

# Fe-Ni-Si-B-V 激光表面快速熔凝非晶化

黄须强 吕 朝阳  
(东北大学 沈阳 110006)

摘 要 采用 5 kW 连续 CO<sub>2</sub> 激光器,通过微区 X 射线衍射、金相显微镜和显微硬度分析,研究实现 Fe<sub>40</sub>-Ni<sub>36</sub>-Si<sub>8</sub>-B<sub>14</sub>-V<sub>2</sub> 合金激光表面非晶化的条件。通过控制激光功率密度和激光扫描速度等参数,实现了 Fe<sub>40</sub>-Ni<sub>36</sub>-Si<sub>8</sub>-B<sub>14</sub>-V<sub>2</sub> 合金表面非晶化。试验结果表明,激光功率密度和激光扫描速度是实现材料表面非晶化的重要条件。选择激光功率密度和激光扫描速度要综合考虑,既要保证熔池有足够大的冷却速度,以防止晶化;又要保证熔池内难熔质点和原始晶体完全熔化并使成分均匀,以防止非均质形核。当激光功率密度为  $2.7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,激光扫描速度在 1.0 ~ 2.0 m/s 的范围内,Fe<sub>40</sub>-Ni<sub>36</sub>-Si<sub>8</sub>-B<sub>14</sub>-V<sub>2</sub> 合金表面可实现单带扫描非晶化。

关键词: 激光 非晶化 Fe-Ni-Si-B-V 合金  
中图分类号: TG401



黄须强

## 0 序 言

与晶体材料比,非晶态材料具有其独特的磁性、力学性能、电性能和耐腐蚀性能<sup>[1,2]</sup>。

激光表面快速熔凝处理在材料表面形成非晶层,使材料表面具有高硬度、耐磨蚀和耐腐蚀等优异性能。它是利用高功率密度的激光束  $10^4 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$  快速扫描金属表面,使金属表面产生极薄的熔化层,而激光束的能量几乎很少传到金属内部,从而使熔化层与基体保持极高的温度梯度,移去激光束后可得到极高的冷却速度 ( $10^8 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ),使金属表面熔化层非晶化。

本文采用 5 kW 连续 CO<sub>2</sub> 激光器,研究 Fe<sub>40</sub>-Ni<sub>36</sub>-Si<sub>8</sub>-B<sub>14</sub>-V<sub>2</sub> 合金激光非晶化的形成条件以及激光功率密度和激光扫描速度对熔层非晶化的影响。

## 1 试验材料及方法

本文选用 Fe<sub>40</sub>-Ni<sub>36</sub>-Si<sub>8</sub>-B<sub>14</sub>-V<sub>2</sub> 铁基铸造合金作基材,样品为直径  $\phi 14 \text{ mm}$ 、厚度 5 mm 的圆片。为了提高试样表面对激光的吸收率,试样经机械磨光、抛光后,在表面均匀地涂上碳素墨水。试样装在一个由电机驱动旋转的圆盘上,通过调节电机速来调节扫描速度。扫描速度为 0.1 ~ 3 m/s。

本试验使用 5 kW 连续 CO<sub>2</sub> 激光器。试验所用激光功率为 4.7 kW,光斑直径为  $\phi 1.5 \sim 3 \text{ mm}$ ,功率

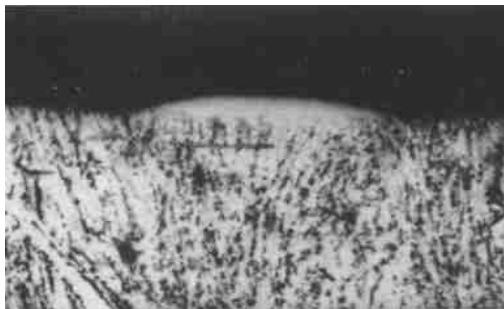
度为  $2.7 \times 10^5 \sim 6.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。

由于激光熔凝区比较窄 (0.5 ~ 1.5 mm),而且很薄 (30 ~ 120  $\mu\text{m}$ ),用一般测试手段很难判断激光熔凝区的组织结构,所以使用微区 X 射线衍射仪,通过分析衍射图谱来判断激光扫描区的非晶组织。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 扫描速度与熔层宽度和深度的关系

