

铁基粉末冶金材料的激光热处理

刘要武* 卜宪章 路长琴

摘要: 本文就铁基粉末冶金材料的激光热处理进行了某些系统的研究。结果表明, 采用此种处理, 可在保持原粉末冶金材料特性的基础上, 大大改善其某些性能, 硬度提高了约6倍, 而耐磨性则提高了近10倍。此外, 此种材料的激光硬化处理工艺要比通常的钢材更为简便。

一、前 言

粉末冶金材料作为一门新学科、新工艺应用到工业生产中以来, 正以惊人的速度向前发展。在航天、航空、交通、机械、日用工业方面都在发挥重要作用。特别作为机械零件, 应用是很广泛的, 用量也越来越大, 对产品强度、硬度、耐磨性、抗腐蚀能力上都提出了更高的要求。

铁基粉末冶金材料是以铁粉作为主要原料, 经成型和烧结而制成的。一般多用在滑动摩擦部位。因其受力较小, 又可利用多油和游离态石墨进行润滑。由于强度和密度较低, 使应用受到很大限制。在目前的生产工艺中, 一般不进行热处理。主要是粉末冶金材料密度较低且不均匀, 难以得到均匀的组织。而且淬火介质或盐炉加热极易腐蚀, 又易变形^[1]。为了扩大粉末冶金材料的应用范围和提高其使用寿命, 都在试图寻找改善其组织, 提高其性能的新途径。

根据激光热处理具有加热及冷却速度极快等特点, 在不改变粉末冶金材料的多孔性和存在游离态石墨等优点的前提下, 进行激光表面处理, 增强表面强度, 提高硬度和耐磨性能, 减少变形, 是完全可以达到的。文中, 重点对铁基粉末冶金材料的激光表面硬化处理的工艺特点进行了论述, 并对其组织与性能的影响做了初步的探讨。

二、试验方法及内容

1. 样品的制备

试验用材料的基本组成及生产工艺如表1所示。制成三种规格的样品如图1所示。

* 马云程、吴洪志、关振中同志参加此项工作。

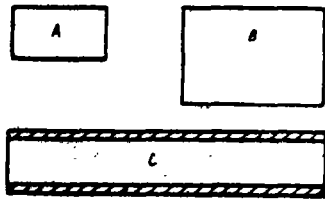


图1 试验用的样品尺寸

A: $10 \times 10 \times 20 \text{mm}^3$

B: $10 \times 20 \times 30 \text{mm}^3$

C: $\phi 17 \times 73 \text{mm}^2$

表1 试验材料的基本组成

Fe	C	S	密度 (g/cm^3)
100	1	1	6.0~6.29
烧结温度 $^{\circ}\text{C}$		1080	
保温时间min		60	

2. 激光热处理设备及工艺

试验设备采用封离式 CO_2 连续激光器如图2, 连续输出功率约为700W。光束质量为多模, 波长为 $10.6\mu\text{m}$ 。光斑直径为1.5mm, 采用三种扫描速度, 分别为:

$$V_1 = 10 \text{mm/sec}$$

$$V_2 = 6 \sim 8 \text{mm/sec}$$

$$V_3 = 15 \text{mm/sec}$$

并对样品做了加涂层、不加涂层、浸油等不同方式的预处理。

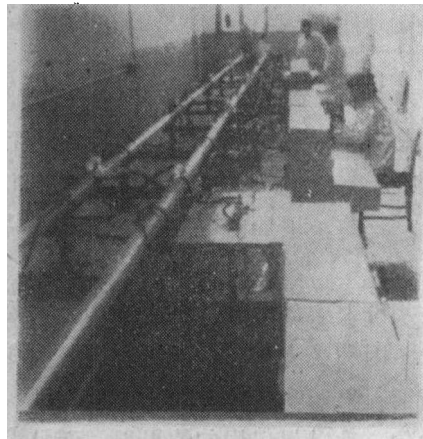


图2 试验用设备直管式 CO_2 激光器

三、试验结果及讨论

1. 金相组织及分析

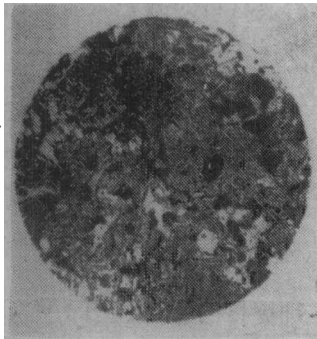


图3 烧结后的组织:

