[\left(1 + \frac{M}{A} \right) \frac{v_m}{v_g \omega_e} \right]^n, \quad (1)$$

式中 d_m 为液滴直径, D 为导流管内径, M 、 A 分别是熔体和气体的液流率, v_m 、 v_g 分别是熔体和气体的运动粘度, $\omega_e = \rho_m \frac{v^2 D}{\gamma}$ 为熔体的表面张力(ρ_m 为熔体密度, v 为气流冲击熔体流的速度, γ 为表面张力), β 和 n 为经验常数。在公式中可以看出,液滴平均直径受气流速率、熔体和气体流率比、导液管直径等影响。在整个雾化过程中,雾化喷嘴对雾化效率的高低及稳定性起着非常重要的作用,而喷嘴的结构直接影响到上述参数,故喷嘴的设计必须充分考虑到这些参数,并使其达到最优。

3 雾化喷嘴设计

雾化喷嘴根据结构可以分为自由落体式喷嘴和限制式喷嘴,如图1所示。

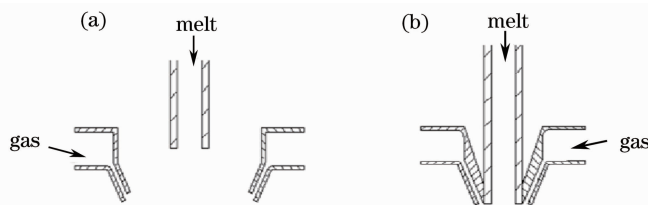


图1 雾化喷嘴示意图。(a)自由落体式;(b)限制式

Fig.1 Schematic diagram of atomizing nozzle. (a) Free-fall nozzle; (b) confined nozzle

自由落体式喷嘴雾化效率不高,仅适用于 $-50\sim+300$ 目($48\sim270\mu\text{m}$)粒度粉末的生产,但结构简单,适于高熔点合金;限制式喷嘴雾化效率高,但设计复杂,多适合于低熔点金属^[14],而激光熔覆合金粉末大多数为Fe基,Ni基和Co基合金粉末^[9],且粒度范围一般为 $-140\sim+320$ 目,故激光熔覆合金粉末需要由较高熔点合金制成,且粒度、圆度要求高,粒度分布要窄,所以激光熔覆合金粉末必须结合自由落体式和限制式喷嘴所制出粉末的优点。在实验室原自由落体式喷嘴的基础之上,设计出激光熔覆合金粉末专用喷嘴,结构如图2所示。设计的喷嘴与常规自由落体式喷嘴相比,采用laval型出口,并加入了导液管和辅助风孔,使其雾化效率提高,并能解决自由落体式喷嘴在高气压下会堵嘴的问题^[15]。而与常规限制式喷嘴相比,虽然出口处的laval设计与国

内外超音速喷嘴设计相似,但设计喷嘴能在导液管长度改变和辅助风孔的作用下解决超音速喷嘴中增压和吸动导致的堵嘴和雾化不充分的问题^[16,17],而且结构简单得多,故设计的喷嘴能制出高的熔点且有合适的粒度和窄的粒度范围的激光熔覆的合金粉末。

3.1 气流出口型腔仿真并设计

粉末雾化过程中,高压气体具有高速和特征尺度小的特点,因此可将其看成是理想气体,并把气流流动过程当成是绝热的,且比热当作常数。

气体的速度越大,对熔体的冲击就越强,雾化的效果就越好,根据气体动力学理论,高压雾化气体从减压阀流出后,其最大速度只能达到声速,即出口截面的气流马赫数 $Ma=1$ ^[18]。为了使气流速度尽可能大,达到超音速,将喷嘴气体出口处设计成 laval 型,即收缩-扩张型,如图 2 中的气流出口所示,根据喷嘴设计原则,一般环缝喷嘴的缝隙大小都不小于 0.5 mm^[14],在此设计的喷嘴中,缝隙选为 0.5 mm,参考实验室原喷嘴及相关文献,喷嘴下端内径为 30 mm^[15],则经过计算喉部到喷嘴中心线约为 16 mm,则喉部面积约为 50 mm²,假设出口马赫数为 2,根据等熵面积比公式^[18]

$$\frac{A}{A_{cr}} = \frac{1}{Ma} \left[\left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right) \frac{2}{k+1} \right]^{(k+1)/2(k-1)}, \quad (2)$$

