

# 国外激光表面处理的进展

徐 恒 钧

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京, 100022)

**摘 要** 激光表面处理是一项新的也是远没有成熟的技术. 本文对近些年来激光表面处理的进展情况进行了综合评述, 并讨论了影响激光表面处理应用的一些问题.

**关键词** 激光表面处理, 激光表面相变硬化, 激光表面熔化, 激光表面合金化, 激光表面涂敷, 激光表面冲击硬化

**分类号** TG 156.99

## 0 引言

高能激光器作为有效的加工工具已经在显微打孔、切割、焊接、金属表面加工等方面获得应用<sup>[1, 2]</sup>. 近年来, 为了改进高能激光加工工艺和理解、认识金属激光表面改性的相变规律, 各国材料科技工作者进行了大量研究工作. 本文仅对近年来激光表面处理研究的一些情况加以评述.

激光表面加工的术语在不同文献中常有出入. 本文中关于激光表面处理指的是:

- 1) 激光表面相变硬化 (LTH);
- 2) 激光表面熔化 (LSM);
- 3) 激光表面合金化 (LSA);
- 4) 激光表面涂敷 (LSC);
- 5) 激光表面冲击硬化 (LSH).

## 1 激光表面相变硬化 (LTH)

激光表面相变硬化是用高能激光束扫过可硬化材料表面, 使表面温度达到相变点以上, 当激光束移开时由于基体的传热使表面快速冷却 (自淬火作用) 从而使材料表面硬化的技术.  $w(C) > 0.2\%$  的钢和珠光体基体的铸铁易于用这一技术硬化. 许多研究者对激光硬化区的显微组织做了详细研究<sup>[3~6]</sup>. 对于一个选定的钢种, 激光加热区域的组织主要取决于该区域达到的最高温度和在此温度的持续时间. 文献 [3] 的作者在考虑了工艺参数 (如激光束强度、强度分布、束斑尺寸、运动速度、激光被吸收的程度等) 以及材料参数 (如导热率和热扩散率) 的基础上给出了钢和铸铁的激光相变硬化的模型并得出了峰值温度、冷却速

度、峰值温度达到的深度的解析解。利用这些解可以预测马氏体的体积分数及硬度分布。

研究证明,激光相变硬化是改善高碳钢和铸铁耐磨性的有效方法<sup>[4~11]</sup>,并在工业中得到应用<sup>[11]</sup>。

工具钢和高速钢的激光表面硬化引起许多研究者的兴趣<sup>[12~14]</sup>。Brover<sup>[13]</sup>用脉冲激光器研究了不同组织的 R6M5 激光高温快速硬化的可能性。实验证明,不同激光能量水平和加热速度与不同原始组织配合,可以得到不同程度和均匀性的固溶体,从而得到在服役条件下所需要的优化的数值。Mulin 等<sup>[14]</sup>用 1 000 J 的激光器硬化 12X18N9T, 13N5A 和 1201 工具钢。激光硬化的工具钢的耐磨性是非硬化工具的 20~25 倍,是带有氮化钛表面涂层的 2~4 倍。

## 2 激光表面熔化 (LSM)

激光表面熔化在满足表面某些需要,如耐磨性、耐蚀性、防止氧化等方面显出独特优点。可用激光表面熔化得到细晶组织、非晶态和亚稳相,低的气孔率和光滑的表面,基体中较小的热影响区以及良好的基体与表面的结合。

用激光表面熔化技术可使灰口铁、球墨铸铁表面生成一层白口层,所以耐磨性的提高是很显著的。用激光加热和熔化表面也是使低碳奥氏体不锈钢降低敏感性的一种手段<sup>[15]</sup>。激光表面熔化还可用于高速钢<sup>[16]</sup>。文献[16]建议采用下列处理方法:退火,激光加热并使表面熔化,再加以标准的热处理(淬火和回火)。AISIT1 高速钢激光表面熔化后的室温相组成为:碳化物,包括 M6C 型和 M7C3 型,残余奥氏体,δ-铁素体和两种类型的马氏体。