激光功率密度为  $2.7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。以不同扫描速度获得的熔凝层金相观察表明,熔凝层的横截面为月牙形,图 1 是扫描速度 1.5 m/s 熔凝层的横截面金相相片。图 2 是不同扫描速度与熔层宽度和深度的关系曲线。它们的变化规律基本上是相似的,随着激光扫描速度的增加,熔层的宽度变窄,深度变浅。



Scanning speed: 1.5 m/s  $\times 80$

Power density:  $2.7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$

图 1 激光熔凝区组织

Fig. 1 Metallograph of laser melted layer

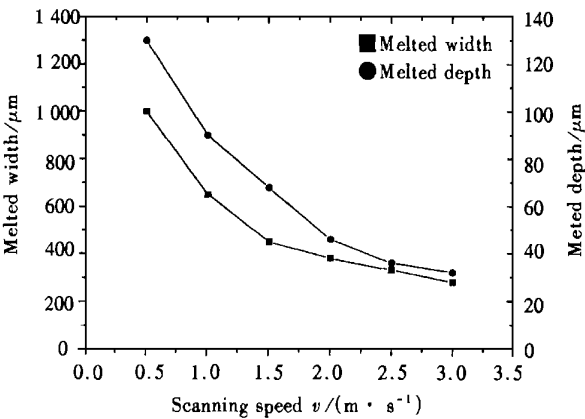


图2 熔宽和熔深与扫描速度的关系曲线  
Fig. 2 Relationship between melted width, melted depth and scanning speed

2.2 激光扫描速度与形成非晶层的关系

图 3a 是试样基体微区 X 射线衍射图谱, 图 3b、c、d 是激光功率密度  $2.7 \times 10^5 W/cm^2$ , 扫描速度分别为 0.5、1.0、2.0、3.0 m/s 的熔区表面微区 X 射线衍射图谱。从这几个图可以看出, 基体在  $40^\circ \sim 50^\circ$  之间出现两个晶态特征峰, 如图 3a 所示。扫描速度为 0.5 m/s 的 X 射线衍射图谱(图 3b)中两个晶态特征峰明显降低, 曲线其它部分较基体 X 射线衍射图谱线平滑, 这表明, 熔区已出现非晶成分, 但还存在晶体成分。扫描速度为 1.0 m/s、1.5 m/s 和 2.0 m/s 的熔区表面 X 射线衍射图(图 3c)基本一致, 两个晶态峰已基本消失, 这表明熔层已基本实现非晶化。当扫描速度增加到 3.0 m/s 时两个晶态峰又表现出来, 如图 3d 所示, 这表明熔区中出现了晶体成分。

当基体材料确定后, 激光功率密度和扫描速度对形成非晶体起重要作用。在激光功率密度不变的条件下, 扫描速度的大小直接决定着冷却速度的大小。随着扫描速度的增加, 熔层变浅, 熔池的温度梯度变大, 从而冷却速度增大。随着扫描速度的增大, 熔层中已出现部分非晶体, 继续增大扫描速度, 非晶体所占比例也增多。当扫描速度增大到一定时, 冷却速度达到某一临界冷却速度以上, 熔层便完全实现非晶化。此时的扫描速度就是在激光功率密度为定值时的最佳扫描速度。当激光扫描速度增大至足以实现熔层非晶化后, 再继续增大扫描速度, 对熔层非晶化是不利的。试验结果表明, 当激光扫描速度增大到 3 m/s, 熔层又开始晶化。

出现这种现象的原因是, 当激光表面快速熔凝非晶化处理时, 由于熔化层很薄, 温度梯度很大, 所以熔池的冷却速度很大。如果熔池冷却速度过大, 将使熔化层的成分难以实现充分均匀化。当激光功

