

电爆过程中能量密度与爆炸产物变化的关系*

朱亮, 朱锦, 毕学松

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 电爆应用于材料喷涂有独特优势。电爆过程中爆炸产物的特性及其演变直接影响涂层质量。利用高压电场中金属丝段电爆方法, 通过改变初始充电电压和金属丝的直径, 调节沉积在金属丝上的能量密度, 进行系列电爆试验; 同时, 利用探针收集电爆过程中的产物并进行显微分析。结果表明, 金属丝电爆最初产物中含有液相和气相, 随着膨胀距离的增大转变为固相。当基体处在爆炸产物未凝固的膨胀距离内, 可得到液相喷涂层或气相喷涂层。提高能量密度可以提高产物中气相的膨胀距离, 同时减少产物中液相成分所占比例。当能量密度大于 125 J/mm^3 , 爆炸产物中液相成分可达 5%, 气相膨胀距离约为 9.5 mm。

关键词: 丝段式电爆; 能量密度; 气相膨胀距离; 气相沉积

中图分类号: O38(TB12); TG174.444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2010)04-0065-05

Correlation Between Energy Density and Variation of Products in Wire Explosion

ZHU Liang, ZHU Jin, BI Xue-song

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: Electrical explosion of wire has unique advantage in material spraying. The features and evolution of the explosion products have a direct impact on the quality of the coating. A series of experiments of electrical explosion were conducted in a segmented wire explosion setup, in which the energy density of wire is adjusted through variations of initial charging voltages and diameter of wire. Experiments results show that the initial explosion products consist of liquid and gas which will turn into solid as the spray distance increase. Coating consists of gas or liquid will be obtained if the base is in the distance where explosion products have not solidified. The increase of energy density, to some extent, can increase the expanding distance of vapor deposition and reduce the proportion of liquid. When energy density is greater than 125 J/mm^3 , the proportion of liquid in explosion products is 5% and the expanding distance of vapor phase is 9.5 mm.

Key words: segmented wire electrical explosion; energy density; expanding distance of vapor phase; vapor deposition

0 引言

丝电爆方法在超细粉制备和表面喷涂上有着广泛用途, 尤其用于表面喷涂具有独特的优点^[1,2]。电爆喷涂过程对基体材料的热影响很小, 可获得基体结合好且致密的涂层, 特别适于高熔点材料的喷涂。

丝电爆喷涂的试验研究表明, 根据电爆金属丝上沉积的能量密度的不同, 可获得两种类型的涂层: 当能量密度较低时, 金属丝熔化后的熔滴喷射到基体上形成液相喷涂层; 能量密度较高时, 金属

丝气化后的蒸气沉积在基体上形成气相沉积层^[3]。许多的电爆喷涂研究获得的涂层, 主要以液相喷涂层为主^[1]。从喷涂过程的本质来看, 金属丝在电爆过程所形成的产物, 也就是在形成涂层前的物相状态, 决定了涂层性质。认识电爆过程中产物的性质与输入到金属丝上的能量的关系, 对有效控制电爆工艺中涂层的质量, 有着直接的实用价值。

传统的电爆过程产物形成机制认为, 金属丝中流过大电流, 靠电阻热加热直到熔化或气化, 随后快速膨胀发生气体放电。根据施加在金属丝上能量的大小, 金属丝可形成气相或液相。但是丝电爆试验发现, 如果把丝电爆过程看作是平衡过程, 有些

收稿日期: 2010-02-25; 修回日期: 2010-03-24

基金项目: *国家自然科学基金项目资助 (50775105)

作者简介: 朱亮(1964—), 男(汉), 甘肃高台人, 教授, 博士。

实验数据无法解释。进而认为当金属丝获得高密度能量时,会发生非平衡过程^[4]。这就意味着金属丝在电爆过程中会以不同能量状态物质形态同时存在,施加在金属丝上的能量要以不同的方式耗散。也就是说,金属爆炸产物中,气相和液相成分会同时出现,金属丝上沉积能量的不同会使爆炸产物中气相液相成分所占的比例发生变化。

