

激光和电子束表面强化技术的发展及其应用^{*}宋仁国¹⁾ 陈光南 张坤

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 激光和电子束表面强化是当前引人注目的两种高新技术. 文章系统地介绍了这两种技术的发展状况及应用, 同时比较了二者的优缺点. 最后, 对目前存在的问题及未来的发展方向作了简要的讨论.

关键词 激光, 电子束, 表面强化

APPLICATION AND DEVELOPMENT OF SURFACE STRENGTHENING PROCESSES WITH LASER AND ELECTRON BEAMS

SONG Ren-Guo CHEN Guang-Nan ZHANG Kun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Surface strengthening processes with laser and electron beams are attracting great attention. The application and development of this new technology is described, and the pros and cons of laser versus electron beam techniques are compared. Finally, present problems and future prospects are discussed.

Key words laser, electron beam, surface strengthening

1 引言

随着高新技术的飞速发展, 人们对提高金属材料的性能, 拓宽其功能, 延长仪器设备中零部件的使用寿命等提出了更高的要求, 但同时又希望成本越低越好. 鉴于许多零部件的破坏都是从表面损伤开始的, 例如承受耐磨、腐蚀的机件均为表面失效, 因此材料科学工作者开始把注意力从整体强化转向材料的表面强化. 正是在这一背景下, 近年来表面工程技术及其相关学科发展极快, 尤其是激光和电子束表面强化技术的研究及其应用均取得了许多重要的进展^[1-5], 深受人们的广泛重视, 因而成为当前材料科学研究中异常活跃的领域之一.

2 激光表面强化

2.1 国内外激光表面强化技术的研究及应用现状

1960年, 当美国物理学家 T. Maiman 用直径 6mm、长 45mm 的红宝石单晶发射出第一束波长为 0.6943 μm 的红色脉冲激光时, 即宣告了激光时代
29 卷 (2000 年) 7 期

的到来. 从此, 各种激光器和激光应用技术如雨后春笋般地发展起来, 促使很多科技领域进行革新和发展, 同时激光技术本身也得到了极快的发展. 最初, 科学家利用激光作为热源进行金属的焊接、切割和打孔等; 从 70 年代起, 开始研究它在金属表面强化方面的应用. 目前, 激光表面强化已发展成为包括许多分支的工艺技术, 主要有激光相变硬化 (laser phase transition hardening)、激光合金化 (laser alloying)、激光涂敷 (laser cladding)、激光快速熔凝 (laser rapid melting and solidification)、激光非晶化 (laser glazing) 及激光冲击硬化 (laser shock hardening) 等^[6-10]. 各种激光表面强化技术的工艺特性见表 1.

由于激光表面强化技术的研究与开发具有显著的经济效益, 因此世界各主要发达国家对激光表面强化技术的工艺方法及其理论研究均十分重视, 都制定了自己的激光技术发展计划. 无论是试验研究还是工业实用化, 美国均处于领先地位, 其应用已扩

* 国家自然科学基金重点资助项目

1) 通讯联系人. 北京航空航天大学应用物理系, 北京 100083
1999 - 11 - 15 收到初稿, 1999 - 12 - 23 修回

表1 各种激光表面强化技术的工艺特性

工艺	功率密度 / $W\ cm^{-2}$	冷却速度 / s^{-1}	作用区深度 / mm
相变硬化	$10^3 - 10^4$	$10^4 - 10^6$	0.2 - 3
合金化	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^6$	0.2 - 2
涂敷	$10^3 - 10^5$	$10^4 - 10^6$	0.2 - 10
熔凝	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^6$	0.2 - 2
非晶化	$10^7 - 10^{10}$	$10^6 - 10^{10}$	0.01 - 0.1
冲击硬化	$10^9 - 10^{12}$	$10^6 - 10^{10}$	0.02 - 0.2

