

文章编号: 1001-3806(2002)06-0446-04

一种激光复合处理工艺的可行性分析

胡金锁¹ 李治源¹ 万华² 王莹¹

(¹军械工程学院, 石家庄, 050003) (²空军后勤学院, 徐州, 221000)

摘要: 采用渗硼+激光处理的复合处理工艺,使工件表层得到共晶型硼化物以期降低渗硼层脆性,提高其耐磨性。为进一步探讨这种工艺的可行性,进行了磨粒磨损试验。结果表明,该复合工艺能较大地提高工件的使用寿命。

关键词: 激光处理;共晶化;磨粒磨损;可行性

中图分类号: TG142.41;TG156.99 **文献标识码:** A

Feasibility analysis of a compound laser treating technique

Hu Jinsuo¹, Li Zhiyuan¹, Wan Hua², Wang Ying¹

(¹ Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, 050003) (² Logistic College of Air Force, Xuzhou, 221000)

Abstract: The process of solid boronizing and laser surface treatment is applied to get boron eutectic layer to lower sample's crisp property and improve its wearing quality. To further discuss the technological feasibility, an abrasive wear experiment has been launched to prove it. Results show that this kind of compound processing technique can greatly prolong the life span of the workpiece.

Key words: laser treatment; eutecticizing; grind wear; feasibility

引言

由于铁的硼化物有很高的硬度和耐磨性,见图 1,因此,在表面处理工艺中得到广泛的应用。然而研究成果表明^[1~3],由相变反应扩散形成的硼化物中的

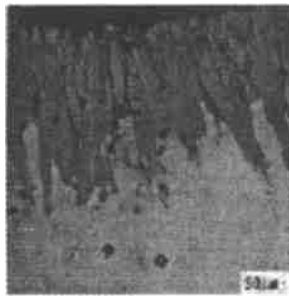


Fig. 1 Microstructure of original sample

FeB, Fe₂B 相属于金属间化合物,其本身具脆性大和易脱落的特点。因此,如何在保持渗硼层高硬度、高耐磨性的同时,减弱其脆性,是进一步发展渗硼技术急待解决的问题。将激光表面处理与其它传统处理技术结合起来进行复合强化,集中了两者的优点,应用到生产中可产生良好的效果。

1 试验方案及参数

1.1 试样制备

试验试样采用 45# 钢。为细化晶粒,将 45# 钢

加热到 860℃进行正火。对试样编号后进行固体渗硼,700℃装箱,900℃保温 2.5h,水淬油冷,170℃低温回火 0.5h。测得硼化物层的平均硬度为 1523HV,组织为 FeB(少量)+Fe₂B。平均厚度约为 105μm。对磨试样选用 GCr15 轴承钢。首先球化退火,工艺过程为:800℃保温 4h,700℃保温 5h,然后炉冷,测得平均硬度为 198HB;制成试样后淬火,860℃保温 16min,油冷,170℃保温 1h 回火处理,测得的平均硬度为 63.5HRC。

激光热处理设备为 JRJ 型、高功率(2kW)、横流、连续激光处理机。为提高热转化效率,通过黑化处理来增强金属表面对激光的吸收能力(本文中采用磷化的方法)。以扫描速度 v 和功率 P 作变量采用正交分析的方法来获得理想的组织结构。对试样进行多道扫描,道间距~0.2mm。当 $v=750\text{mm}/\text{min}$, $P=1150\text{W}$,光斑直径为 2.5mm 时,得到完全共晶化的硼化物组织(尽管部分可能是伪共晶)。

1.2 试样观察

为克服渗硼层硬、脆给手工制样带来的困难,并保证试样的真实性与再现性,试验采用 Q-100 型自动金相试样切割机切割,试样尺寸 10mm×8mm×10mm。选用 DMP-3A 型自动金相试样磨抛机进行磨制和抛光。用 3P 试剂浸蚀,经过多次试验,浸蚀