文中通过改变电爆过程工艺参数,获得不同输入能量的丝电爆过程。利用探针收集丝电爆过程中的产物,分析丝电爆过程中金属丝上沉积的能量密度和电爆产物性质的关系。

1 试验方法

利用丝段式电爆装置来进行电爆试验,如图1所示。单相交流电通过变压器升压,经整流后向储能电容器充电,在上下电极建立起高压电场。金属丝通过上电极小孔,竖直落入两电极之间,金属丝的两端与上下电极发生气体放电,将储能电容器上的电能施加在金属丝上,使金属丝发生爆炸。金属丝爆炸后的产物以圆柱状向外膨胀,由陶瓷探针收集不同位置处的爆炸产物。

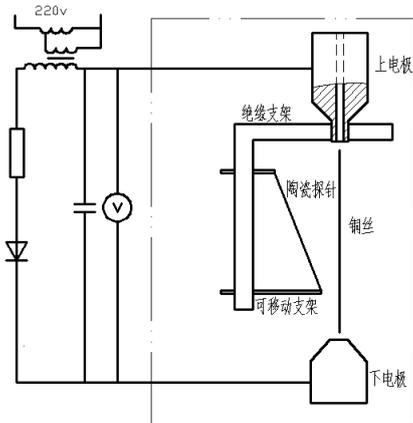


图1 试验装置图

Fig.1 The experimental setup

为了在一次试验中探测到离爆炸中心不同距离上的爆炸产物,将陶瓷探针倾斜的放置在两个可移动水平支架上。下支架离爆炸中心的距离设为2 mm,上支架距爆炸中心距离设置为50 mm,这样可以收集探测到距爆炸中心2~50 mm范围内的爆炸产物的连续变化。通过扫描电镜(SEM)来观察不同距离上探针收集到的产物来确定爆炸产物相态变化。

用作喷涂材料的金属丝段为紫铜,直径分别为

0.2 mm和0.3 mm,其长度由电极间距确定。上下电极间距为75 mm。根据以前的试验研究,放电气隙为5 mm时,金属丝段电爆完全且过程稳定^[5],则金属丝段长度为70 mm。使用的储能电容的电容量C为8.88 μF ,初始充电电压U分别为7 kV、8 kV、9 kV。

2 电爆过程中产物性质

将收集到电爆产物的探针,在扫描电镜(SEM)下沿探针的长度方向观察,发现所收集到的电爆产物的形态逐渐发生变化。其形态特征反映探针所在位置处电爆瞬时产物的性质。探针长度方向上收集产物的形态特征及其变化,在不同电爆参数下有着明显的差异。可以归纳为两类。

一类是当铜丝直径为0.2 mm,电容的初始充电电压高于7 kV,或铜丝直径0.3 mm,电压高于8 kV时,探针上收集到的电爆产物主要表现出的特征。随着探针离电爆中心距离增大,陶瓷探针上的爆炸产物有以下3种情况:①在离爆炸中心距离足够小时,涂层表面致密平整,有明显的气相沉积纹路,见图2(a)。这种涂层是高温的气相喷涂材料直接沉积在陶瓷探针的表面得到的涂层,可称为气相沉积涂层。②当陶瓷探针离爆炸中心的距离逐渐增大一定程度时,所收集到的电爆产物的涂层不再有气相沉积层的特征;而是微小的颗粒堆积在陶瓷探针表面,且涂层表面总体上较均匀,如图2(b)所示。可以认为,在这种涂层的形成过程中,部分的气相产物已凝固成小颗粒,然后吸附到探针上形成涂层。当然,在这个过程中有一部分气相产物直接沉积在探针和已形成的固体小颗粒上。③当探针离爆炸中心的距离较远时,爆炸产物已无法在探针上形成致密的涂层,呈现出近似球形大固体颗粒,而每个大颗粒又有许多小颗粒堆积而成,见图2(c)。显然,探针上形成这种形态电爆产物的收集物,是由气相产物在膨胀过程中凝结成固体颗粒,随后又发生团簇附着在探针表面。