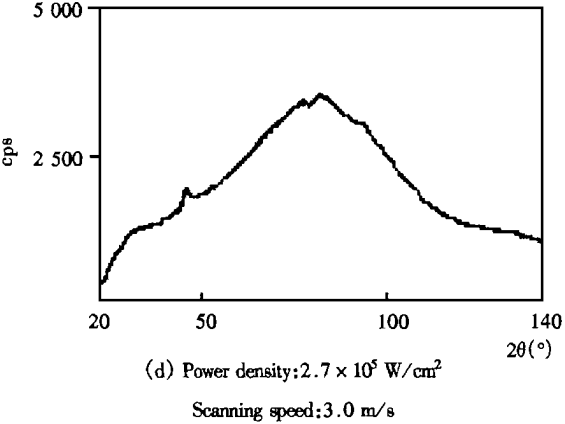
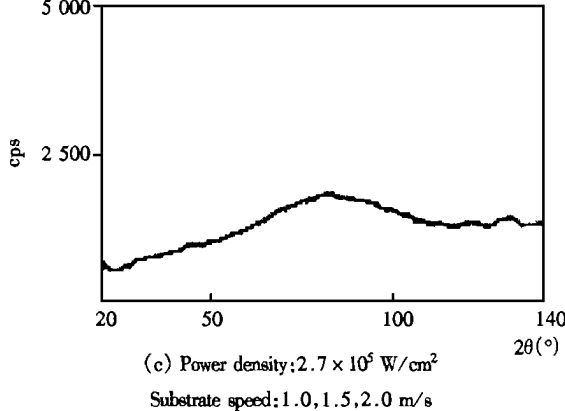
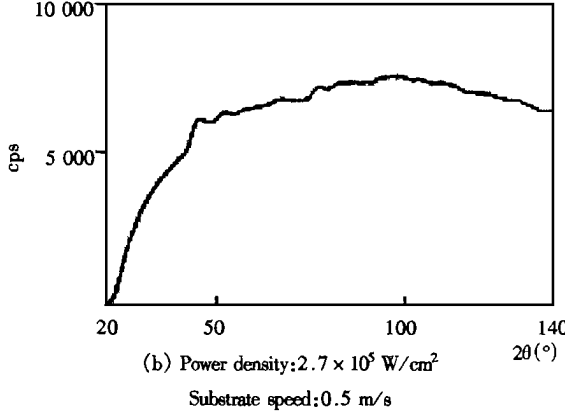
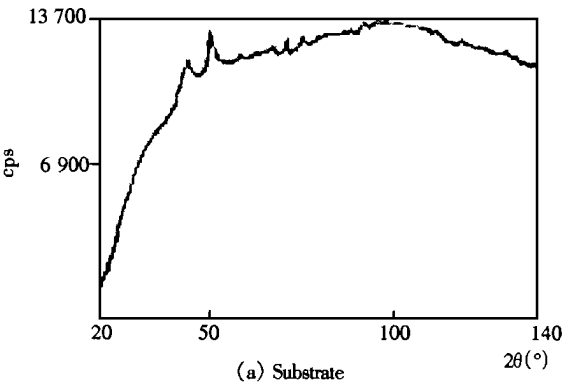


图3 微区 X 射线衍射图谱  
Fig. 3 Micro-diffractometer diffraction spectrum

率密度不变时,提高扫描速度或减少作用时间,相应地减少了熔池的存在时间,也就减少了熔体实现成分均匀化所需的时间。当熔池寿命减少到一定程度时,熔池内合金成分极不均匀,各微小体积元之间出现成分起伏,甚至在熔池中还会保留未完全熔化的原始晶体。这样在熔体微小区域内满足了非均质形核所需的相起伏和成分起伏,从而降低该微区非晶形成能力。当过冷熔体急冷到低温时,在该微区内形成的晶态相又为相邻区域熔体提供非均质形核条件,这样就降低了相邻区域非晶形成能力,从而降低了整个熔区的非晶形成能力。因此,在连续激光非晶化时,要综合考虑,既要保证熔池有足够大的冷却速度,以防止晶化;又要保证熔池内原始晶体完全熔化并使成分均匀,以防止非均质形核。

