

# 电爆喷涂中粉末导体的能量沉积特性

韩峰<sup>1,2</sup>, 朱亮<sup>1,2</sup>, 王旭东<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 电爆喷涂作为一种正在研究的新型表面改性技术, 其喷涂原料形态、种类的多元化是促进该技术实现工程应用的重要因素。基于对传统丝电爆喷涂的研究认识, 引入粉末导体作为喷涂原料进行电爆喷涂实验, 并自主开发了一套针对粉末导体的连续电爆喷涂装置, 对粉末电爆喷涂的能量沉积特性进行了初步研究。结果表明, 随充电电压(8~13 kV)及粉末粒径(10~100 μm)的变化, 粉末电爆呈现两种能量沉积模式: 平滑震荡模式(I)和突变模式(II)。在平滑震荡模式下, 由于过早发生了沿粉末表面的旁路气体放电, 粉末能量沉积低, 受热程度不高, 很难形成有效涂层; 突变模式下, 旁路气体放电被有效抑制, 粉末能量沉积充分, 更易得到均匀、致密的涂层。可通过同时提高充电电压和减小粒径的途径, 实现粉末能量沉积模式由平滑震荡式向突变式转变, 进而改善涂层质量。

**关键词:** 粉末电爆喷涂; 能量沉积; 涂层形貌; 电爆产物; 粉末粒径

## Characteristics of Energy Deposition for Powder Conductor in Electrical Explosion Spraying

HAN Feng<sup>1,2</sup>, ZHU Liang<sup>1,2</sup>, WANG Xudong<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Electrical explosive spraying is a new surface modification technology. The diversification and morphology of sprayed raw materials are important factors to promote the application of this technology into engineering. Based on the understanding of traditional wire electrical explosive spraying, a powder conductor, as a raw material, was adopted for this electrical explosive spraying experiment. A set of electrical explosive spraying device for the powder conductor was developed and the energy deposition characteristics of powder electrical explosive spraying were studied preliminarily. The results show that, with the change of charging voltage(8~13 kV) and particle size(10~100 μm), there are two energy deposition modes in powder electrical explosion, namely, smooth oscillation mode (I) and catastrophe mode(II). In the smooth oscillation mode, it is difficult to form an effective coating on the substrate surface. While in the catastrophe mode, it is easier to form a high-quality coatings. It is concluded that the essence of the powder energy deposition mode is controlled by the competition between the resistance of powder system and the gap resistance of interparticle. Therefore, the powder energy deposition mode can be transformed from the smooth oscillation to the catastrophe by increasing charging voltage and reducing particle size simultaneously, and hence the resultant coating quality can be improved.

**Key words:** powder electrical explosion spraying; energy deposition; coatings morphology; electrical explosion products; powder diameter

## 0 引言

电爆炸是利用高电压对电爆导体脉冲放电, 在瞬时大电流的加热作用下电爆导体沉积能量并发生爆炸的现象<sup>[1]</sup>。当电流注入后, 电爆导体依次经历能量沉积、失稳电爆、等离子体放电 3 个阶段, 其中

电爆导体的能量沉积对后续电爆行为的演变有着至关重要的影响, 并随应用领域的差异体现出不同特点。例如, 合理的能量沉积可提高纳米粉的制备效率及粉体品质<sup>[2]</sup>; 设法提高导体的能量沉积速率则有助于获得高温高密度等离子体, 产生稳定的强脉冲 X 射线<sup>[3-5]</sup>。

在电爆喷涂中, 喷涂材料的能量沉积是其获得热量的主要方式, 并为喷涂粒子的形成及喷射提供初始热动条件<sup>[6-7]</sup>。只要沉积的能量足够熔化喷涂原

基金资助项目: 国家自然科学基金(51765038)。  
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51765038).

料并使其最终发生爆炸,理论上可选用任何形式的导体材料进行喷涂。但一直以来,大多数研究通常选择金属丝作为喷涂原料,其原因在于:连续的金属丝可稳定束缚或焊接于两电极间完成电流导入,实现能量沉积<sup>[8-9]</sup>。喷涂原料形态、种类单一成为电爆喷涂方法走向工程应用的最主要瓶颈。

相比于金属丝导体,许多喷涂原料仅能以粉末的形式存在(如:镍基合金粉、金属陶瓷粉等),利用粉末导体进行电爆喷涂具有广阔的工程应用潜力。而目前对于粉末电爆喷涂的研究还处于起步探索阶段。由于粉末导体是由大量离散导电颗粒群集而成,如何将电流可靠、稳定的导入粉末是实现粉末电爆喷涂的重要条件。为此,有人提出了对粉末进行压制,固定于电极间进行电爆喷涂,但某些硬度较高的金属陶瓷粉末很难压制成块,无法实现电流的稳定导入<sup>[10]</sup>;还有是将粉末置于侧壁开有窗口的喷腔内,对粉末进行约束限制,实现电流的稳定导入<sup>[11-12]</sup>,而利用该方法完成单次电爆喷涂后,须将电爆喷涂系统关停,手工填充粉末后再进行喷涂,喷涂效率较低。