另一类探针上收集产物,多见于输入到单位体积金属丝的能量较低的情况下,如铜丝直径为0.3 mm,电容的初始充电电压为7 kV时,其形态如图2(d)所示。可以看出,探针收集物的底层具有气相沉积涂层的特征,在表面分布着熔融金属粒子溅射状图案,或表面圆滑的颗粒。尺寸大概在几微米到几十微米之间。可以推断,这种形态的电爆产物的收集

物,应该为金属丝爆炸后形成的熔融金属滴喷溅到探针表面形成的。观察发现,爆炸产物中这种熔融金属滴类型的收集物,随着电容初始充电电压的升高而减少。如果在电爆喷涂中得到较完全的气相沉积层,应提高输入金属丝上的能量,以减少电爆产物中熔融金属滴的份额。在膨胀过程中,部分气相爆炸产物凝结成小颗粒,随着离爆炸中心距离的增大,更多的气相成分凝结成固相颗粒。所以,随着

离爆炸中心距离的增大,探针上得到的涂层也由气相沉积层转变为固态颗粒堆积层。

因此,如果要得到良好气相沉积涂层,基体表面必须处在气相爆炸产物膨胀的范围内。一旦超出这个范围,气相成分凝结成固体颗粒,与基体很难形成良好的结合。

气相爆炸产物能够膨胀的距离,可以通过输入到金属丝上的能量加以控制。图 3 给出了爆炸产物

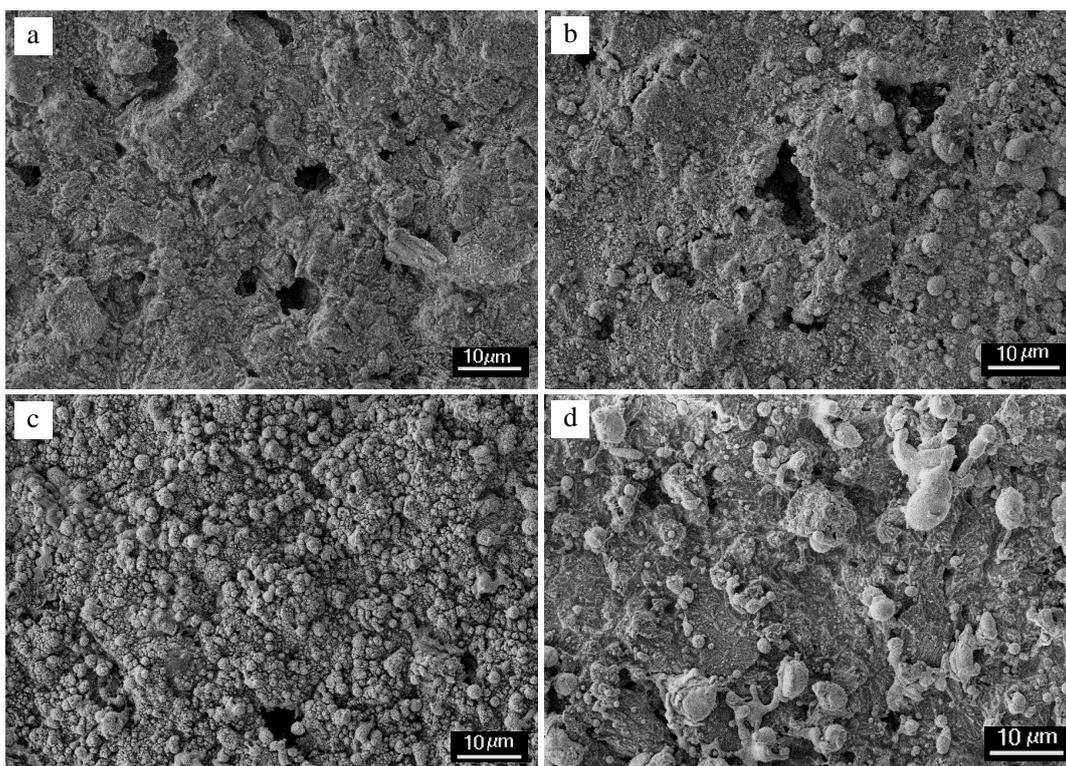
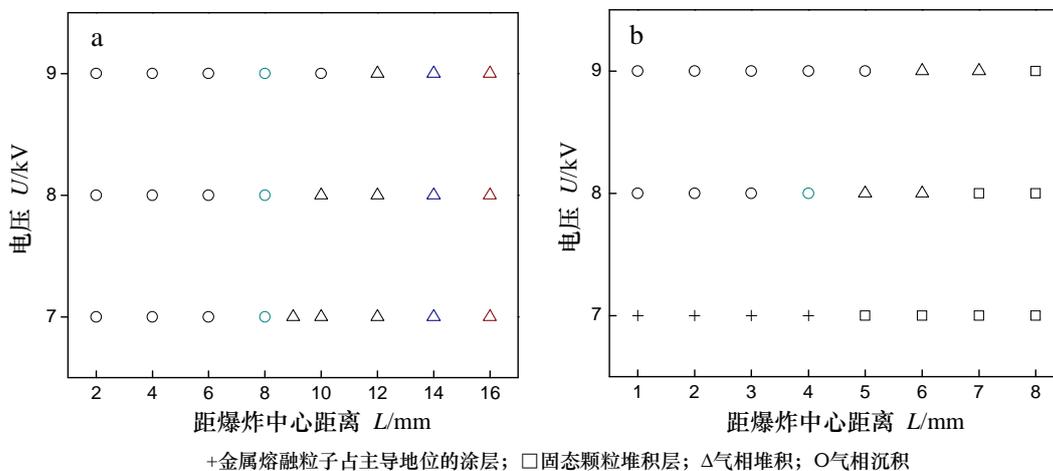


