

特定强度分布脉冲激光表面强化实验

孙培培¹, 虞钢¹, 王恒海², 何秀丽¹, 李少霞¹

(1. 中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190;
2. 中国电子科技集团第十四研究所, 南京 210039)

摘要: 激光硬化层均匀性受光束空间强度分布和作用时间的影响。采用二元光学变换技术得到光束中心线强度比值为 1:2:3、3:2:1 和 1:1:1 的 5×5 点阵光斑。研究这三种强度分布光斑对 Q235 钢脉冲激光硬化后表面形貌、硬化层形状、硬度及耐磨性的影响。结果表明, 激光光斑的空间强度分布对 Q235 钢硬化层均匀性影响很大, 1:2:3 强度分布光斑作用下的材料表面形貌、硬化层均匀性、硬度均匀度均优于 1:1:1 强度分布光斑。

关键词: 脉冲激光; 光束变换; 激光强化; 硬化层均匀性

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2011)02-0106-06

Surface hardening of steel by pulse laser with proportional intensity distribution spots

SUN Pei-pei¹, YU Gang¹, WANG Heng-hai², HE Xiu-li¹, LI Shao-xia¹

(1. Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. The 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

Abstract: The uniformity of hardened layer is affected by dimensional intensity distribution and time of laser spots. Pulsed laser spots with 5×5 two dimensional array which have intensity proportions of 1:2:3, 3:2:1 and 1:1:1 intensity distribution by optical transformation was used to harden Q235 steel. The effects of laser treatment on surface morphology, hardened layer shape, distribution of hardness and wear resistance of the Q235 steel were studied. The results show that the dimensional intensity distribution of laser spot affects uniformity of hardened layer to a large extent. The surface morphology, uniformity of hardened layer, uniformity of hardness and wear resistance of Q235 steel laser-treated by the array with intensity proportion of 1:2:3 are all better than that by the array with intensity proportion of 1:1:1.

Key words: pulse laser; beam transformation; laser transformation hardening; uniformity of hardened layer

表面相变硬化技术自 20 世纪 70 年代问世以来, 在工业应用方面取得了重要的成就^[1]。传统的激光表面硬化技术是利用直接来自激光器或通过简单聚焦的光束进行连续扫描的相变处理方法, 光束多为高斯或准高斯分布, 材料经热处理后相变硬化带形状为中央较深的月牙形^[2], 与一般期望获得的均匀硬化层有较大差距。其原因在于光斑中心处热量主要向纵深方向传递, 因而等温线涉及的深度较深, 即硬化层较厚; 而光斑边缘处热量向两边传递更剧烈, 造成

等温线涉及的深度逐渐变浅, 即硬化层越来越薄。改变光束几何形状和强度分布是解决以上问题有效方法之一^[3-4], 文献[2]指出期望获得一个均匀的淬火带, 事实上需要的是在作用光斑边缘有能量突起的光束, 并利用矩形光斑变换装置得到马鞍形分布光束。文献[5]通过改变光斑形状的方法, 将矩形光斑的两条直边改成曲边, 从理论上分析了这种曲边矩形光斑得到均匀硬化带的可能性, 因为并没有设计出可产生曲边矩形光斑的实验设备, 没有给出实验结果。文献[6]也给出基于边缘能量补偿的环形光斑和线性光斑温度场计算和模拟, 同样没有给出实验结果。以上光束变换研究均是基于连续激光扫描, 对于某些表面形状复杂的工件, 需要用到脉冲激光进行表面硬化。本实验室在通过二元光学变换呈点阵分布的脉冲激光束表面硬化方面已做过许多工作^[7-9], 但以往采用的均是 1:1:1 强度分布点阵光斑, 得到的硬化层均匀

收稿日期: 2010-03-09; 修订日期: 2010-08-23

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10832011)

作者简介: 孙培培(1986—), 女, 博士研究生, 从事激光与材料相互作用和激光制造工艺力学方面研究, E-mail: sunpeipei@imech. ac. cn。