针对以上问题,作者所在团队开发了一种气体放电导入电流的电爆方法<sup>[13-14]</sup>,在喷涂过程中粉末原料不接触电极,而是与电极留有一定气隙,大电流通过形成的气隙击穿通道稳定的导入粉末原料。该方法不仅实现了电流的可靠导入,还便于喷涂过程中粉末原料的连续送进,为提高粉末电爆喷涂效率提供了可行的技术途径。

基于该方法,本文自主开发了一套针对粉末导体的连续电爆喷涂装置,利用该装置进行系列粉末电爆喷涂实验,根据对涂层形貌及电爆产物特征的观察对比,并结合对放电回路电流、电压及能量沉积的测量分析,对粉末电爆喷涂过程的能量沉积特性进行了详细论述。

## 1 实验装置及方法

### 1.1 实验装置

自行设计、制作的连续粉末电爆喷涂装置<sup>[15]</sup>如图1所示。该装置的主体结构由喷枪、载料杆、电极和传送装置组成。喷枪和载料杆均选用具有良好绝缘性能的聚乙烯制成,两铜电极包覆于绝缘喷枪内并分别与储能电容器相连,载料杆开有约束凹槽,其槽宽 $d$ 与电极间预留的喷射窗口宽度一致,为4 mm,槽深 $h$ 为15 mm。喷涂前将粉末制成浆

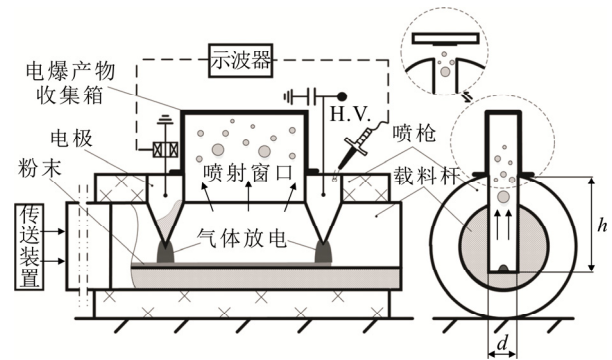


图1 粉末电爆喷涂装置

Fig.1 Schematic diagram of powder electrical explosive spraying device

料均匀涂覆于槽底备用。该装置工作原理为:利用高压发生器 H.V.对储能电容器充电,两电极间首先建立起高压电场,在传送装置的带下载料杆被连续送入喷枪。传送过程中两电极伸入载料杆的凹槽中,但不与粉末发生接触,而是通过气体放电的形式将大电流导入粉末使其发生电爆,产生的高压气体和喷涂粒子在载料杆的凹槽内受约束汇聚成高速喷射束流撞击基体,最终形成涂层。该装置克服了以往每喷涂一次须更换一次喷涂材料的缺点,可使粉末电爆喷涂过程稳定、连续的进行。

### 1.2 实验方法

将专门设计的电爆产物收集箱密封连接到喷枪的喷口处对电爆产物进行收集。为保证收集结果的真实准确,在各参数下均连续电爆20次,待电爆产物沉降后,对其进行取样。采用 SEM(Quanta 450 FEG)对收集到的产物进行观察分析。利用 Person101 罗氏线圈和 Tektronix P6015A 高压差分探头分别对电爆过程中电流、电压响应参数进行同步测量,响应信号通过 Tektronix MDO3102 数字示波器进行采集,罗氏线圈可承受的最大峰值电流为50 kA,高压差分探头的最大测量电压为40 kV,示波器具有5 GHz的采样频率。通过对采集到的电流电压进行积分,得到电爆过程输入的能量,即

$$E = \int_0^t IU_r dt \quad (1)$$

式中: $I$ 为实测回路电流; $U_r$ 为粉末两端阻性压降; $t$ 为电爆响应时间。其中, $U_r$ 可计算为

$$U_r = U_m - L_a \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$U_m$ 、 $L_a$ 分别为实测压降值和测量回路等效电感(电极与粉末间气体放电电感与粉末负载电感之和),根据文献<sup>[16-17]</sup>中提出的电感计算方法,估算

出的  $L_a$  约为  $0.15 \mu\text{H}$ , 设备的固有电感约为  $0.1 \mu\text{H}$ 。

喷涂原料选用粒径分别为  $100$ 、 $50$ 、 $30 \mu\text{m}$  以及  $10 \mu\text{m}$  的 Ni60A 球形粉末; 基体材料采用经喷砂处理的 304 不锈钢试片; 选定的初始充电电压范围为  $8\sim 13 \text{ kV}$ , 储能电容  $C$  为  $8.88 \mu\text{F}$ , 两电极间距为  $70 \text{ mm}$ 。实验前将制成的粉末浆料均匀涂覆于载料杆底部预置的滤纸槽中, 待浆料完全固化并定型后移去滤纸, 所得单次电爆粉末的尺寸约为:  $70 \text{ mm}\times 0.3 \text{ mm}\times 0.3 \text{ mm}$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 涂层形貌特征