珠光体加少量的铁素体和渗碳体, 以及游离态石墨与硫化物 400 \times

试验所采用材料的成份含有1%的碳。由于碳含量直接控制着渗碳体的体积百分数, 从而在很大程度上控制着珠光体的数量。而碳经烧结后, 以石墨形式存在的约占0.1~0.2%, 以化合态存在的约为0.8%。因此, 得到的基体显微组织除石墨与硫化物(均起固体润滑作用)外, 主要为片状珠光体加少量的铁素体图3, 有少量的渗碳体($< 2\%$)。由于渗碳体硬而脆, 如果数量过多(如超过10%以上), 将使材料脆性增大。尤

其是做为摩擦材料，过多的渗碳体容易划伤表面，产生犁沟，甚至剥落，增加磨料磨损，对摩擦副不利。

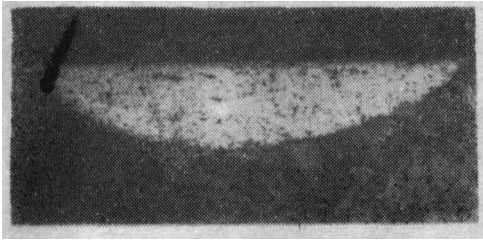


图4 激光硬化带横断面形貌 32×

铁基粉末冶金材料经激光热处理后，硬化层形貌为球冠形图4。这主要与激光光斑的能量分布和导热方式有关。硬化组织除石墨与硫化物外均为隐晶马氏体图5。过渡区组织为细珠光体，如图6所示。

激光相变硬化原理和普通热处理基本相同，金属的淬硬仍然是一个奥氏体转变成马

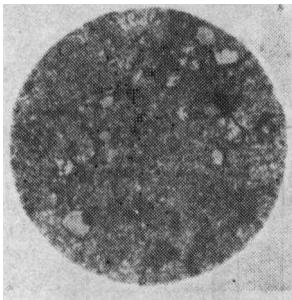


图5 激光相变硬化组织

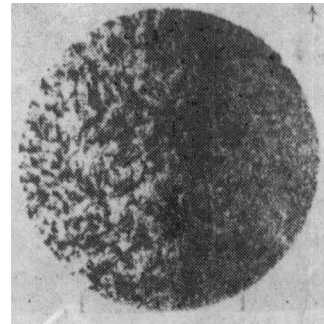


图6 过渡区组织

氏体的过程。奥氏体的形成是受扩散支配的过程，即存在着平衡。只有当奥氏体内部达到均衡浓度，并以超过临界冷却速度冷却后才可能获得均匀马氏体。然而，已经发现，在快速硬化中，不管所经历的过程如何，适当提高奥氏体化（淬火）温度，都可加速扩散，不管如何缩短奥氏体化时间，仍可能获得均匀硬化^[1]。这种分析与图7中的硬度分布是相符的。样品表面经激光束扫过后，由于是局部硬化，加热及冷却过程迅速，可允许金属表面瞬时过热。因此所得到的硬化组织极为细密，表面硬度比常规淬火要高一些。无疑对提高耐磨性是有利的。

