

# 金属熔滴气动按需喷射特性试验研究

李杨<sup>1</sup>, 齐乐华<sup>1,2</sup>, 罗俊<sup>1</sup>, 曾祥辉<sup>1</sup>, 杨方<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学机电学院, 710072, 西安; 2. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 710072, 西安)

**摘要:** 利用自行研制的气动式金属熔滴按需喷射系统进行了单颗熔滴的喷射特性试验研究, 并采用动态压力采集系统和频闪拍摄系统测量了产生单颗熔滴时的坩埚腔内气压变化, 记录了熔滴成形时刻和成形过程, 揭示了气压对熔滴产生的影响规律: 在每一次喷射中, 产生熔滴的数目随着脉冲宽度的增加而增加; 单颗熔滴的断裂时间受气压的影响; 脉冲宽度在一定范围内改变可以使液体断裂形成单颗熔滴, 当供给气压相对较低时, 此脉冲宽度的取值范围较广; 在喷射产生单颗熔滴的前提下, 改变脉冲宽度将使腔内气压的峰值发生变化, 但不能显著改变熔滴尺寸; 熔滴飞行速度与腔内气压峰值成正比关系。

**关键词:** 气动按需喷射; 熔滴; 气压; 脉冲宽度

**中图分类号:** TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0069-05

## Experimental Study on Characteristics of Molten Metal Pneumatic Drop-on-Demand Ejection

LI Yang<sup>1</sup>, QI Lehua<sup>1,2</sup>, LUO Jun<sup>1</sup>, ZENG Xianghui<sup>1</sup>, YANG Fang<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To generate single molten droplet by one gas pulse is essential for molten metal pneumatic drop-on-demand (DOD) ejection. This experimental study was carried out to investigate the characteristics of single molten droplet DOD ejection with a proprietary molten metal pneumatic DOD ejection system. The ejection process was examined by dynamic pressure acquisition system and strobe photography system. Based on the molten droplet forming process recorded, the influence of pressure on generating molten droplet was revealed. For each single pulse, the number of generated molten droplets increased with the pulse width. The pinch-off time was affected by the peak pressure in the chamber. The variation of the range of the pulse width for generating single molten droplet with gas pulse pressure was determined, and the range became wider in the case of relatively low supply pressure. The results show that, within the single molten droplet generation window, the size of the molten droplets is not influenced significantly by changing the pulse width but the peak pressure in the chamber decreases with the pulse width; the velocity of the molten droplet decreases proportionally with the decreasing peak pressure.

**Keywords:** pneumatic drop-on-demand ejection; molten droplet; gas pressure; pulse width

收稿日期: 2010-07-19. 作者简介: 李杨(1986—), 男, 硕士生; 齐乐华(联系人), 女, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA03A238); 国家自然科学基金资助项目(51005186); 西北工业大学研究生创业种子基金资助项目(Z2010016).

网络出版时间: 2011-01-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110123.2128.001.html>

金属熔滴按需喷射技术在 MEMS 器件封装、微小金属零件快速成形和微小电气连接等领域有着广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>. 目前广泛应用的压电陶瓷驱动式熔滴喷射技术通常是将压电陶瓷直接置于加热装置内部, 由于压电陶瓷居里温度的限制, 其工作温度较低<sup>[1]</sup>. 气动式熔滴按需喷射技术具有喷头结构简单、无需内部致动器、熔滴可控等优点, 同时克服了压电陶瓷工作温度受限制的缺点, 应用于高熔点金属微滴按需喷射具有较大优势. 气动式熔滴按需喷射技术的关键在于精确可控的单颗熔滴喷射, 以实现熔滴的按需沉积制造. Cheng 等<sup>[2,5]</sup>研究了气压参数对熔滴产生的影响, 认为脉冲宽度影响单颗熔滴的产生. Cao 等<sup>[6]</sup>用气动按需喷射的方法沉积出简单铝制件, 从沉积精度方面分析了气动按需喷射方法的沉积质量. 得到均匀可控的金属熔滴是提高沉积质量和精度的前提和保证, 因此必须对单颗熔滴的产生区间和熔滴特性进行分析.