采用连续送料的电爆喷涂方法进行系列粉末电爆喷涂实验, 当电压低于  $11 \text{ kV}$  时, 在任意粒径下, 基体表面均未能形成有效涂层, 仅是大量粉末烧结团混合着未完全熔化的原始粉末颗粒粘附于基体表面, 其典型形貌如图 2(a)所示, 而且粉末粒径越大、充电电压越低, 粉末烧结团的体积则越大。随电压逐渐提升至  $13 \text{ kV}$ , 在  $>10 \mu\text{m}$  3 种粒径下, 基体表面仍存在较多未熔化的原始粉末及粉末烧结团, 但相比于低电压时, 粉末烧结团出现体积减小而密度增大的趋势, 典型特征如图 2(b)所示。

将电压保持在  $13 \text{ kV}$ , 而粒径继续减小至  $10 \mu\text{m}$  后, 基体表面可明显观察到一层平整、光亮的银白色涂层。通过进一步放大观察, 如图 3 所示, 涂层均匀、致密, 喷涂粒子在基体表面的扁平化程度较高, 呈现典型的“薄饼状”扁平粒子堆积的形貌特征, 且扁平粒子分布均匀、堆积致密, 形成的涂层属于典型的熔滴喷涂层<sup>[18]</sup>。

### 2.2 电爆产物收集

在依靠喷涂粒子扁平后, 层-层叠加堆积获得涂层的喷涂方法中, 涂层的形貌特征是由电爆产物与基体发生碰撞前的形态、尺寸等特性所决定的。通过对电爆产物进行收集, 不仅可以对其凝固后的形貌特征进行较为清晰的观察, 而且还可对其尺寸特征进行统计。

从收集结果来看, 当电压  $<11 \text{ kV}$  时, 各粒径粉末电爆产物主要由体积较大的粉末烧结团和大量未熔化的原始粉末颗粒组成, 其典型形貌如图 4(a)所示。可以看出, 粉末烧结团是由发生局部熔化的原始粉末颗粒以烧结缩颈的形式连通构成, 其间存在大量未充分闭合的孔洞, 整体较为疏松。当电压升至  $13 \text{ kV}$ , 随粒径逐渐减小, 产物中的粉末烧结团

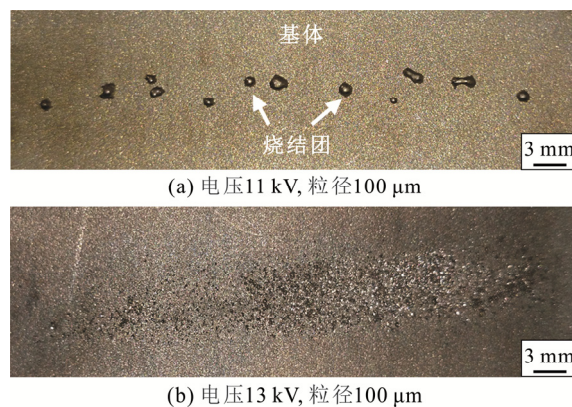


图 2 涂层表面宏观形貌

Fig.2 SEM image of macrostructures of coatings surface

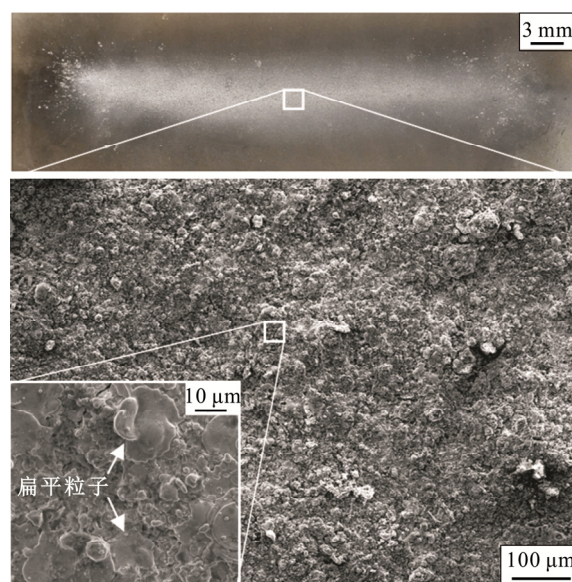


图 3 涂层表面形貌(电压  $13 \text{ kV}$ , 粒径  $10 \mu\text{m}$ )

Fig.3 Morphology of coatings surface(charging voltage:  $13 \text{ kV}$ , particle size:  $10 \mu\text{m}$ )