2. 性能

(1) 硬度、硬化层深及带宽

表面硬度是在苏联ПМТ-3型显微硬度计上测定，加载为100g。结果如图7所示。

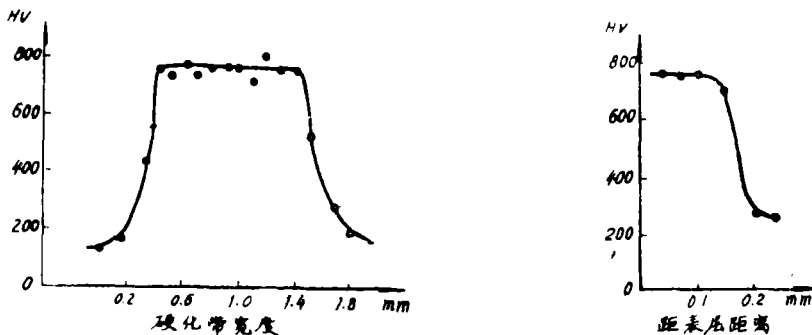


图7 硬化带硬度分布曲线

从测试结果可以看出，激光热处理后，表面硬度得到显著的提高。同时因光束能量近似高斯曲线分布，故硬化带两边加热温度不足，硬度约 $HV400$ 左右。从曲线很陡下降可清楚看出，热影响区很小。硬化带宽度和深度与材料的密度及工艺参数密切相关（下面将重点讨论）。在此部分的试验中，均把硬化带控制在 $1\sim 1.2\text{mm}$ 范围内，深度可达到 0.20mm 左右。

(2) 耐磨性能

试验采用MM200摩擦磨损试验机，样品尺寸为图1中的A，在其上分别处理成1、2、3条硬化带，以获得不同的硬化面积，与摩擦副做切入法磨损试验图8。试验条件为：室温下的干滑动摩擦，载荷 5 kg ，转速 200rpm 时间 20 分钟，摩擦副材料为 40Cr ，经调质处理，硬度为 $HV268$ 。材料的耐磨性能评定采用称重法。即磨损重量 = 磨前重量 - 磨后重量。样品的处理状态及试验结果如表2及图9所示。

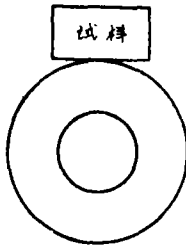


图8

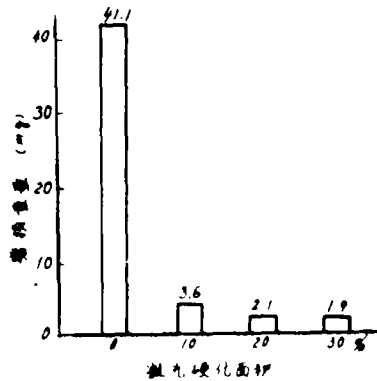


图9 激光硬化面积与磨损量的关系

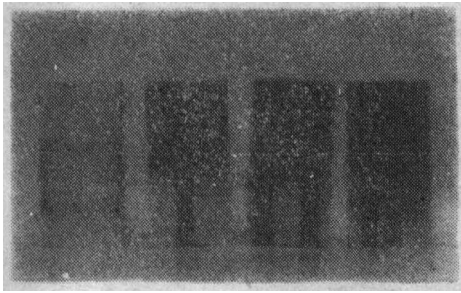
表2 硬化带形式及硬化面积

热处理方式	原始组织	激光表面硬化		
硬化带形式	无	—	二	三
硬化面积%	0	10	20	30
硬度值 HV	118	641~681	641~681	641~681

从试验结果看出，样品经激光硬化后，耐磨性能得到显著的改善。观察样品表面的磨损状态图10，未经激光处理的样品，由于硬度较低，磨损为一条条犁切的沟槽。经激光处理的样品，在磨损部位，硬化带高出未硬化部位，说明在磨损过程中硬化带起了耐磨骨架的作用，因而大大减轻了整个磨损部位的磨损，包括未硬化部分的磨损程度。同时软的基体又可充分发挥游离态石墨的减摩作用。从能量角度考虑，磨损中硬化带吸收的塑变能很少，相当一部分能量只能以热的形式放出，引起磨损表面温度升高，促使表面产生氧化膜，防止或减少了在压力足够高时接触面凹凸不平部分间的粘着磨损，从而也提高了耐磨性。