文献[17]报道了 Ti-6Al-4V 合金激光表面熔化的研究结果。使用 2 kW CO<sub>2</sub> 激光器,试样移动速度为 2 m/s。激光表面熔化和自淬火使表面形成 HCP 马氏体表层。显微组织具有高度结构。激光表面熔化在表层中产生残余张应力,从而导致其疲劳强度低于未处理材料。

Draper<sup>[18]</sup>的实验证明,铁铝青铜经激光表面熔化处理后,显微组织明显细化,且由原来的多相组织变为亚稳的单相,使耐腐蚀和冲蚀性能得到提高。因为铝青铜广泛用于航海业,故这一结果具有重要的实用意义。

美国 NASA Marshall 航天中心正致力于提高航天飞机(SSME)许多零件的寿命或修复完成每一次飞行任务之后的零件<sup>[19]</sup>。主燃烧室中最关键的部件是其内衬(热壁),它由锻造的 NARloy-Z 制成。该合金在 580~760 °C 的温度范围暴露 96 h 后,可观察到晶界析出物及无析出区,这些都会降低主燃烧室内衬的寿命。一旦析出物形成,除了用熔化方法以外,很难用热处理的方法使其回到固溶体中去。激光上釉是细化锻造 NARloy-Z 的显微组织的一种很有效的方法。用这种方法得到了很细的激光上釉显微组织,第二相均匀分布和错在铜基体中的扩展固溶体,使合金热稳定性和时效硬化得到很大改善。

## 3 激光表面合金化 (LSA)

激光表面合金化就是利用激光照射使基体表层熔化并把供给表面(预敷或喷射)的合金元素的物质熔化,混合均匀,以便在基体表面形成一个理想的合金层,从而改善表面性质的工艺。这一工艺具有巨大应用前景。人们已对不同的基体和合金元素的组合做了大量

研究<sup>[20~29]</sup>。激光表面合金化的主要目的是提高材料的物理性能、化学性能及耐磨性。

阻碍激光表面合金化广泛应用的障碍,除设备投资大、成本高外,就是在材料处理过程中表面易产生气孔、裂纹以及表面平整度的下降。针对后者,研究者根据具体情况加强研究,已经摸索出一些可行的办法。

Ion<sup>[21]</sup>用实验证明,激光表面合金化是提高低碳钢耐腐蚀性能的一种可行的办法。他使用的激光器功率为6 kW,合金元素为铬,激光合金化层的厚度为0.5 mm,使耐腐蚀性大大提高。Mazumder等<sup>[23]</sup>用激光使1016低碳钢表面以铬、锰、碳合金化。结果证实,用激光加工过的材料在销-柱磨损试验中表现出比Stellite 6合金还要好的耐磨性。作者认为,耐磨性的提高归因于树枝状组织和铬的碳化物,且枝晶越细,耐磨性越好。较低的激光功率和较高的激光-工件相对移动速率可以得到较高耐磨性的合金层。

文献[22]报道,用亚微米TiC颗粒进行激光表面合金化时,在合金中会形成不规则的聚集物;另一方面,当用SiC时,SiC在激光熔化时完全分解为Si和C。因此用激光使Ti+SiC熔化,可以使表面形成一个富硅和存在TiC的表面合金层。富硅可以提高表面耐腐蚀性,而钛与碳形成TiC微细粒子使表面得到强化。这一强化材料的方法已引起人们的注意。