数量增多、体积变小, 其内部孔洞趋于收缩、闭合, 粉末烧结团逐渐由不规则状向球状过渡, 典型特征如图 4(b)所示。出现粉末烧结团、原始颗粒共存的现象表明, 能量沉积过程中, 粉末内部的欧姆加热程度较低, 并不足以驱动所有颗粒快速熔化, 颗粒间仅进行着较为缓慢的烧结致密化过程。

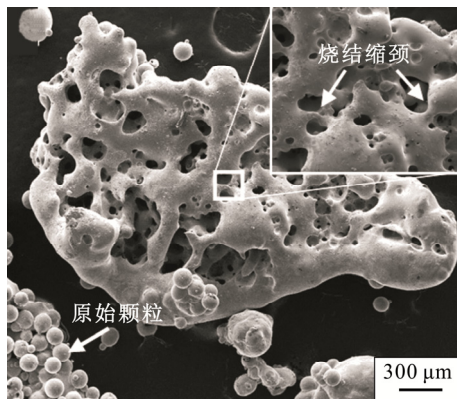
当电压升高至  $13 \text{ kV}$ , 粒径减小至  $10 \mu\text{m}$  后, 与其他参数相比, 产物中并未发现粉末烧结团, 而是布满了不同直径的球形颗粒, 颗粒表面光滑且具有很高的球形度, 典型特征如图 4(c)所示。粒径统计结果表明: 产物中最大粒径约为  $20 \mu\text{m}$ , 最小仅为  $0.2 \mu\text{m}$ , 平均粒径为  $5.2 \mu\text{m}$ , 明显小于所对应的原始粉末颗粒。由此可推断, 在此参数下, 粉末内



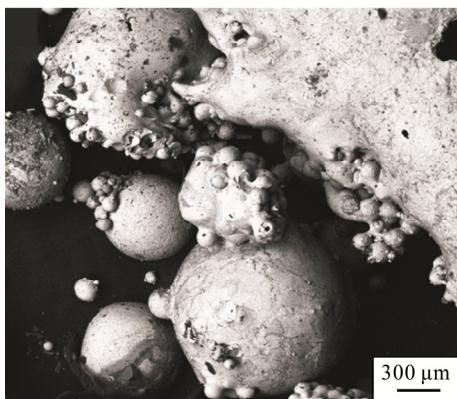
部的欧姆加热充分, 离散颗粒间的相变及致密化过程发展迅速, 在电爆失稳前粉末原料已达到完全熔融状态, 并在随后的爆炸喷射过程中, 进行着尺度与形态的重新分配调整。

### 2.3 粉末能量沉积

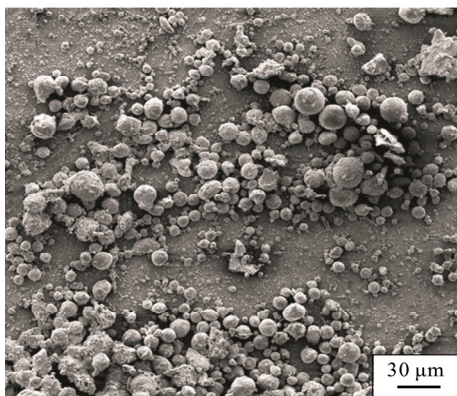
电爆产物出现的差异与粉末的受热程度密不可分, 粉末的受热、熔化过程则是由电流导入后的能量沉积特性所决定的。通过对各参数下放电回路电流、电压的测量, 发现随充电电压及粒径的变化, 电流电压呈现两种典型的演变模式:



(a) 电压11 kV, 粒径100  $\mu\text{m}$



(b) 电压13 kV, 粒径100  $\mu\text{m}$



(c) 电压13 kV, 粒径10  $\mu\text{m}$

图4 电爆产物形貌 SEM 图

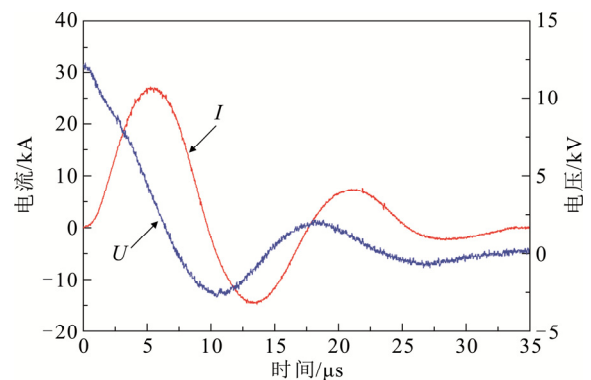
Fig.4 SEM image of microstructures of electrical explosive products

1) 平滑震荡模式。如图 5(a)所示, 当电压低于 13 kV, 同时粒径大于 10  $\mu\text{m}$  时, 电流电压波形均表现为平滑的衰减震荡, 整个响应过程无明显电流电压信号突变现象。