图9为不同硬化面积试样的相对磨损值，也反映了不同硬化面积对耐磨性的影响。随着硬化面积的增大，耐磨性也增加。但增加的幅度随之降低。大量试验证实，硬化面积为 $20\sim$

30%时, 具有相对高的耐磨性, 若硬化面积继续提高, 耐磨性的增加则微乎其微。因此, 选择硬其游离态石墨的减摩作用。



a. 正面

b. 侧面: 左 激光处理
右 未处理

图10 样品在同一条件下磨损后的痕迹

激光硬化带具有较高的耐磨性, 按磨损机理可从以下方面来解释。磨损主要是机械过程, 是断裂的一种形式。材料的显微结构、硬度、变形率等与耐磨性能之间存在着密切的联系^[3]。铁基粉末冶金材料激光硬化后的组织具有极高的硬度, 且组织极为细化, 即高的硬度和相对好的韧性相结合, 因而具有很高的耐磨性。从能量化面积为20%~30%。

四、铁基粉末冶金材料激光热处理的工艺特点

铁基粉末冶金材料组织结构、性能等与普通的钢铁材料有很大的区别。其中多孔性是主要特点之一, 根据不同的用途能够制成不同密度的零件。做为减摩材料, 需要浸油来增加耐磨性, 这些都给激光热处理工艺带来新的问题。就材料的不同密度、加工状态、含油率三个方面的试验结果进行分析讨论。

1. 不同密度对激光热处理的影响

对4.4~6.35g/cm³范围内近十种密度的材料, 进行了三种条件的激光热处理试验:

(1) 样品未加涂层和浸油, 扫描速度为 V_2 ;

(2) 样品加涂层未浸油, 扫描速度为 V_3 ;

(3) 样品加涂层和浸油, 扫描速度为 V_1 。同时, 对密度连续变化的样品用 V_2 速度处理, 结果如图11~14所示。试验的整个趋势是相同的。随着密度的降低, 硬化带宽度和深度增加, 而硬度稍有下降。密度越低越易烧伤图15。因材料密度不同反映孔隙大小与分布的不同。孔隙所起的作用一是表面光洁度, 孔隙越多, 光洁度越低, 在一定范围内对光的吸收就越强。二是内表面积, 孔隙多, 内表面积大, 导热性差。在相同工艺下, 密度低的样品吸光能力强, 硬化带宽而

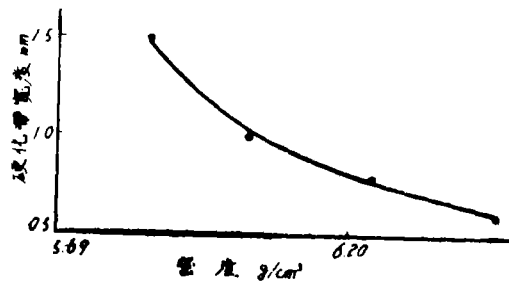


图11 密度连续变化的样品, 在激光处理工艺参数相同的条件下, 密度与激光硬化带宽度的关系

且深。由于冷速相对变低，即高温停留时间较长，得到的组织较粗大，如图16所示。在残余奥氏体基体上分布着一些较粗大的马氏体针。密度高的样品导热性好，冷却速度快，得到的硬化组织主要为细小的隐晶马氏体。因此其硬度较高。由于铁基粉末冶金材料表面存在着孔隙，可以把这些孔隙看成是一个个对光具有吸收作用的黑洞。因此，表面不加涂层就可达到硬化效果。这也是与其它材料不同的特点之一。