Marion<sup>[24]</sup>试验成功了另一种激光表面合金化的方法。他用10 kW CO<sub>2</sub>激光器使处在氮气中的钛或钛合金表面熔化,从而形成一层耐磨的TiN。用这种方法可在材料表面形成一层纯的TiN,而更重要的是可以得到一个较厚的钛与TiN的混合层,这一层不仅非常耐磨,且不像纯TiN那样脆。文献[24~26]研究了与上述工艺类似的表面合金化方法,不同的是处理过程完全是在固态下进行的。作者认为,连续波CO<sub>2</sub>激光器和脉冲激光器都可用来使钛或钛合金及其他材料表面氮化。表面形成TiN后,硬度从150~200 HV升高到600~850 HV。Kim等<sup>[27]</sup>研究了在碳素工具钢表面生成TiN的表面合金化方法。

用常规的方法局部渗硼需要花费很长的时间用于渗前处理及渗硼处理。用激光使低碳钢局部渗硼,不仅处理速度快,而且不需要渗硼前的处理。使用Nd-YAG激光器使AISI 1018渗硼可以得到950~2 200 HV的高硬度。电子显微分析表明,在生成FeB的情况下可以得到最高硬度,最低硬度与生成FeB和共晶对应。AISI 1018最理想的激光渗硼组织是Fe<sub>2</sub>B,这种组织的硬度在1 300~1 700 HV范围内,同时使处理的表面产生压力<sup>[28]</sup>。

近些年来,铝及铝合金激光表面合金化研究相当活跃<sup>[30~40]</sup>,也取得了很有意义的结果。研究内容主要集中在激光表面合金化的可行性,凝固过程与相选择和合金化层的相组成。Tomlinson等<sup>[30]</sup>利用铜、锰、铬、镍等不同元素使Al-12Si合金激光表面合金化,合金层厚度1~1.5 mm,组织为金属间化合物分布在快速凝固的基体上。磨损试验表明,Al-Ni和Al-Fe-Cu可以明显提高Al-12Si合金的耐磨性和承载能力,含铜的合金层总是具有低的磨损率。Almeida等<sup>[32]</sup>利用合金元素铬、钼在铝合金表面制备耐蚀表面合金层使铝合金抗点蚀性能明显提高。缺点是制备工艺为两步法,麻烦复杂。Volz<sup>[33, 40]</sup>采用一步法使铸造和变形铝合金激光表面合金化。使用10 kW CO<sub>2</sub>激光器,合金粉末是镍基、钴基、铁基和铜基合金,用自制喷粉装置供粉。合金层硬度为HV<sub>0.2</sub>400~1000,无论是单道扫描还是大面积涂层均无裂纹和气孔,并具有高的承载能力。Pierantoni等<sup>[34]</sup>以铁作为合金元素用激光表面合金化改善铸造铝合金的性能。预先将铁电镀在Al-7Si和Al-12Si合金表面,然后用激光处理。凝固状态时合金层硬度为HV<sub>0.05</sub>400,220℃时效后,可以达HV<sub>0.05</sub>500,表面平整度可与精加工比美。在高温暴露时,表面合金层很稳定。

## 4 激光表面涂敷 (LSC)

激光表面涂敷与激光表面合金化相似,不同的是前者被基体稀释的程度非常低.这种技术同样会改善表面性质.经常用来提高材料的耐磨性、耐蚀性和耐高温性能<sup>[41~46]</sup>. Engstrom<sup>[43]</sup>在低碳钢表面涂敷 Stellite No.6 合金,得到非常细的组织,稀释率很低,涂层致密,与基体结合良好.人工海水腐蚀试验证明,其耐腐蚀性与锻轧薄板相当.脉冲 Nd-YAG 激光器在用于低碳钢涂敷 Hastelloyc 方面有很大潜力<sup>[44]</sup>.用这种方法形成的厚 0.3~0.4 mm 的涂敷层,被基体稀释率小于 10%,在涂层和涂层-基体间的过渡区无裂纹.涂敷层均匀,表面光滑,因此只需很少的表面精加工. Jasim 等<sup>[46]</sup>研究了用激光涂敷制造热障涂层.试验结果表明,在很宽的激光参数条件下,可以得到快速冷却导致的细晶组织,平滑、光亮的表面.

