

文章编号: 1007-4627(2005)01-0118-04

纳秒强流脉冲电子束强化金属表面的研究*

刘志坚, 乐小云, 江兴流

(北京航空航天大学理学院, 北京 100083)

摘要: 利用多极板溅火花放电装置产生的高功率脉冲电子束对不同类型的钢, 如 45[#], 65Mn, T8, 9Cr18 和 GCr15 等进行轰击, 研究其在金属材料表面改性中的应用. 样品表面的显微硬度和耐腐蚀性测试结果以及扫描电子显微镜(SEM)的观察分析表明, 经电子束轰击后, 这些材料在结构、组织和性能上发生了明显的变化, 轰击中心区域的显微硬度和耐蚀性明显提高. 基于一维热传导方程对材料表面的冷却速率进行了估算, 对电子束与金属材料的作用过程进行了理论分析. 结果表明, 高功率密度脉冲电子束与金属材料相互作用, 表面冷却速率高达 $1.2 \times 10^{12} \text{ }^\circ\text{C/s}$, 使材料表面局部瞬间达到熔化, 产生骤热急冷过程.

关键词: 溅火花; 脉冲电子束; 表面改性

中图分类号: TL99 **文献标识码:** A

1 引言

对金属材料性能的改善主要取决于晶粒度的大小, 而晶粒度的大小主要取决于加温时间和冷却速率. 加热时间越短, 冷却速度越快, 晶粒度越小, 金属材料的表面性能越好. 传统的工艺方法都是加温时间长, 冷却速度慢. 近代脉冲电子束的迅猛发展, 把它应用于金属热处理, 可称作是热处理工艺上的一个重大变革, 它克服了传统工艺上的弊端, 其作用机理与激光技术基本相似, 而且比激光热处理有更多的优越性: (1) 处理的样品变形小, 对精密微处理非常有益; (2) 电子束的能量转换效率比激光高; (3) 不受材料对光反射性的影响; (4) 电子束处理的深度可以通过改变电压调节. 因此, 很多激光热处理工艺可能被电子束热处理所代替. 短脉冲粒子束发生设备——低气压溅火花放电室^[1, 2], 可以产生束流密度约为 10^6 A/cm^2 , 功率密度约为 10^9 W/cm^2 的高重复率的脉冲电子束, 而且脉冲时间短. 本文研究了利用多极板溅火花放电装置产生的强流脉冲电子束对不同类型的钢, 如 45[#], 65Mn, T8, GCr15 和 9Cr18 等进行了轰击, 研究其在金属

材料表面改性中应用.

2 试验

利用多极板溅火花放电装置产生的强流 ns 脉冲电子束轰击金属表面. 脉冲电子束的能量 20—60 keV, 脉冲次数 1—1 000 次, 脉冲频率 1—2 Hz, 保护气体为氮气, 室内真空度 10 Pa. 多极板放电室是溅火花放电装置的主要部分, 它由一系列具有中心孔的圆形金属极板和环形绝缘片粘结而成. 实验材料采用各种类型的钢, 如 45[#], 65Mn, T8, 9Cr18 和 GCr15 等, 加工成 $\phi 15 \text{ mm}$, 厚度 1—3 mm 的圆片, 表面抛光. 轰击后的样品用 S-530 型扫描电镜和 XJB-1 型金相显微镜观察样品表面形貌, 使用 HV-5 型维氏硬度计测试样品的显微硬度.

3 结果与讨论

图 1 给出了 45[#] 钢在外加电压 44 kV, 脉冲数 30 次的单点轰击下的扫描电镜图. 用高倍扫描电镜观察, 发现在电子轰击区, 显微形貌发生了巨大变化, 呈现出非常粗糙的急冷组织结构. 轰击中心

收稿日期: 2004 - 08 - 31

* 基金项目: 航空科学基金资助项目(00G51004)

作者简介: 刘志坚(1974 -), 男(汉族), 辽宁本溪人, 博士研究生, 从事强脉冲粒子束与物质的相互研究;

E-mail: lzj927@sina.com

区的形貌出现了微孔、微裂纹、泡状组织和蜂窝状组织(见图 1(a)), 原来基体的平衡结构, 铁素体和珠光体已无法看到, 晶粒明显细化, 看不到晶界的存在, 基本呈无序的状态, 有明显熔融流动的痕迹. 图 1(b)给出了中心区与基体之间的过渡区域,

过渡区也呈现出熔后重新凝结的痕迹, 但是不同于中心区, 而且存在中心区与基体两种结构. 质火花脉冲电子束的能量密度很高, 但并不均匀, 目前认为是高斯分布^[3], 因此就出现了过渡区域与中心区形貌的差别.