式中 A 为任意截面面积, A_{cr} 为喉部面积, k 为比热比,氮气取 1.4。 Ma 为截面 A 处的马赫数,根据公式可得出出口面积为 84 mm²。为指导设计,选用 FLUENT 对自行设计喷嘴的气流出口和原有收缩型喷嘴的气流出口处进行仿真对比,将实际三维流场简化成二维,并使气体流场水平放置,如图 3 所示。采用四边形结构化网格,湍流模型选用 Splart-Allmaras 湍流模型^[19],采用理想气体状态方程。入口总压为 7 MPa,温度为 300 K。由于超音速流动的压力出口边界需根据入口条件推算^[19],故自行设计喷嘴出口边界压力估算为 1 MPa,收缩型喷嘴出口边界压力设为 101 kPa,壁面边界为无滑移绝热壁面,雾化介质为氮气,气体黏度利用 Sutherland 公式^[19]计算。

图 4 为气体出口处气体流速的仿真图,从图 4(a) 中可以看出,气流在喷嘴中一直加速,在喉部时达到音

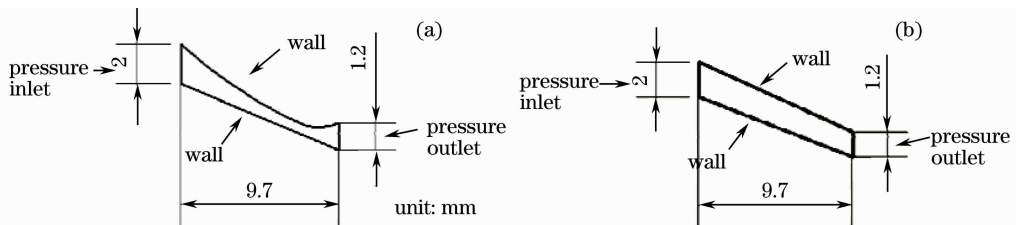


图 3 计算区域和边界条件。(a)设计的喷嘴;(b)收缩喷嘴

Fig. 3 Computational domain and boundary condition. (a) Designed nozzle; (b) convergent nozzle

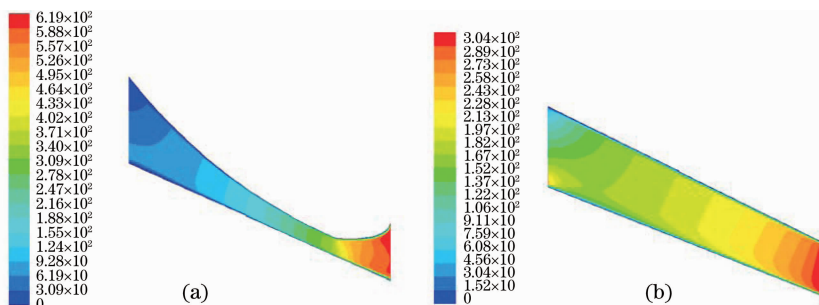


图 4 气流出口处速度仿真。(a)设计的喷嘴;(b)收缩喷嘴

Fig. 4 Velocity simulation of gas outlet. (a) Designed nozzle; (b) convergent nozzle

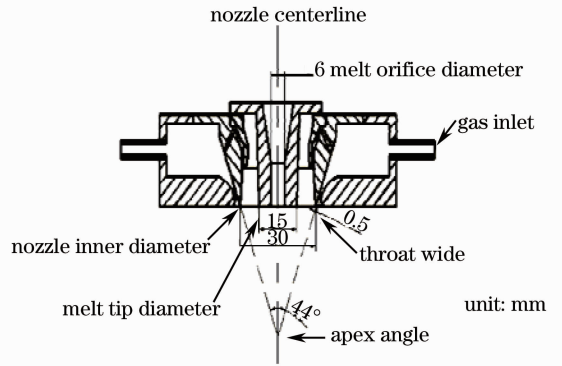


图 2 自制雾化喷嘴结构图

Fig. 2 Configuration of designed nozzle

速,然后继续加速,在出口处速度达到 619 m/s。

从图 4(b)中可以看出气体也是一直加速,但到达出口处的速度达到临界值,只有 304 m/s。通过对比可以说明设计的 laval 型腔能显著提高气流的出口速度。为加工方便,并使雾化角度达到最佳角度,即 44° ^[15],根据缝隙大小和雾化角度,气流出口处结构设计如图 5 所示。