在激光表面涂敷过程中经常发生的问题是热应力造成的裂纹及疏松.文献 [47] 用唯象模型定性地分析了试验结果.作者把试样分为 3 个不同的部分(即涂敷层、热影响和基体),通过分析提出了一个可用来预测涂敷层表面行为的一般公式. Powell<sup>[48]</sup>分析了这两个问题并讨论了在激光涂敷过程中使基体超声震动的试验结果.实验表明,这一方法既可降低热应力又可减少疏松.

## 5 激光表面冲击硬化 (LSH)

激光冲击硬化是一个使人感兴趣的激光应用<sup>[50]</sup>.脉冲激光可使工件表面薄层(几个原子厚)快速蒸发,在表面原子移走的时候,发生动量脉冲并产生一个冲击波或应力波,需要的能量密度约为  $10^7 \sim 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>,脉冲时间为几 ps 到几百 ns.这一脉冲的作用主要是力学作用,并局限在被照射区域附近.在此温度下热影响作用可忽略不计.常用 Nd:YAG 激光器,也可用 CO<sub>2</sub> 激光器或 KrF(0.25 μm) 激光器. Chan<sup>[51]</sup>使用名义功率为 10 GW/cm<sup>2</sup> 脉冲时间为 20~40 ns 的脉冲 Q 开关的 YAG 激光器使铸铁、7075 和 7475 铝合金冲击硬化,冲击振幅为 5.6 GPa.两种铝合金的疲劳寿命均得到提高.其原因是表面存在残余压应力.

文献 [52] 作者认为,为了得到表面残余压应力,应对热应力的作用和冲击波的作用加以区分.试验说明,使用吸收涂层后可以得到表面残余压应力.由于只有冲击波透入材料,该区域受张力变形,但受周围材料的约束,被约束的区域就是一个压应力区.如果热量进入该区域,膨胀将会导致变形,在冷却时将会产生张应力.

激光冲击硬化可以得到与喷丸相近的残余应力水平,但表面损伤更小,且能得到更大的透入深度.

### 参 考 文 献

- 1 Ghosh S K. Laser Processing of Materials. In: Ghosh S K, Ericsson T eds. Proceedings of the Fourth International Conference on High Power Lasers. Paris: 1998
- 2 Luxson T J, Parker D E. Industrial Lasers and Their Applications. 2<sup>nd</sup> ed. London. 1992
- 3 Li W B. Laser Transformation Hardening of Steel Surface: [Dissertation]. Lulea: Lulea

