

高速摄像技术在材料科学研究中的应用和发展

李慕阳, 陈松*, 谢明, 郭俊梅, 马俊, 吴建昆, 任县利, 胡洁琼, 王塞北
(昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘要: 高速摄像技术是一项高科技测量技术, 其应用已从电影、军事、航空航天等领域延伸到材料科学及相关科学领域。基于高速摄像技术的特点、原理和发展, 系统地分析和概述了高速摄像技术在国内外材料科学领域的应用研究概况, 简要介绍了该技术在焊接或电接触研究中的应用, 典型的高速摄像实验光路设计以及本组在贵金属电接触材料研究中部分研究结果, 最后探讨了高速摄像技术存在的问题、发展趋势和应用展望。

关键词: 高速摄像技术; 材料科学; 应用; 焊接电弧; 光路设计

中图分类号: O4-33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2014)S1-0175-06

Application and Development of High-speed Video Technology in Materials Science

LI Muyang, CHEN Song*, XIE Ming, GUO Junmei, MA Jun,
WU Jiankun, REN Xianli, HU Jieqiong, WANG Saibei

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metal,
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: High-speed video technology is a high-tech measurement technology. The application has been extend from the movie, military, aerospace and other fields to materials science and related sciences. Based on the characteristics of the high-speed video technology, principles and development, the applied research profiles of the high-speed video technology in the field of materials science at home and abroad were systematically analyzed and overviewed, and the technology of welding and electrical contacts, some optical design of high-speed video and some research results in electrical contact materials of precious metals were briefly introduced, finally the high-speed video technical problems, development trends and application prospects were discussed.

Key words: high-speed video technology; materials science; application; welding arc; optical design

高速摄影或摄像是一种快速拍摄技术。1948年, 电影电视工程师协会(SMPTE)将高速摄影或摄像定义为拍摄速度每秒超过128帧, 并且连续拍摄至少3帧。高速摄像系统是一种高速瞬发过程的测试记录手段, 最早出现于20世纪70年代, 该技术综合利用光、机、电、光电传感器与计算机等一系列技术, 拍摄间隔时间在千分之一秒到几十万分之一

一秒之间, 主要用于记录高速运动或变化过程中的某一瞬时状态或全部历程的手段。由于高速摄像技术具有精度高、速度快、拍摄信息量多等优点, 能够直接测量和获得大量的准确时空信息, 为研究高速运动的现象和运动规律提供了重要实验数据。目前广泛应用于流体和燃烧研究, 飞行及武器研究, 机械加工和工具设计, 物理和化学过程光电工程研

收稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(51267007, 51461023, 51164015)、云南省自然科学基金(2010CD126、2010ZC260、2011FB126、2012FB195)、云南省重点基金(2011FA026)。

第一作者: 李慕阳, 男, 硕士生, 研究方向: 贵金属基电接触材料基础理论和应用。E-mail: hklmy58@gmail.com

*通讯作者: 陈松, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 贵金属材料学。E-mail: cs@ipm.com.cn

究, 医药研究, 天体物理学研究, 材料学研究, 原子能研究, 爆破工程等研究领域^[1]。目前在材料科学领域, 该技术应用还处于初级阶段, 目前主要用于材料领域中的高速变化行为的研究, 如粉末冶金中的雾化制粉过程、电弧焊接过程、电接触基本行为和过程的观察等。本文介绍了高速摄像技术的基本原理和特点, 主要针对其在材料研究领域中的应用以及取得成果, 重点介绍了该技术在电弧和电接触研究中的进展, 并给出了本研究组在贵金属电接触行为所做的部分工作和成果。

1 高速摄像技术的发展

首先需要区分高速摄影和高速摄像技术之间的异同。这两种技术均是采用一定制式的相机以很高的速度一幅一幅的(即摄影频率)来拍摄快速运动的物体, 将物体的运动变化过程记录下来。而这两种技术的主要差别是: 高速摄影是采用胶片作为记录介质, 而高速摄像则是采用非胶片的摄影, 使用的光敏器件为固体图像传感器, 其记录介质为存储器和磁盘。前者出现较早, 技术成熟, 而后者是在前者基础上发展而来, 目前大有取代前者的趋势。