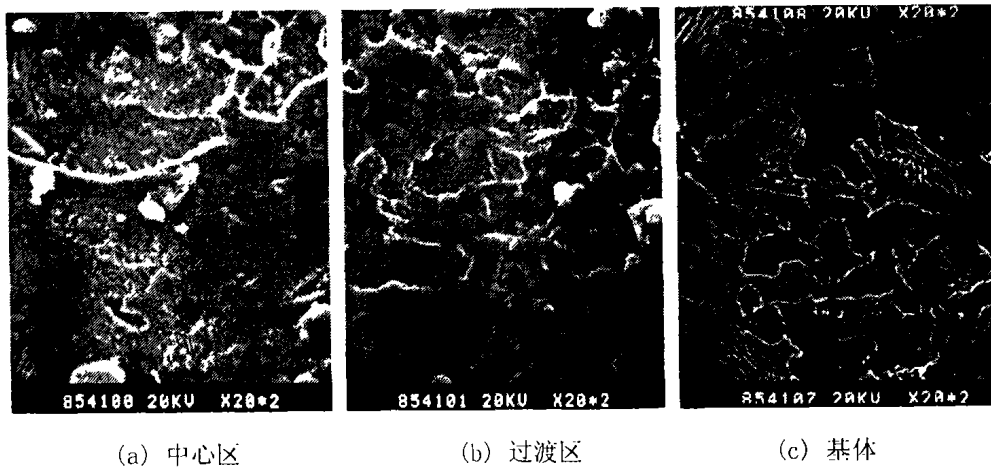


图 1 45#钢轰击区的扫描电镜图(放大 2 000 倍)



图 2 45#钢轰击区腐蚀后的金相图(放大 1 000 倍)

轰击后的样品先用酒精清洗, 然后用 20% 的硝酸腐蚀, 在金相显微镜下观察样品表面形貌(见图 2), 发现轰击中心区及周围一个圆环难以被腐蚀. 由此可见, 这些急冷组织具有较好的耐蚀性.

为了验证 ns 强流脉冲电子束对金属材料表面改型的普适性, 分别以不同的电压和脉冲数轰击了 45#, 65Mn, T8, 9Cr18 和 GCr15 等各种类型的钢. 在扫描电镜下观察, 都出现了与 45#钢类似的试验结果, 即轰击中心区显微形貌与基底有明显区别.

样品表面形貌的变化必然改变金属表面的宏观性能, 为此, 我们测量了几种不同类型的钢经电子束轰击后的显微硬度. 图 3 给出了电子轰击后各种材料的显微硬度变化曲线(载荷 10 g), n 为脉冲

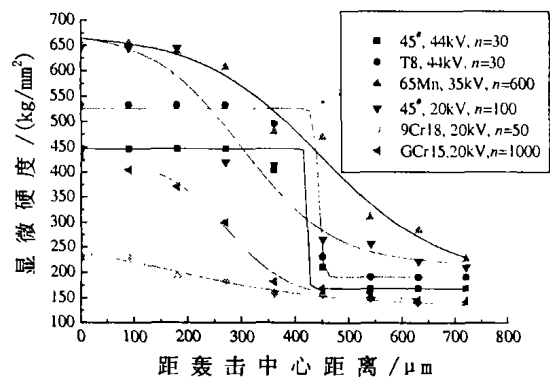


图 3 电子注入后各种型号钢的显微硬度变化曲线

数. 从图 3 可见, 经电子束轰击后, 几种材料的硬度都有不同程度的提高(1.8—2.9 倍), 尤其是 65Mn 的硬度变化最显著, 提高了约 2.9 倍. 另外还发现在高电压下, 显微硬度提高的有效区域大. 通常硬度提高耐磨性能也增强. 可见质火花脉冲电子束用于强化金属表面是有效的.

实验结果表明, 质火花脉冲电子束轰击金属表面可以细化晶粒, 改变样品表面的形貌, 提高显微硬度和耐蚀性, 开辟了金属材料表面改性的新途径. 如果样品通过旋转马达带动, 在适当的外加电压和脉冲数下, 可以实现样品的大面积处理, 实现工业化应用.

4 理论分析

电子束轰击材料表面时,电子必然进入材料,与材料中的电子或晶格发生作用.根据碰撞过程的一般考虑,这种作用不会直接对质量为 M 的晶格原子发生,而是对游离于晶格间的电子先发生能量交换,原因是晶格原子的质量远大于电子的质量,能量的转换是相当小的.高能电子与晶格中的自由电子发生碰撞,会导致较高的振动能,产生大量声子,而后来的电子被声子散射,温度会更高,从而就产生更多的声子,散射也就愈加频繁^[4],这样就会使高能电子的能量很快传递给整个晶格,晶格的振动必然加强,这就意味着材料的温度很快上升.多极板膺火花放电室产生的电子束流密度约为 10^6 A/cm²,若在放电室上加 44 kV 的高压,则电子束功率密度 $F_0 = 4.4 \times 10^{10}$ W/cm².如此高功率密度的脉冲电子束作用于样品表面的小区域,使材料表面温度急剧升高,以至于此区域表面一层瞬间达到熔化状态,而样品基底的温度仍然保持不变,这样就形成了一个很大的温度梯度,使轰击表面产生骤熔急冷过程.根据热传导方程可以粗略估计冷却速度.