通讯作者: 虞钢(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事一般力学与力学基础及高密度激光先进制造工艺力学方面研究, 电话: 010-82544250, E-mail: gyu@imech. ac. cn。

性不能达到使用要求。

本文针对上述问题,设计特定强度分布光斑并应用于实验研究中,给出硬化层几何均匀性和硬度均匀度的量化定义,以期获得特定光强分布对硬化层均匀性的影响关系。采用二元光学变换技术得到中心线强度比值为 1:2:3、3:2:1 和 1:1:1 的 5×5 点阵光斑,所谓中心线强度比值,即沿着所有过最中心小光斑的直线上,从中心到边缘各小光斑的强度比值。对 1:1:1 强度分布光斑、1:2:3 强度分布光斑和 3:2:1 强度分布光斑^[10]脉冲激光作用下 Q235 钢材料性能进行研究,给出脉冲激光作用后的材料表面形貌、硬化层均匀性、硬度均匀度及耐磨性的表征。

1 实验方法和均匀度含义

1.1 光斑强度分布

脉冲激光束圆光斑经过二元光学变换后获得 1:

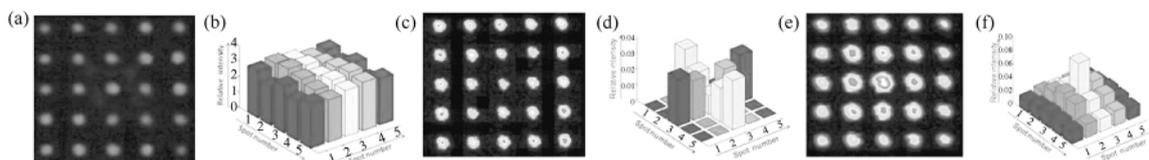


图 1 1:1:1、1:2:3 和 3:2:1 点阵光斑二维强度分布 (a)、(c)、(e) 及相对强度大小 (b)、(d)、(f)

Fig. 1 Two dimensional intensity distributions (a), (c), (e) and relative intensity value (b), (d) and (f) of 5×5 array with intensity proportion of 1:1:1, 1:2:3 and 3:2:1

1.2 实验方法

试样材料为 Q235 钢,试块尺寸为 100 mm \times 50 mm \times 20 mm,化学成分如表 1 所示。

表 1 Q235 钢的化学成分 (wt%)

Table 1 Composition of Q235 steel (wt%)

C	Mn	Si	S	P	Fe
0.14—0.22	0.30—0.65	0.30	0.050	0.045	Bal.

实验设备采用额定输出功率 1 kW 的 Nd:YAG 固体激光器,光束模式为多模,聚焦镜头焦距 150 mm。分别采用本实验室自主研制的均匀光强分布、1:2:3 光强分布和 3:2:1 光强分布的 5×5 点阵光斑二元光学转换片进行单脉冲激光硬化实验。利用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM) 对处理后的组织、硬化层深度进行观察。滑动磨损实验在 MHK500 型环块滑动磨损实验机上进行,标准试样尺寸为 20 mm \times 9.5 mm \times 9.5 mm,对磨环材料为 GCr15 (硬度为 64 HRC,表面粗糙度 $R_a < 0.63 \mu\text{m}$),试验采用载荷为 2000 N,转速为 40 r/min,油磨 2 h。试样在磨损

1:1 强度分布的 5×5 点阵光斑,如图 1 (a) 所示为 1:1:1 点阵光斑 (中心线强度比值) 强度二维分布图,图 1 (b) 为其相对强度大小示意图,显然 5×5 点阵光斑中的 25 个小光斑的强度是相等的。如图 1 (c) 所示为 1:2:3 点阵光斑 (中心线强度比值) 强度二维分布图,图 1 (d) 为其相对强度大小示意图,1:2:3 为中心线强度比值,即沿着所有过最中心小光斑的直线上,从中心到边缘各小光斑的强度比值为 1:2:3。即若假设最中心处的小光斑的强度为 1,则围绕中心小光斑的 8 个小光斑强度为 2,最外圈小光斑强度为 3。如图 1 (e) 所示为 3:2:1 点阵光斑 (中心线强度比值) 强度二维分布图,图 1 (f) 为其相对强度大小示意图,3:2:1 为中心线强度比值,即沿着所有过最中心小光斑的直线上,从中心到边缘各小光斑的强度比值为 3:2:1。即若假设最中心处的小光斑的强度为 3,则围绕中心小光斑的 8 个小光斑强度为 2,最外圈小光斑强度为 1。

