

文章编号: 1001-1455(2001)01-0017-04

电爆炸高速喷涂新技术研究

刘宗德¹, 安江英¹, 杨 昆¹, 韩铭宝², 陆 辛³

(1. 华北电力大学动能系, 北京 102206; 2. 北京大学力学与工程科学系, 北京 100871;
3. 北京机电研究所, 北京 100083)

摘要: 利用电爆炸方法, 研制了高速喷涂金属涂层的装置。提出了脉冲加热电流的简化计算公式, 并将理论值和实测结果进行了比较。以 1Cr18Ni9Ti 钢为喷涂原料进行了高速喷涂实验。实验表明, 涂层的平均晶粒直径小于 10⁴nm。当电容器初始电压高于某一值时, 涂层与基体结合面处形成了比涂层晶粒尺寸更为细小的过渡层。涂层的硬度值与喷涂前的原始硬度值相比显著提高。

关键词: 电爆炸; 冲击加热; 快速凝固; 高速喷涂

中图分类号: O347.51; TF124 文献标识码: A

1 引言

传统的喷涂技术为火焰喷涂或电弧喷涂, 即将熔化的金属粒子高速喷向基体表面, 在被喷射的表面上, 粒子被碰撞、快速冷却并与基体材料表面紧密结合。涂层的强度及涂层与基体的结合强度随粒子的喷射速度提高而显著提高。目前国外超音速喷涂的极限速度约为 1500m/s^[1], 在此喷涂速度下, 涂层与基体的结合强度仍大大低于基体材料的强度。

在电爆炸技术的应用领域, 虽然早在几十年前就有人研究了电爆炸金属丝的行为, 但对电爆炸的机制至今还未完全认识清楚。当今, 国内外主要研究利用电爆炸法制备超细微粉的新技术^[2]。即在一定的气体介质下通过对金属导体瞬间施加直流高压, 在原料丝内部形成 10⁶ ~ 10⁷A/cm² 的电流密度, 使爆炸获得直径为几十至几百纳米的粒子。作者尚未见到利用电爆炸技术进行表面喷涂的文献。

利用电爆炸法, 我们研制了电爆炸高速喷涂金属涂层装置。利用该技术, 可使高温金属粒子或蒸气以极高的速度直接喷涂到基体材料表面, 金属粒子或蒸气在基体表面上急剧冷却而形成具有优良力学性能的涂层。

2 实验描述

电爆炸高速喷涂系统主要由高压直流电源、储能电容器组、三电极开关、电爆炸喷涂室组成。所需喷涂的材料被制成箔后置于喷涂室内, 金属箔与 RLC 电路串联。放电电容器组的容量为 1200 μ F, 电容器的最高充电电压为 7kV, 最大储能达 29.4kJ。当三电极开关闭合时, 电容器放电在电路中产生大电流, 金属箔在几十微秒至几毫秒内被加热到汽化温度。汽化金属从喷射腔迅速喷射至金属材料表面而快速冷却。涂层的结合强度随喷射速度的提高而提高。

根据图 1 所示的电路, 并假设在对金属箔加热期间回路总电阻 R 不变, 则有

$$L\ddot{I} + RI + I/C = 0, \quad LC\dot{V} + RCV + V = 0 \quad (1)$$

式中: L 为回路的自感系数, C 为电容器组的总电容, V 为电容器电压, I 为回路电流。且 $dI/dt = I$,

* 收稿日期: 2000-06-01; 修回日期: 2000-09-05
基金项目: 国家自然科学基金项目(19702003)
作者简介: 刘宗德(1963—), 男, 博士, 教授。

$dV/dt=V$ 。回路的初始条件为 $V(0)=V_0, I(0)=0$ 。由方程(1)得电压和电流解

$$V(t) = V_0 \sqrt{1 + (\alpha/\omega)^2} \cos(\varphi) \exp(-\alpha t)$$

$$I(t) = CV_0 \omega [1 + (\alpha/\omega)^2] \exp(-\alpha t) \sin(\varphi)$$

式中: $\alpha=R/(2L)$, $\omega=1/\sqrt{LC}$ 。由于对金属箔片的加热时间很短(几百微秒),故忽略加热期间金属箔的热量损失^[3],从而求得金属箔的温升率 T 和温度 T

$$T = \frac{I^2 R_f}{C_0 \rho S l}, \quad T(t) = \int_0^t \frac{I^2 R_f}{C_0 \rho S l} dt + T_0 \quad (2)$$

