

文章编号: 1001-3806(2008)06-0572-04

激光扫描金属粉末的“球化效应”及其应用

欧阳鸿武, 刘卓民, 黄誓成, 王 琼, 张 新

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 为了利用激光束扫描金属粉末时的“球化效应”将异形金属粉末球化, 通过采用正交实验法, 系统探讨了获得球化效果的激光工艺参量, 得到相应的球形粉末。结果表明, 金属粉末的球化能力决定于金属粉末的粒径、导热性、熔点和激光吸收率等因素, 可用球化因子 K 表征; 当激光扫描速度与激光功率 (高于临界功率后) 的比值大致等于 K 时, 可获得球形粉末。

关键词: 激光技术; 金属球形粉末; 球化效应; 钛; 青铜

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

Laser scanning to fabricate spherical powder by “balling effect”

OUYANG Hongwu, LIU Zhuomin, HUANG Shi-cheng, WANG Qiong, ZHANG Xin

(State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: This study is carried on to explore a feasible approach to transfer the irregular powder, such as Ti powder and bronze powder, into spherical powder by “balling effect”. The results indicate that (1) the balling ability of metal powder can be ranked by a balling factor K which accounts for the influence of particle size, density, special thermal property, boiling point as well as laser absorbing rate; (2) when the scanning speed v equals laser power P multiplying K , the irregular particle will be transformed into spherical powder

Key words: laser technique; metal powder; balling effect; Ti; bronze

引 言

近年来,随着粉末冶金零件近净成形制造技术迅速发展,球形粉末的应用日益广泛,球形粉末的制备技术因此成为当前一个重要的研究内容。例如,制备高性能球形 Ti 粉就是面临的难题之一。Ti 合金具有耐腐蚀性强、比强度高等一系列优越的性能^[1],应用领域不断扩展,对于富钛的中国,加快发展球形 Ti 粉制备技术的研究,更是具有重要的战略意义。类似地,还有其它一些材料,如青铜(铜锡合金),同样难以低成本生产出球形粉末。探寻将异形粉末转化为球形粉末的可行途径因而备受关注。

金属粉末在激光束作用下存在球化现象^[2]:即当激光束扫过粉末时,粉末迅速升温熔化后在表面张力作用下收缩成为球形颗粒,称为“球化效应”。RYU 等人^[3]运用激光束扫描物体表面,使物体表面所吸附微细粉末或薄膜在激光作用下迅速球化并弹起的行为,

使吸附物脱离物体表面,以清洁物体表面。HABEN-NICHT 等人^[4-7]利用激光束扫描金属薄膜制备出由离散液滴组成的规则图形。这些研究提供了一条思路:利用激光束扫描粉末中的“球化效应”,将非球形粉末转化为球形粉末。为此,作者开展了探索性研究。

1 实验装置和方案

实验中采用 DTM 公司的 Sinterstation2500 型选区激光烧结设备,CO₂ 激光,激光功率从 0W ~ 700W、激光扫描速度从 0mm/s ~ 180mm/s 连续可调,激光束直径 $D = 0.3\text{mm}$ 。

钛粉为氢化脱氢工艺制备的异形粉末,粒度分布范围为 $10\mu\text{m} \sim 250\mu\text{m}$,粉末平均粒度为 $125\mu\text{m}$ 。异形钛粉具有很高的激光(CO₂ 激光)吸收率,达 0.59,钛的熔点为 1941K;异形黄铜粉的激光吸收率为 0.26^[8],粒度分布范围为 $10\mu\text{m} \sim 60\mu\text{m}$,粉末平均粒度为 $35\mu\text{m}$,熔点为 1163K。

实验装置如图 1 所示。实验中,在长 × 宽 × 厚为 200mm × 120mm × 6mm 平整的不锈钢板上均匀地铺洒一薄层粉末,激光束沿往复路径作用于粉末。实验参量的范围设定如下:激光功率为 300W ~ 700W,功率的增量均为 100W;扫描速度为 10mm/s ~ 130mm/s,速度

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50574103)