实验前后分别用超声波清洗 40 min,试样质量在精度为 0.01 mg 的电子天平上测定。

采用 HXD1000 半自动显微硬度计进行显微硬度测试,载荷为 50 g,加载时间 15 s。由于不同光强分布的脉冲点阵激光硬化后硬化层形貌的均匀性存在差异,因此,对硬化层横截面的硬度测试,采用在硬化层的中心 (即光斑中心) 处和离硬化层中心 $D/3$ (D 为硬化层宽度) 处沿硬化层深度方向测试两条硬度曲线的方法,如图 2 所示。第二条硬度测试曲线之所以取在离硬化层中心 $D/3$ 处其原因有二:其一在于第一条硬度测试曲线取在了光斑中心处,为了综合反映硬度情况,第二条硬度测试曲线最好取在两个小光斑之间,这就意味着只有左起第一二列小光斑之间和第三四列小光斑之间两个位置可取;其二在于下文 2.2.2 所定义的第一类硬度均匀度,为了得到更靠近边缘位置硬度均匀度,最终决定取在左起第一二列小光斑之间,即取整数离硬化层中心 $D/3$ 处。这种硬度测试方法既能反映不同光强分布的脉冲激光对硬化层形貌的影响,又能测得硬度随层深的变化。

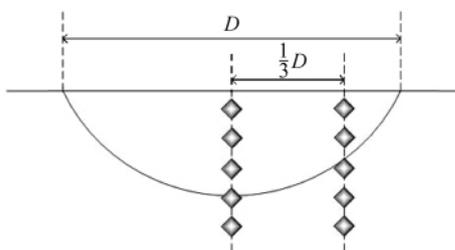


图2 显微硬度测试方法示意图

Fig. 2 Schematic illustration of measurement of microhardness

1.3 均匀度含义

1.3.1 几何均匀度

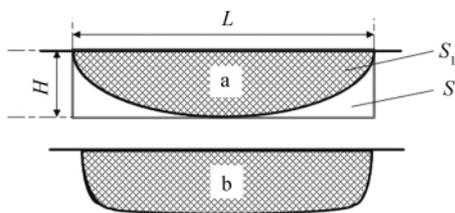


图3 两种不同的硬化层形貌

Fig. 3 Two different shapes of hardened layer

图3所示为两种不同的硬化层形貌,可看出硬化层b趋近于矩形而硬化层a为月牙形,目测硬化层b的几何均匀性要优于硬化层a。目前,对于硬化层均匀性还没有统一的定量的描述,因此,作者对硬化层的几何均匀性定义如下。

如图3(a)所示,用几何均匀度 R 来描述激光硬化层的均匀性,定义 R 为

$$R = \frac{S_1}{S} = \frac{S_1}{LH} \quad (1)$$

式中, S_1 表示硬化层的面积, L 表示硬化层表面的宽度, H 表示硬化层的深度, S 表示以硬化层宽度 L 和深度 H 为边长的矩形的面积。

硬化层几何均匀度 R 的物理意义为:表征硬化层几何均匀性的好坏。显然, R 越大表明硬化层的几何均匀性越好。

1.3.2 硬度均匀度

为了研究点阵光斑激光硬化层中硬度的均匀化程度,特给出两种硬度均匀度的数学表示。

第一类硬度均匀度:假设所要求的硬化层最低临界硬度为 H_c ,从硬化层表面中心(光斑中心)沿深度方向至达到临界硬度 H_c 的距离表示为 h_0 ,光斑边长(对于矩形)或直径(对于圆形)的长度为 D ,从硬化层表面离中心为 $D/3$ 处沿深度方向至达到临界硬度 H_c 的距离表示为 h_1 ,则第一类硬度均匀度可表示为

$$R_{H_1} = \frac{h_1}{h_0} \quad (2)$$

它表征了沿深度方向满足临界硬度以上的硬度值随硬化层长宽度方向的变化情况。

第二类硬度均匀度:假设硬化层某一区域内测定的 n 个硬度值为 $H_i (i=0, \dots, n)$,这 n 个硬度值的平均值为 \bar{H} ,此区域内硬度值标准差 \sqrt{S} 可表示为

$$\sqrt{S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (H_i - \bar{H})^2}{n}} \quad (3)$$