式中: R_f, C_0 分别代表金属喷涂箔材料的电阻和比热, ρ, S 和 l 分别表示喷涂箔材料的密度、横截面积和有效长度, T_0 表示加热前喷涂箔的初始绝对温度。材料的比热将随温度升高而改变,可由下式近似表达^[4]

$$C_0 = 4.1868(A + BT)/W \quad (3)$$

式中: W 为摩尔质量, A, B 为材料常数。

实验中,选用了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢作为喷涂材料,厚度为 20mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板为基体材料。1Cr18Ni9Ti 钢箔的横截面积为 0.2mm^2 ($0.2\text{mm} \times 1\text{mm}$)。在 4.2kV 的初始电压下,测量与计算的回路电流衰减曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出,在前两个半波内,计算结果与实测结果十分接近。当放电时间大于约 0.4ms 时,实测电流趋近于零,而计算电流仍较大,这说明对金属箔的加热时间约为 0.4ms,当金属箔汽化后,电路断开,电流迅速衰减至零。

1Cr18Ni9Ti 钢箔的温升率和温度随时间变化的计算结果分别如图 3 和图 4 所示。从图中可以看出,温升率为随时间不断衰减的半波,在 $0 < t < 0.3\text{ms}$ 的时段内,金属箔的平均温升率可达 $4.310^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

当金属箔的温度达到其汽化温度时,被加热的金属箔在喷腔内发生电爆炸^[5]。金属气体以极高速碰撞所需涂靶的表面。关于金属蒸气喷射速度的计算方法,所见文献甚少,作者将在下一阶段的工作中进行探讨。

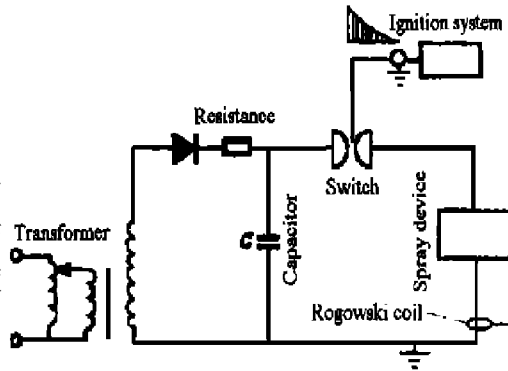


图 1 喷涂装置原理图

Fig.1 Schematics of spray system

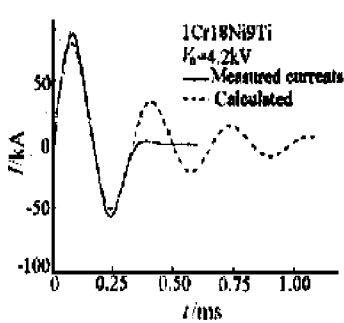


图 2 回路电流随时间的衰减
Fig.2 Current delay

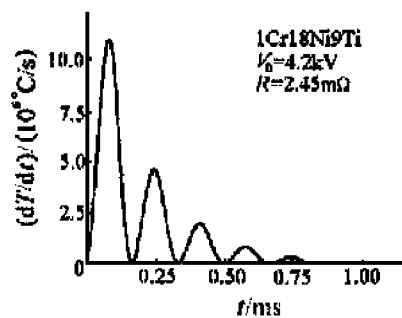


图 3 钢箔温升率随时间的变化
Fig.3 Foil temperature change vs. time

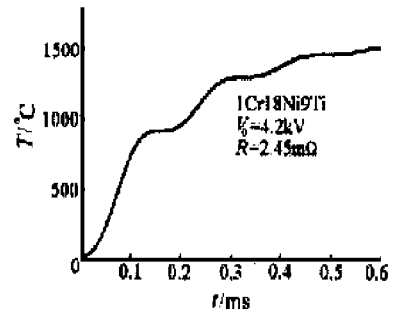


图 4 钢箔温度随时间的变化
Fig.4 Foil temperature vs. time

3 实验结果与讨论

实验中,选取了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢作为喷涂材料,基体材料亦为 1Cr18Ni9Ti 钢,其厚度为 20mm。实验后,检测了涂层及基体材料的显微硬度、金相组织。实际上,测得喷涂箔的维氏硬度为 $H_V=198$,基体材料的维氏硬度为 $H_V=203$ 。实验发现,涂层的厚度主要取决于爆炸箔的质量。当电容器的充电电压高于 3kV 时,所得涂层厚度十分稳定,且分布均匀。在低于 3kV 的充电电压下,涂层的厚度分布不均匀,局部区域出现较大的熔滴型凝固物(这说明爆炸箔并未完全汽化就被喷射到基体表面)。