展到汽车、航空、国防、轻工等部门。例如，美国通用汽车公司将 15 台激光器安装在淬火生产线上处理转向器箱体（铁素体可锻铸铁），可日产 3 万件，产品的耐磨性提高 10 倍，所需费用仅为常规氮化的 1/5；美国 METCO 公司采用激光涂敷技术在内燃机排气阀座上涂敷 Ni 基合金，使阀座的耐磨、耐蚀和抗冲击性能均得以提高。英国研究激光器也较早，所进行的激光表面强化试验研究工作亦很多。如英国 Rolls - Royce 公司采用微机控制的自动化吹粉激光涂敷取代手工氩弧焊在气轮机叶片上涂敷钴基合金，显著提高了叶片的高温耐磨性，且成本降低，工艺精确，再现性好。我国关于激光表面强化技术的较有系统的试验研究工作始于 70 年代末，虽然起步较晚，但发展迅速。目前已有清华大学、华中理工大学、哈尔滨工业大学、北京工业大学、中国科学院力学研究所、中国科学院金属研究所、中国科学院长春光学精密机械研究所等数十家单位在从事激光表面强化技术方面的研究工作，并取得了很多有重要价值的成果。同时，我国在长春第一汽车制造厂、西安内燃机配件厂等单位建成了 9 条激光相变硬化生产线，这标志着我国某些激光表面强化技术也已步入了工业化阶段。

从上述情况可见，世界各国目前正加紧进行激光表面强化技术的试验研究及推广应用。可以预料，今后的激光表面强化技术将会进一步扩大应用范围，这是因为激光表面强化具有其他热处理方法所没有的特点。

2.2 激光表面强化技术的特点

激光是一种亮度极高，单色性、方向性和相干性极强的光源，因而特别适合于材料的表面强化处理。与传统工艺相比，激光表面强化技术在材料加工中具有如下特点：

- (1) 处理部位可以任意选择，例如盲孔、槽沟等

特殊部位均可使用激光进行表面强化处理；

- (2) 可以处理形状复杂的工件表面，并能准确地控制处理区域的深度和形状；
- (3) 输入热量少，处理后工件变形小；
- (4) 能量密度高，加工时间短；
- (5) 激光处理后，只需少量的表面加工；
- (6) 可以局部加热，只加工必要部分；
- (7) 工艺过程无需真空环境，无化学污染。

2.3 激光表面强化设备

激光表面强化设备包括激光器、光学系统和机械系统三大部分，如图 1 所示，其中激光器是实现激光表面强化处理最关键的设备。在激光技术发展初期，由于缺乏大功率激光器，不能适应表面强化的要求，因此使得激光表面强化技术的发展受到很大限制。现在国内外已有了适应表面强化处理要求的大功率激光设备，最大功率可达 15—20kW。

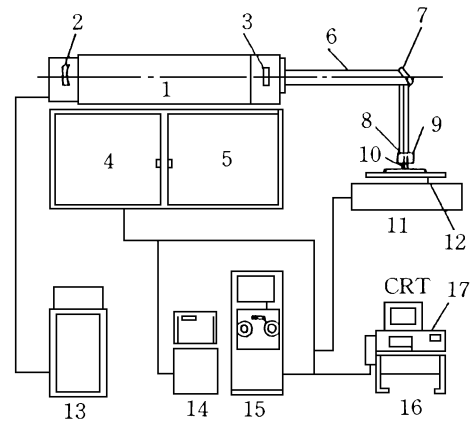


图1 激光表面强化处理装置构成示意图

- (1) 激光介质；2 全反射镜；3 部分反射镜；4 配电盘；5 气体交换装置；6 激光射束；7 曲面反射镜；8 聚光系统；9 辅助气体；10 气体喷嘴；11 X - Y 工作台；12 被处理工件；13 冷却装置；14 操纵台；15 数控装置；16 磁带记录装置；17 系统打字机