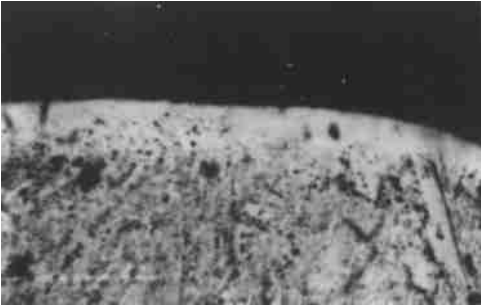
2.3 激光功率密度与形成非晶层的关系

图4是功率密度分别为  $6.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 、 $9.4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ,扫描速度分别为 0.1 m/s、0.5 m/s 的激光单带扫描横截面金相照片。由图可见,当功率密度为  $6.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$  时,扫描速度虽小,仅为 0.1 m/s,熔层中还有未熔质点,基体中枝晶已外延生长到熔层中,它表明功率密度  $\leq 6.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ,不论怎样调节扫描速度,熔层都不可能实现非晶化。当功率密度增大到  $9.4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ,扫描速度与前者相比增加了 5 倍,熔层内虽然基本上已无未熔质点,但 X 射线衍射图与图 3a 基本一致,两个晶态特征峰仍然十分显著,它表明熔层没有非晶化。当功率密度增加到  $1.5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  时,扫描速度为 0.5 m/s, X 射线衍射图与图 3b 基本一致,表明熔层已有部分非晶体。当扫描速度增加到 0.1 m/s, X 射线衍射图与图 3c 基本一致,表明熔层已实现非晶体。当扫描速度增加到 0.1 m/s, X 射线衍射图与图 3c 基本一致,表明熔层已实现非晶化。

分析上述试验结果可得出,当激光功率密度很低时,基体中的难熔质点不能在熔池冷却前全部熔化,这样就为熔层的非均质形核创造了相起伏条件,使熔层的非晶能力降低。只有功率密度达到一定值时,熔层所吸收的能量足以使熔层中晶体和难熔质点全部熔化时,才可能实现熔层的非晶化。当激光功率密度高到足以使熔层全部熔化后,继续提高激光功率密度,对实现熔层的非晶化是极其有利的。这是因为随着激光功率密度的提高,从最高温度冷却到液相线的时间变长,即熔池均匀化的时间变长,为熔层成分均匀化创造有利条件,不利于熔层非均质形核,从而提高非晶形成能力。

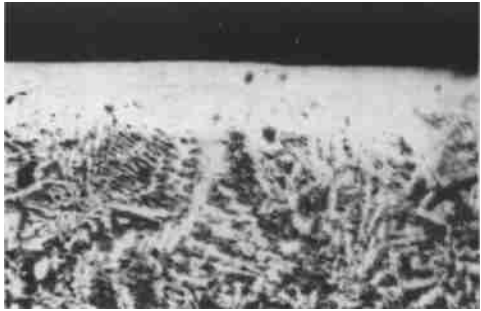
总之,提高激光功率密度,增加成分均匀化所需

的时间,阻止了非均质形核,从而增加熔层的非晶形成能力。但是提高激光功率密度是有限的,这是因为要求激光器具有较高的功率和良好的聚焦系统。所以当激光功率密度提高到一定时,再增加激光扫描速度,从而达到非晶化的目的。高的功率密度和快的扫描速度是实现非晶化的必要条件。



(a) Scanning speed: 0.1 m/s

Power density:  $6.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$



(b) Scanning speed: 0.5 m/s

Power density:  $9.4 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$

图4 激光熔凝区组织

Fig. 4 Metallograph of laser melted layer

2.4 熔区中显微硬度沿深度的变化关系

图5是功率密度为  $2.7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,扫描速度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 和 3.0 m/s 激光熔区沿深度的硬度分布曲线。从这些曲线可以看出在熔区的上部一定区域内,显微硬度值保持不变,在此区外,沿着熔区深度的增加,硬度值逐渐减少。扫描速度为 1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 的熔区上部的硬度值最高,而且有相同的数值。并随着扫描速度的增加熔区上部硬度保持不变的深度减少。扫描速度为 0.5 m/s、3 m/s 的熔区上部的硬度值与前者相比小很多。根据前面表面微区 X 射线衍射分析,扫描速度为 1 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 的熔区表面已完全非晶化,而扫描速度为 0.5 m/s、3 m/s 的熔区表层中含有晶体和非晶。把微区 X 射线衍射分析与显微硬度的变化结合起来,可以看出,显微硬度值最高的区域对应着非晶区,非晶区的深度随着扫描速度的

