

# SmCo<sub>5</sub> 永磁材料激光打孔过程的研究

刘丽敏 李长江

(北京化工学院, 北京, 100029)

**摘要:** 本文对SmCo<sub>5</sub>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。

## Research on SmCo<sub>5</sub> laser drilling

Liu Limin, Li Changjiang

(Beijing Institute of Chemical Technology)

**Abstract:** In this paper, the experimental studies and analysis on the morphology and composition of SmCo<sub>5</sub> permanent magnetic rotor drilled with a pulsed laser are described. This study provides a base for selecting the parameters of laser.

### 一、引 言

稀土钴永磁材料同铝镍钴合金和钕、镨铁氧体相比,其矫顽力、剩磁和最大磁能积等性能优异,而且稳定可靠,综合技术效果和经济效果都比较好<sup>[1]</sup>,因此广泛应用于电子、电器设备中。尤其是在永磁电机中采用稀土钴永磁体,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,耗电量减小。

本文研究SmCo<sub>5</sub>永磁材料的激光辐照效应。通过手表步进电机用SmCo<sub>5</sub>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

SmCo<sub>5</sub>是北京有色金属研究总院用真空熔炼、粉末冶金烧结技术生产的各向异性永磁材料。其剩磁 $B_r = 0.95\text{T}$ ,矫顽力 $H_c = 680\text{kA/m}$ ,内禀矫顽力 $H_{ci} = 1200\text{kA/m}$ ,最大磁能积 $(BH)_{max} = 160\text{kJ/m}^3$ ,可逆磁导率 $\mu_r = 1.05$ ,密度 $d = 8.2\text{g/cm}^3$ 。将大块材料经切割、研磨制成 $\phi 1.80 \times 0.75\text{mm}$ 的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YAG脉冲激光器。重复频率为20Hz,脉冲宽度0.2ms,每个脉冲能量为0.4J。输出模式为TEM<sub>00</sub>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-250 Mk3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及断面形态进行实验观测。用同一台装置作x射线能谱分析,测定样品经激光照射后不同部位成分的变化。

### 三、结果与讨论

#### 1. 激光辐照后样品的温度分布

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

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

在束腰半径 $a$ 处,光强 $I$ 降为 $I_0/e$ 。设SmCo<sub>5</sub>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,

$$\begin{aligned} H &= I(1-R) = I_0(1-R)\exp(-r^2/a^2) \\ &= H_0 \exp(-r^2/a^2) \end{aligned} \quad (2)$$

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<sup>[2]</sup>:

$$T(r,t) = \frac{H_0 a^2}{4kl} \left[ \text{Ei} \left\{ -r^2/a^2 \right\} - \text{Ei} \left\{ -\frac{r^2/a^2}{1+4kt/a^2} \right\} \right] \quad (3)$$

式中, $k$ 为材料的热扩散率, $l$ 为样品厚度,Ei为误差积分。样品中心 $r=0$ 处的热点温度为

$$T(0,t) = \frac{H_0 a^2}{4kl} \ln(1+4kt/a^2) \quad (4)$$

由(3)式,根据误差积分的特性可知,当 $4kt/a^2 < 0.25$ 时,温度分布在形状上与输入的热通量类似。 $4kt/a^2$ 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, $4kt/a^2$ 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1b分别为SmCo<sub>5</sub>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。孔的锥度小、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 $^\circ\text{C}$ ),使材料熔化,甚至汽化和等离子体化,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。孔中心形成凹坑,多次照射形成穿孔。凹坑周围或孔壁有

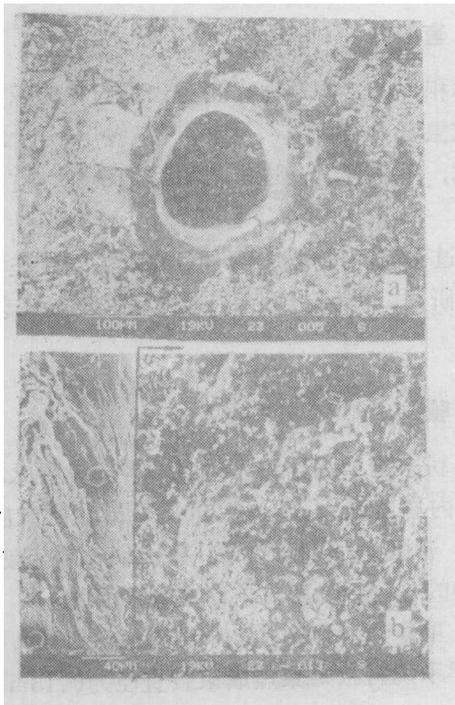


Fig.1 SEM micrograph of drilled SmCo<sub>5</sub> surface (a) and section (b)

