

Nd-Fe-B 永磁材料激光打孔过程的研究

张国忠

(北京联合大学化学工程学院, 北京, 100009)

刘丽敏 李长江

(北京化工大学, 北京, 100029)

摘要: 对 Nd-Fe-B 永磁转子在脉冲激光打孔过程中合金组织、结构和成分的变化做了实验研究和分析。这些结果为正确选择最佳激光参数提供了科学依据。

关键词: 钕-铁-硼永磁体 脉冲激光器 激光打孔 快速熔凝区 热影响区

Experimental research on laser drilling on Nd-Fe-B material

Zhang Guozhong

(College of Chemical Engineering, Beijing Union University, Beijing, 100009)

Liu Limin, Li Changjiang

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing, 100029)

Abstract: The Nd-Fe-B is a wide employed permanent magnet material. As a example, it is used in watch step motor and the laser drilling is utilized. This paper discuss the effects of laser parameters on the temperature distribution and microstructure of the material surface.

Key words: Nd-Fe-B magnet pulse laser laser drilling rapid fused zone heat-affected zone

一、引 言

第三代稀土永磁材料 Nd-Fe-B 三元合金为单轴磁各向异性的金属间化合物^[1], 其最大磁能积为 SmCo₅ 永磁材料的两倍以上, 而且原料充足, 成本低廉, 因此广泛应用于电子、电器设备中, 成为机电工业的具有广阔应用前景的新材料。尤其是在永磁电机中采用 Nd-Fe-B 永磁体, 不仅可以改进电机的技术参数, 有利于小型化, 而且可靠性提高, 耗能量减少。

本文研究 Nd-Fe-B 永磁材料激光辐照效应。通过手表步进电机用 Nd-Fe-B 永磁转子在激光打孔前后合金显微组织, 形态以及成分变化的实验研究, 提供在生产中选择最佳激光工艺参数的依据。

二、实 验

Nd-Fe-B 是用真空感应熔炼、粉末冶金烧结技术制备的各向异性永磁材料。标称成分为: Nd₁₅Fe₇₇B₈。其剩磁 $B_r = 1.10\text{T}$, 矫顽力 $B_H C = 720\text{kA/m}$, 内禀矫顽力 $H_C = 1360\text{kA/m}$, 最大磁能积 $(BH)_{\max} = 220\text{kJ/m}^3$, 可逆磁导率 $\mu_r = 1.1$, 居里温度 $\theta_C = 310\text{ }^\circ\text{C}$, B_r 温度系数 $\Delta B_r / B_r \cdot \Delta T = -0.12\% / \text{K}$, 密度 $d = 7.4\text{g/cm}^3$ 。将大块材料经切割、研磨制成 $\phi 1.50\text{mm} \times 0.70\text{mm}$ 的圆盘形转子坯件作为本实验中的样品, 易磁化方向在圆平面内。

本实验中所使用的激光器是 Nd³⁺:YAG 脉冲激光器。激光波长 $1.06\mu\text{m}$, 重复频率为 20Hz, 脉冲宽度 0.5ms, 单脉冲输出能量为 10J, 光束发散角小于 15mrad, 腔内小孔选模, 输出模式为 TEM₀₀ 模。通过光学系统将激光聚焦成束腰直径为 0.15mm 的光束。样品置于焦点

处,每次用连续两个脉冲打孔。用10等分,占空比为1:1,转速为1r/s的切光片控制每相邻两次打孔之间的冷却时间为0.1s。

用STEREOSCAN-250MK3型扫描电子显微镜对样品在激光打孔前后不同部位的表面和断面形态进行实验观察。用同一台装置作能量色散X射线谱分析,测定样品经激光照射前后不同部位成分的变化。

三、结果与讨论

1. 激光辐照下样品的温度分布

设入射激光束光强 I 在空间呈高斯分布,在距束中心或样品中心为 r 处,光强可表示为

$$I = I_0 \exp(-r^2/d^2) \quad (1)$$

在束腰半径 d 处,光强 I 降为 I_0/e 。设NdFeB样品的表面反射系数为 R ,在正入射的情况下,辐照在样品上的热通量密度 H 在空间也可设为高斯分布,

$$H = I(1-R) = I_0(1-R)\exp(-r^2/d^2) = H_0 \exp(-r^2/d^2) \quad (2)$$

式中, H_0 为 $r=0$ 处的热通量密度。设激光照射时间,即加热时间为 t ,则样品上温度随半径 r 的变化为^[2]:

$$T(r, t) = \frac{H_0 d^2}{4kh} \left[E_i \left\{ -r^2/d^2 \right\} - E_i \left\{ -\frac{r^2/d^2}{1 + 4\alpha t/d^2} \right\} \right] \quad (3)$$