- Univ, 1984
- 4 Ion C J, Moiso T. Laser Surface Modification of 13.5 %Cr, 0.6 %C steel. *J Mater Sci*, 1991, 26(1): 43~48
  - 5 Singh J. Laser Beam and Photon-assisted Processed Materials and Their Microstructures. *J Mater Sci*, 1994, 29: 5232~5258
  - 6 Solina A. Residual Stress Induced by Localized Laser Hardening Treatment on Steel and Cast Iron. *J Heat Treating*, 1986, 4(3): 272~280
  - 7 Kusinski J, Thomas G. Fundamentals, Applications and Systems Engineering. In: Duely W W eds. Washington. 1986. 150~156
  - 8 Sorensen B, Vuorinen E, Pedersen F. Surface Hardening and Melting of Cast Iron by CO<sub>2</sub>laser. In: Proceedings of 2<sup>nd</sup> NOLAMP Conference, Lulea, Sweden, 1989
  - 9 Lopeze V. Surface Laser Treatment of Ductile Irons. *J Mater Sci*, 1994, 29: 4216~4224
  - 10 Tan Y H. Abrasive Wear Property of Bainitic Nodular Cast Iron. *J Mater Sci*, 1990, 25: 4133~4139
  - 11 Yanmar Dissel Engine Co. Highly Accurate Laser Hardening Developed for Cast Ring Grooves. *Trade Times*, 1985, 25: 11
  - 12 Bakowsky L. Recent Development in Processing With High Power CO<sub>2</sub> Laser. In: *Welding and Cutting '89*, Essen FRG, 1989
  - 13 Brovor G I. Influence of the Radiation Parameters and the Initial Structure of Tool Steels on the Efficiency of Laser Hardening. *Chernaya Metall*, 1990, 2: 53~56
  - 14 Mulin Y I, Sokolov V A. Laser Hardening of Forging Tools. *Energomashinost*, 1989, 5: 30~31
  - 15 Nakito Y. *Trans Jpn Weld Soc*, 1986, 17: 84
  - 16 Pelletier J M. Laser Surface Melting of low Medium Carbon Steels: Influence on Mechanical and Electrochemical Properties. *J Mater Sci*, 1989, 24: 4343~4349
  - 17 Robert A. Laser Processing of Ti-6Al-4V. In: Mukherjee K, Mazumder J, eds. *Lasers in Metallurgy*. 1981
  - 18 Draper C W. The Effect of Laser Melting on Copper Alloys. In: Mukerjee K, Mazumder J, eds. *Lasers in Metallurgy*. 1981
  - 19 Singh J. NASA Technical Report 108419, 1993
  - 20 Draper C W. Laser Surface Alloying: the State of the Art. In: Mukerjee K, Mazumder J, eds. *Lasers in Metallurgy*. 1981
  - 21 Ion Joh. Laser Surface Alloying of Structural Mild Steel for Corrosion Resistance. In: *Laser Surface Treated Materials*. 1990. 25~33
  - 22 Laroudie F, Tassin C, Pons M. Hardening of 316L Stainless Steel by Laser Surface Alloying. *J Mater Sci*, 1995, 30: 3652~3657
  - 23 Mazumder J. Laser Surface Alloying of Steel With Cr-Mo-C for Enhanced Wear Properties. In: Mukerjee K, Mazumder J, eds. *Laser Processing of Materials*. 1981
  - 24 Siersten M. Nitriding of Titanium Alloy. In: *Laser Surface Treated Materials*. 1990. 25~29

- 25 Astapchik S A. Laser Treatment of Titanium Alloys in Various Atmospheres. *Vesti Akad Navk Fiz-Tekhn*, 1989, 4: 3~6
- 26 Katayama S. Surface Hardening of Titanium Alloys by Laser Nitriding. In: *Laser Processing of Materials*. 1994. 159
- 27 Kim T H, Seong B G. Titanium Nitride Laser Beam Surface Alloying Treatment. *J Mater Sci*, 1990, 25: 3583~3591
- 28 Tayal M, Mukherjee K. Localized Boriding of Low-carbon Steel Using a Nd:YAG Laser. *J Mater Sci*, 1994, 29: 5699~5702
- 29 Ariely S. Phase Investigation in Laser Surface Alloyed Steels With TiC. *J Mater Sci*, 1995, 30: 1849~1853
- 30 Tomlinson W T, Bransden A S. Sliding Wear of Laser Alloyed Coatings on Al-12Si. *J Mater Sci Lett*, 1994, 13(15): 1086~1098
- 31 Schneider R. Surface Treatment by CO<sub>2</sub> Laser. Final Report. Report No.TIB/A94-03921, 1992
- 32 Almeida A, Vilar R, Li R. Improvement of Corrosion Properties of Aluminum Alloys by Laser Alloying. In: *9th International Congress on Heat Treatment and Surface Engineering*. Nice-Acropolis, France, 1994, 26~28
- 33 Volz R. Some Aspects to the Field of Wear Resistance Coatings on Aluminium Alloys Using CO<sub>2</sub> Lasers. In: *TS93: Thermal Spraying Conference*. Aachen, Germany, 1993, 3~5
- 34 Pierantoni M, Wagniere J D, Blank E. Improvement in the Surface Properties of Al-Si Cast Alloys by Laser Surface Alloying. *Mater Sci Eng: A110*, 1989, (1-2): 17~21
- 35 Gaffet E, Pelletier J M, Bonnet-Jobez S. Laser Surface Alloying of Nickel Film on Aluminum-based Alloy. *Appl Suf Sci*, 1989, 43: 248~255
- 36 Gremaud M, Carard M, Kurz W. The Microstructure of Rapidly Solidified Al-Fe Alloys Subjected to Laser Surface Treatment. *Acta Metal et Mater*, 1990, 38(12): 2587~2599
- 37 Trivedi R, Kurz W. Microstructure and Phase Selection Diagrams for Directionally Solidified Binary Alloys. In: *Intelligent Processing of Materials*. Indianapolis, Indiana, USA, 1990
- 38 Multschenko B F. Hardening With Laser Beams- Pioneering in the Automobile Industry. *Techische Runoschau* 1990, 82(37): 100~101
- 39 Zimmermann M, Carard M, Gremaud M, Kurz W. Characterization of Banded Structure in Rapidly Solidified Al-Cu Alloys. In: *7th International Conference on Rapidly Quenched Materials*. Stockholm, Sweden, 1990
- 40 Volz R. Producing Hardfacing Layers on Aluminum Alloys by High Power CO<sub>2</sub> Laser. In: *Mordike B L eds. Laser Treatment of Materials*. 1993. 399~405
- 41 Li L J, Mazumder J. A Study of the Mechanism of Laser Cladding Processes. In: *Laser Processing of Materials*. 1994. 35~50
- 42 Steen W M. Hardfacing of Nimonic 75 Using 2 kW CO<sub>2</sub> Laser. *Metals Technology*,