高速摄影是摄影技术的一个专门分支, 起源于 1884 年布拉格物理研究所马赫教授用电火花照明拍摄飞行的弹丸。而高速连续摄影是从 1870 年英国摄影家 Eadward Muybridge 使用一系列的单幅照相机来记录奔跑中马的图像开始地^[2]。高速摄影由高速摄像机和胶片判读系统组成, 采用连续光作为光源, 用高速摄影机将某一运动过程记录在按时间发展的一幅幅胶片上, 拍摄完成后可以通过慢速放映再现被记录过程的运动或变形过程的方法^[3]。空间信息是以图像来表现的, 而时间信息是以摄影频率或曝光时间来决定的。对高速摄影记录胶片的后期定量分析是在胶片判读仪上进行的。传统的胶片判读系统需要冲洗设备、放映设备等, 机械结构复杂, 实验成本较高。国内高速摄影技术起步于 20 世纪 50 年代后期, 早期主要用于国防军事方面, 目前已扩展到民用领域, 从宏观机械运动扩展到微观机制, 并已取得了许多科学成果。

高速摄像技术是一种全新的高速瞬发过程的测试记录手段, 出现于 20 世纪 70 年代, 初期的高速摄像系统无论摄像速率还是摄像分辨率都较低, 难以与胶片式高速摄影机相比。1960 年前胶片是高速摄像记录的惟一介质, 但近年来随着电子技术、

计算机技术、微加工技术的发展, 出现了新型传感器和大容量存储技术, 高速摄像系统的性能得到大幅度提高。高速摄像机的基本工作原理是首先通过 CCD 摄像头直接将模拟图像转化为数字化图像, 而后存储到磁盘或存储模块, 同时由监视器显示, 最后工作结束后即可及时地慢速重放^[4], 并进行后期处理、测量和分析。该技术的主要优点是: 分辨率高, 拍摄图像清晰, 没有光晕现象, 抗干扰能力强, 功耗低, 系统操作方便; 相机便于携带可独立工作; 事后通过网线或通用接口把图像下载至计算机; 可组成网络摄像系统等。该设备的出现大大节约了实验所需要的时间及人力、物力, 大大降低了实验的难度和门槛, 有力推动了高速摄像技术的应用领域和范围。目前高速摄像机的核心技术和制造加工技术主要掌握在国外企业手中, 国内用户只能进口才能获得该类装备。主要的高速摄像机机型为: Weinberger 公司的 Visario, VRI 公司的 Phantom V5.0、Redlak 100k 等高速摄像系统^[5]。

2 高速摄像技术在材料科学研究中的应用

高速摄像技术的应用领域很广, 本章着重介绍高速摄像系统在材料学领域方面的一些应用。高速摄像技术主要用于观察和测量, 材料加工、制备和服役过程中, 极短时间内发生的状态变化或行为。目前已有的研究领域主要有包括金属雾化制粉、钢带轧制、焊接技术和电接触实验等。

2.1 高速摄像技术在金属加工中的应用

我国在金属雾化制粉工艺中, 利用高速摄像技术取得了良好的效果。金属粉末在粉末冶金、喷涂技术和高效率焊条的生产中均占有非常重要的地位。熔融金属在高温高压下压出喷嘴时, 金属的粒子速度很高, 为了减少粉末中的含氧量, 控制颗粒的形貌和粒度, 必须对金属的雾化机理进行深入的研究。高速摄影的图片可以显示喷嘴口到喷嘴汇交点之间金属液流波动的横向位移量, 描绘了雾化开始区到完成区金属雾化过程^[6]。这就为喷嘴设计、参数选择和提高粉末质量提供了良好的依据。

在薄型钢带轧制工艺中, 由于此前缺乏有效的手段, 成型过程不清楚, 应用高速摄影技术后, 可以获得其成型过程的清晰照片, 从而可以很好的改进制作工艺, 提高产品合格率。