3.2 辅助风孔的设计

气雾化过程中经常会有堵嘴的现象,堵嘴会烧坏喷嘴,造成很大的损失,所以,在设计喷嘴的时候必须考虑解决喷嘴堵嘴的问题,一些学者对喷嘴的堵嘴进行了研究,大多数认为是由于雾化时气流产生的负压或者气流的紊流,使熔体散流到喷嘴气流出口处^[15]。而且负压过大会加速熔体的下流,但气体雾化时,熔体与气体的流速比越小越有利于粉末的雾化^[13],为了防止喷嘴堵嘴并且降低流速比,在喷嘴中加入 2 对辅助风孔(如图 2 所示),使部分气体通过通孔向下流动,维持喷嘴附近气压平衡,减少紊流作用,不使熔体液滴返回风口。

3.3 导液管的设计

限制式喷嘴相比于自由落体式喷嘴,之所以雾化效率提高很多,主要是因为限制式喷嘴在熔体流出时就被气体冲击雾化,大大降低了气体的损耗。为了使熔体在流出前少受气流紊流的影响和流出后与气体的距离缩短,在喷嘴中设计并加入合适的导液管(如图 2 所示)。激光熔覆合金粉末大部分都是高熔点的,为了让熔体能通过导液管顺利流出,导液管选用陶瓷材料。

4 实验验证及分析

要验证设计的喷嘴是否符合要求,首先要检验雾化介质能否获得很高的速度,其次是看雾化过程中雾化过程是否稳定,再次看雾化过程中是否会堵嘴,最后是看雾化的合金粉末是否满足激光熔覆的技术要求。因此从上述几个方面对喷嘴进行检验。

4.1 气体出口速度测试

根据空气动力学原理,采用毕托管总压法测定气流的出口速度^[20]。先用毕托管测出气流出口处的滞止压强为 p^* ,然后根据当地气压 p ,和空气动力学公式^[18]

$$\frac{p^*}{p} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right) \frac{k}{k-1}, \quad (3)$$

得出马赫数,计算出气流速度,最后计算出设计喷嘴的气流出口速度和原有收缩型喷嘴的气流出口速度分别是 589 m/s 和 299 m/s,与模拟结果基本吻合,表明与原喷嘴相比,设计的喷嘴能显著提高气流的出口速度。

4.2 喷嘴中心线压力分布的测试

为了检验辅助风孔的作用,在无熔体时,用减压阀控制 7 MPa 的气流,用 U 型水压力计测量喷嘴中心线的压差分布,用橡胶管连着 U 型水压力计和直径为 6 mm 的石英玻璃测压导管。从雾化器上口处至下口每隔 10 mm 测一个点,每点的测量时间为 60 s,待 U 型水压力计稳定后再开始读数,测量的结果如图 6 所示。从图中可以看出,无辅助风孔的原始喷嘴中心线上开始是负压,中间段是正压,最后段是负压,与陈平等^[21,22]测量的结果基本一致。而设计的有辅助风孔的喷嘴中心线从上口到下口中心线处全是负压,而且负压从大到小,这是因为加入了辅助风孔后,打破了气流的不规则回流,使得正压区消除。