式中, k 为材料的热扩散系数, α 为材料的导热系数, h 为样品厚度, E_i 为误差积分,且

$$E_i(-x) = \int_{-\infty}^x (e^u/u) du$$

样品中心 $r=0$ 处的热点温度为 $T(0, t) = [H_0 d^2 / (4kh)] \ln(1 + 4\alpha t/d^2)$ (4)

由(3)式,根据误差积分的特性可知,当 $4\alpha t/d^2 < 0.25$ 时,温度分布在形状上接近于输入热通量的高斯分布。 $4\alpha t/d^2$ 值越大,即在束腰半径一定时加热时间越长,中心温度越高;相反, $4\alpha t/d^2$ 值越小,即在束腰半径一定时加热时间越短,中心温度越低。上述温度分布特征直接影响激光打孔后的表面形态。

2. 激光辐照后样品表面及断面形态

图1a和图1b分别为NdFeB转子样品经激光照射打孔后表面和断面的电子显微镜照片。孔呈倒圆锥形,轮廓清晰,纵横比约为5。样品经激光打孔后结构与形态发生了显著的变化。从孔中心向外可明显地分成孔

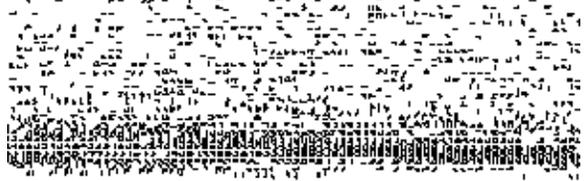


Fig. 1 SEM micrograph of drilled NdFe-B surface (a) and section (b)

区、熔凝区、热影响区和基体区等四个部分。这种现象是同入射光强、热通量乃至样品上的温度分布相关的。

中心孔区直径约为 $150\mu\text{m}$,与入射激光束的束腰直径相当。材料吸收激光能量,温度急剧升高(估计达 2000°C),使材料熔化、氧化甚至气化和等离子体化,形成熔融体,气体甚至等离子体的羽状烟柱从孔中喷溅出来。孔中心处形成凹坑,多次照射形成穿孔。凹坑周围或孔壁有约 $10\mu\text{m}$ 厚的玻璃态熔凝物和由合金在高温下氧化、燃烧所产生的金属氧化物层,并有明显的龟裂纹,裂纹宽度约为 $1\mu\text{m}$ 。图2给出了孔壁的电子显微镜照片。

Fig. 2 SEM micrograph of hole wall

图 3a 是快速熔凝区表面形态的电子显微镜照片。溶凝区分布在孔区周围约 $10\mu\text{m}$ 厚的环状区域内,是材料快速熔化、



Fig. 3 SEM micrograph of fused zone (a), heat-affected zone (b) and base zone (c)

又快速冷却产生的非晶化产物,同时表面漂有氧化物熔渣。由于 Nd-Fe-B 合金在平行和垂直 c 轴方向上热膨胀系数的各向异性^[1],以及在激光打孔时产生的热冲击波或压力波的作用,使得高取向度的 Nd-Fe-B 磁体在快速冷却过程中热应力超过烧结体的抗拉强度,从而产生宽度约为 $1\mu\text{m}$ 的微细裂纹。为保证产品质量和成品率,上述情况应尽量避免,并且快速熔凝区在扩孔时必须除去。

由于热传导使得在熔凝区与基体之间的约 $30\mu\text{m}$ 厚的范围内形成热影响区。虽然未达到熔化温度,但表面形态与基区有所不同。如图 3b 所示,晶粒较粗,同时也存在有微细裂纹。热影响区也应在扩孔时除去,以保证产品在孔周围的结构和机械强度与基体相同。

图 3c 是远离熔凝区和热影响区的基区,相当于在激光打孔前样品表面的电子显微镜照片。可以看出它是由尺寸为 $0.5\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ 的晶粒组成的,晶粒间隙较大,并存在较多的气孔。