图 2 爆炸产物 SEM 照片

Fig.2 SEM images of explosion products



(a) 直径为 0.2mm 的铜丝产物相态变化

(b) 直径为 0.3mm 的铜丝产物相态变化

图 3 产物性质与电极电压和距爆炸中心距离的关系

Fig.3 Correlations among coating feature and the electrode voltages, and spraying distance

在距爆炸中心不同距离上的相态变化试验结果。对于 0.2 mm 丝径,当电容初始充电电压分别为 7 kV、8 kV 和 9 kV 时,气相膨胀的最远距离分别为 8 mm、9 mm 和 10 mm;而对于 0.3 mm 的丝径,则分别为 0 mm、4 mm 和 5 mm。可见,丝径的减小,初始充电电压的提高,都增加了输入到金属丝上的能量,使得气相膨胀的距离增加。

3 能量密度与爆炸产物的关系

在电爆过程的放电回路参数一定的情况下,金属丝段上的能量密度主要取决于储能电容器中的能量,即 $CV^2/2$,其中 C 为储能电容器容量, V 为初始充电电压。增加 V ,可显著提高放电过程的输入能量到金属丝上的能量。但要估算出沉积到金属丝上的能量,必须要考虑放电回路的电参数的影响。根据 Kvarzhkava 提出的电爆过程中金属丝上沉积的能量的估算公式^[6]:

$$W = V\Delta Q - \frac{(\Delta Q)^2}{2C} - \frac{Li^2}{2} - \int i^2 R_c dt \quad (1)$$

其中 $\Delta Q = \int idt$, i 是电爆回路电流,在电爆过程中随时间而变化,可有电流传感器实时测得^[7]。 R_c 为电路中的总电阻减去金属丝上的电阻,实测值为 $5.9 \times 10^{-3} \Omega$ 。 L 为回路中的电感,实测值为 $3.8 \mu H$ 。这样就可以估算出沉积到金属丝上的能量。如果将 W 除以金属丝的体积,可得到金属丝单位体积上所沉积的能量,即能量密度 W_v 。