则第二类硬度均匀度可表示为

$$R_{H_2} = \frac{\sqrt{S}}{H} \quad (4)$$

式中, R_{H_2} 为第二类硬度均匀度,它表征了硬化层某一区域内硬度值的均匀化程度。

2 实验结果与讨论

2.1 激光强度分布对表面形貌的影响

1:1:1强度分布、1:2:3强度分布和3:2:1强度分布光斑激光硬化后的材料表面形貌见图4(a)、4(b)和4(c)。图中1:1:1光斑、1:2:3光斑和3:2:1光斑所用工艺参数为功率 $P=1000\text{ W}$,脉宽 $T=100\text{ ms}$ 。

可见在相同能量输入下,1:1:1强度分布光斑作用后边缘强化效果次于中心,1:2:3强度分布激光硬化后表面比较均匀平整。这正是由于激光与材料相互作用过程中,光斑中心处热量主要向纵深方向传递而光斑边缘处热量向两边传热更剧烈造成的,1:2:3强度分布光斑实际上相当于给出边沿能量补给,因此会得到相对均匀的表面形貌。这和文献[2]中提到的均匀淬火带需要作用光斑边沿有能量突起光束的观点是一致的。3:2:1强度分布光斑则恰恰相反,相当于减少边沿能量输入,增加中心能量输入,势必造成相同能量输入下中心熔化现象严重同时边沿强化力度却不足,对于追求材料表面粗糙度小、均匀性好的激光相变硬化显然不合适。因此以下只要比较1:1:1强度分布光斑和1:2:3强度分布光斑脉冲激光作用后材料硬化层形状、硬度及耐磨性,不再提及3:2:1强度分布光斑。

2.2 激光强度分布对硬化层形貌的影响

如图5(a)、5(b)、5(c)、5(d)所示为使用1:1:1强度分布光斑,光斑边长2 mm,功率1000 W,不同脉宽作用下硬化层沿层深方向的形貌,从图中可以看出,硬化层形貌均为明显月牙形。根据公式(1),求

得功率 1000 W 时,70 ~ 110 ms 脉宽范围内的硬化层几何均匀度变化不大,都处在 65% ~ 75% 之间。

如图 5(e)、5(f)、5(g)、5(h) 所示为使用 1:2:3 强度分布光斑,功率 1000 W,不同脉宽作用下硬化层

沿层深方向的形貌,从图中可以看出,硬化层形貌为接近于矩形的近似梯形。根据公式(1),求得功率 1000 W 时,120 ~ 180 ms 脉宽范围内的几何均匀度变化不大,都处在 75% ~ 86% 之间。