作者简介:欧阳鸿武(1964-),男,教授,主要从事激光快速成形和金属粉末制备等方面的研究。

E-mail: oylhw@mail.csu.edu.cn

收稿日期:2007-09-25;收到修改稿日期:2008-04-01

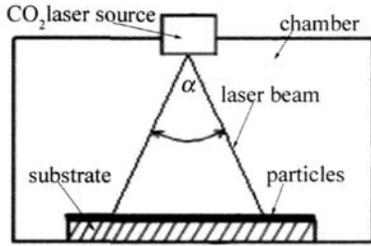


Fig 1 Schematic diagram of laser beam scanning equipment

的增量均为 20mm/s。分别调节扫描速度和激光功率,进行交叉试验。扫描间距均为 0.3mm。氩气作为保护气氛,工作腔内氧含量低于 6×10^{-4} 。粉末的形状和表面形貌采用 PH L IPS XL30 扫描电镜进行扫描分析和显微放大观测。

2 实验结果和讨论

2.1 实验结果

在 5 × 7 个不同的工艺参量组合中,粉末在激光扫描下的变形表现出较大的差异。将既能实现球化,同

时还能基本保持原始的粒度用“B”表示;成球直径大于原始尺寸的用“R”表示(由多个颗粒熔合而成);当粉末熔结成条块状时,用“A”表示;部分粉末球化时,用“T”表示;粉末虽有稍许变形,但仍为离散的异形,用“W”表示;“*”表示球化效果最好的情况。大写字母和小写字母分别代表青铜和钛粉的实验结果。实验结果列于表 1 中。粉末形貌 SEM 图片如图 2 和图 3 所示。

Table 1 Variation of powder shape under different process parameters

power/W	speed/(mm · s ⁻¹)						
	10	30	50	70	90	110	130
700	A (a)	A (r)	R (b)	B (r)	B (r)	W (w)	W (w)
600	A (a)	R (b*)	B (r)	B (r)	W (w)	W (w)	W (w)
500	A (r)	B* (r)	B (r)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)
400	A (r)	B (w)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)
300	A (w)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)
200	T (w)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)	W (w)

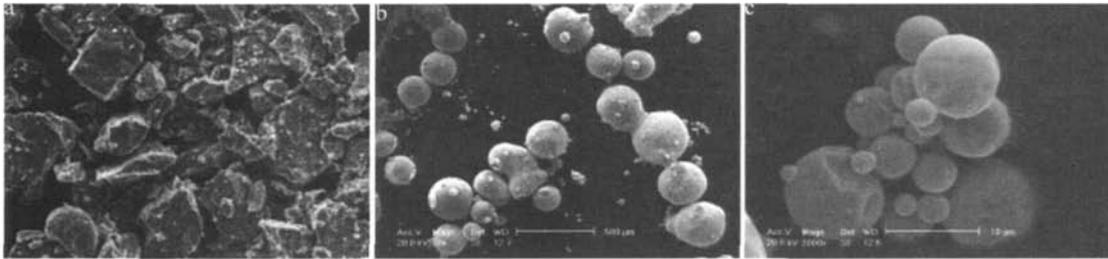


Fig. 2 Balling of Ti powder

a—irregular Ti powder b—partly balling c—fully balling

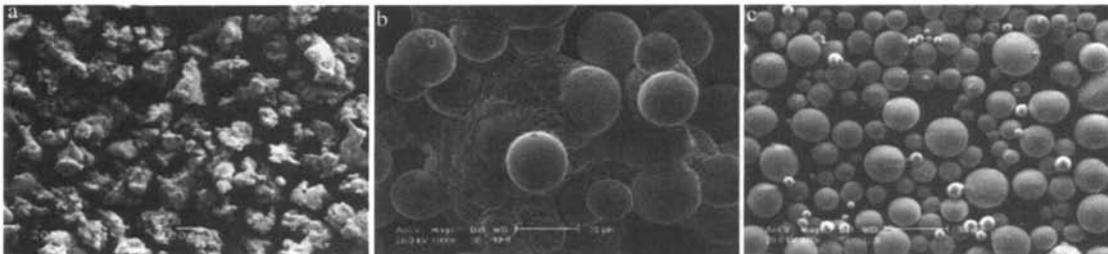


Fig. 3 Balling of bronze powder

a—irregular bronze powder b—agglomerate c—spherical bronze powder

从表 1 中可以看出,实验结果的整体趋势呈现很好的规律性,粉末的形貌特征大致可分为 3 个区域:W 区,即未球化区;T+B 区,即球化和部分球化区;A+R 区,即团聚或成块区。随激光功率和激光扫描速度的提高,形成一个 R+B 工作带(窗)。