表 1 不同的电压和丝径对应的能量密度

Table 1 Values of energy density calculated by voltage and diameter of wire

电压 /V	丝径 /mm	能量密度 /(J/mm ³)
7	0.2	113
	0.3	43
8	0.2	124
	0.3	67
9	0.2	158
	0.3	93

前面的分析可知,电爆产物中存在液相气相两种类型的成分。电爆工艺参数的改变,会影响其份额的变化。通过扫描电镜分析收集在探针上的物相的形态,并统计液相成分的份额。同时,

利用记录的电爆过程中放电回路的电流波形,以及相关的工艺参数,通过方程(1)可估算出对应的能量密度。表 1 详细列出了不同电压和不同丝径下金属丝上沉积的能量密度。这样可得到能量密度和电爆产物中液相成分所占份额的关系,如图 4 中的实线所示,其中每个数据点是若干实测值的平均值。

可以看出,减小金属丝直径,提高储能电容的初始充电电压,都会不同程度地提高电爆过程的能量密度,进而使电爆产物中液相成分所占份额减少,但其变化规律不是线性的。当能量密度小于一定值时,液相份额随能量密度的增加快速下降。当能量密度大于约 80 J/mm^3 时,爆炸产物液相成分份额小于 10%。继续增加能量密度,液相成分的减少变得缓慢。当能量密度为 158 J/mm^3 时,爆炸产物中液相成分所占比例仍为 5%。而铜的气化能只有 47.8 J/mm^3 ^[8]。也就是说,能量密度为 3 倍的气化能时,仍存在 5% 的液相成分。这就进一步说明,金属丝电爆过程偏离平衡状态,属于一个非平衡过程。

电爆产物中气相成分,在凝结成固体颗粒前所能膨胀的距离,对于确定能够获得气相沉积层的喷涂距离至关重要。同样,利用前面的试验结果,可得到能量密度与电爆产物中气相成分膨胀距离的关系,如图 4 中虚线所示。气相膨胀距离随能量密度的增加逐渐增大。当能量密度为 158 J/mm^3 时,气相的膨胀距离可达 9.5 mm。

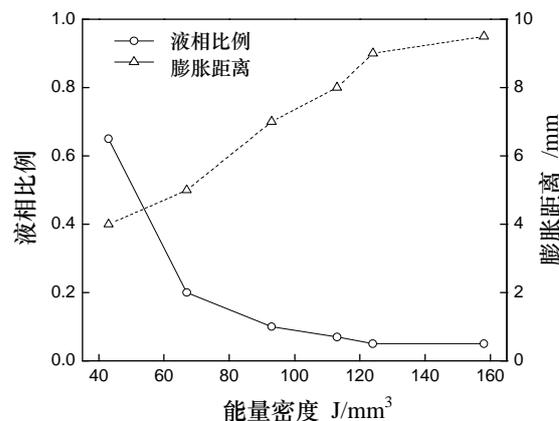


图 4 能量密度与爆炸产物中液相成分所占比例及气相膨胀距离的关系

Fig.4 Correlations among the energy density and the proportion of liquid and expanding distance of vapor phase

4 结 论

(1) 利用探针收集电爆产物并进行显微分析,可确定最初电爆产物中含有液相和气相两种类型的相态。提高能量密度可减少产物中液相成分所占比例。当能量密度为 2~3 倍的气化能时,其液相成分的份额约为 10%~5%。

(2) 电爆产物中的气相成分,膨胀一定距离后凝结成固态颗粒。当基体处在气相产物未凝固的膨胀距离内,可得到气相沉积层。气相膨胀距离随能量密度的增加逐渐增大。当能量密度为 158 J/mm³ 时,气相的膨胀距离可达 9.5 mm。