作者简介:胡金锁,男,1971 年出生。博士研究生。从事电磁发射及表面工程研究。

收稿日期:2001-12-27;收到修改稿日期:2002-03-15

温度和时间以 60℃, 1.5min 为最佳。在 71 型显微硬度仪上测定显微硬度, 载荷 100g, 加载时间 15s。

将试样放在显微镜下观察, 如图 2、图 3 所示。硼化物形貌在共晶转变不同的区域内分别有枝晶状、点状、块状、长条状、串状、菜花状等多种形貌, 渗层厚度由



Fig. 2 Microstructure after laser treatment

原来的 105μm 增加到 155μm, 渗硼层硬度降到 1200HV 左右。这主要是由激光作用下的温度场和熔池中各点的凝固条件不同及基体的物理特征等因素造成的。其中有的可能是由于相同的晶粒因为金相取向的不同而呈现出不同的组织形貌。上述结果表明, 渗硼层激光改性过程有特殊的作用机理。



Fig. 3 Microstructure after laser treatment with SEM

程有特殊的作用机理。

1.3 激光工艺参数的理论分析及验证

通过试验, 优选出合适的工艺参数。下面运用数学的方法来分析在此工艺条件下能否达到共晶化的温度。波长为 10.6μm 的 CO₂ 激光对金属的穿透深度很小, 大约为 10nm, 因此, 可认为金属材料吸收的光能向热能转变是瞬间发生的。在这个瞬间, 热能仅仅局限在材料的激光照射区。随后通过热传导, 能量由表面的高温区向心部的低温区扩散, 从而形成一个温度场。正是由于这个温度场的作用导致了材料组织的变化。故激光热处理的效果可以通过热传导分析来计算。假设渗硼层为各向同性的均质材料, 三维热传导偏微分方程的一般形式为^[4, 5]:

$$\rho c (\partial T / \partial t) = \partial (K \times \partial T / \partial x) / \partial x + \partial (K \times \partial T / \partial y) / \partial y + \partial (K \times \partial T / \partial z) / \partial z + H(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度, c 为比热容, T 为温度, t 时间, K 为材料的导热系数, H 为材料单位时间单位体积的发热量。在激光处理中, 不考虑材料内部的发热量(例如相变潜热), 而激光是表面热源, 按边界条件处理, 其边界条件如下。

当 $t = 0$ 时, 试样具有均匀的温度 $T_0 = 298K$,

即: $T(x, y, z, t) = 0$ 。在试样的周边, 能量通过辐射与对流进行交换。

对连续的激光照射并且假定工件为无限厚的情况下, 问题可以简化为一维, 上述方程可简化为:

$$T[z, t] = (2\alpha K) (kT_0)^{1/2} \text{erfc}[z / (kt)^{1/2}] \text{ 或} \\ T[z, t] = (2\alpha P_{\text{tot}} / KA) (kT_0)^{1/2} \text{erfc}[z / (kt)^{1/2}] \quad (2)$$

式中, z 为距表面距离, α 为吸收系数, A 为光斑直径, k 为材料的热扩散系数, P_{tot} 为入射激光功率。材料热物理参数的选定是参照 45# 钢的数据, $K = 35J/msK$, $k = 6.9 \times 10^{-6}/ms$, 磷化 = 0.9, $A = 1.56 \times 10^{-6}m^2$, $P_{\text{tot}} = 1150W$, erfc 为补余误差函数。

由于渗硼层厚度在 105μm, 取 $z = 160\mu m$, 即计算距表面 0.16mm 处的材料温度(光斑处), 把以上数据代入可得: $T = 1180^\circ C$ 。

由铁硼二元相图可知, Fe-Fe₂B 的共晶温度是 1149℃, 共晶成分 3.8%B。当含硼量为 0.02% 的奥氏体与含硼量为 8.83% 的 Fe₂B 一起加热到高于共晶温度便会熔融成含硼量为 3.8% 的液相, 此液体冷却得到 $\alpha + Fe_2B$ 的共晶组织。从计算的结果看出, 这个温度要大于硼共晶温度 1149℃, 使得共晶反应在理论上能够进行。

2 相变过程分析

实际上, 在以激光为热源的不平衡凝固条件下, 成分在结晶点附近的合金也能获得全部的共晶组织。渗硼层激光处理以后, 其成分、组织形态、分布状况、渗层厚度、硬度都发生了明显的变化。