2.2 实验结果分析

2.2.1 球化过程的理论分析 粉末颗粒在激光束的作用下,整个颗粒熔化后,熔体(滴)的形状变化取决于两个相反运动的竞争:熔体的铺展和收缩。熔体有润湿底板的倾向,熔体的铺展即熔体润湿底板,变形为扁平状;熔体的球化即熔体在表面张力作用下收缩成

球过程,是熔体的反润湿过程。熔滴的球化过程伴随着熔滴的快速冷却。研究表明^[2],“球化效应”的产生存在 3 种不同的机制:(1)熔体由于高温梯度导致的球化;(2)快速扫描时,熔体收缩中由于毛细管不稳定导致球化;(3)高激光功率和低扫描速度引起熔体过度变形和过长熔体存在时间,导致球化。利用机制(1)能产生比较理想的球化效果。

(1)粉末的熔化和熔滴的冷却过程

设激光功率为 P (W),激光束的光斑面积为 A (mm²),激光强度 Q 为:

$$Q = P/A \quad (1)$$

忽略粉末颗粒在激光作用下的蒸发以及粉末颗粒与底板间的热传导,粉末颗粒在激光束作用下熔化的时间^[9]:

$$t_m = \frac{d \cdot \rho_s}{a \cdot Q} c_p \cdot (T_m - T_0) \quad (2)$$

式中, T_m 和 T_0 分别为熔化温度和室温, ρ_s 为烧结金属密度, c_p 为比定压热容, a 为粉末的激光吸收率, d 为粉末颗粒直径。

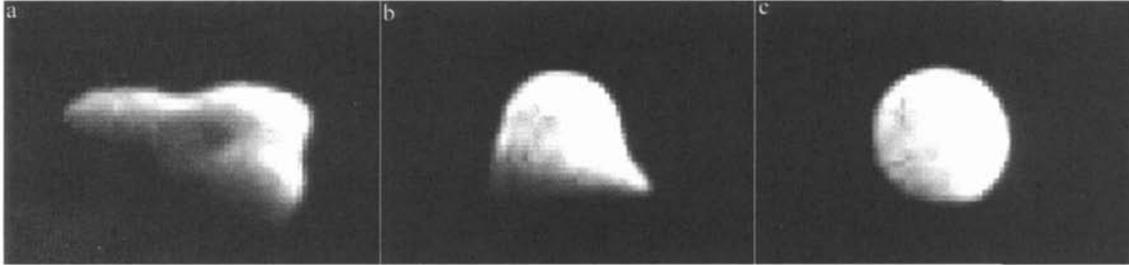


Fig 4 Melting, retracting and balling of mental powder
a—melting b—retracting c—balling

张力作用下的收缩速度 v_s 来计算熔体收缩所需的时间^[4]:

$$t_s = h(t) / v_s \quad (3)$$

$$v_s = (2 S \rho_l^{-1} \chi_r^{-1})^{0.5} \quad (4)$$

式中, χ_r 为熔膜厚度, $h(t)$ 为熔体收缩成球的运动距离 (近似计算中采用熔体的平面特征长度与成球直径的差值), ρ_l 为熔体密度, 熔体的铺展系数 $S = 1.904 \text{ N/m}$ 。

由于收缩速度与熔膜的密度和厚度的倒数的平方根成比例, 较薄的厚度有利于提高成球过程的收缩速度, 即颗粒越细, 成球过程越快, 并有效避免熔滴的铺展 (润湿)^[11]。

2.2.2 工艺参量对熔化——球化过程的影响

(1) 工艺参量对熔化和冷却过程的影响

在激光束的作用下, 颗粒的熔化速度取决于粉末本身的物性, 根据 (2) 式和表 2 中的参量可以计算出

Table 2 Material properties and boundary condition

parameters	bronze	Ti
melt temperature T_m	1163K	1941K
specific heat capacity c_p	$0.394 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$0.84 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
melt density ρ_l	$8.6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$4.7 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
gas temperature T_g		400K
wall temperature T_w		500K
radiation constant σ	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	
emissivity ϵ	0.77	
thermal convection h	$35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	