增加而减小。这表明,当激光功率密度一定时,在获得非晶的扫描速度范围内,扫描速度越小,获得非晶层的深度越大。

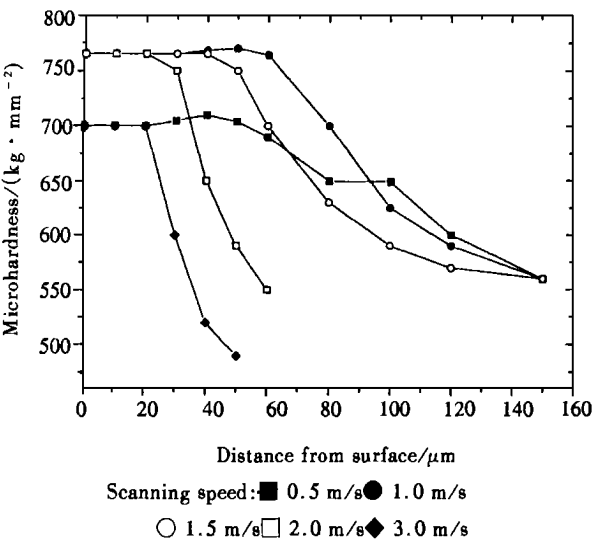


图 5 激光熔区沿深度的硬度分布曲线

Fig. 5 Relationship between microhardness and Distance from melted layer surface

3 结 论

- (1) 采用连续 CO<sub>2</sub> 激光器,在功率密度为  $2.7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,扫描速度在 1.0 ~ 2.0 m/s 的范围内,Fe<sub>40</sub>-Ni<sub>36</sub>-Si<sub>8</sub>-B<sub>14</sub>-V<sub>2</sub> 铁基合金可实现非晶化。激光功率密度和扫描速度是实现非晶化的重要条件。
- (2) 在连续激光非晶化时,选择功率密度和扫描速度需要综合考虑,既要保证熔池有足够大的冷却速度,以防止晶化;又要保证熔池内原始晶体完全熔化并使成分均匀,以防止非均质形核。

参 考 文 献

1 Luborsky F E. Amorphous metallic alloys. Butterworths 1983.

2 郭贻诚,等. 非晶态物理学. 北京: 科学出版社, 1984.

作者简介 黄须强,男,1965 年 3 月出生,讲师。1993 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,现为中国科学院金属研究所在职博士研究生。目前主要研究方向为堆焊材料及工艺。发表论文 4 篇。

1999 年度两院院士增选名单

1999 年中国科学院、中国工程院院士的增选工作,从 1998 年 11 月正式启动。经过提名、遴选、评审和选举 4 个阶段,截至 1999 年 12 月,增选名单正式公布。全国机械工程领域有 1 位专家被选为中国科学院院士,13 位被选为中国工程院院士。这既是对每一位专家学术成就的肯定,同时也是机械工程学术界的荣誉。

中国科学院院士

姓 名	专 业	单 位
温诗铸	机械设计与理论(机械学)	清华大学

中国工程院院士

姓 名	专 业	单 位
艾 兴	切削加工和刀具材料	山东工业大学
朵英贤	机械设计	中国兵器装备总公司北京机械电器研究所
周 济	设计制造自动化	华中理工大学
柳百成	铸造工艺与设备	清华大学
钟群鹏	机械装备失效分析预测与预防	北京航空航天大学
郑南宁	自动控制	西安交通大学
封锡盛	自动控制	中国科学院沈阳自动化研究所
陈国良	金属材料	北京科技大学
陈蕴博	金属材料及热处理	北京机电研究所
闻立时	复合材料	中国科学院金属研究所
黄伯云	粉末冶金	中南工业大学
曾苏民	金属压力加工	西南铝加工厂
高金吉	设备诊断工程	中国石油辽阳石化分公司