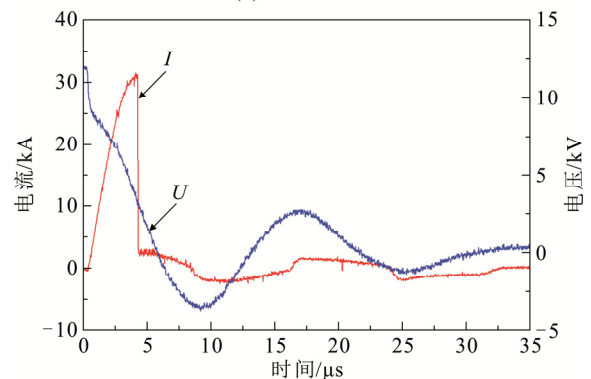
2) 突变模式。如图 5(b)所示, 当电压为 13 kV, 同时粒径减小至 10  $\mu\text{m}$  时, 随着电流的迅速升高, 电压快速降低, 当电流在升至峰值时, 发生突然陡降, 后又经历了数个小幅平缓震荡周期后消失。

图 6 给出了这两种模式下典型的能量沉积曲线, 其中图 6(a)为电压 13 kV 时, 不同粒径的能量沉积曲线; 图 6(b)为粒径 10  $\mu\text{m}$  时, 不同电压的能量沉积曲线。不难发现, 当电压一定、粒径不同时, 两种模式的能量沉积速率基本一致, 其差别在于突变模式相对于平滑震荡模式的能量沉积过程开始的更早。而当粒径一定、电压不同时, 两种模式的能量沉积过程几乎同时开始, 但具有不同的能量沉积速率, 突变模式明显较平滑震荡模式沉积速率更快。

综合对涂层形貌特征、电爆产物收集和粉末能量沉积的分析, 显然在突变模式下能量沉积过程具有发生早、速度快的特点, 更容易形成均匀、致密的熔滴喷涂层, 而在平滑震荡模式下, 基本无法形成有效涂层。



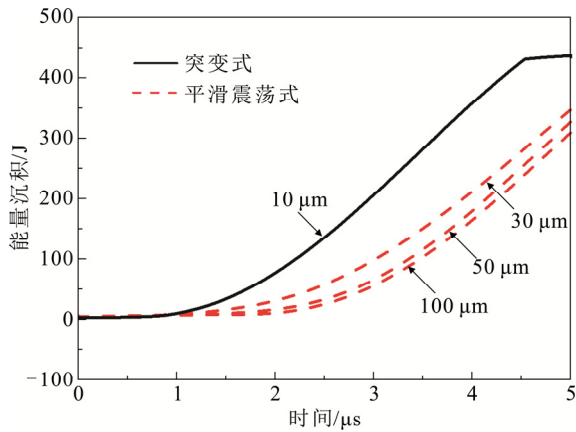
(a) 平滑震荡式



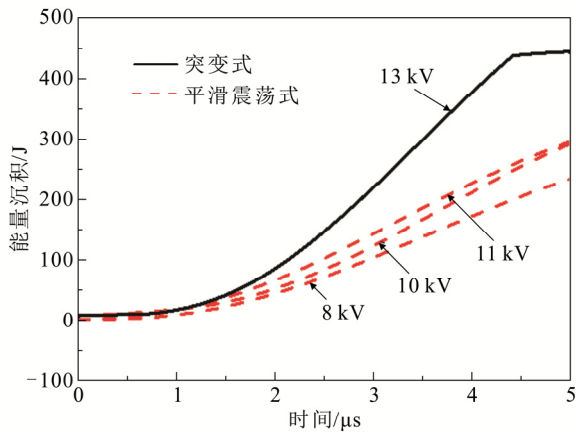
(b) 突变式

图5 电爆电流、电压波形

Fig.5 Typical waveforms of current and voltage drop



(a) 电压13 kV时, 不同粒径能量沉积曲线



(b) 粒径10 μm时, 不同电压能量沉积曲线

图6 不同参数下能量沉积曲线

Fig.6 Waveform of energy deposition in different parameter

### 3 讨论

粉末电爆喷涂中, 随电压和粉末粒径的变化, 粉末电爆存在两种能量沉积模式: 平滑震荡模式和突变模式。当电压提高至 13 kV, 同时减小粒径至 10 μm 时, 粉末导体的能量沉积模式由平滑震荡式向突变式转变。在突变模式下可得到直径小、球形度高的喷涂粒子, 因而更容易形成均匀、致密的熔滴喷涂层; 而在平滑震荡模式下, 电爆产物以大体积烧结团混合原始粉末的形式粘附于基体上, 无法形成有效涂层。结合以上实验结果, 围绕粉末导体的电流导入、加热熔化及爆炸喷射, 对电爆喷涂中粉末导体的能量沉积特性进行如下阐述。