2.2 高速摄像技术在电弧和电接触研究中的应用

中国石油集团工程技术研究院的孙勃等人^[7]根

据高压干法水下焊接特殊的环境要求, 组建了一套熔滴过渡高速摄像系统。该系统采用激光为背景光源, 利用准直扩束光学系统对激光进行准直扩束, 选用 FASTCAM 1024 PCI 高速摄像机, 并设计了可实现 X 轴和 Z 轴二维精确调整的高速摄像技术工作台。用该系统在高压干法水下焊接工作舱内进行拍摄。获得了清晰的水下高压舱内焊接电弧形貌及熔滴过渡图像, 加深了对水下焊接的电弧行为及熔滴过渡过程的认识, 为进一步分析、研究和改进水下焊接工艺, 保证水下焊接质量提供了有力的依据。

清华大学的姜平等^[8]采用高速摄像方法, 观测了低碳钢激光深熔焊过程中的等离子体形态, 就激光焦点位置对等离子体的影响进行了研究。同时检测了等离子体的光、声、电信号, 得到不同焊接模式下的等离子体的形态, 从而验证了等离子体光信号随焦点位置改变而呈 U 型曲线变化的规律。

西北工业大学凝固技术国家重点实验室的陈静等人^[9], 通过建立近距离连续拍摄高速摄像系统实现了对激光快速成形过程中熔池行为的实时观察, 并采用图像分割算法获得了熔池侧视形态, 结合熔覆试样的定量金相法获得的熔池前视形态, 对熔池进行了定量表征。结果发现, 熔池的长度和宽度与光束直径相当, 熔池自由表面呈圆弧形并向外凸起, 最大熔深处熔池自由表面法向和激光束轴线之间存在夹角, 表明熔池向激光束轴线方向倾斜, 而熔池在液态存在时间较短, 例如光束直径为 4 mm, 光束扫描速度为 5 mm/s 时, 熔池在液态存在时间小于 1 s。激光熔覆区的高速摄影实验结果发现, 随金属粉末的射入, 熔池的几何尺寸逐渐减小, 熔池后沿不断抬高, 最大熔深处熔池自由表面法向和激光束轴线之间的夹角由 1°左右逐渐增大到 25°左右, 导致熔池中局部凝固条件发生改变, 从而影响到局部熔覆层的微观组织。

北京工业大学陈志翔等人^[10]采用同步控制拍摄高速摄像和数据采集的技术, 研究焊接过程中电弧、熔滴过渡或熔池等动态行为。建立了高速图像和工艺参数同步记录与分析系统, 系统包括高速摄像机、同步信号发生器、高速数据采集装置及图像与波形同步播放软件。同步信号发生器可适用于 20~200000 帧/秒的高速摄像同步与触发控制。基于 PC 的数据采集装置, 在 200 kHz 采样频率下可实现 4 路焊接参数的同步采集。结果表明, 系统可作为焊接材料、工艺性能、过程控制等研究中对动态过程进行记录与分析的有力工具。

西安交通大学的魏鑫等人^[11]对 W-Cu 电接触材料进行表面熔化层真空击穿的微观结构分析, 并且采用高速摄像机对观察电弧运动特征。实验结果表明阴极斑点出现在铜的第一次击穿阶段。富铜熔体从阴极斑点喷出是由于高等离子体压力和铜的局部沸腾带来的大体积膨胀。通过高速摄像机可以清晰的观测到熔滴喷溅现象。电弧首先出现在第一次击穿过程中钨铜合金的铜相, 实验结果与理论计算是一致的。实验结果还可以发现钨铜合金微观结构演化过程中的液相分离。

法国的 Emilie Le Guen 等人^[12]开发三维传热模型去预测温度场、焊缝几何形状和混合激光熔化活性气体保护焊焊接接头电弧产生过程中的固化焊缝形状。他们对 S355 钢不同焊接速度和送丝速度进行了一系列的混合焊接实验, 并且用高速摄像机去测量焊缝熔池几何形状。焊缝熔池的可视化有助于更好的理解焊接小孔和熔滴之间的相互关系。通过观察这些各种各样的焊缝形状, 将弧压、表面能量分布和电弧效率这些理论计算与实验结果相比较, 发现其具有很好的相关性。

巴西米纳斯联邦大学的 Modenesi P J 和 Reis R I^[13]开发了一个数学模型来模拟气体金属电弧 (GMA) 焊接时电极的温度场分布。将得出的结果与用高速摄像系统观察到的电弧区形态相比较, 来解释恒定电流条件下的焊接熔化速率曲线, 研究焊条熔化对 GMA 焊接工艺稳定性, 焊接效率和焊珠形状的影响。