目前，激光表面强化用的设备主要为 CO₂ 连续激光器。YAG 激光器由于输出功率小，用得较少，但适于在材料上打孔和冲击淬火。

2.4 激光表面强化的加热过程

激光束向金属表面层的热传递是通过“逆韧致辐射效应”实现的，金属表面和其所吸收的激光进行光 - 热转换。当光子和金属的自由电子相碰撞时，金属自由电子的能级升高，并将其吸收的能量转化为晶格的热振动。由于光子穿透金属的能力极低，因此只能使表层的很薄一层温度升高。由于导带电子的平均自由时间只有 $10^{-3}s$ 左右，从而使这种热交换

物理

和热平衡非常迅速的建立.从理论上分析,在激光加热过程中,金属表面极薄层的温度可以在微秒至皮秒(10^{-6}s — 10^{-12}s)级内就能达到相变或熔化温度.这个时间远远小于激光实际辐照的时间,而加热层的厚度很明显地低于硬化层的深度.

一般说来,用于激光表面强化的零件,其表面已具备很高的光洁度,当激光照射这种光洁表面时,一部分能量被表面反射,表面越光滑,反射越强烈,只有被吸收的光的能量才能起到加热的作用.为了提高光热转换效率,通常都要对表面进行黑化处理,以增加表面吸收光能的效率.所谓黑化处理是在需要加热的部位涂上一层对光束有高吸收能力的薄膜涂料.现在常用的几种黑化处理方法有磷化法、炭素法、油漆法等.

3 电子束表面强化

3.1 国内外电子束表面强化技术研究及应用概况

电子束技术已有 30 多年的发展历史,电子束的高综合效率和高精确性使它能够完成以前的方法无法实现的工作.电子束技术在焊接、切割等金属加工工业中的应用已很成熟.例如,电子束焊接早在 60 年代中期就大量用于航空、航天及电子技术中,目前在机械工业中也日益得到重视.

电子束技术在金属表面强化处理方面的研究与应用开始于 70 年代初期,最早是用于薄钢带、细丝的连接真空退火处理和冲击淬火问题.美国早已拥有比较完善的电子束连续退火炉,用来处理钛、铌、钽、铝及核反应堆用的金属材料.近十几年来,激光表面强化技术的发展及应用也促进了电子束技术在金属表面强化方面的研究及其应用.电子束表面强化和激光表面强化,除了热源的区别外,其他方面基本上是一样的.一般地说,凡是激光表面强化具有的一些特点,电子束表面强化也基本具备.

世界主要工业发达国家,如美国、德国、法国、意大利、日本等,均开展了电子束表面强化方面的研究工作,从近几年的资料看,东欧的几个国家及韩国、巴基斯坦等国也相继开展了这方面的工作,并取得了一些具有重要实用价值和理论意义的成果^{[11]—[16]}.如美国 Sciaky 公司的电子束表面强化系统,把小型电子计算机和大功率电子枪结合起来,指令通过键盘、电视终端显示的联合装置输入系统,从存储器把电子束的偏转电压、电流和聚焦数据提供给小型电子计算机,计算机利用这些信息控制电子

束,以一定的方式在给定的零件上进行扫描.计算机只需要改变程序,就能将一台电子枪既用于焊接又可用于表面强化处理.通过他们的试验及应用认为,电子束表面强化技术用于汽车工业和宇航工业是非常有前途的,这些领域是电子束潜在的用户.美国 Chrysler 汽车公司购置了 Sciaky 公司的电子束表面强化处理系统,成功地解决了(其他方法所不能解决的)自动传动离合器凸轮的淬火变形问题.我国有关电子束表面强化技术的研究工作开展得较少,目前仅有机械工业部北京机电研究所和中国科学院电工研究所等少数单位进行了这方面的研究,且获得了一些有意义的结果.

从目前的国内外研究状况看,电子束表面强化技术尚处于研究阶段,其研究和应用规模也远不及激光表面强化技术,但可以预料,电子束表面强化技术将越来越受到重视并会很快在工业中获得应用,成为激光表面强化技术的有力竞争者.