粉末导体是由大量离散颗粒群集而成, 是一种多体相互作用的无序体系, 具有复杂的静态电学特性。在粉末体系中, 毗邻颗粒间接触将形成诸多强度迥异的力链, 其相互交接构成网络, 随机分布于粉末内<sup>[19-21]</sup>。根据 M Creyssels 等对粉末静态导电特性的研究可知, 当电流通过粉末时, 并不是所有颗粒均参与导电过程, 电流主要沿力链的分布方向传

导, 并对力链内颗粒进行加热, 即形成所谓的“电链”导电系统, 而远离力链的颗粒则很难获取热量<sup>[22-23]</sup>。

在粉末电爆喷涂过程中, 当电流导入粉末后, 随着欧姆加热的作用, 力链内颗粒受热发生局部熔化, 颗粒间导电斑点面积增加, 接触电阻逐渐降低, 致使粉末体系电阻不断降低。当充电电压较低时, 电爆过程中电流上升速率相对平缓<sup>[24]</sup>, 使得粉末的能量沉积速率也随之变慢, 导致粉末体系电阻的下降速度较慢; 而当粒径较大时, 粉末在单位体积内的力链数量变少, 即导电路径减少, 则粉末体系具有相对大的等效电阻。有电流通过时, 粉末开始由绝缘态向导电态转变<sup>[22,25]</sup>, 但转变进程相对缓慢, 表现为能量沉积过程开始较晚。

这说明在平滑震荡模式下, 粉末具有体系电阻高、电阻下降速率慢的特点。结合图 7 可知, 在粉末受热后, 颗粒表面的解吸附气体和杂质蒸汽逐渐膨胀, 其等效阻值逐渐减小, 在粉末体系电阻与颗粒间气隙电阻的竞争关系中, 气隙电阻迅速小于粉末体系电阻, 在电压作用下, 首先发生了两颗粒间的表面击穿放电。同时, 颗粒间放电对颗粒表面具有净化作用<sup>[26]</sup>, 这使得颗粒表面附近杂质气体浓度倍增, 出现了颗粒间表面放电的“多米诺骨牌效应”, 最终引起粉末体系的表面旁路击穿放电现象。由于粉末体系电阻在初期阻性加热的影响下, 一直处于缓慢下降趋势直至电流完全转移至电阻更低的击穿通道内, 整个过程电阻的变化率始终为  $dR/dt < 0$ , 因而在平滑震荡模式下的电流电压曲线(图 5(a))在整个响应过程中并没有出现明显突变。通过进一步对比直径为 0.3 mm 的 Ni60A 丝的电流电压波形, 如图 8 所示。发现丝电爆时电流可顺利导入丝核内部并对其进行欧姆加热, 丝核在震荡电流的前半周期内就已气化并且发生击穿, 最终丝两端的电压迅速崩溃下降, 随后进入等离子体放电阶段。相似体积及材料下, 丝电爆和粉末电爆电流电压波形的差异, 说明粉末电爆中平滑震荡模式并非简单的电流短路模式, 而是粉末电爆过程中特有的一种放电模式。在平滑震荡模式初期, 粉末内部进行着一定程度的欧姆加热, 但由于击穿通道的过早形成, 颗粒相变及致密化的主要驱动力随欧姆加热的过早终结而消失, 初期短暂的阻性加热过程不足以使所有粉末颗粒熔化, 则以烧结缩颈的形式连通构成烧结团, 并混合未被加热的原始粉末在随后的爆炸过程中一同喷射而出, 形成如图 4(a)、4(b)所示的形貌。



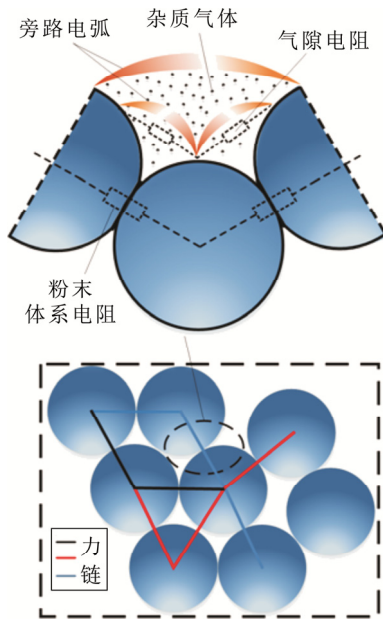
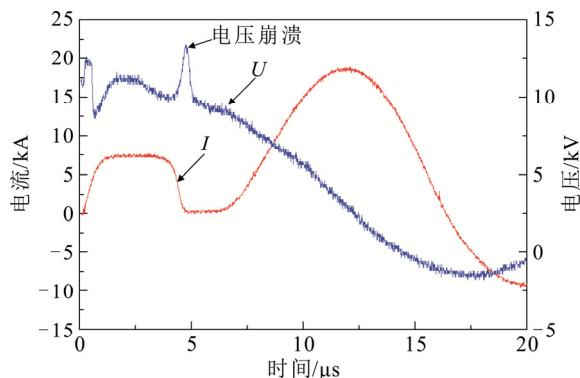