显然,辅助风孔的设计减少了气流回流,使熔体不因气流回流而堵嘴。

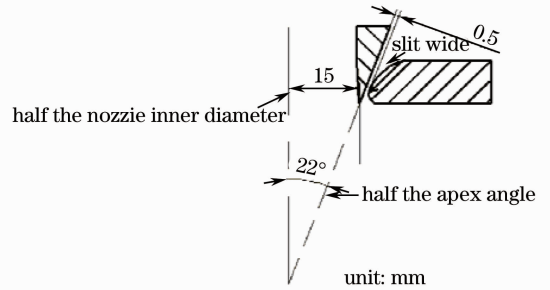


图 5 雾化喷嘴气流出口结构图

Fig. 5 Configuration of atomizing nozzle's gas outlet

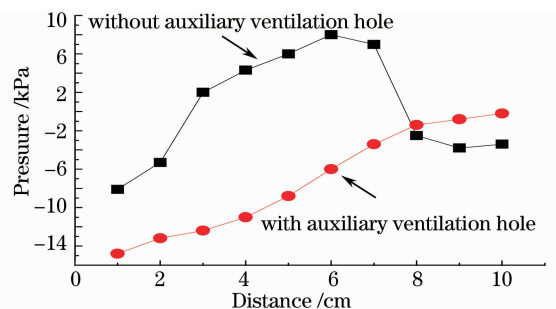


图 6 喷嘴中心线上的压力分布

Fig. 6 Pressure profiles along nozzle axis

4.3 合金粉末雾化实验

为验证设计喷嘴的稳定性及导液管的实用性,对喷嘴进行雾化实验,实验材料采用本实验室配比的高熔点高硬度 Ni 基合金,配成炉料放在中频感应炉中熔炼,当过热度到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时浇注到升温至 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的带导液管的漏包中,并用减压阀控制 7 MPa 的氮气雾化。合金融化后,熔体经过漏包流出,这时高速氮气直接冲击熔体,熔体被雾化成细小的熔滴。先对实验室原喷嘴进行 3 次雾化实验,再对设计的喷嘴进行 3 次雾化实验,发现原喷嘴有 1 次堵嘴,而设计的喷嘴雾化过程安全稳定,合金熔体全部顺利喷雾完成,未出现堵嘴现象。

对上述实验结果分别取平均值,发现设计的喷嘴所制的 100 目 ($150\text{ }\mu\text{m}$) 以下的合金粉末与原喷嘴相比多了将近 50%,都取 $-100\sim +500$ 目 ($25\sim 150\text{ }\mu\text{m}$) 的 1 kg 粉末进行粒度分析,发现设计的喷嘴雾化产生的 $-140\sim +320$ 目的粉末比原喷嘴也显著提高,如表 1 所示。

表 1 设计的喷嘴与原喷嘴效率对比

Table 1 Efficiency comparison between designed nozzle and original nozzle

Granularity	$-100\sim +140$ mesh	$-140\sim +320$ mesh	$-320\sim +500$ mesh	$-100\sim +140$ mesh
	number /g	number /g	number /g	number /%
Traditional nozzle	561.17	361.67	77.16	36.17
Designed nozzle	368.24	526.32	105.26	52.63

这一方面是因为 laval 出口设计使气流雾化速度提高,使雾化更充分,另一方面是因为越靠近喷嘴下端口,中心线负压越小,如图 6 所示,而负压的大小直接影响到熔体的流速,即负压越小,抽吸压力越小,熔体流速越慢,而熔体流速相对缓慢,稳定时雾化效率更高。而导液管的增加,使熔体流出时就在喷嘴下端口附近,受到较小的抽吸力,而且减少了熔体与气流之间的距离,减少气体损耗,所以加导液管后喷嘴能有更好的雾化效果。

理论上是导液管越长越好,但导液管长度必须适宜,如果导液管太长,受到气体的冲击,受热不均,容易开裂或者造成堵塞,本文中导液管的长度设计到喷嘴出口处,与气流汇聚点有一定的距离。进一步提高雾化效率又能不堵嘴的最佳喷嘴长度的设计还得通过进一步的相关实验。

4.4 粉末流动性分析

用霍尔流量计来分别测量 5 次 $50\text{ g}-140\sim +320$ 目的原喷嘴和设计喷嘴所制粉末全部流失所需的时间,取平均值,测试结果如表 2 所示。