在 Fe-B-C 三元相图上分别存在 $L \leftrightarrow \gamma + Fe_2B$, $L \leftrightarrow Fe_2B + Fe_3C$, $L \leftrightarrow \gamma + Fe_3C$ 3 个二元共晶反应。但从给出的 3 条沟线交汇点处的箭头指向分析, 却是包共晶反应(限于篇幅相图略)。这是因为 Fe₃C 具有较大的溶硼能力, 其中 80% 的碳原子可被硼原子置换而形成 Fe₃(C, B), 致使溶有硼的 Fe₃(B) 单相深入到相的内部。当二元共晶反应 $L \leftrightarrow Fe_2B + Fe_3(C, B)$ 穿越相区时, 即转化为 $L + Fe_2B + Fe_2B \leftrightarrow \gamma + Fe_3(C, B)$ 的包晶反应, 所以在包共晶反应之间有两个三相平衡区: 一个是二元共晶反应 $L \leftrightarrow \gamma + Fe_2B$, 一个是包晶反应 $L + Fe_2B \leftrightarrow \gamma + Fe_3(C, B)$ 。当温度合适时, 发生包共晶四相平衡: $L + Fe_2B \leftrightarrow \gamma + Fe_3(C, B)$ 。在包共晶反应后, 又形成了两个三相平衡区: $\gamma + Fe_2B + Fe_3(C, B)$ 和 $L + Fe_3(C, B) + \gamma$ 。当位于 $L + Fe_3(C, B) + \gamma$ 区的合金成分随温度下降, 包

共晶反应后多余的液体按 $L \leftrightarrow \gamma + Fe_3(C, B)$ 进行, 至 $1100^\circ C$ 时液体全部消失。必须指出: 由于激光加热速度快, 温度梯度大, 熔池特性复杂, 加热和冷却都属于非平衡态, 因此合金成分将发生很大的偏析, 包共晶反应进行不可能完全, 出现共晶反应区范围扩大, 共晶组织的数量、形态发生变化等现象。这也正是渗硼层激光处理后其形态多种多样的原因。

含碳量在 $0.3\% \sim 1.0\%$ 的钢铁渗硼层, 在硼化物与基体过渡的相界面发生 $Fe_2B + \gamma$ 共晶反应, 然后再进行 $L + Fe_2B \leftrightarrow \gamma + Fe_3(C, B)$ 的包共晶反应生成 $Fe_3(C, B) + \gamma$ 型共晶组织, 还有可能直接发生 $L \leftrightarrow Fe_3(C, B)$ 至 $1100^\circ C$ 该共晶反应结束。随着温度的进一步提高, 液相成分范围扩大, 在激光加热条件下, 由于液相的两个界面间存在着浓度差, 会使液相成分较大地偏离共晶成分而结晶出亚共晶组织或过共晶组织。从理论上讲, 平衡冷凝条件下的共晶组织应该是 $\gamma + Fe_3(C, B)$ 共晶, 但是激光加热冷凝过程是不平衡过程, 包共晶反应结束后, 来不及扩散转变的 Fe_2B 相被保存下来。激光加热的能量绝大部分储存在材料的表层中。这些热量主要靠材料自身冷却。由于基体的厚度要远远大于渗硼层的厚度, 且加热时间短, 因而冷却速度极快, 使得晶核未能进一步长大就凝固下来, 故得到的晶粒非常细小。与此同时, 靠近过渡区的基体热影响区发生相变。由于冷却速度极快, 这部分基体获得针状马氏体组织, 如图 2 所示。马氏体组织对共晶层起到了较好的支撑作用, 对提高工件的耐磨性大有帮助。

3 磨损试验及可行性检验

3.1 磨粒磨损试验设计

试验设备用 MM-200 型磨损试验机。上下试样在试验前后用酒精清洗干净, 保证试样表面无污物。称重使用克感量为 $0.1mg$ 的分析天平。用 L 表示原始渗硼试样, L_m 表示经过激光处理的试样。