不同粒度、激光功率下, 粉末熔化所需的时间。粉末粒度越细, 或激光功率密度越高, 熔化时间越短。实验中粉末熔化时间均低于 10^{-5} s , 对于细小颗粒, 熔化时间均为纳米级。可见, 金属粉末的熔化十分迅速。以激

当激光束离开后, 熔化的熔滴与环境进行热交换, 迅速冷却, 由于金属液的热传导性高, 可以忽略熔滴内部的温度梯度^[10]。

(2) 熔滴的收缩和球化过程

假设金属颗粒熔化后的形状如图 4a 所示的近平面状 (离散状态), 在表面张力作用下, 经历图 4b 的过程, 最后收缩成球形。利用物体表面薄层熔膜在表面

光扫描速度为 60 mm/s 计算, 激光作用于粉末的时间 t_p (等于激光束直径除以激光扫描速度) 为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。

如果粉末熔化所需的时间 t_m 大于激光作用时间 t_p , 金属粉末将不能充分熔化。这是产生球化效应的前提条件, 因此, 存在一个临界激光功率 P_m 及对相应的激光扫描速度 v_m , 只有激光功率大于 P_m 后才会出现球化现象。

(2) 粉末球化的基本条件和球化因子

激光功率 P 和扫描速度 v 对粉末的球化过程的影响是相互依赖的, 只有当激光功率和扫描速度与粉末物性彼此协同的条件下, 才能获得满意的球化效果, 即激光作用时间 t_p 与熔化时间 t_m 基本一致, 因此有:

$$\frac{d \cdot \rho_s}{a \cdot Q} c_p \cdot (T_m - T_0) \approx D / v \quad (5)$$

式中, D 为光束的直径。将 (1) 式带入 (5) 式, 并令:

$$K^{-1} = \frac{\pi \cdot d \cdot \rho_s \cdot D}{4a} c_p \cdot (T_m - T_0) \quad (6)$$

得到: $v/P = K \quad (7)$

将 K 定义为球化因子, 直接表征金属粉末球化的难易程度。当其它条件确定时, K 仅仅是颗粒粒径的线性函数。图 5 为根据 (6) 式和表 2 中的数据计算得到的

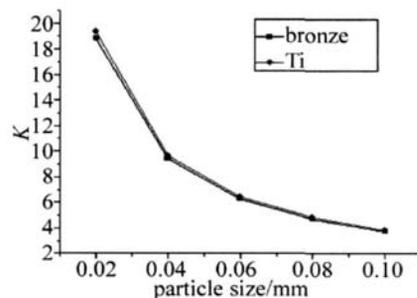


Fig 5 Factor of balling versus the particle sizes

Ti和青铜粉末的球化因子 K 与粉末粒度的关系曲线,可见,随粉末粒度的降低, K 随之提高,球化更加容易发生。相反,粉末粒度过大,提高了球化的难度。采用细小的粉末或选用粒度分布较窄的粉末,可以提高球化速度,有利于步提高生产效率。因此,对于不同的粒径,如果激光功率与激光扫描速度依据(7)式作相应变化,在高于临界功率范围内,选择合适的工艺参量,可获得好的球化效果。

3 结 论

(1)在适当的工艺条件下,利用激光扫描快速熔化异形粉末使其球化,成为获取球形粉的一种可行途径。

(2)金属粉末的球化能力可用球化因子 K 表征, K 值的大小与金属粉末的直径、密度、激光束粒径、导热性、熔化温度成反比,与激光吸收率成正比。

(3)激光功率 P 、激光扫描速度 v 与球化因子 K 之间满足关系式: $v/P = K$,根据不同金属粉末的 K 值,选择合适的 P 和 v ,可制备出较为理想的球形粉末。

参 考 文 献

[1] LU Y, CHEN L F, TANG H P, *et al* Design of powder metallurgy titanium alloys and composites [J]. Materials Science and Engineering, 2006, 418 (1/2): 25-35.