图 5 反映了涂层显微硬度随深度的变化。由图 5 可以看出,涂层的硬度明显高于基体材料的硬度,靠近涂层表面处的硬度最高,基体表面的热影响区的硬度变化较小,仅略有增加。为了了解涂层与基体材料结合是否牢固,检测了涂层与基体结合面处的显微硬度。对同一试样,沿结合面长度方向在 6mm 范围内测量了 3 个点的显微硬度。不同充电电压下所得涂层与基体结合面处的显微硬度见表 1。

表 1 1Cr18Ni9Ti 钢涂层与基体结合面处的显微硬度
Table 1 Micro-hardness of the interface between 1Cr18Ni9Ti steel coat and base metal

V_0/kV	显微硬度 H_v		
2.5	152	180	170
3.0	183	209	201
3.5	205	208	210
4.0	225	219	235
4.2	216	220	228

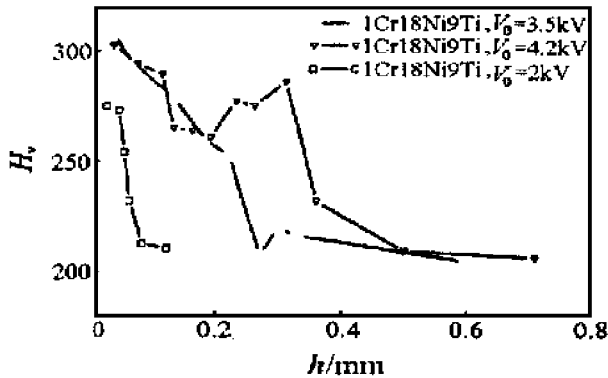


图 5 涂层显微硬度随深度的变化
Fig.5 Coat micro-hardness vs. depth

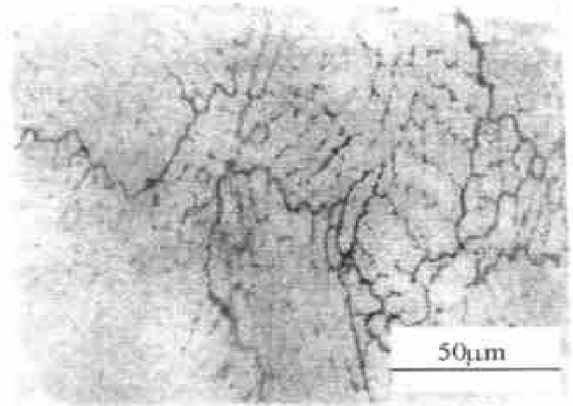


图 6 1Cr18Ni9Ti 涂层的显微组织
Fig.6 Metallograph of 1Cr18Ni9Ti coat

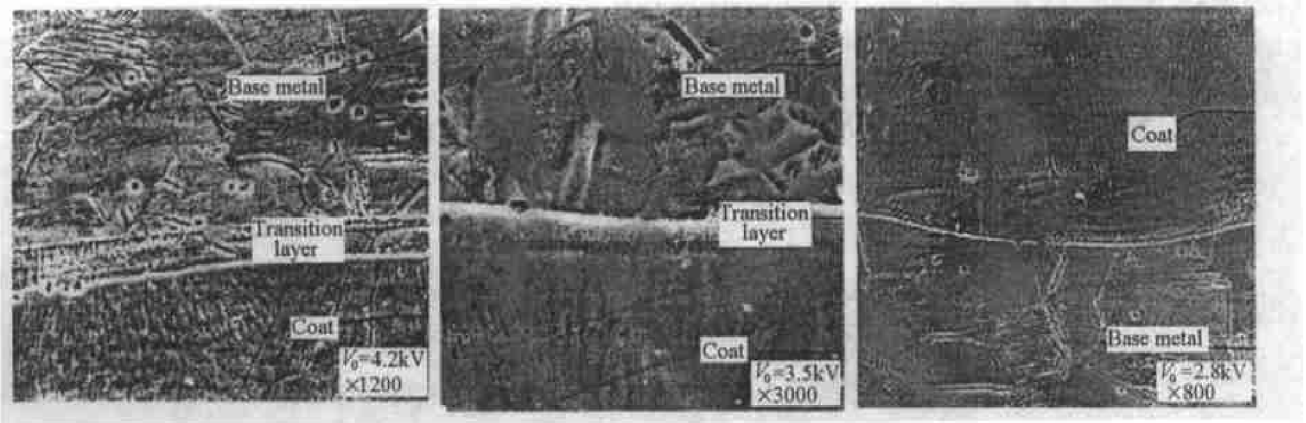


图 7 涂层与基体结合面处的显微组织
Fig.7 Metallograph of coat and base metal

涂层与基体的结合大致有机械结合、物理结合和化学键结合等三种方式,其结合过程十分复杂,大致可分为三个阶段:(1)喷涂熔滴或蒸气与基体的结合阶段(物理接触);(2)粒子与基体活化面相互作用阶段;(3)涂层与基体表面之间界面上相互作用的体积扩展阶段。