德国马格德堡奥托·冯·格里克大学的 Fuchs H 等人^[14]用不同磁场条件下的阴极操纵手段来获得斑点运动、离子电流、熔滴喷溅的实验结果。采用高速摄像系统可以很清晰的观测到斑点增加速率和侵蚀区域的扩大。从测得的离子流密度的角分布可以得到集中的等离子体柱。磁场强度的影响还需进行更系统的研究。

日本东京工业大学的 Manabu Tanaka 等人^[15]使用商用电力系统变压器生成一个稳定的多相交流电弧, 然后采用高速摄像机和同步电压波形分析观察和研究电弧放电行为及其稳定性。其研究结果表明复燃现象发生在相邻电极之间, 相数量的增加导致了稳定的多相交流电弧的产生。尽管氧气火焰的增加导致电弧区域的均匀性降低, 但是电极位置的修正可以改善多相交流电弧的均匀性。

印度理工学院鲁尔基分校的 Ghosh P K 等人^[16]在脉冲电流气体金属电弧 (P-GMA) 焊接不锈钢填充

焊丝熔敷过程中,应用高速摄像系统研究电弧特性变化、电弧环境保护稳定性和金属过渡行为的脉冲参数变化,还研究了气体保护焊缝球状熔敷和喷射过渡模式。从其根直径、投射直径、长度、硬度和金属转移行为的电弧特性研究发现,熔滴分离速度随直径的不同而变化;并且发现直径的增加会对在高电弧电压下的电弧形状产生不利的影响。

2.3 电弧和电接触研究中的光路设计

高速摄像技术在多数实际使用中不需要设定特别的光路,通过高速摄像机就可以直接进行摄像和拍摄。但在电弧和电接触研究中,由于电弧的亮度较高或者电接触过程中研究区域较小的缘故,一般根据研究需要设计一定的光路成像系统,主要包括背光光源、成像系统和拍摄系统。

2.3.1 光源类型

由于电弧是一个高亮度辐射光源,直接取像看不到其内部变化过程且容易损坏摄像机感光系统,一般均采用背光技术取像,对背光的要求是在高速摄影机上所接受光的强度必须至少强于电弧本身的弧光。背光及其光路的选用和配合直接影响高速摄影摄像质量。目前常用的背光光源有两类:一类是以氙灯、碘钨灯为代表的点光源背光光源;另一类是以激光为代表的平行光背光光源。

碘钨灯、氙灯的光色正、光强大、较稳定、无闪烁,但需要用球面或抛物面反射镜来聚焦,方能形成平行光源。此类光源的缺点:光源的发热量较大,对实验和操作有一定影响;光源的单色性较差,后期经过透镜存在色差。

激光光源通常选用实验室常见的波长 632.8 nm 的氦氖激光器(功率 25 mW),由于激光束很细,所以必须经过一定的光路进行扩束处理,变成有一定直径的平行光源后才可以作为背光源。激光光源单色性和平行性较好,实验和操作方便,后期经过透镜不存在色差,设备功率较小。所以目前许多实验中大量采用激光作为背景光源。

2.3.2 成像系统

图 1 是不同光源情况下高速摄像的光路设计图。成像系统主要包含成像透镜、干涉滤光片、小孔光阑、底板或投影屏。成像系统的主要作用是光源扩束、放大、成像、滤光和成像功能。光源扩束主要通过反射镜(如图 1 中 a)或透镜组(如图 1 中 b)来实现,主要是将光源变为适当的平行光束照射在物体上。而对于物像的放大主要通过透镜或透镜组实现物像的放大,这一系统对电接触过程中较小区域的研究十分重要。由于电弧的光强较大,需要通过小孔光阑、干涉滤光片的方法来降低光强,方便成像和拍摄。滤光片采用光的干涉原理,通过薄膜技术制备而成,所以滤光片叫干涉滤光片,它能从连续光谱中滤出所需波长范围的光,所能透过的光谱范围是可以任意选定的,透过的光谱宽度可由 0.1 纳米到几十纳米。往往光经过滤光片后对光束限制还不够,则还要设置光阑(带孔的金属薄片)来限制光束。光阑常设置在透镜的焦点附近,从而来调节成像的光强。对于一般电接触行为的研究,由于电弧亮度较弱,所以不需要滤光片和光阑。