表 2 粉末流动性测定

Table 2 Liquidity determination of powder

	Average time /s
Traditional nozzle	24.3
Designed nozzle	17.2

从表中可以看出,设计的喷嘴与原始喷嘴相比,所制的粉末有良好的流动性。

4.5 粉末分析

图 7 分别为原有喷嘴与设计的喷嘴所制取的 $-140\sim +320$ 目镍基粉末在扫描电镜下的 200 倍照片,

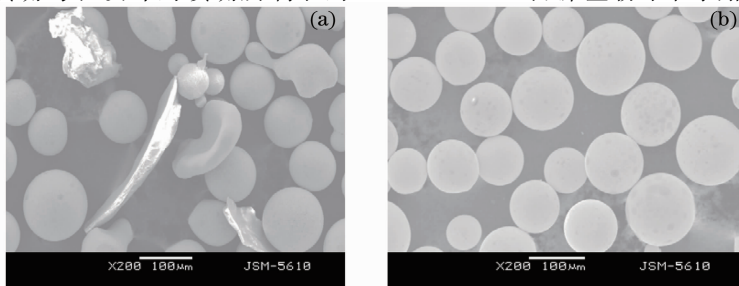


图 7 自制镍基粉末形貌。(a)原喷嘴所制粉末;(b)设计喷嘴所制粉末

Fig. 7 Morphology of nickel-base powder. (a) Powder produced by original nozzle; (b) powder produced by designed nozzle

可以看出原喷嘴所制粉末分布不是很规则,但设计喷嘴所制粉末几乎全呈规则的球形,符合激光熔覆粉末流动性好的性能。原因是改进后雾化更稳定,而且气体作用在熔体上的能量更多,使得雾化效果更好,从而粉末更均匀。

5 结 论

喷嘴出口处设计成 Laval 型后,通过仿真和测试,发现与收缩管出口相比,气流的出口速度可提高一倍以上。喷嘴中加入辅助风孔后,能减少气流紊流作用,使雾化顺利进行,并减少抽吸压力,使熔体流速变慢,使雾化更充分。喷嘴中加入导液管后,能使熔体流出后直接被气流雾化,雾化更加充分,雾化效率提高。设计的喷嘴与实验室传统的喷嘴相比,雾化稳定,效率提高 50%,而且制出的高温 Ni 基合金粉末颗粒度、球形度好,且分布窄,流动性好,能满足激光熔覆的要求。

参 考 文 献

- Shen Bin, Yan Guangchao, Wu Gang. Laser cladding on complex disc cam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 244~248
沈 斌, 闫广超, 吴 刚. 复杂盘形凸轮表面激光熔覆工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 244~248
- Liu Juan, Tang Xiahui, Peng Hao *et al.*. Pulse modulation characteristic of high power continuous CO₂ laser and its application in special cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1575~1580
刘 娟, 唐霞辉, 彭 浩 等. 高功率连续 CO₂ 激光器脉冲调制特性及特殊熔覆应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1575~1580
- Li Li, Yang Xichen, Dong Ze. CCD measurement of temperature field of coaxial powder plow in laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2431~2437
栗 丽, 杨洗陈, 董 哲. 激光熔覆中同轴粉末流温度场的 CCD 检测[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2431~2437
- Wang Wenli, Chao Mingju, Wang Dongsheng *et al.*. Investigation on in-situ synthesis of TaC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 277~282
王文丽, 晁明举, 王东升 等. 原位生成 TaC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 277~282
- Li Chunyan, Zhang Song, Kang Yuping *et al.*. Comment on material system for laser cladding[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3): 5~9
李春彦, 张 松, 康煜平等. 综述激光熔覆材料的若干问题[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(3): 5~9
- Tan Wen, Liu Wenjin, Jia Junhong. Research on laser cladding Fe-C-Si-B[J]. *Heat Treatment of Metal*, 2000, (1): 15~18
谭 文, 刘文今, 贾俊红. 激光熔覆 Fe-C-Si-B 的研究[J]. *金属热处理*, 2000, (1): 15~18
- Jia Junhong, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. The effect of titanium addition on generating composite coatings reinforced by laser cladding on the surface of Fe-C alloy[J]. *Applied Laser*, 2000, **20**(4): 145~148
贾俊红, 钟敏霖, 刘文今 等. Ti 对 Fe-C 合金表面激光熔覆复合材料层组织和性能的影响[J]. *应用激光*, 2000, **20**(4): 145~148
- Xu Bingshi, Liu Shican. *New Technologies of Surface Engineering*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 208~212
徐滨士, 刘世参. *表面工程新技术*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 208~212
- Si Songhua, Yuan Xiaomin, He Yizu. Microstructures and properties of laser clad Ni-based metal-ceramics layers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 759~762
斯松华, 袁晓敏, 何宜柱. 激光熔覆镍基金属陶瓷涂层的组织性能研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 759~762
- Ouyang Hongwu, Chen Xin, Yu Wentao *et al.*. Progress and prospect on the gas atomization[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2007, **25**(1): 53~58
欧阳鸿武, 陈 欣, 余文焘 等. 气雾化制粉技术发展历程及展望[J]. *粉末冶金技术*, 2007, **25**(1): 53~58
- Tang Ying, Yang Jie. Study on laser cladding Ni-based alloy power of coating[J]. *Hot Working Technology*, 2004, **33**(2): 16~22
唐 英, 杨 杰. 激光熔覆镍基粉末涂层的研究[J]. *热加工工艺*, 2004, **33**(2): 16~22
- Sun Ronglu, Guo Lixin, Dong Shangli *et al.*. Study on microstructure of laser-clad NiCrBSi-TiC coating on the surface of titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3): 275~278
孙荣禄, 郭立新, 董尚利 等. 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层的组织研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3):

