

激光相变硬化工艺参数的研究*

苏宝熔 李跃增

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文报导了用 HJ-1 型 CO₂ 激光器对六种金属材料进行的相变硬化实验结果。研究了激光工艺参数对材料硬化层组织与性能影响。提出这些材料激光相变硬化的最佳工艺参数; 并将激光硬化 V 型导轨的实验结果和普通热处理结果作比较。

Study of the technical parameters of laser transformation hardening

Su Baorong Li Yaozeng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: The experimental results on transformation hardening of 6 kinds of metals have been reported by using a HJ-1. CO₂ laser. The effect of technical parameters of the laser on the structure of surface hardening and its characteristics have been investigated. Optimum parameters of laser transformation hardening for these metals have been found. And the experimental results of laser hardened V-guide slide were compared with those of common heat treatment.

一、概 述

从 1979 年开始在 HJ-1 型千瓦横流 CO₂ 激光器^[1] 上进行了六种常用典型材料的相变硬化工艺参数实验。这六种材料是: T20、T45、T10A、GCr15、灰铸铁、33CrNiMoA。试样尺寸为 20×20×30 毫米, 每个试样均进行了对 10.6 微米光波具有高吸收能力的表面处理。根据 L₁₈(6¹×6⁰) 正交试验结果和激光加热金属表面的热学分析^[2] 得知, 当材料及涂层一定时影响硬化层组织与性能的激光工艺参数只有二个, 即功率密度和扫描速度。本文重点研究了这两种参数对材料硬化层组织及其表面硬度的影响。

二、实验结果与讨论

1. 激光功率密度与作用时间的关系

图 1 表明三种材料获得满足要求的硬化层组织所需功率密度随作用时间的增长而减小。由于材料本身热扩散和热传导等特性的差异, 可硬化的激光参数范围也略有不同。三种材料的可硬化范围与美国联合技术研究中心的结果^[3] 比较略向左扩展, 如图 2 所示。说明可硬化的工艺参数还可以降低, 这可能由于表面涂层对激光吸收能力和材料特性不同所致。

收稿日期: 1980 年 7 月 15 日。

* 横流 CO₂ 激光组参加了实验工作。

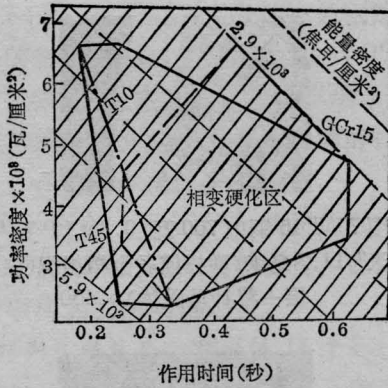


图1* T45、T10 A、GCr15 三种材料的功率密度与作用时间的关系

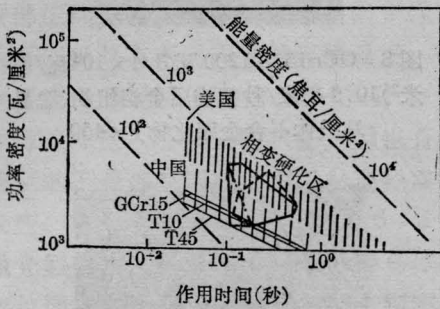


图2 我们实验结果(图1)与美国联合技术研究中心的结果对比

2. 激光光束质量与硬度分布的关系

这个问题很重要，它取决于光斑的能量分布和形状。国外多数采用单模圆形高斯光束，如图4^[4]所示的硬度分布对实际应用不利，它随着零件表面的不断磨损，保留的硬化组织也就越来越少。要想使高斯光束达到如图3所示的硬度分布，必须加光束摆动装置。由于我们所采用的多模散焦光束能量分布不象高斯光束那样集中，扫描时很少出现局部过热、过烧甚至熔化现象，同时能够得到深度一致的硬化层(见图3)。如果这种光束经重迭多次扫描可以得到均匀大面积硬化层(见图5)。由此可见，激光用于相变硬化对光束质量要求不高，在没有光束摆动装置条件下，方形多模散焦光束更有实用价值。我们使用的HJ-1型CO₂激光器其输出的光束即属此类型。

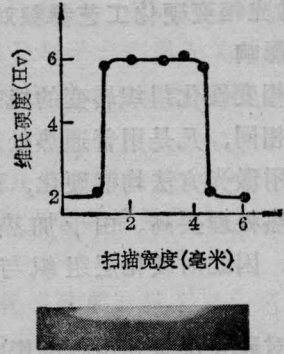


图3 T45钢1200瓦，14.7毫米/秒方形多模散焦光束单程扫描硬度分布及其横断面

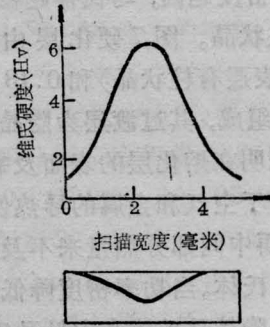


图4 高斯光束单程扫描硬度分布及其横断面(国外报导的示意图)