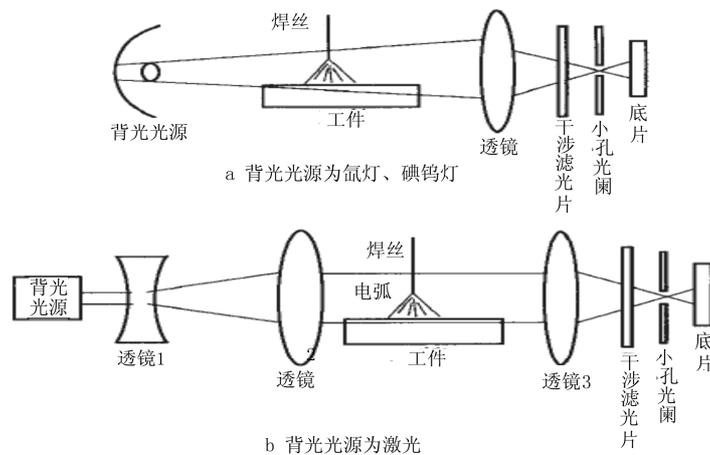


图 1 高速摄像常用光路设计图

Fig.1 High-speed video common optical design

2.3.3 拍摄系统

对于物像的拍摄也有直接成像或间接成像两种

方式。直接成像方式是通过高速摄像机直接拍摄物像;而间接成像主要是将物像投影在一定的投影屏

上, 供高速摄像机间接拍摄物像。实际使用中具体选择的拍摄方式, 主要取决于光源强度、物像类型、实验和操作条件等。一般光源较强时多采用间接方式, 光源较弱时采用直接方式。

2.4 高速摄像技术在电接触研究中的应用

近年来高速摄像技术的发展, 在电接触研究领域中的电弧、分断过程等方面逐渐开始使用起来。对于电弧的研究主要集中在高电压、大电流的开关放电行为, 以及大电流条件下的电弧行为, 而对于小电流、中小电压条件下使用的贵金属基电接触材料的电弧或微观电接触行为的研究, 目前国内外相关的研究报道极少。本研究小组针对该问题开展了研究, 并根据研究体系的特点建立了适合贵金属基电接触材料测试的高速摄像体系, 并设计和构建了相应的光路设计, 图 2 为安装在电接触实验机上进行实时测试的高速摄像系统的光学系统部分。通过该系统目前已经拍摄了分断式电接触过程中触头的运动行为和特点, 图 3 为拍摄到的触头的瞬时放大影像, 其线放大率为约 20 倍。



图 2 电接触试验机高速摄像光路系统

Fig.2 Electrical contact testing machine and high-speed video optical system



图 3 拍摄到的触头放大影像(20 倍)

Fig.3 Magnify image of contact by High-speed video (20X)

3 高速摄像技术发展及应用展望

实践证明高速摄像技术在记录瞬时状态和过程相关的研究方面, 具有广泛的应用前景。在材料科学应用方面存在下列问题: ① 材料学研究的工作环境比较复杂, 若拍摄条件和技术较差, 会直接影响实验结果; ② 高速摄像系统中的拍摄技术, 以及光路设计技术需要进一步总结和提高, 从而方便使用人员进行学习和选择; ③ 现有的高速摄像机的成本比较高, 导致高速摄像系统和设备的普及率不太高, 使得该技术的应用造成了阻碍。

对于高速摄像技术近年来随着计算机技术和微电子技术的发展, 数据处理和图像处理的进一步成熟, 该技术出现一定的发展方向 and 趋势, 主要表现在: ① 高速摄像技术的数据存储量不断提高, 拍摄时间不断延长, 图像分辨率不断提高, 从而方便研究; ② 采用高速摄像技术功能不仅仅是拍摄功能, 而且出现了与红外探测、光谱分析等技术进行集成化的趋势, 从而提高设备的综合分析能力; ③ 高速摄像系统的硬件和软件技术不断提升和进步, 从而降低设备的成本和价格, 实现该技术的普遍使用。