本文从气压致动动力的角度研究了金属熔滴气动按需喷射特性, 通过分析单颗熔滴的产生条件和试验参数取值区间、单颗熔滴的尺寸和飞行速度, 揭示了由脉冲宽度所调整的气压参数在金属熔滴按需喷射过程中的影响规律, 以期为提高金属熔滴气动按需喷射的沉积质量、得到良好的制件提供指导.

## 1 试验方法

图 1 为本课题组自行研制的气动式金属熔滴按需喷射试验系统. 金属熔滴喷射装置的关键部件为石英坩埚, 坩埚外部是加热电炉, 坩埚底部是经拉制及研磨后形成的毛细喷嘴(喷嘴直径为 0.24 mm), 喷嘴内部为流线型结构. 向金属熔滴喷射装置顶部通入压缩氩气作为供给气压, 用来产生熔滴. 函数发生器输出宽度不同的脉冲信号驱动电磁阀, 以获得不同的电磁阀通路时间, 气路在电磁阀的作用下通断, 从而产生脉冲气压, 使熔融金属受压并从喷嘴喷出, 坩埚内部多余的气体从泄气孔排出. 为了测量和监控坩埚腔内的气压变化情况, 在进气口安装动态压力传感器, 压力采集计算机显示并存储压力采样数据. 采用频闪光源与 CCD 同步触发曝光的方法拍摄飞行熔滴的瞬间影像<sup>[7]</sup>, 用于观察熔滴喷射过程. 为了降低氧化作用的影响, 喷射装置放于充满惰性气体的手套箱内, 手套箱内氧的质量浓度不高于 14.2 mg/m<sup>3</sup>.

将表 1 所示的锡铅合金装入坩埚中, 加热至 280 ℃并保温 10 min 后开始试验. 试验时, 熔融金

属液面距喷嘴出口约 30 mm, 泄气孔通气直径设定为 2.58 mm. 函数发生器输出 2 路信号: 一路信号触发电磁阀以通断气路, 使腔内液体受迫喷射; 另一路信号延时不同时刻, 触发频闪仪和 CCD 摄像头, 使 CCD 捕捉熔滴产生和飞行的瞬时照片, 并传递至频闪拍摄计算机, 利用图像处理软件获得熔滴半径和熔滴坐标, 通过比较系列照片中熔滴的形心坐标, 用差值算法分析计算熔滴的平均飞行速度.

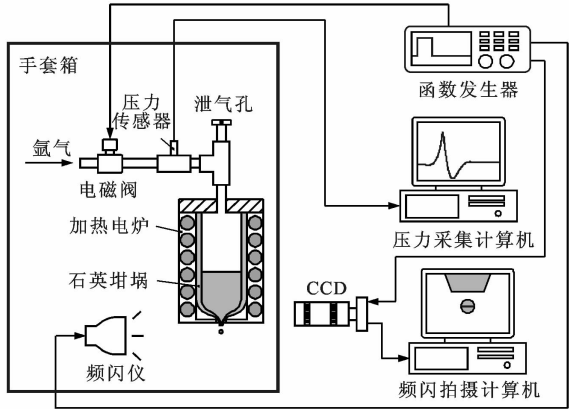


图 1 试验装置及控制系统示意图

表 1 试验用 Sn-40%Pb 合金的性能参数

| 性能参数                             | 数值      |
|----------------------------------|---------|
| 熔点/℃                             | 183     |
| 280 ℃时的密度/Mg · m <sup>-3</sup>   | 8.04    |
| 280 ℃时的动力黏度/Pa · s               | 0.001 5 |
| 280 ℃时的表面张力/mN · m <sup>-1</sup> | 440     |