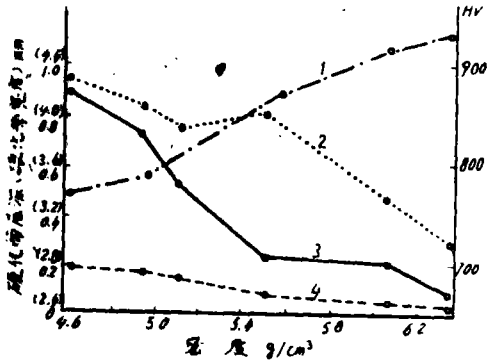


图12 未加涂层和浸油的样品经激光处理后，密度与硬化层深、带宽、硬度的关系。

- 1. — 硬化带硬度
- 2. — 硬化层深度
- 3. — 硬化带宽度
- 4. — 表面烧伤深度

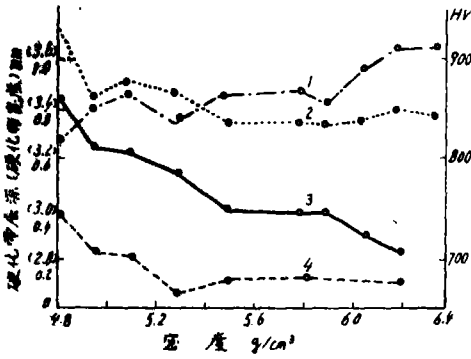


图13 表面加涂层但未浸油的样品经激光处理后，密度与硬化层深、带宽、硬度的关系。

- 1. — 硬化带硬度
- 2. — 硬化层深度
- 3. — 硬化带宽度
- 4. — 表面烧伤深度

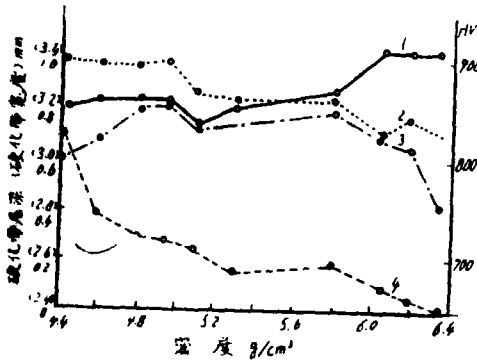


图14 浸油并加涂层的样品经激光处理后，密度与硬化层深、带宽、硬度的关系。

- 1. — 硬化带硬度
- 2. — 硬化层深度
- 3. — 硬化带宽度
- 4. — 表面烧伤深度

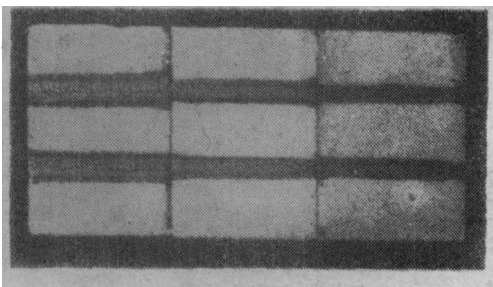


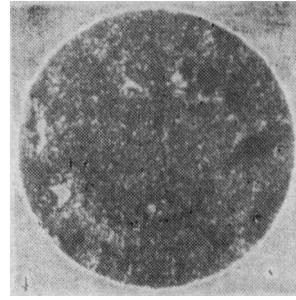
图15 不同密度的样品用相同工艺参数处理的结果。

左起：4.6，5.6，6.35g/cm³



500 ×

图16 密度为4.6g/cm³的激光硬化区的组织



500 ×

图17 密度为6.05g/cm³的激光硬化区的组织

2. 表面加工状态对激光热处理的影响

用同一工艺参数对密度为 5.1g/cm³ 三种表面状态—自由面、复压面、磨削面—的材料进行处理，结果如图18~21所示。可以看出，表面光洁度越好，越不易烧伤，但程度低于上述不同密度材料的试验结果。因为复压后材料表面的孔隙有一部分遭到闭塞。磨削后的材料表层有很大一部分的孔隙闭塞，仅仅是表层很薄的一部分密度改变。