参考文献:

- [1] 王静, 廖庆喜, 田波平, 等. 高速摄像技术在我国农业机械领域的应用[J]. 农机化研究, 2007, 1(1): 184-186.
Wang J, Liao Q, Tian B, et al. The present and development tendency of high-speed photography applied on agricultural machinery. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 1(1): 184-186.
- [2] 张三喜, 姚敏, 孙卫平. 高速摄像及其应用技术[M]. 国防工业出版社, 2006: 1-50.
- [3] 刘缠牢, 阮萍, 熊仁生, 等. 高速摄影测量的计算机辅助[J]. 光子学报, 2001, 30(1): 113-116.
Liu C, Ruan P, Xiong R, et al. The computer aided method of high frequency photographing measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(1): 113-116.
- [4] 郭海云, 李桓, 陈育浩, 等. 高速摄像技术在弹道碎石器探头运动参数测量中的应用[J]. 中国医疗器械杂志, 2005, 28(6): 22-24.
Guo H, Li H, Chen Y, et al. The application of high-speed camera technique in movement parameter measurement of the pneumatic lithotritics[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2004, 28(6): 22-24.

- [5] 林凡, 吴林桃, 郭车辉. CMOS 图像传感器技术及研究进展[J]. 半导体技术, 2001, 26(12): 40-44.
Lin F, Wu S, Guo D. Technology of CMOS image sensor and its research progresses[J]. Semiconductor Technology, 2001, 26(12): 40-44.
- [6] 顾小民, 孙松年, 李亚平, 等. 高速摄影在金属雾化制粉研究中的应用[J]. 光子学报, 1987(3): 128-128.
Gu X, Sun S, Li Y, et al. High-speed photography in the study of metal atomization[J]. Acta Photonica Sinica, 1987(3): 128-128.
- [7] 孙勃, 唐德渝, 牛虎理, 等. 熔滴过渡高速摄像技术在潜水焊接试验中的应用[J]. 石油工程建设, 2011, 37(4): 53-55.
Sun Bo, Tang D, Niu H, et al. Application of high-speed photography for melt transfer in underwater welding tests [J]. Petroleum Engineering Construction, 2011, 37(4): 53-55.
- [8] 姜平, 陈武柱, 夏侯荔鹏, 等. 激光深熔焊等离子体的高速摄像实验研究[J]. 应用激光, 2001, 21(5): 289-291.
Jiang P, Chen W, Xiahou L, et al. An experimental study on plasma in deep penetration laser welding using high speed camera[J]. Applied Laser, 2001, 21(5): 289-291.
- [9] 陈静, 谭华, 杨海欧, 等. 激光快速成形过程熔池行为的实时观察研究[J]. 应用激光, 2005, 25(2): 77-80.
Chen J, Tan H, Yang H, et al. Research on the molten pool behavior in the process of laser rapid forming through in situ observation technique[J]. Applied Laser, 2005, 25(2): 77-80.
- [10] 陈志翔, 张军, 宋永伦, 等. 焊接过程高速图像和工艺参数的同步记录与分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(3): 69-72.
Chen Z, Zhang J, Song Y, et al. Synchronized record and analysis of high speed images and process parameters for welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3): 69-72.
- [11] Wei X, Yu D, Sun Z, et al. Arc characteristics and micro-structure evolution of W-Cu contacts during the vacuum breakdown[J]. Vacuum, 2014, 117(4): 83-89.
- [12] Le Guen E, Carin M, Fabbro R, et al. 3D heat transfer model of hybrid laser Nd: Yag-MAG welding of S355 steel and experimental validation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(7): 1313-1322.
- [13] Modenesi P J, Reis R I. A model for melting rate phenomena in GMA welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189(1): 199-205.
- [14] Fuchs H, Keutel K, Mecke H, et al. Pulsed vacuum arc discharges on steered arc cathodes[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 116(9): 963-968.
- [15] Tanaka M, Tsuruoka Y, Liu Y, et al. Stability analysis of multi-phase AC arc discharge for in-flight glass melting [J]. Current Applied Physics, 2011, 11(5): S35-S39.
- [16] Ghosh P K, Dorn L, Kulkarni S, et al. Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1262-127.