- 1980, 232~237
- 43 Engstrom H. Laser Cladding of Stellite No.6 on Mild Steel. In: Laser Surface Treated Materials. Final Report of Nordisk Industrifond Project, 1990. 57~71
- 44 Jensen T A. Laser Cladding Using a Nd:YAG Laser or CO<sub>2</sub> Laser. In: Laser Surface Treated Materials. Final Report of Nordisk Industrifond Project, 1990. 72~84
- 45 Flinkfeldt J. Laser Impregnation With 2.5,6 and 9 kW Lasers. In: Laser Surface Treated Materials. Final Report of Nordisk Industrifond Project, 1990, 85~95
- 46 Jasim K M. Thermal Barrier Coatings Produced by Laser Cladding. J Mater Sci, 1990, 25: 4943~4948
- 47 Pilloz M, Pelletier J M. Residual Stresses Induced by Laser Coatings. J Mater Sci, 1992, 27: 1240~1244
- 48 Powell J, Steen W M. Vibro Laser Cladding. In: Mukherjee K, Mazumder J eds. Laswrs in Metallurgy. 1991. 93~104
- 49 Choi J, Mazumder J. Non-equilibrium Synthesis of Fe-Cr-C-W Alloy by Laser Cladding. J Mater Sci, 1994, 29: 4460~4476
- 50 Mordike B L. Metallurgical Aspects of Laser Surface Treatment. In: Mordike B L eds. Laser Treatment of Materials. DGM Informationsgesellschaft Verloag Germany, 1990. 171~180
- 51 Chan C L. Ph. D. Thesis of Illinois, Urbana, 1986
- 52 Fournier J. Ph. D. thesis, Ecole Polytechnique Paris, 1989

## Review of Research on Laser Surface Treatment

Xu Hengjun

( Department of Materials Science and Engineering,  
Beijing Polytechnic University, Beijing, 100022 )

**Abstract** Laser surface treatment is a new technique that is far from maturity. In this paper, the progress in laser surface treatment research is reviewed. Some problems that affect the practical application of laser surface treatment are discussed.

**Keywords** Laser surface treatment, Laser surface transformation hardening, Laser surface melting, Laser surface alloying, Laser surface cladding, Laser surface shock hardening