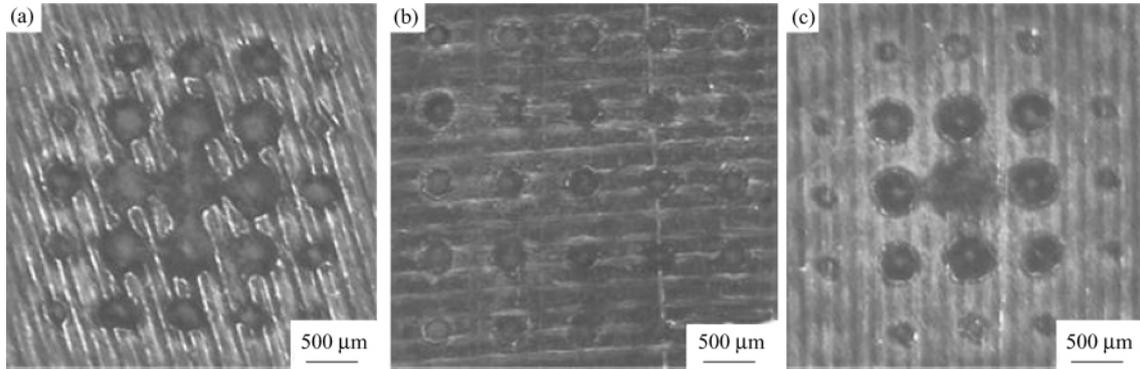


图 4 (a) 1:1:1 强度分布光斑、(b) 1:2:3 强度分布光斑和 (c) 3:2:1 强度分布光斑激光硬化表面形貌

Fig. 4 Surface morphology after laser hardening with array which have intensity proportions of 1:1:1 (a), 1:2:3 (b) and 3:2:1 (c)

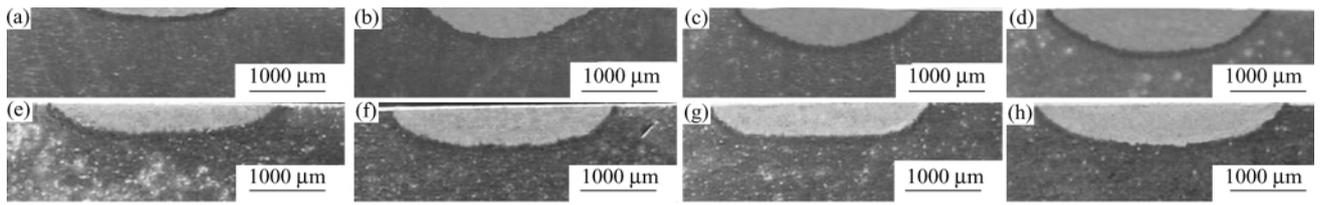


图 5 不同脉宽作用下 1:1:1 强度分布光斑激光硬化层形貌 (a)、(b)、(c)、(d) 以及 1:2:3 强度分布光斑激光硬化层形貌 (e)、(f)、(g)、(h)

Fig. 5 Shapes of laser hardened layer with different pulse time by array which has intensity proportion of 1:1:1 (a),(b),(c),(d) and 1:2:3 (e),(f),(g),(h)

可见,由于加强边沿能量补给,1:2:3 强度分布光斑作用下的硬化层几何均匀度明显优于 1:1:1 强度分布光斑,但硬化层形貌并不是理想的矩形,硬化层几何均匀度并没有达到 100%,可见强度分布并没有达到最佳比值。理论上讲,设计不同的光斑强度分布,使边缘能量输入和中心能量输入保持一个适当比值从而获得一个 100% 均匀的温度场是可以实现的,可见从均匀温度场反求出所需光斑强度分布不失为一个有效的获得均匀硬化层的方法,可以后续研究。但实验中,受实验环境、材料状态和工艺参数改变的影响,要得到一个完全均匀的硬化层并不容易。

2.3 激光强度分布对硬度的影响

如图 6(a) 所示为 1:1:1 强度分布的点阵光斑硬度曲线,图中曲线 1 为硬化层中心处沿层深的硬度曲线,曲线 2 为离中心 $D/3$ 处沿层深的硬度曲线。

可见,1:2:3 强度分布光斑激光硬化层的完全硬化区和不完全硬化区不存在明显界限。根据公式

(2),取最低临界硬度 H_c 为过渡区硬度下限为 200 HV0.05,可得第一类硬度均匀度,1:1:1 强度分布光斑为 74.8%,1:2:3 强度分布光斑为 100%;若取最低临界硬度 H_c 为硬化区硬度下限为 250 HV0.05,可得第一类硬度均匀度,1:1:1 强度分布光斑为 73.4%,1:2:3 非均匀强度光斑为 86.7%。由于第一类硬度均匀度实际上也是表征硬度值一定时点阵光斑宽度方向的能量分布均匀性,而 1:2:3 非均匀强度分布点阵光斑补偿了边缘能量,所以第一类硬度均匀度要优于 1:1:1 强度分布光斑。