参考文献:

- [1] 朱 亮, 张周伍. 电爆技术用于超细粉制备和表面喷涂的研究进展 [J]. 材料导报, 2005, 19 (12): 76-79.
- [2] 杨家志, 刘钟阳. 电爆喷涂技术在材料表面制备涂层的研究进展 [J]. 材料导报, 2008, 22(2): 83-89.
- [3] 朱 亮, 杨 奇, 毕学松. 电爆喷涂中过程参数与涂层性质的关系 [J]. 高电压技, 2009, 35 (9): 2232-2237.
- [4] Kwon Y S, Ilyin A P, Tikhonov D V. Mechanism of metal destruction and formation of particles in electrical explosion of wires Science and Technology [C]. The 7th Korea-Russia International Symposium on plasma, KORUS, 2003, (1): 217-220.
- [5] 朱 亮, 罗仁昆, 毕学松. 高压电场中金属丝段的电爆现象 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (10): 77-80.
- [6] Kvartzhava I F, Bondarenko V V, Plutto A P, et al. Oscillographic determination of the energy of electrical explosion of conductors [J]. Zh. Eksper. Teor. Fiz, 1956, 31 (5): 745-751.
- [7] 毕学松, 朱 亮. 金属丝段电爆过程电压电流测量 [J]. 电测与仪表, 2009, 46 (4): 10-13.
- [8] Kotov Yu A. Electric explosion of wires as a method for preparation of nanopowders [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2003, 5: 539-550.
- [9] Lugscheider E, Weber T, Knepper M, et al. Production of biocompatible coatings by atmospheric plasma spraying [J]. Materials Science and Engineering: A. 1991, (139): 45-48.
- [10] Gross K A, Berndt C C. Reviews in mineralogy and geochemistry [M]. Washington, D C, USA. Mineralogical Society of America, 2002.
- [11] Cao Y, Lu W, Zhang B, et al. Radiological and histological examination of gap healing on plasma sprayed HA coating surface [J]. Key Engineering Materials. 2004, (254-256): 757-760.
- [12] Zheng X B, Shi J M, Liu X Y, et al. Developments of plasma-sprayed biomedical coatings [J]. Journal of Ceramic Processing Research 2001, 2(4): 174-179.
- [13] 徐淑华, 王迎军, 罗承萍. 生物羟基磷灰石涂层材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2002, (01):48-50.
- [14] 曹 宁, 李木森, 李和胜. 等离子喷涂 HA 涂层的制备工艺优化与表征研究进展 [J]. 材料工程, 2009, (02): 79-84.
- [15] Zhao L D, Bobzin K, Ernst F, et al. Study on the influence of plasma spray processes and spray parameters on the structure and crystallinity of hydroxylapatite coatings [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2006, 37(6): 516-520.
- [16] Lugscheider E, Bobzin K, Zhao L D, et al. Assessment of the microplasma spraying process for coating application [J]. Advanced Engineering Materials, 2006, 8(7): 635-639.
- [17] 贺定勇, 孙旭峰, 赵力东. 微束等离子喷涂羟基磷灰石涂层 [J]. 无机材料学报, 2007, 22(4): 754-758.
- [18] 贺定勇, 赵秋颖, 赵力东, 等. 微束等离子喷涂工艺参数对羟基磷灰石涂层结构和结晶度的影响 [J]. 材料研究学报, 2007, 21(6): 659-663.
- [19] Sun L M, Berndt C C, Grey C P. Phase, structural and microstructural investigations of plasma sprayed hydroxyapatite coatings [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 360: 70-84.

作者地址: 兰州理工大学材料科学与工程学院 730050
Tel: (0931) 2808 168
E-mail: rauly921@163.com (朱锦)

作者地址: 北京市朝阳区平乐园 100 号 100124
Tel: (010) 6739 2168
E-mail: zhaoqiuying@emails.bjut.edu.cn