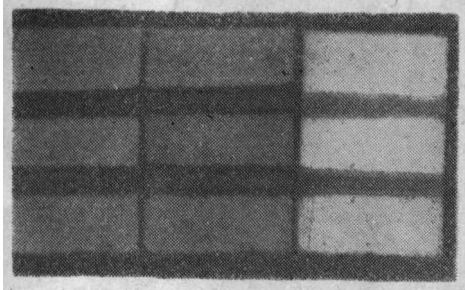


图18 相同密度、不同表面状态的样品，在同一工艺参数下处理的结果
从左至右：自由面、复压面、磨削面

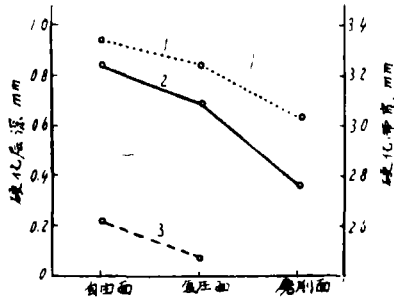


图19 加涂层、未浸油的样品经激光处理后，不同的表面状态的硬化效果
1. —硬化带层深度
2. —硬化带宽度
3. —一面表烧伤深度

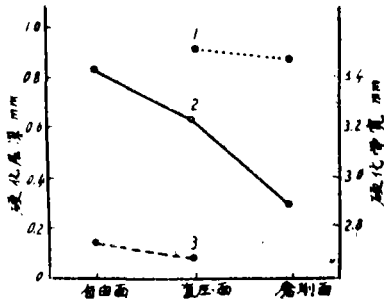


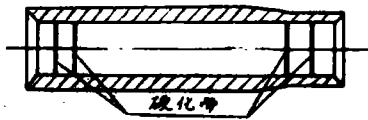
图20 未加涂层、未浸油的样品，经激光处理后，不同的表面状态的硬化效果。
1. —硬化层深度
2. —硬化带宽度
3. —表面烧伤深度

可以认为铁基粉末冶金材料的孔隙度对激光热处理的影响是其内表面积和导热性起主要作用。

3. 含油率对激光热处理的影响

铁基粉末冶金材料做为减摩材料应用时需要浸油。孔隙内充的油借毛细管力保持在摩擦面上起到润滑作用。相同条件下，在一定范围内浸油的多少直接影响到材料的耐磨性能。

我们进行了激光热处理对铁基粉末冶金材料含油率影响的试验，样品及处理部位如图21，结果如表3所示。



扫描速度： V_0
 硬化带宽：1 ~ 2 mm
 硬化层深：~0.2mm

图21 样品C的激光扫描花样

表4 激光处理对汽阀导管含油率的影响

样品号	激光处理前含油率%	激光处理后含油率%	激光处理后浸油后重新含油率%	密度 g/cm^3
0	2.61	2.54	2.70	6.32
1	2.90	2.86	2.96	6.19
2	2.64	2.57	2.78	6.29
3	2.60	2.53	2.64	6.33
4	2.48	2.47	2.62	6.27
5	2.52	2.46	2.67	6.34
6	2.55	2.48	2.65	6.35
7	2.66	2.59	2.78	6.26
8	2.73	2.69	2.83	6.24
平均	2.63	2.58	2.74	6.29

从试验结果可看出，激光热处理对铁基粉末冶金材料的含油率影响甚微，实际应用没有影响。这一结果与激光硬化后的孔隙状态有关。分两种情况讨论：(1)激光淬火处理，孔隙明显增大图22。由于样品本身含有一定的游离态碳，又经过浸油，当激光束扫过时，这些可