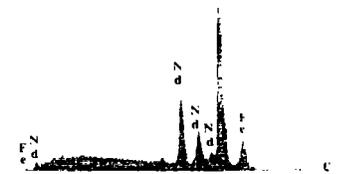
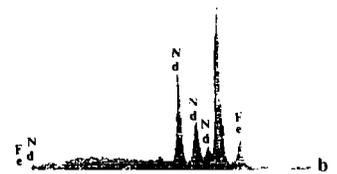
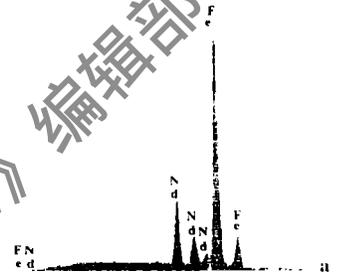


Fig. 4 X-ray energy spectra of base (a, b) and fused zone (c)

3. 激光打孔后不同区域的合金成分

图 4 为激光打孔前后 Nd-Fe-B 转子各区域的能量色散 X-射线谱图。图 4a 和 4b 为打孔前,相当于基区的能量色散 X-射线谱图,分别与主相——Nd₂Fe₁₄B 硬磁相和辅相——富钕相相对应^[3]。主相晶粒尺寸较大,而辅相多形成于晶界或晶粒交接处。热影响区相样是由上述主相和辅相组成,表明热影响区与基区具有相同的合金成分和晶体结构,仅表面形态有所不同。图 4c 为熔凝区物质的能量色散 X-射线谱图。在该区内未发现像基区和热影响区内存在的主相和辅相两相结构,而是成分到处均匀一致,应为合金快速熔凝后形成的非晶态。在相应的 X-射线谱中 Nd 和 Fe 的特征峰高均在主相和辅相之间,可看做是两相共混所得到的非晶态产物。

四、结 论

Nd-Fe-B 是加工性差的脆性材料,特别是由于它的热膨胀系数的各项异性使得在激光打孔过程中产生微细裂纹,造成产品破碎。为此在激光打孔时必须谨慎选择脉冲峰值功率,重复频率,脉宽及加热时间等工艺参数,使得加热通量刚好低于引起等离子体的程度。激光束腰直径应不大于欲加工的孔径,以使能在扩孔时将熔凝区和热影响区除去后,孔径能符合后要求。采用较低功率的激光脉冲,较短的加热时间、多次重复打孔对 Nd-Fe-B 类硬脆材料有利。

USED CARS 测量对撞式扩散火焰的温度分布*

赵建荣 李春金 杨仕润
(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

摘要: 介绍了用 USED CARS 技术测量对撞式甲烷/空气扩散火焰前滞止区和尾流区的温度分布剖面。在滞止区富甲烷边观察到甲烷燃烧前的热解过程; 尾流区温度高于滞止区温度, 表明在滞止区有未完全燃烧的中间产物存在, 在尾流区发现 C_2 及 CH 的光谱也证明了这一点。

关键词: USED CARS 对撞式扩散火焰 温度分布

Measurements of temperature distribution in a counterflow diffusion flame by USED CARS

Zhao Jianrong, Li Chunjin, Yang Shirun
(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080)

Abstract: This paper reports that temperature distribution profiles in forward stagnation and wake region of CH_4/AIR counterflow diffusion flame have been measured by USED CARS. The pyrolysis zone of CH_4 is observed at the side with rich CH_4 in the stagnation region. The flame temperature in wake region is higher than that in stagnation region. This means there are intermediate products that did not burned completely in the stagnation region. It is proved by emission spectra of C_2 and CH in wake region, too.

Key words: USED CARS counterflow diffusion flame temperature distribution

一、引 言

过去 30 多年来,人们一直热衷于利用激光作为非侵入性测量手段取代常规的测量方法来研究燃烧现象。相对于常规的测试手段,它的优点是可遥测,快速,不干扰流场,好的分辨率和

* 中国科学院重点课题“燃烧基础研究”的子课题。

参 考 文 献

- 1 Sagawa M, Fujimura S, Togawa M *et al.* J A P, 1984; 55(6): 2083
- 2 Lin Tungpo. IBM J R & D, 1967; 11(5):527
- 3 Herbst J F. Phys Rev, 1984; B29(7): 4176

作者简介: 张国忠(附照片), 男, 1938 年 9 月出生。副教授。现从事电子物理及电源技术研究。

刘丽敏, 女, 1959 年 7 月出生。讲师。现从事功能材料研究。

李长江, 男, 1940 年 9 月出生。教授。现从事功能材料研究。

收稿日期: 1996-02-01