275~278

- 13 Peng Chaoqun. Spray Forming Technology[M]. Changsha: Central South University Press, 2004. 74~75
彭超群. 喷射成形技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004. 74~75
- 14 Huang Peiyun. Powder Metallurgy Principle[M]. Beijing: Powder Metallurgy Press, 2004. 98~101
黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 粉末冶金出版社, 2004. 98~101
- 15 Chen Qingjun, Fan Hongbo, Su Jianfei *et al.*. Investigation on the atomization characteristics of free atomizer[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2003, **13**(4): 10~13
陈庆军, 范洪波, 孙剑飞 等. 开放式气雾器的雾化特性研究[J]. 粉末冶金工业, 2003, **13**(4): 10~13
- 16 Zhao Xinming, Xu Jun, Zhu Xinxue *et al.*. Aspiration pressure variation at the tip of metal delivery tube in the supersonic atomization nozzle[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2010, **28**(1): 21~25
赵新明, 徐 骏, 朱学新 等. 超音速气雾化喷嘴中轴吸压力变化规律的研究[J]. 粉末冶金技术, 2010, **28**(1): 21~25
- 17 Shen Jun, Jiang Zuling, Zeng Songyan *et al.*. Pressurization and aspiration phenomena in process of gas atomization[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 1994, **12**(1): 15~17
沈 军, 蒋祖龄, 曾松岩 等. 气体雾化过程的增压和吸动现象[J]. 粉末冶金技术, 1994, **12**(1): 15~17
- 18 Wang Yuexin. The Basis of Gas Dynamic[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006. 180~185
王月新. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006. 180~185
- 19 Han Zhanzhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. Fluent-Calculation Examples and Application of Fluid Engineering Simulation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. 105~107
韩占忠, 王 敬, 兰小平. Fluent-流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010. 105~107
- 20 Zhu Zixin, Liang Xiubin, Xu Bingshi *et al.*. The simulation and experiment of high velocity arc spraying droplet[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, **23**(1): 5~8
朱子新, 梁秀兵, 徐滨士 等. 高速电弧喷涂熔滴速度的数值模拟及试验[J]. 焊接学报, 2002, **23**(1): 5~8
- 21 Chen Ping, Liu Fuping. Improvement of the atomizer used for producing metal powder [J]. *Metal Materials and Metallurgy Engineering*, 2009, **37**(4): 46~49
陈 平, 刘福平. 雾化制粉用喷嘴的改进[J]. 金属材料与冶金工程, 2009, **37**(4): 46~49
- 22 Zhao Maiqun. Gas dynamics ananalysis of unrestricted nozzle[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 1997, **15**(2): 99~105
赵麦群. 非限制式雾化器的气体动力学分析[J]. 粉末冶金技术, 1997, **15**(2): 99~105