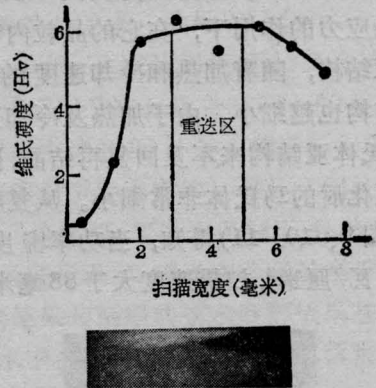


图5 方形多模散焦光束重迭2毫米多程扫描及其横断面

* 根据美国实验结果在HJ-1型激光器上进行工艺参数向低方向扩展实验。为了区分三种材料可硬化的范围，将可硬化的实验点做成连线，其构成的多边形无物理意义。

3. 激光相变硬化工艺参数对材料组织与性能的影响

激光相变硬化组织转变的机理与普通热处理基本相同，凡是用普通热处理方法能淬硬的材料用激光方法均能硬化，而且表面硬度比普通热处理要高。由于加热和冷却速度非常快，因此对硬化层组织与性能影响很大。

(1) 对硬化层金相组织的影响

(a) 对马氏体粗细的影响。实验表明，在可硬化的功率密度范围内，扫描速度越快，激光照射后马氏体越细。同样在一定扫描速度下，功率密度越高，马氏体越粗甚至熔化，表层出现柱状晶。图7硬化层由0.22毫米深白亮层(表层有柱状晶)和0.13毫米深马氏体(4级)组成，其过渡层为隐晶马氏体和屈氏体。说明在熔化层的表面及靠近基体的过渡层，由于空气和金属的导热使其冷却速度非常快，而中间部分热量来不及扩散，因此得到粗针马氏体。当功率密度降低，扫描速度提高时可得隐晶马氏体和中针马氏体，如图6所示。如扫描速度再提高可得全部隐晶马氏体(见图8)。一般用激光硬化表面，很容易得到这种组织。这是因为奥氏体在组织应力和热应力的作用下，在它的晶粒内部形成许多亚结构，随着加热和冷却速度的加大，其亚结构也越细小。由于加热及冷却速度很快，奥氏体亚结构来不及回复再结晶，因此使激光硬化后的马氏体非常细小。从复膜电镜照片(图9、10、11)得知，当功率密度降至 4×10^3 瓦/厘米²，扫描速度大于88毫米²/秒，

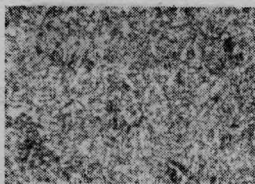


图6 T45钢以1200瓦(3.4瓦/厘米²)7.9毫米/秒扫描后金相组织(隐晶马氏体+中针马氏体)×450

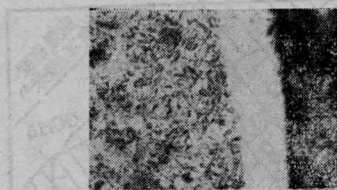


图7 T45钢以700瓦(9.3×10^3 瓦/厘米²)14.7毫米/秒扫描后金相组织(白亮层+粗针马氏体)×450

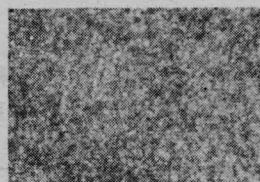


图8 GCr15以1200瓦(3.4×10^3 瓦/厘米²)10.9毫米/秒扫描后金相组织(隐晶马氏体+合金碳化物)×450

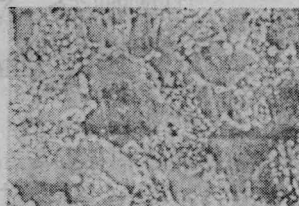


图9 T45基体金相组织(珠光体+铁素体)×1,000

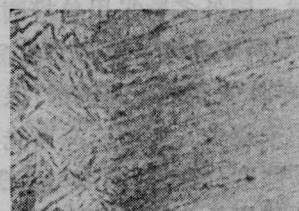


图10 T45硬化层金相组织(白亮层+针状马氏体)×1,000

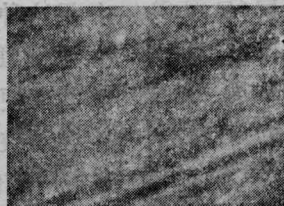


图11 T45白亮层(划痕是制样品时造成的)×10,000

其硬化层表面出现超精细结构(白亮层),如图11所示该种白亮层放大到一万倍仍未看到晶界。

(b) 对过渡层深浅的影响。过渡层与激光工艺参数及材料成分有关,如表1所示。当材料成分和功率密度相同时,过渡层的深度随扫描速度的增加而减小,反之随功率密度的增加而增加。实验还表明钢中含碳或合金元素越多,过渡层越浅。因为这些元素来不