3.2 试验过程及结果

试验过程中, 用漏斗加入 200 目的细沙粒。预磨 1h 开始记录数据。磨粒磨损比滑动摩擦的粘着磨损剧烈得多, 所用时间要短。两试样均是在压力为 $490N$ 、转速 $200 r/min$ 、每隔 $10 min$ 称重一次的状态下进行的。根据

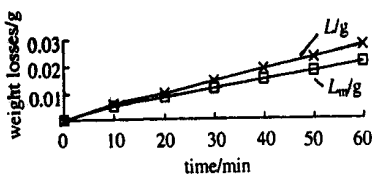


Fig. 4 Wear curves

试验数据, 得出失重量随时间变化的关系, 如图 4 所示。从图中可以看出, 经激光共晶化处理的试样有着较好的耐磨性。下面来分析该试样在磨粒磨损中的内在机制。表 1 列出了 L 、 L_m 两试样的绝对耐磨性分别为 $38h/g$ 、 $51h/g$ 。所谓耐磨性是指在一定的工况条件下材料抵抗磨损的特性。它分为绝对耐磨性和相对耐磨性两种。绝对耐磨性用磨损率的倒数来表示。相对耐磨性是指两材料在相同的工况条件下磨损量的比值。本试验采用绝对耐磨性作为评定标准, 直接、可靠。选取各试样稳定磨损阶段 5 个磨损率的平均值并取倒数, 就得到各试样的绝对耐磨性。可以看出, 后者的耐磨性明显好于前者。那么, L_m 比 L 寿命能提高多少, 可以通过下式计算得出: $L_{tg} = 51/38 \times (1 + 45/105) = 1.92$ 倍。其中 $45\mu m$ 为激光共晶化后渗层的增厚量, $105\mu m$ 为原渗硼层厚度, 用两试样的绝对耐磨性比值 $51/38$ 粗略的表示二者的寿命比。可以看出, 寿命提高了近 1 倍。

Table 1 Weight losses and utter abrasive resistance of samples

samples	weight losses per 10 mins in steady abrasive stage					mean value	utter abrasive resistance
$L/10^{-3}g$	4.1	4.5	4.3	4.3	4.6	4.36	38
$L_m/10^{-3}g$	3.2	3.4	3.2	3.0	3.5	3.26	51

3.3 结果分析

磨粒磨损是指物体表面与磨料相互摩擦而引起表面材料损失的现象。试验使用的磨料为 SiO_2 , 粒度为 200 目, 平均硬度为 $1100HV$ 。下面从磨粒磨损机理的角度出发, 分析试验结果发生的原因。

在磨粒压入和擦伤金属表面时, 压痕处的金属要产生变形。当压入深度达到临界深度时, 伴随着沙粒压入而产生的拉伸应力足以使得渗层表面经过若干轮次后产生裂纹。裂纹有两种主要类型, 垂直于表面的中间裂纹和从压痕底部向表面扩展的横向裂纹, 一旦横向裂纹与垂直表面的中间裂纹相交或者扩展到表面, 材料微粒便会发生脱落, 形成磨屑。渗硼层经过激光处理后, 其硬度依然很高, 仍然属于脆性材料, 原始渗硼层更是这样。应用 Wishow 已经建立的脆性材料磨损模型, 给出单位滑动距离、单位面积上体积磨损的上限 V :

$$V = N W^{5/4} / H^{1/2} K_{1c}^{3/4} \quad (3)$$

式中, $N = K_5 \times d^{1/2}$ 。 W 为载荷, K_{1c} 为材料的断裂韧性, 也称应力强度因子, H 为材料的硬度, N 为单位面积上的磨粒数, d 为磨粒的平均直径, K_5 为取