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 单颗熔滴的产生与成形

不同脉冲宽度对应不同的熔滴喷射情况. 当供给气压为 50 kPa、喷嘴直径为 0.24 mm 时, 不同脉冲宽度(0.30、0.32、0.35、1.00 ms)下的熔滴喷射情况如图 2 所示. 图中的拍摄时间从液体的弯月面刚从喷嘴露出時計. 在电磁阀开合一次的过程中, 当脉冲宽度较小时, 液体的弯月面虽然超越了喷嘴(见图 2a), 但随着气体从泄气孔排出马上缩回喷嘴中; 随脉冲宽度增大, 液体断裂形成单颗熔滴(见图 2b、2c), 其余部分则回缩入喷嘴内; 随脉冲宽度继续增大, 则出现气压脉冲喷射多颗熔滴的情况(见图 2d). 出现上述现象是因为系统通过开合电磁阀通断气路, 在腔内形成气压波动(见图 3), 推动坩埚内部

熔融金属向下流动,在喷嘴处产生熔滴,而改变脉冲宽度则改变了电磁阀的开合时间,从而改变了坩埚腔内气压峰值和气压作用的时间。

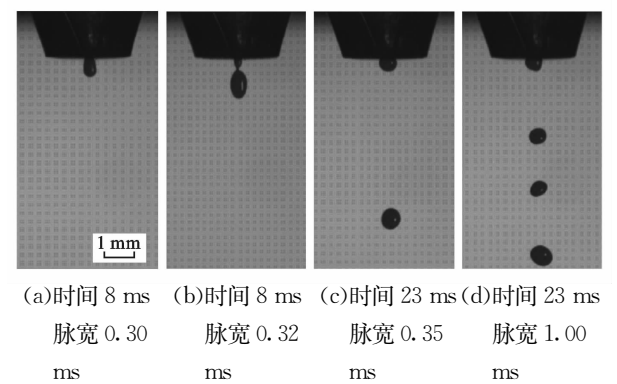


图 2 脉冲宽度对熔滴产生的影响

熔滴喷射时,如果要驱动一颗熔滴以速度  $U$  飞行,喷嘴处所需的内外压差  $\Delta p$  可估算为<sup>[8]</sup>

$$\Delta p = \frac{\rho U^2}{2} + \frac{K\rho U^2}{2} + \frac{32\eta UL_{eq}}{d^2} + \frac{2\sigma_d}{d} \tag{1}$$

式中: $\rho$  为液体密度; $U$  为液体在喷嘴处的轴向速度; $K$  为入口损失系数; $d$  为喷嘴直径; $L_{eq}$  为喷嘴等效长度; $\eta$  为黏度; $\sigma_d$  为表面张力。当喷嘴处的液体从静止加速到速度  $U$  时,所需的压力为  $\rho L(dU/dt)$  (其中  $L$  为喷嘴长度, $t$  为加速时间)<sup>[9]</sup>。由于润湿现象的存在,液体从喷嘴处出流后有一定程度的铺展(见图 2a、2c、2d),因此液体与喷嘴的实际接触直径大于喷嘴直径。考虑到试验所用喷嘴并非为直管式,以及喷射时坩埚内液面高度为  $h$  的液体产生静压  $\rho gh$ ,式(1)修正为

$$\Delta p' = \frac{\rho U^2}{2} + \frac{K\rho U^2}{2} + \frac{32\eta UL_{eq}}{d^2} + \frac{2\sigma_d}{K_s d} + \rho L_{eq} \frac{dU}{dt} - \rho gh \tag{2}$$

式中: $K_s$  为液体铺展系数,即液体在喷嘴出口处的铺展直径和喷嘴直径之比,在试验中测量为 1.4~1.7。当  $K$  取 0.1、 $h$  取 30 mm、 $t$  取 10 ms、 $U$  取 0.3 m/s 时,计算得  $\Delta p'$  的理论估算值为 2.4 kPa。假设喷嘴外的气压为标准大气压,则喷射时液体断裂成形的前提条件是腔内气压的峰值  $p_p$  应高于此理论值  $\Delta p'$ 。

喷射产生单颗熔滴时腔内气压波形(见图 3)的峰值  $p_p$ 、峰值宽度  $t_w$  和峰值时间  $t_p$  如表 2 所示,表中的时间以坩埚内压力开始上升的时刻为起始。在供给气压  $p=18$  kPa、脉冲宽度  $\tau=8$  ms 的条件下,15 ms 时腔内气压  $p_{in}$  达到峰值 2.5 kPa,而熔滴在