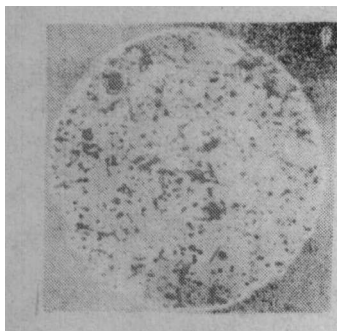


图22 激光淬火处理的孔隙 200x

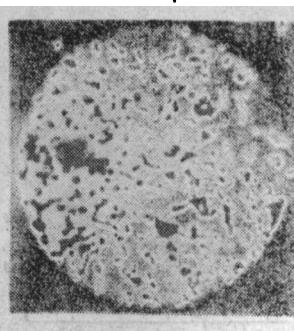
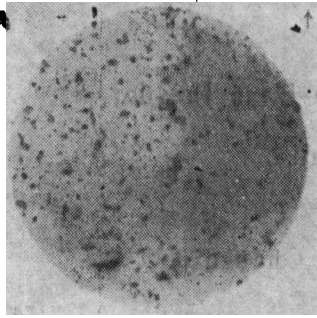


图23 激光熔化—凝固处理的孔隙 200x



200×

图24 原始状态的孔隙

品 (V_H 为15mm/sec) 的硬化效果基本相同, 说明浸油样品表面的吸光能力明显降低。这可能是由于孔隙内的油在激光束作用下, 急剧的碳化挥发损失掉部分能量。油挥发散热, 对样品表面又起到一定的保护作用, 不易被烧伤。

挥发性物质发生挥发的作用引起孔隙尺寸变大。(2)激光熔化—凝固处理, 孔隙增大, 但其程度稍低于激光淬火处理的见图23。因为组织重熔后, 在凝固的过程中可以添补部分在加热过程中由可挥发性物质挥发时增大的孔隙。但这个过程是极快的, 一般在十分之几秒内就可完成。因此, 孔隙仍大于原始组织。所以, 激光硬化的样品经过重新浸油, 含油率略高于处理前的。同时, 我们对同一密度浸油与未浸油的样品进行激光处理, 发现浸油的样品 (V_H 为10mm/sec) 与未浸油的样

五、结 论

根据上述试验结果和分析, 可以得出:

1. 铁基粉末冶金材料的激光硬化组织是由极为细小、均匀的隐晶马氏体, 未溶碳化物以及基本保持原始形态的硫化物所组成。这种组织具有优异的性能。其硬度平均可达 $HV700$ 左右, 比原始基体硬度 ($HV100$ 左右) 提高近 6 倍, 材料干摩擦磨损的耐磨性提高近 10 倍。

2. 铁基粉末冶金材料是多孔性的材料, 其表面存在大量的孔洞。它对 $10.6\mu\text{m}$ 波长的 CO_2 激光具有良好的吸光性能。因此, 激光处理前不需进行其它的表面预处理。而且, 材料表面状态和本身所固有特点对激光处理工艺参数的敏感性很强。起主导作用的是其内表面积。

3. 由于激光硬化部分的密度对总的密度影响甚微, 因此对总的含油率无明显影响, 故可保持材料润滑好这一特点。

4. 铁基粉末冶金材料经激光热处理后, 可保证粉末冶金材料自身具有的优点, 同时又使某些性能, 特别是耐磨性能得到显著的改善和提高。从而为激光热处理在这方面的扩大应用提供了科学依据。

参 考 文 献

- [1] 中南矿冶学院编, 粉末冶金基本原理, 冶金工业出版社。
- [2] 粉末冶金金相图谱编写组, 粉末冶金金相图谱, 机械工业出版社, 1980年。
- [3] [英]J·霍林, 摩擦学原理. 机械工业出版社
- [4] 中国科学院长春光机所, 激光热处理文集, 1985. 1.
- [5] [苏]H·H雷卡林等著, 材料的激光加工, 科学出版社, 1982年。

Laser Heat Treating of an Iron-Base Powder Metallurgic Meatrial

Liu Yaowu Pu Xianzhang Lu Changqin

Abstact

Some investigations of Laser heat treating for an iron-base powder metallurgic material are described in this paper. The result indicates that this processing can greatly improves some performances of the material while retaining its original propeties. The resulting hardness can be approxima tely increased by six times and wear resistance by ten. Farther more, laser hardening of this material is more simple and convenient than those of common steels.