表 1

材 料	激光处理工艺参数			过渡层深度* (毫米)
	功 率 (瓦)	功率密度 (瓦/厘米 ²) × 10 ³	扫描速度 (毫米/秒)	
T45	1200	3.4	14.7	0.016
T45	1200	3.4	7.9	0.064
T45	700	9.3	14.9	0.032
GCr15	1200	3.4	10.9	0.002

* 自5%马氏体至基体的深度

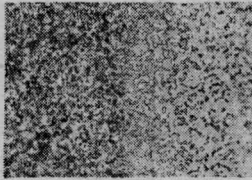


图12 T45经1200瓦(3.4×10³瓦/厘米²) 14.7毫米/秒扫描后的过渡层×450

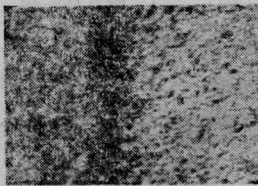


图13 T10经1200瓦、10.9毫米/秒扫描后的过渡层×450

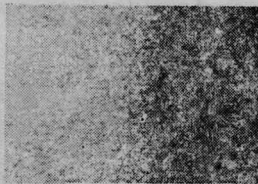


图14 GCr15经1200瓦、10.9毫米/秒扫描后的过渡层×450

及扩散和溶解(见图12、13、14)。

(2) 对硬化层性能的影响。由于激光处理时加热及冷却速度相当快,在金属表层瞬间允许过热。因此一般激光相变处理后其硬度值比普通热处理高。其硬度变化规律与激光工艺参数有直接关系与材料成分无关,只是在数值上有所差异。图15表明在不同扫描速度下随功率密度变化其表面硬度有一个极大值,随着扫描速度的增大,最大值也增大。图16表明当扫描速度相同时,硬化层深度随功率密度增加而增加。当功率密度足够大,进入熔化区。图17表明硬化层宽度随功率密度增加而增加,随扫描速度增加而减少。

(3) 对工件厚度的影响。由于激光淬火冷却是靠金属的热扩散和热传导而实现的,

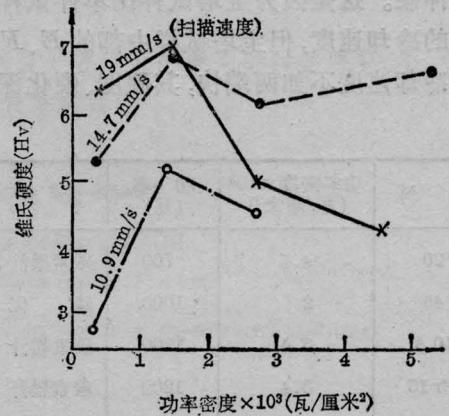


图15 T45钢表面硬度与扫描速度和激光功率密度的关系

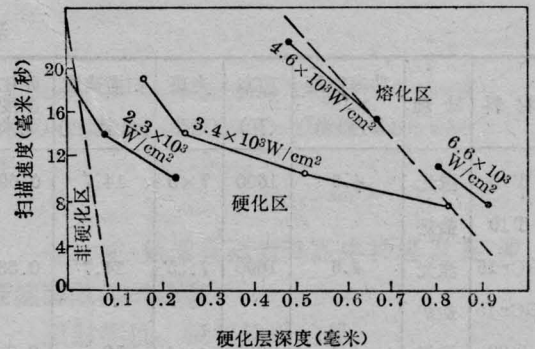


图16 T45钢硬化层深度与扫描速度和激光功率密度的关系

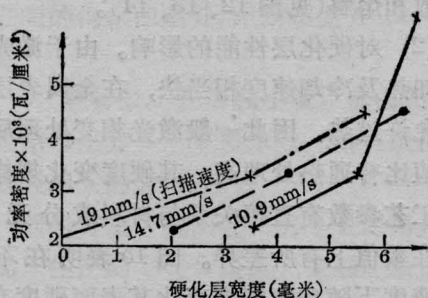


图 17 T45 钢硬化层宽度与扫描速度和激光功率密度的关系

当加热速度较慢, 工件又比较薄时, 工件几乎被整体加热。这时即使表面能够奥氏体化, 由于冷却速度小于临界冷却速度, 奥氏体被分解成珠光体。如图 18 中的 A 点(2 毫米单件试样)没有淬硬; 而用同一工艺参数处理宝塔试样, 其中 2 毫米厚的部分(图 18 中 D 点)却能淬硬。这是因为宝塔试样比单件试样有更大的冷却速度, 但宝塔试样中部的 E、F 点由于冷却速度不如两端快, 其硬度、硬化深度