图7 粉末电爆能量沉积机制

Fig.7 Mechanism of energy deposition for powder electrical explosion

图8 13 kV时0.3 mm直径Ni60A丝电爆电流电压波形  
Fig.8 Waveforms of current and voltage drop of Ni60A wire in diameter of 0.3 mm at 13 kV

相比而言, 突变模式下的充电电压高、粒径小, 所以粉末体系内部力链数量更多, 导电路径分布更广, 颗粒间致密化进程迅速, 粉末体系电阻快速降低, 在表面杂质气体形成后, 粉末体系电阻始终小于气隙电阻, 电流一直在粉末内部传导。粉末内部能量的持续沉积可使更多的粉末颗粒参与导电加热, 熔融颗粒的数目将出现雪崩式增长, 颗粒间快速熔合致密化过程将促进体系电阻进一步快速降低, 抑制了旁路击穿通道的发展。随着粉末内部能量沉积的进行, 粉末完全熔化并部分气化, 熔融状态的导体出现失稳并发生喷射, 电流快速下降, 能量沉积过程迅速终结, 表现为图 5(b)中电流的陡降和图 6

中突变模式能量沉积曲线斜率的突变。所形成的喷涂粒子球形度高、尺寸小, 涂层质量高。

可见, 通过同时提高充电电压和减小粉末粒径的途径, 合理调控粉末体系电阻的演变特性以达到抑制旁路电流过早形成的目的, 实现粉末能量沉积模式由平滑震荡式向突变式转变, 可改善涂层质量。

## 4 结论

1) 在粉末电爆喷涂中, 随充电电压及粉末粒径的变化存在两种能量沉积模式: 平滑震荡模式和突变模式。在平滑震荡模式下, 电爆产物以大体积烧结团混合原始粉末为主, 无法在基体形成有效涂层; 而在突变模式下喷涂粒子直径小、球形度高, 更容易形成均匀、致密的熔滴喷涂层。

2) 当充电电压提高至 13 kV, 同时减小粉末粒径至 10  $\mu\text{m}$  时, 粉末导体的能量沉积模式由平滑震荡式向突变式转变。

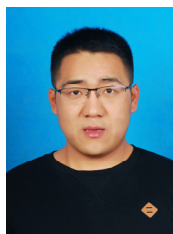
3) 粉末能量沉积模式的本质受控于粉末体系电阻与颗粒间气隙电阻的竞争关系, 通过同时提高充电电压和减小粒径的途径, 控制粉末体系电阻的演变特性以达到抑制旁路电流过早形成的目的, 实现粉末能量沉积模式由平滑震荡式向突变式转变, 进而改善涂层质量。

后续将重点开发一种可对约束槽狭小空间内的电爆过程进行具有时空分辨能力的诊断测试方法及装置, 从图像或光谱的角度, 对粉末电爆过程的能量沉积特性进行更为深入的研究。

## 参考文献 References

- [1] 张永民, 邱爱慈, 周海滨, 等. 金属丝电爆炸现象研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 44(7): 1-12.  
ZHANG Yongmin, QIU Aici, ZHOU Haibin, et al. A review of wire electrical explosion phenomena[J]. High Voltage Engineering, 2016, 44(7): 1-12.
- [2] 毕学松, 朱亮, 杨富龙. 丝电爆过程的电流导入机理[J]. 物理学报, 2012, 61(7): 078105.  
BI Xuesong, ZHU Liang, YANG Fulong. Mechanism of current injection in the process of wire electrical explosion[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(7): 078105.
- [3] ZHOU Qing, ZHANG Qiaogen, YU Lu, et al. Effect of current rate on energy deposition of electrical wire explosion in air[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(11): 3639-3643.
- [4] MICHAEL J T. Formation of plasma around wire fragments created by electrically exploded copper wire[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, 35: 700-709.
- [5] 石桓通, 邹晓兵, 赵岫, 等. 并联金属丝提高电爆炸丝沉积能量的数值模拟[J]. 物理学报, 2014, 63(14): 145206.  
SHI Huantong, ZOU Xiaobing, ZHAO Can, et al. Numerical simula-