一维热传导方程

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = F(Z, t) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(K \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad (2)$$

只考虑温度与时间的关系,在大于脉冲宽度的时间里,可以得到^[5]

$$T = \frac{2F}{K} \sqrt{\frac{\eta}{\pi}} (\sqrt{t} - \sqrt{t-\tau}), t > \tau \quad (3)$$

其中, F 为材料吸收的功率密度, K 为材料的热导率, η 为热扩散系数, τ 为脉冲宽度, T 为温度.

式(3)对时间 t 求导,就可得到冷却速度

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{F}{K} \sqrt{\frac{\eta}{\pi}} \left(\frac{1}{\sqrt{t-\tau}} - \frac{1}{\sqrt{t}} \right) \quad (4)$$

对钢来说, $K = 0.097$ cal/(g · s · °C), $\eta = 0.087$ cm²/s, $\rho = 7.758$ g/cm³, $\tau = 50 \times 10^{-9}$ s, 取 $t = 90 \times 10^{-9}$ s, 电子束的功率密度 $F_0 = 4.4 \times 10^{10}$ W/cm², 反射电子及损失能量系数 $\alpha = 0.4$, 则

$$\frac{dT}{dt} = -1.2 \times 10^{12} \text{ (°C/s)} \quad (5)$$

可见,冷却速度是相当大的.当然,这不是实际的冷却速率,原因是材料的热导率 K 在高温下的值会变化的,且在短脉冲作用下,由于热扩散长度 $\sqrt{3\mu\tau}$ 与材料的吸收长度相近,材料表面的吸收就必须考虑薄层内的吸收等效于热传导中的热源,这时热传导方程无解析解,而要用差分法作近似计算^[6].因此,实际的冷却速率小于此值,尽管这只是粗略的计算结果,但它反映了冷却速度数量级.

5 结论

实验结果与理论分析表明, ns 强流脉冲电子束与金属材料相互作用,产生瞬态骤热急冷过程,细化了晶粒,改变了材料的表面组织结构,从而提高了轰击区域的硬度和耐蚀性,有效的强化了金属表面.随着实验数据的累积和研究的深入,尤其是解决了电子束的均匀性问题后,膺火花脉冲电子束用于金属材料表面改性会有更加广阔的应用前景.

参 考 文 献:

- [1] Jiang X L, Jiang S C. IEEE NS, 1985, 5/32: 2 492.
- [2] Jiang Xing-liu, Xu Ning. Rev Sci Instrum, 1990, 161(1): 644.
- [3] 江兴流, 陈克凡, 姜松训. 科学通报. 1985, 4: 259.
- [4] 基泰尔 C. 著. 固体物理导论. 北京: 科学出版社, 1979, 345 - 348.
- [5] 梁培辉, 陈栾升, 曹思华. 中国激光, 1983, 10(7): 458.
- [6] Bell R O, Toulemonde M, Siffert P, et al. Appl Phys, 1981, 19: 313.

Study on Strengthen of Metal Surface with Nanosecond Intense Pulsed Electron Beams *

LIU Zhi-jian, LE Xiao-yun, JIANG Xing-liu

(Department of Applied Physics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: High power density electron beams generated by multiplate pseudospark discharge chamber, have been used to bombard various kinds of steel targets such as 45[#], 65Mn, T8, 9Cr18, GCr15, etc, and study its applications for modification of metal surface. The microhardness and corrosive resistance property have been measured and the morphology was obtained by using SEM analysis. The results showed that the surface properties and structure of the materials bombarded have been modified; in the bombarded center area, the microhardness as well as corrosive resistance property was improved obviously. The interactions between the electron beam and the metal materials were theoretically considered and discussed on the basis of simple calculation with one dimensional thermal transfer equation. It showed that the cooling rate of metal surface with $1.2 \times 10^{12} \text{ }^\circ\text{C/s}$ was so high that caused the metal surface instant melted, and abrupt cooled.

Key words: pulsed electron beam; pseudospark; surface modification

(上接第 78 页)

Study of Movable System of Neutron Detecting Latent Explosive**

JIA Wen-bao

(Shanghai Engineering Technology University, Shanghai 200336, China)

Abstract: Because it can on-line analyze many elements quickly and precisely without sampling and movement, prompt gamma neutron activation analysis is one of the most effective methods to monitor latent dynamite especially nonmetal. Many researchers have studied the techniques of the neutron detecting latent dynamite and got some achievements. This paper mainly discussed each method and technology route of neutron detecting landmine and latent dynamite, investigated the activation analysis with Am-Be isotope neutron source and 14 MeV pulse neutron tube, and proposed a geometrical layout of movable system.

Key words: movable explosive; prompt gamma neutron activation analysis; neutron source

* **Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China(00G51004)

** **Foundation item:** Shanghai Education Council Youth Development Fund; Shanghai Engineering Technology University Youth Fund, (03FZ02, 2003Q16)