12 ms 时断裂(断裂时间用  $t_f$  表示);在  $p=50$  kPa、 $\tau=0.35$  ms 的条件下,11 ms 时腔内气压达到峰值 5.5 kPa,20 ms 以后为负值,而熔滴在 20 ms 时断裂。可以看出,当供给气压较低时,熔滴在腔内气压达到峰值后发生断裂;当供给气压较高时,熔滴在腔内气压开始为负值时断裂。

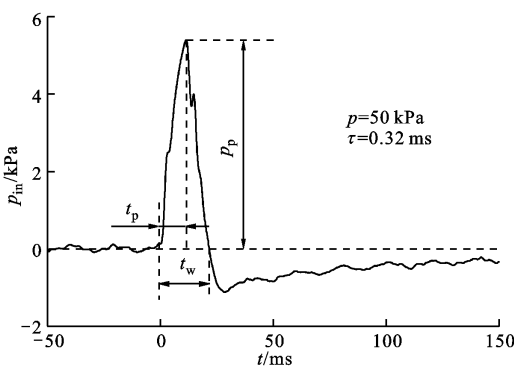


图 3 坩埚内部气压波动曲线

在不同的供给气压下,形成熔滴的断裂时间不同。这是因为当供给气压较低时,坩埚内的液体受到压缩气体冲击而发生内部振荡,当液体内部的振荡波远离喷嘴时造成局部负压<sup>[10]</sup>,从而产生断裂;当供给气压较高时,腔内的气压峰值较高,腔内必须及时形成负压才能使得液体回缩断裂,从而形成单颗熔滴。但是,无论是在低压还是高压条件下,峰值宽度过大都会导致气压作用时间增加,不利于形成单颗熔滴(见图 2d)。另外,表 2 中出现了峰值压力明显低于断裂理论值 2.4 kPa 的情况(第 1 行数据),这是由于式(2)未考虑熔滴脱离喷嘴过程中表面张力造成的局部压升<sup>[11]</sup>,此外,对流线型喷嘴只进行了等效长度的处理,可能也是造成理论偏差的原因。

表 2 形成单颗熔滴时的腔内气压波形特征数据

| $p/\text{kPa}$ | $\tau/\text{ms}$ | $t_f/\text{ms}$ | $t_p/\text{ms}$ | $t_w/\text{ms}$ | $p_p/\text{kPa}$ |
|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 18             | 2                | 12              | 12              | 24              | 1.6              |
| 18             | 8                | 12              | 15              | 32              | 2.5              |
| 18             | 14               | 12              | 13              | 35              | 2.1              |
| 50             | 0.320            | 20              | 12              | 21              | 5.4              |
| 50             | 0.335            | 20              | 11              | 21              | 5.4              |
| 50             | 0.350            | 20              | 11              | 20              | 5.5              |

2.2 单颗熔滴试验参数取值分布

改变脉冲宽度导致了腔内气压发生变化,所以形成了不同的喷射情况。电磁阀开合 1 次产生 1 次气动脉冲时,若腔内气压较低,液滴在表面张力和腔内局部负压的作用下会回缩至腔体内,不能形成熔

滴;若腔内气压过高,1 次脉冲将激励液体断裂形成多颗熔滴. 调整脉冲宽度可以改变腔内气压,当腔内气压恰好能使液体克服表面张力断裂为单颗熔滴时(见图 2b),此时的脉冲宽度为  $\tau_1$ ;当腔内气压恰好能使液体出流并断裂形成单颗熔滴,但受表面张力和腔内局部负压的影响不能继续形成次颗熔滴时(见图 2c),此时的脉冲宽度为  $\tau_2$ . 当脉冲宽度  $\tau \in [\tau_1, \tau_2]$  时,1 次气压脉冲形成 1 颗熔滴,可实现金属熔滴的按需喷射. 将能够喷射形成单颗熔滴的脉冲宽度区间称为工作区间,如图 4 所示.