涂层与基体的结合强度主要取决于喷射粒子或蒸气的速度。涂层与基体结合面处物理、化学和力学特性十分复杂,可能同时存在物理连接与化学连接等方式。喷涂的动力学过程还有待于进一步研究。

1Cr18Ni9Ti 不锈钢涂层的金相显微组织如图 6 所示。金相分析表明,在 4.2kV 的电容器充电电压下,涂层的平均晶粒直径约为 $7.5\mu m$,约为喷涂前原始材料平均晶粒尺寸的 $2/7$ (喷涂前涂层材料的平均晶粒直径约为 $26\mu m$),可见涂层的晶粒大大得到细化。图 7 分别为 $V_0=4.2、3.5、2.8kV$ 时所得涂层与基体结合面交界区域的扫描电镜照片。从图中可发现,当 $V_0=4.2、3.5kV$ 时,在涂层与基体结合面处有一厚度较均匀、晶粒尺寸小于涂层晶粒尺寸的过渡带。这说明在高速喷涂的过程中,基体表面薄层由于受喷涂气体的快速加热而熔化,尔后由于热传导而迅速冷却,形成不同于基体材料显微组织的快冷层。

过渡层的作用是将涂层与基体材料牢牢地“焊接”在一起。而当 $V_0=2.8\text{kV}$ 时, 由于能量不够, 涂层与基体结合面未形成过渡层而出现空隙。

4 结 论

(1) 所研制的电爆炸高速喷涂装置能使高温金属气体在极短时间内喷涂到基体表面。

(2) 由于电爆炸所得涂层的冷却速率极高, 其硬度值显著高于常规喷涂技术所得值。涂层与基体材料的结合面处有一厚度均匀的过渡带, 它是由于基体材料快速熔凝而形成的。过渡带可将涂层与基体牢固地焊接在一起, 从而显著提高涂层与基体的结合强度。

(3) 1Cr18Ni9Ti 钢涂层组织细密, 平均晶粒尺寸约为 $7.5\mu\text{m}$, 约为原来平均晶粒尺寸的 $2/7$ 。

(4) 电爆炸高速喷涂技术具有喷涂速度快(远高于常规的超音速喷涂技术所达到的速度)、涂层凝固速率高、成本低廉及喷涂质量稳定等优点, 值得被进一步研究。

王仁院士为本项研究提供了许多有意义的指导, 深表感谢。

参考文献:

- [1] 徐滨士, 梁秀兵, 马世宁. 新型高速喷涂枪的开发研究[J]. 中国表面工程, 1998, 40(3): 16—19.
- [2] 王群, 杨海滨, 鲍海飞, 等. 电爆炸一步法制备 Cu-Zn 合金超细微粉[J]. 金属学报, 1999, 35(12): 1271—1273.
- [3] Gourdin W H, Weinland S L, Boling R M. Development of the Electromagnetically Launched Expanding Ring as a High Strain-rate Test Technique [J]. Rev Sci Instrum, 1989, 60(3): 427—432.
- [4] 刘江龙. 高能束热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [5] 刘宗德, 丰树平, 张宁, 等. 冲击大电流高加热率实验装置研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(4): 315—321.

Studies on Rapid Spraying by Electrical Explosion Method

LIU Zong-de¹, An Jiang-ying, YANG Kun¹, HAN Ming-bao², LU Xin³

(1. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Department of Mechanics, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Beijing Electromechanical Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: By electrical explosion method, a new device developed was used to spray gasified metal with a very high speed on base metal surface. Simplified equations were derived to estimate pulse heating currents. Calculated and measured currents were compared. Tested alloy was 1Cr18Ni9Ti stainless steel. Average coat grain diameter was refined from $26\mu\text{m}$ to less than $10\mu\text{m}$. When initial capacitor voltage was higher than certain levels, a transition layer of rapid solidification between coat and base metal appeared whose crystal sizes were much smaller than that of coat. The hardness values of coats were much higher than that of the original.

Key words: electric explosive; impulse heating; rapid solidification; high speed spraying