- [2] GU D D, SHEN Y F. Balling phenomena during direct sintering of multi-component Cu-based metal powder [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 432 (1/2): 163-166.
- [3] RYU D Y, SHIN K, DROCKENMULLER E, *et al* A generalized approach to the modification of solid surfaces [J]. Science, 2005, 308 (5719): 236-239.
- [4] HABENICHT A, OLAPNSKIM, BURNEISTER F, *et al* Jumping nanodroplets [J]. Science, 2005, 309 (5743): 2043-2045.
- [5] NAHAL A, MOSTAFAV FAMIAD J, GHODS A, *et al* Laser-induced dendritic microstructures on the surface of Ag^+ -doped glass [J]. J A P, 2006, 100 (5): 053503 (1-6).
- [6] LESHANSKY A M, RUBINSTEIN B Y. Nonlinear rupture of thin liquid films on solid surfaces [J]. Phys Rev, 2005, E71 (4): 040601 (1-4).
- [7] TRICE J, THOMAS D, FAVAZZA C, *et al* Pulsed-laser-induced dewetting in nanoscopic metal films: theory and experiments [J]. Phys Rev, 2007, B75 (23): 235439 (1-15).
- [8] TOLOCHKO N K, LAOUI T, KHLOPKOV Y V, *et al* Absorbance of powder materials suitable for laser sintering [J]. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6 (3): 155-160.
- [9] GIBSON I, SHIH D. Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process [J]. Rapid Prototyping Journal, 1997, 3 (4): 129-136.
- [10] SHEN X F, WANG Y, YAO J, *et al* Finite element simulation of the thermal stress distribution in direct metal laser sintering [J]. Laser Technology, 2005, 29 (4): 343-346 (in Chinese).
- [11] BERGERON V, BONN D L, MARTIN J Y, *et al* Controlling droplet deposition with polymer additives [J]. Nature, 2000, 405 (6788): 772-775.

(上接第 567 页)

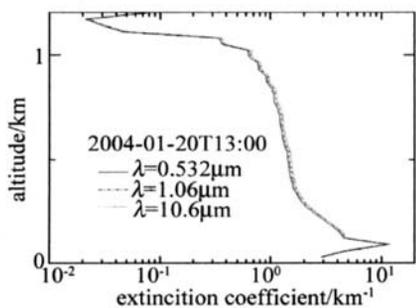


Fig 6 The vertical distributions of extinction coefficient

2 结 论

作者根据 2004-1-20 在北京测量的 1 次沙尘暴数据,计算了沙尘粒子对可见光和红外波段的消光特性,得出沙尘暴期间近地面的消光系数是沙尘暴到来之前的 5 倍~6 倍,而在垂直方向上,这次沙尘暴的沙尘粒子主要集中在 1200m 以下的大气中,其消光系数大约是沙尘暴未到来前大气的 10 倍。尽管只是 1 次测量结果,有些结论还存在不足,但这对沙尘天气下各种红外探测仪的工作性能和大气辐射传输的研究是有参考意义的。

感谢北京环境保护监测中心虞统工程师提供本文中的部分数据。

参 考 文 献

- [1] DONG Q Sh. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China [J]. Chinese Journal of Radio Sciences, 1997, 12 (1): 15-25 (in Chinese).
- [2] DONG Q Sh, ZHAO Zh W, CONG H J. The mm-wave attenuation due to sand and dust [J]. Chinese Journal of Radio Sciences, 1996, 11 (2): 29-32 (in Chinese).
- [3] WU Zh S, YOU J G, YANG R K. Study on laser attenuation character in sand and dust storms [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31 (9): 1975-1981 (in Chinese).
- [4] LI Sh G, LI X D, HOU L T. The absorption and extinction of infrared radiation in lower atmosphere by sand storm [J]. Chinese Journal of Radio Sciences, 2003, 18 (1): 43-47 (in Chinese).
- [5] TAN K, HU H L. Correction of measured results of an optical particle counter [J]. Acta Optica Sinia, 1984, 4 (1): 55-60 (in Chinese).
- [6] HU H L, ZHAO F Sh, GONG Zh B. Effect of particle refractive index on the accuracy of aerosol measurements with optical particle counters [J]. Bulletin of Science of China, 1988, 33 (5): 428-432 (in Chinese).
- [7] GU F, YANG J, BIAN B M. Measurement of particle mass concentration using particle counter method [J]. Laser Technology, 2007, 31 (4): 360-363 (in Chinese).
- [8] SPINHERNE J D. Micro pulse lidar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31 (1): 48-54.
- [9] SUN Zh B, GUO J J, LIU Zh Sh. Visibility measurement over the horizontal path by means of micro-pulsed lidar [J]. Laser Technology, 2007, 31 (2): 200-202 (in Chinese).