决于磨料的形状和分布系数。

在三体磨粒磨损下,磨粒 90% 的时间处于滚动,只有 10% 的时间在滑动。因此可以推断:表面受随机性的疲劳滚压,是使此机理及公式成立的主要原因。

由上面的公式可看出,磨损量直接与材料的硬度和断裂韧性有关。在定量的公式中定性分析两表面的磨损量。对于 H 和 K_{1c} 两个参数,其中一者增长,必定将导致另外一者的下降,反之亦然。但两者的指数值分别为 $1/2$ 和 $3/4$,也就是断裂强度因子的增长速度要比硬度的增长速度快。由公式知,磨损体积与二者成反比,从而使得经过激光处理的试样耐磨性比未处理的耐磨性提高了 92%。硬度反应了材料抵抗磨料压入的能力,从表面上看,材料越硬越耐磨,然而,根据以上分析磨粒磨损断裂磨损机理,它还不能完全决定磨损。原因是:硬度不能说明材料裂纹产生及扩展的敏感程度。硬而脆的 Fe_2B , FeB 对裂纹的产生及扩展较敏感,在连续的滚压下产生裂纹导致剥落。用激光处理的工艺降低了材料硬度的同时,提高了渗层的断裂韧性。实践表明,材料的硬度高而断裂韧性低,或者材料的断裂韧性高而硬度低,耐磨性都差。只有当二者配合较佳时,耐磨性最好。基于这种原理,采用激光热处理,使渗层转变为硬度较低的、韧性较好的共晶体,可提高工件耐磨粒磨损的能力。

图 5、图 6 显示了试样磨损的显微组织 SEM 照片。从两者的磨损形貌看,都属于断裂机制控制下的磨损。二试样比较, L 试样表面脱落严重,深度及面积都较大,如图 5 所示。而 L_m 试样由于断裂韧性好,其磨损形貌更多地表现为表面划伤、犁沟、翻边等,如图 6 所示。从形貌上看, L 试样的破坏更严重些,即耐磨粒磨损能力较差。另外,经过激光处理后,基体



Fig. 5 SEM morphology of sample L after wearing experiment 500 \times

获得针片状马氏体(见图 2),对渗层起到强有力的支撑作用,这也是其耐磨性提高的一个原因。



Fig. 6 SEM morphology of sample L_m after wearing experiment 500 \times

在以滚压、凿削等为主的磨粒磨损工况下,采用激光处理的方法无疑是有效和可行的。经激光处理后,渗层厚度增加,韧性也得到改善,耐磨性随之提高。可以应用到两体磨粒磨损的犁铧、泥浆泵叶轮、榨油机榨螺等,以及三体磨损的粉碎机的颚板、轧碎机的滚筒等工件;军事上可应用到电磁轨道炮的导轨强化上,其烧蚀问题一直困扰着电炮的实用。由实验结果可以推断,这一复合热处理工艺有着良好的应用前景。

这一复合热处理工艺有着良好的应用前景。

4 结 论

(1) 厚约 $105\mu\text{m}$ 的渗硼层发生完全共晶化转变的激光工艺参数为: $P = 1150\text{W}$, $v = 750\text{mm/min}$, $D = 2.5\text{mm}$ 。通过三维热传导方程验证了工艺参数的可行性。(2) 激光共晶化处理在极短的时间内得到厚度为 $150\mu\text{m}$ 左右的枝晶状共晶层,组织为 $\alpha + Fe_3(C, B) + Fe_2B + FeB$ (极少量),显微硬度下降,脆性降低。(3) 磨损试验结果表明: $45^\#$ 钢采用渗硼+激光表面处理技术,获得表层共晶化组织,使表层得到适当的硬度和韧性的配合,可提高其耐磨性 92%。将该工艺应用到以磨粒磨损为主要机制的工件上,可取得较好的经济效益和社会效益,具有良好的实用前景。

参 考 文 献

- [1] 陈 概, 马天弛. 应用激光, 1997(5): 197~ 200.
- [2] 谭继福, 冯志刚, 韩志范. 重庆大学学报, 1993(6): 105~ 109.
- [3] 胡金锁, 郝敬敏, 张玉军 *et al.* 兵器材料科学与工程, 2001(6): 37~ 40.
- [4] 贡 海, 高冠玖. 机械工程材料, 1996(2): 51~ 53.
- [5] Levcovici A M, Levcovici D T, Munteanu V *et al.* J Mater Engng & Performance, 2000, 9(5): 536~ 540.