对 1:1:1 强度分布以及 1:2:3 强度分布点阵光斑激光强化后材料表面沿中心一排光斑位置(如图 4 所示第三排小光斑从左至右)即横向进行了硬度测试,硬度曲线如图 7(a) 和图(b) 所示。

从图 7 看出,点阵光斑激光硬化层沿宽度方向硬度呈波浪形变化,这正是点阵光斑强化的特点。1:1:1 强度分布点阵光斑激光硬化层沿宽度方向硬度

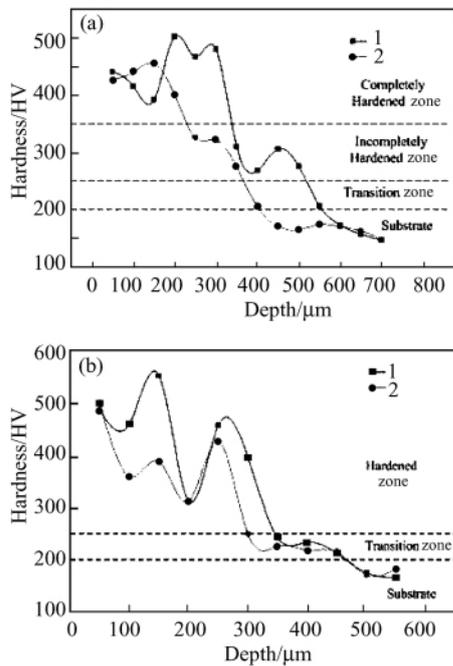


图 6 1:1:1强度分布光斑(a)及1:2:3强度分布光斑(b)沿层深方向硬度曲线

Fig.6 Hardness profiles along depth with array which has intensity proportion of 1:1:1 (a) and 1:2:3 (b)

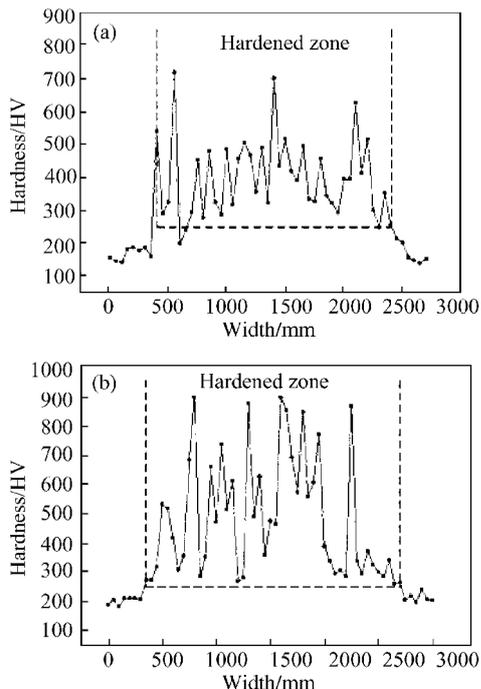


图 7 1:1:1强度分布光斑(a)及1:2:3强度分布光斑(b)沿横向硬度曲线

Fig.7 Hardness profiles along width with array which has intensity proportion of 1:1:1 (a) and 1:2:3 (b)

约 400 HV0.05, 根据公式(4), 其第二类硬度均匀度为 29.8%; 1:2:3强度分布点阵光斑激光硬化层沿宽度方向平均硬度约 483 HV0.05, 其第二类硬度均匀度为 42.2%。1:2:3强度分布和 1:1:1强度分布点阵光斑激光硬化后的这种波浪形分布的硬度值使得硬化层具有强韧结合的特点, 有利于提高表面耐磨性^[9]。

2.4 激光强度分布对耐磨性的影响

对上述脉冲激光硬化后的表面以及基体材料进行了磨损失重对比, 结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 在相同磨损条件下, Q235 钢基体材料的磨损量约为点阵光斑强化后的磨损量的 5 倍; 1:1:1强度分布光斑硬化后材料的磨损量与 1:2:3非均匀强度分布光斑强化后磨损量无明显差别。