- tion of energy deposition improvement in electrical wire explosion using a parallel wire[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 145206.
- [6] SUHARA T, KITAJIMA K, FUKUDA S, et al. The structure and adhesion of coatings deposited by wire explosion spraying[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1974, 11(4): 787-792.
- [7] GRABATIN H, SCHLETT V, STUKE H, et al. Resistance of tantalum and columbium coatings to propellant gas erosion[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1985, A3(6): 2545-2550.
- [8] LI Q, SONG Q Z, WANG J Z, et al. Effect of charging energy on droplet diameters and properties of high-carbon steel coatings sprayed by wire explosion spraying[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 206: 202-207.
- [9] 朱亮, 赵进峰, 石茂虎. 丝电爆炸喷涂方法用于管内壁铝涂层的制备[J]. *焊接学报*, 2014, 35(6): 65-68.  
ZHU Liang, ZHAO Jinfeng, SHI Maohu. Molybdenum coating prepared on inner surface of tube by wire electrical explosion spraying[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(6): 65-68.
- [10] 周刚毅, 董新龙, 刘军. 金属粉末电爆炸过程的实验研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(2): 272-275.  
ZHOU Gangyi, DONG Xinlong, LIU Jun. Experiment study of metallic powder electrical explosion[J]. *ACTA Armamentarii*, 2009, 30(2): 272-275.
- [11] KIKKAWA F, TAMURA H, KONDO K. Ti-B-C composite coating produced by electrothermally exploded powder-spray technique[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2006, 15(1): 92-96.
- [12] MIZUSAKO F, TAMURA H, KONDO K. Radiographic characterization of thermal spray jets produced by electrothermal explosion of ceramic powders[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(1A): 422-429.
- [13] 朱亮, 毕学松. 利用气体放电导入电流的金属丝电爆装置: 中国, 201110054792.7[P]. 2012-09-26.  
ZHU Liang, BI Xuesong. Metal wire explosion device using gas discharge to import current: China, 201110054792.7[P]. 2012-09-26.
- [14] 朱亮, 赵进峰, 石茂虎. 丝电爆炸喷涂方法用于管内壁铝涂层的制备[J]. *焊接学报*, 2014, 35(6): 65-68.  
ZHU Liang, ZHAO Jinfeng, SHI Maohu. Molybdenum coating prepared on inner surface of tube by wire electrical explosion spraying[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(6): 65-68.
- [15] 朱亮, 韩峰. 小口径管内壁粉末电热爆喷涂装置: 中国, 201510648009.8[P]. 2017-09-12.  
ZHU Liang, HAN Feng. Powder electrical explosion spraying device for inner wall of small diameter tube: China, 201510648009.8[P]. 2017-09-12.
- [16] 吴坚, 李兴文, 邱爱慈, 等. 金属丝电爆炸研究进展-(I): 真空环境[J]. *高电压技术*, 2018, 44(6): 1898-1906.  
WU Jian, LI Xingwen, QIU Aici, et al. Review of electrical exploding wires-(I): in vacuum[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(6): 1898-1906.
- [17] 吴坚, 阴国锋, 范云飞, 等. 金属丝电爆炸研究进展-(II): 水环境[J]. *高电压技术*, 2018, 44(12): 4003-4012.  
WU Jian, YIN Guofeng, FAN Yunfei, et al. Review of electrical exploding wires-(II): underwater[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(12): 4003-4012.
- [18] 朱亮, 张有国, 毕学松. 腔内约束电热爆喷涂涂层的形成[J]. *焊接学报*, 2012, 33(2): 77-80.  
ZHU Liang, ZHANG Youguo, BI Xuesong. Coating formation of electro-thermal explosion spray in constrained capillary tube[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(2): 77-80.
- [19] DORBOLO S, VANDEWALLE N. Electrical investigations of granular arches[J]. *Physics A*, 2002, A311: 307-312.
- [20] 孙其诚, 王光谦. 静态堆积颗粒中的力链分布[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 4667-4674.  
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Force distribution in static granular matter in two dimensions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 4667-4674.
- [21] 孙其诚, 辛海丽, 刘建国, 等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. *岩土力学*, 2009, 30: 83-87.  
SUN Qicheng, XIN Haili, LIU Jianguo, et al. Skeleton and force chain network in static granular material[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30: 83-87.
- [22] CREYSSELS M, DORBOLO S, MERLEN A, et al. Some aspects of electrical conduction in granular systems of various dimensions[J]. *The European Physical Journal E*, 2007, 23: 255-264.
- [23] DORBOLO S. Hysteretic behavior in metallic granular matter[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(5): 936-938.
- [24] ROMANOVA V M, IVANENKOV G V, MINGALEEV A R, et al. Electric explosion of fine wires: three groups of materials[J]. *Plasma Physics Reports*, 2015, 41(8): 617-636.
- [25] BRANLY E. Impact of transmission efficiency on conductivity[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series I - Mathematics*, 1890, 111: 785.
- [26] TOKITA M. Development of large-size ceramic/metal bulk FGM fabricated by spark plasma sintering[J]. *Transactions Technology Publications*, 1999, 308/311: 83-88.



HAN Feng  
Ph.D. candidate



ZHU Liang  
Ph.D., Professor  
Corresponding author

韩峰

1986—, 男, 博士生

主要从事电爆机理及电爆喷涂方面的研究

E-mail: hanfeng07@aliyun.com

朱亮(通信作者)

1964—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事焊接工艺及设备、电爆喷涂及电爆制粉技术方面的研究

E-mail: zhul@lut.cn

收稿日期 2019-05-18 修回日期 2019-11-15 编辑 曹昭君