当供给气压相对较低时,单颗熔滴的试验参数取值范围较广,工作区间较宽. 如图 4 所示,当供给气压设定为 18 kPa 时,工作区间为 0.2~14 ms,分布范围较广,但是当供给气压过低时,腔体内部气压峰值也较低,产生熔滴比较困难,所以产生单颗熔滴的工作区间较窄,例如在 14 kPa 时,只有当脉冲宽度为 0.11~0.2 ms 时才能够产生单颗熔滴. 当供给气压过高时,脉冲宽度的改变对峰值压力的影响较大,同样会导致工作区间较窄,例如供给气压增加到 28 kPa 时,工作区间在 0.2~0.3 ms 之间,供给气压继续增加到 50 kPa 时,工作区间仅为 0.32~0.35 ms.

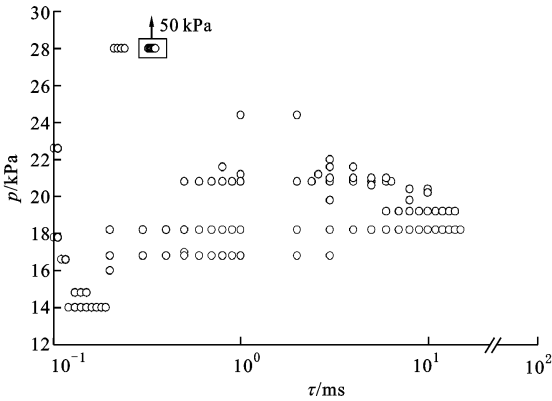


图 4 供给气压为 14~50 kPa 时单颗熔滴试验参数的取值分布

2.3 脉冲宽度对单颗熔滴半径的影响

熔滴半径决定沉积制造的精度. 在单颗熔滴工作区间内,脉冲宽度对熔滴半径的影响如图 5 所示. 当供给气压为 18 kPa 时,脉冲宽度从 2 ms 增加至 14 ms,熔滴半径有增长的趋势,但保持在 0.164~0.228 mm 之间,其标准方差为 0.015 6 mm. 试验结果显示,在单颗熔滴工作区间内,改变脉冲宽度不会使熔滴半径有显著变化,这使得在改变脉冲宽度、保持稳定喷射的同时优化其他喷射特性参数成为

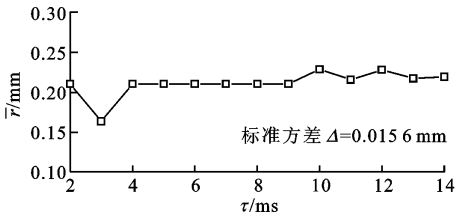


图 5 脉冲宽度与熔滴平均半径的关系

可能.

改变脉冲宽度的实质是改变了腔内气压峰值和气压作用时间. 显然,在能产生单颗熔滴的工作区间内,腔内气压峰值和气压作用时间的变化对熔滴尺寸的影响均不大,这表明在熔滴成形断裂过程中,表面张力对熔滴尺寸起主导作用. 改善表面张力的影响可以通过清洁喷嘴、改变喷嘴直径等方法实现,而是否能形成单颗熔滴,则要考虑表面张力和腔内气压的联合作用,根据 2.1 节中的分析,当供给气压较高时,腔内要产生负压才能成功喷射单颗熔滴.

2.4 腔内气压峰值对熔滴飞行速度的影响

不同的熔滴飞行速度影响熔滴沉积后的铺展效果<sup>[12-13]</sup>. 在单颗熔滴工作区间内,改变脉冲宽度可得到腔内气压峰值与熔滴飞行速度的关系. 如图 6 所示,当供给气压为 18 kPa 时,腔内气压峰值具有随脉冲宽度增加而减小的变化趋势,由 3 ms 时的 2.5 kPa 逐渐减小为 14 ms 时的 2.1 kPa. 同样,熔滴的飞行速度也有随脉冲宽度的增加而减小的趋势,由 3 ms 时的 0.68 m/s 减小为 12 ms 时的 0.36 m/s,而后略有上升. 可见,熔滴的飞行速度受腔内气压峰值的影响较大. 从式(2)可以看出,熔滴飞行速度  $U$  正比于压差  $\Delta p'$ ,这与试验现象吻合良好.