约 $10\mu\text{m}$ 厚的金属氧化物层,由合金在高温下氧化、燃烧所产生。图2给出了孔壁的电子显微镜照片,是由一些疏松并有明显的龟裂纹的结构组成的。

为了便于讨论,图3a和3b分别给出了 $\text{SmCo}_5$ 转子在激光打孔前表面和断面的电子显微镜照片,它相当于基区的形态。可以看出它是由尺寸为 $0.5\sim 4\mu\text{m}$ 的晶粒组成的。晶粒间隙较大,并存在较多的气孔。



Fig.2 SEM micrograph of hole wall

Fig.4 SEM micrograph of fused zone



Fig.3 SEM micrograph of  $\text{SmCo}_5$  surphace (a) and section (b) before laser drilling

图4是快速熔凝区表面形态的电子显微镜照片。熔凝区分布在孔区周围 $70\sim 80\mu\text{m}$ 厚的环状区域内,是材料快速熔化、又快速冷却产生的非晶化产物。由于消除了材料中的孔隙而引起明显的收缩。表面常浮有氧化物熔渣。由于 $\text{SmCo}_5$ 合金在平行和垂直C轴方向上热膨胀系数的各向异性<sup>[3]</sup>,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 $\text{SmCo}_5$ 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 $0.5\sim 5\mu\text{m}$ 的微细裂纹,并且一直延伸到热影响区甚至基体区。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 $60\mu\text{m}$ 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5所示。晶粒细化,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与机械强度与基体相同。

### 3. 激光打孔后不同区域的合金成分

图6为激光打孔前后 $\text{SmCo}_5$ 转子各区域的x射线能谱图。曲线a为打孔前,相当于基区的能谱,表明其主要合金成分为Sm, Co和Pr,其中Co含量最大。曲线b为孔壁物质的能谱,与基区相比,该区成分发生了很大变化。金属成分大大减少,应为合金被激光烧蚀产生



Fig.5 SEM micrograph of heat-affected zone

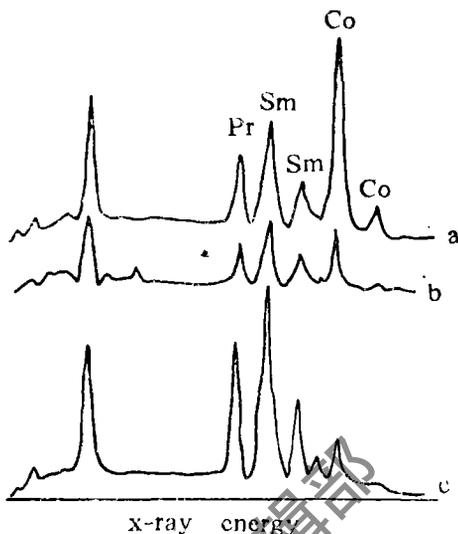


Fig.6 X-ray energy spectra of base zone (a), hole wall (b) and fused zone (c)

的金属氧化物熔渣。曲线c为熔凝区的能谱，与基区相比，Co含量明显减少，表明熔凝区是由 $\text{SmCo}_{5-x}$ 为主的相组成。

#### 四、结 论

$\text{SmCo}_5$ 是加工性差的脆性材料，特别是由于它的热膨胀系数的各向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。激光束直径应不大于欲加工的孔径，以便能在扩孔时将熔凝区和热影响区除去后，孔径符合要求。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 $\text{SmCo}_5$ 类硬脆材料有利。

#### 参 考 文 献

- [1] Buschow K H J, Luiten W, Naastepad P A *et al.* Philips Tech Rev, 1968; 29(11): 336
- [2] Lin Tungpo, IBM J-R & D, 1967; 11(5): 527
- [3] Walmer M S, Radial orientation and magnetization of sintered  $\text{SmCo}_5$ , Proceedings of the 2nd International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and their Applications, The 2nd International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and their Applications, Ohio, 1976, Dayton Ohio USA: University of Dayton, 1976: 384

\* \* \*  
作者简介：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：1992年7月27日。 收到修改稿日期：1993年3月9日。