及宽度均比两端小。由此可见, 工件越厚越有利热的扩散和传导, 在同样加热速度下其冷却速度越快, 越容易得到全部马氏体组织, 当工件很薄必须提高功率密度或扫描速度才能获得硬化组织。

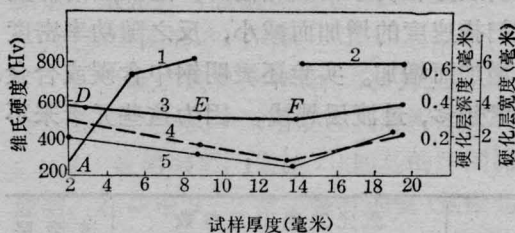


图 18 T45 钢表面硬度、硬化层深度和宽度与工件厚度的关系

1—1000 瓦 (2×10^3 瓦/厘米²), 14.7 毫米/秒镀镍单件试样硬度; 2—工艺同 1, 宝塔试样硬度值; 3—镀镍+碳化钨, 其它工艺同 1, 宝塔试样硬度; 4—工艺同 1, 硬化层的宽度; 5—硬化层深度

4. 推荐六种常用典型材料的激光相变硬化工艺, 详见表 2。

表 2

材 料	功率密度 $\times 10^3$ (瓦/厘米 ²)	功 率 (瓦)	涂 料	扫描速度 (毫米/秒)	硬化深度 (毫米)	硬 度 Hv	金 相 组 织
T20	4.4	700	碳素墨汁	19	0.3	476.8	板条马氏体+少量针状马氏体
T45	2	1000	磷 化	14.7	0.45	770.8	细针马氏体
T10 A	3.4	1200	碳素墨汁	10.9	0.38	926	隐晶马氏体
GCr15	3.4	1200	碳素墨汁	19	0.45	941	隐晶马氏体
33CrNiMoA	2	1000	石 墨	14.7	0.29	617.5	隐晶马氏体+合金碳化物
灰 铸 铁	2	1000	碳素墨汁	14.7	0.29	678	片状石墨+隐晶马氏体+针状马氏体

表 3

材 料	处 理	功率密度 $\times 10^3$ (瓦/厘米 ²)	功 率 (瓦)	光斑 (毫米)	扫描速度 (毫米/秒)	硬化深度 (毫米)	扫描宽度 (毫米)	涂 料	硬 度		导 轨 尺 寸 (毫米)	变 形 量 (毫米)	周 期 (秒)
									Hv	Rc			
T10	激光	4.6	1600	7×5	14.7	0.69	6.7	碳素墨汁	941.5	67.5	200×18×14	0.016	13.6
T10	盐炉									65	同 上	0.235	900
GCr15	激光	4.6	1600	7×5	14.7	0.53	7	碳素墨汁	877.3	65.6	同 上	0.068	13.6
GCr15	盐炉									62.5	同 上	0.134	900
T20	激光	4.4	700	4×4	19	0.3	4	碳素墨汁	426.8	44.7	240×18×12	0.052	12.6
T20	激光	8.1	1300	4×4	14.7	0.4	4	炭化钨	426.3	44.3	同 上	0.082	12.6

5. 激光硬化 V 型导轨

V 型导轨是光学仪器中常见的零件之一。用普通热处理方法处理,周期长、变形大。我们用激光分别处理了三种材料的 V 型导轨面,效果良好,见表 3。

三、结 论

(1) 激光功率密度与作用时间的关系,随着材料特性及表面涂层对激光吸收能力的不同而变化。

(2) 用方形多模散焦光束单程扫描,表面不易出现局部过热、过烧甚至熔化现象,而且硬化层深度均匀。用该光束重迭多程扫描,可得到大面积深度较均匀的硬化层。

(3) 激光工艺参数对硬化层组织、深度、宽度及其性能影响很大,而且有一定变化规律。根据科研生产的需要,可通过控制功率

密度及扫描速度使马氏体细化,甚至得到超晶细组织以利提高耐磨、耐蚀性能。

(4) 硬化层硬度变化规律与激光工艺参数有直接关系与材料成分无关。

(5) 工件厚度对淬硬性有影响。当工件很薄,必须同时提高功率密度和扫描速度,才能获得硬化组织。

(6) 根据六种材料及典型零件实验结果,建议在 HJ-1 型 CO₂ 激光器上进行小批量试投产(相变硬化)。

参 考 文 献

- [1] 王哲恩等;《激光》,1980, 7, No. 7, 1.
- [2] H. S. Carslaw, C. Jager; *Conduction of Heat in Solids* Clarendon Press, 1959.
- [3] Edward M. Breinan *et al.*; *Physics Today*, 1976, 29, No. 11, 44.
- [4] S. L. Engel; *American Machinist*, 1976, No. 5, 107~111.