表 2 不同强度分布光斑作用后磨损量

Table 2 Wear loss of array with different intensity proportions

Process parameter	Wear loss/g	
1:1:1	1000 W 80 ms	0.00031
	1000 W 90 ms	0.00024
	1000 W 100 ms	0.00040
1:2:3	1000 W 160 ms	0.00030
	1000 W 170 ms	0.00021
	1000 W 180 ms	0.00012
Substrate	—	0.00182
	—	0.00174

3 结论

1) 光斑的实际空间强度分布很大程度上影响了硬化层均匀性, 由于加强边沿能量输入, 采用 1:2:3 强度分布点阵光斑进行 Q235 钢脉冲激光表面硬化, 可得到相对 1:1:1 强度分布点阵光斑更为均匀的材料表面形貌、硬化层形状及硬度均匀度;

2) 点阵光斑特有的沿宽度方向硬度分布, 可大幅度的提高材料表面耐磨性;

3) 本文给出了 1:1:1、1:2:3 和 3:2:1 三种强度分布光斑作用结果, 但可以预见的是, 通过合理设计光强比值使边沿能量输入和中心能量输入控制在一个比较适当的范围内, 既使得硬化层均匀性优于现有结果又不至于导致中心层深过浅或边沿附近局部熔化是可以实现的。当然, 要想精确预测出工业要求的特定形状硬化层所需光强分布, 仅仅量化表达硬化层均匀性是远远不够的, 还需要量化表达涉及到激光与材料相互作用过程的一系列因素, 例如作用时间、材料热物性参数等。

参 考 文 献

- [1] Sandven O. Laser Surface Transformation Hardening , Metals Handbook (9th ed) [M]. ASM Metals Park , OH , 1981.
- [2] 李俊昌. 激光热处理优化控制研究 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1995:12.
- [3] Reed R C , Shen Z , Robinson J M , et al. Laser transformation hardening of steel: effects of beam mode , beam size , and composition [J]. Materials Science and Technology , 1999 , 15 (1) : 109 - 118.
- [4] Leung M K H , Man H C , Yu J K. Theoretical and experimental studies on laser transformation hardening of steel by customized beam [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer , 2007 , 50 : 4600 - 4606.
- [5] 何 芳 , 吴 钢 , 宋光明. 曲边矩形光斑激光淬火的理论研究 [J]. 天津工业大学学报 2003 22(5) : 17 - 20.
He Fang , Wu Gang , Song Guangming. Study on laser hardening with curved rectangular beam [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University , 2003 , 22(5) : 17 - 20.
- [6] 王云山 , 王娟娟 , 朱福栋. 激光热处理光束优化系统 [J]. 中国激光 2008 , 35 (11) : 1730 - 1734.
Wang Yunshan , Wang Juanjuan , Zhu Fudong. Beam optimum system for laser heat treatment [J]. Chinese Journal of Lasers , 2008 , 35 (11) : 1730 - 1734.
- [7] 崔春阳 , 虞 钢 , 王立新 , 等. 球墨铸铁变换激光束淬火性能的研究 [J]. 金属热处理 , 2006 , 31 (10) : 31 - 33.
Cui Chunyang , Yu gang , Wang Lixin , et al. Properties of ductile iron modified by laser surface hardening with optical changing of laser beam [J]. Heat Treatment of Metals , 2006 , 31 (10) : 31 - 33.
- [8] Li Shaoxia , Yu Gang , Zheng Caiyun , et al. High-power laser beam shaping by inseparable two-dimensional binary-phase gratings for surface modification of stamping dies [J]. Optics and Lasers in Engineering , 2008 , 46 : 508 - 513.
- [9] Chen Y , Gan C H , Wang L X , et al. Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd-YAG laser beam with two-dimensional array distribution [J]. Applied Surface Science , 2005 , 245 : 316 - 321.
- [10] Li Shaoxia , Yu Gang , Zheng Caiyun , et al. Quasi-dammann grating with proportional intensity array spots [J]. Optics Letters , 2008 , 33 (18) : 2023 - 2025.