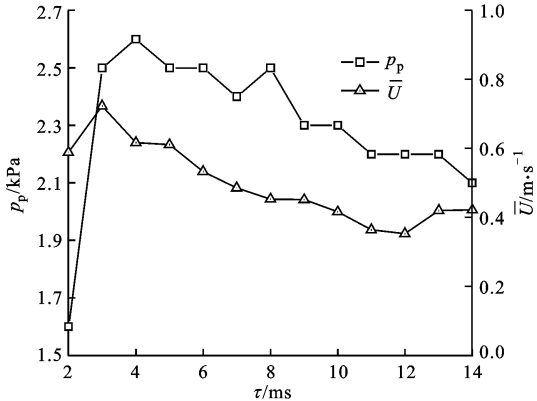


图 6 脉冲宽度与腔内气压峰值和熔滴飞行速度的关系

3 结 论

(1)脉冲宽度决定腔内气压峰值和气压作用时

间,并影响单颗熔滴的产生.能够产生单颗熔滴的脉冲宽度范围称为单颗熔滴工作区间,当供给气压相对较低时,此工作区间较宽.

(2)在单颗熔滴工作区间内,随脉冲宽度增加熔滴半径有增大的趋势,但是变化不大;腔内气压峰值与脉冲宽度相关,熔滴飞行速度与腔内气压峰值成正比.

## 参考文献:

- [1] 蒋小珊,齐乐华,罗俊,等. 金属微滴产生系统的设计与实现[J]. 中国机械工程, 2009, 20(15): 1775-1778.  
JIANG Xiaoshan, QI Lehua, LUO Jun, et al. Design and implementation for metal micro-droplet generation system [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(15): 1775-1778.
- [2] CHENG Stewart Xu, LI Tiegang, CHANDRA S. Producing molten metal droplets with a pneumatic droplet-on-demand generator [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(3): 295-302.
- [3] ZENG Xiang Hui, QI Le Hua, HUANG Hua, et al. Experimental research of pneumatic drop-on-demand high temperature droplet deposition for rapid prototyping [J]. Key Engineering Materials, 2010, 419/420: 405-408.
- [4] WALLACE D, HAYES D, CHEN T, et al. Ink-jet as a MEMS manufacturing tool [J]. ASME Conference Proceedings, 2007(42657): 1161-1168.
- [5] CHENG S, CHANDRA S. A pneumatic droplet-on-demand generator [J]. Experiments in Fluids, 2003, 34(6): 755-762.
- [6] CAO Wenbin, MIYAMOTO Y. Freeform fabrication of aluminum parts by direct deposition of molten aluminum [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(2): 209-212.
- [7] 杨观,齐乐华,罗俊,等. 均匀液滴喷射成型中微熔滴关键参数在线检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 590-595.  
YANG Guan, QI Lehua, LUO Jun, et al. Key parameter measurement system for molten micro-droplet in uniform droplet spray forming [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 590-595.
- [8] BRUCE C A. Dependence of ink jet dynamics on fluid characteristics [J]. Journal of Research Development, 1976, 20(3): 258-270.
- [9] WIJSHOFF H. The dynamics of the piezo inkjet print-head operation [J]. Physics Reports, 2010, 491(4/5): 77-177.
- [10] BOGY D B, TALKE F E. Experimental and theoretical study of wave propagation phenomena in drop-on-demand ink jet devices [J]. IBM Journal of Research Development, 1984, 28(3): 314-321.
- [11] LE H P. Progress and trends in ink-jet printing technology [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 1998, 42(1): 49-62.
- [12] 李彦鹏,王焕然. 低冲击能量液滴与球面碰撞沉积特性的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 21-24.  
LI Yanpeng, Wang Huanran. Numerical study on deposition characteristics of a droplet impinging onto spherical surface with low impact energy [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 21-24.
- [13] 李京龙,李长久. 等离子喷涂熔滴的瞬时碰撞压力研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(12): 30-34.  
LI Jinglong, LI Changjiu. Droplet transient impact pressure in plasma spraying [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(12): 30-34.

(编辑 葛赵青)