3.2 电子束表面强化技术的特点

电子束表面强化是一种较为先进的表面改性技术,与传统的表面技术相比,它具有如下优点:(1)适合于局部表面改性;(2)零件处理时的变形小;(3)一般不需特别的冷却装置即可获得足够的冷却速度;(4)不论零件的形状多么复杂,凡是能观察到的区域就可以进行电子束表面强化;(5)由于电子束的功率参数、作用时间等规范参数可以精确控制,表面层的温度、强化的深度、加热和冷却速度等都可以严格控制;(6)电子束表面强化在真空中完成,故可以获得纯净的表面强化层,没有氧化和氮化过程;(7)电子束的能量利用率很高,是一种节能型的表面强化手段,这一点明显地优于激光表面强化技术.

3.3 电子束表面强化设备

电子束表面强化设备如图 2 所示,它包括电子枪、真空工作室、传动机构和控制系统.

电子束设备所要求的真空度不太高,电子束部分可高一些,排气系统则可低一些.在电子枪部分,有产生热电子的加热灯丝,为了延长灯丝的使用寿命,必须有较高的真空度,最好是 10^{-2}Pa 左右,工作室部分有 1Pa 左右就可以了.通过灯丝加热产生出的热电子,在电场作用下,向阳极方向加速,穿过阳极的孔后,向下发射.电子束的通、断和束流由栅极进行控制,穿过阳极的电子束经电磁透镜聚焦缩小后,用偏转线圈使其偏转,照射到工作台上的工件表面.偏转线圈可以根据需要采用,但在电子束表面强化处理中,这种偏转往往具有较大的作用.

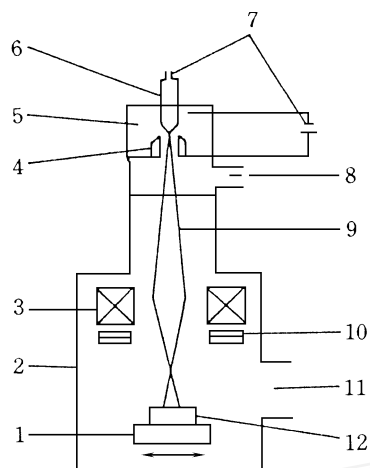


图2 电子束装置示意图

- (1 工作台; 2 工作室; 3 电磁透镜; 4 阳极; 5 阴极;
6 灯丝; 7 电源; 8 排气系统; 9 电子束;
10 偏转线圈; 11 排气系统; 12 工件)

3.4 电子束表面强化的加热过程

当高速、收束的电子流轰击被处理的金属表面时,电子能穿过金属的表面进入到距表面一定深度,传给金属原子能量使金属原子的振动加剧,把电子的动能转化为热能,从而使被处理金属的表层温度迅速升高.这与激光加热有所不同,激光加热时被处理的金属表面吸收光子能量,激光并未穿过金属表面.

研究表明,电子束表面强化处理时,电子束照射到金属表面会同金属的原子核及电子发生相互作用.由于电子与原子核的质量相差特别大,电子与原子核的碰撞可以看作弹性碰撞,因此能量传递主要通过电子束的电子与金属表层的电子碰撞而完成.传递给电子的能量立即以热能形式传给了金属表层的点阵原子.由于电子束的辐射加热时间很短,加热过程可近似认为是准绝热的,其热传导效应就可以忽略,其温度分布遵从表层内部的电子耗散曲线.在加热过程中,能量耗散程度控制温度的升高.

电子束辐照与激光束辐照的主要区别在于产生最高温度的位置和最小熔化层的厚度.电子束辐照加热时熔化层至少有几个微米厚,这会影响到冷却时固相-液相界面的推进速度;在随后的冷却过程中,电子束辐照加热的温度分布大体与激光辐照的相似,但加热阶段差异很大,电子束辐照时的能量沉积范围较宽,而且约有一半电子作用区几乎同时熔化.电子束照射时液相温度低于激光束温度,因而温度梯度较小;激光加热温度梯度大,且能保持较长的时

间.

4 激光束与电子束的特征比较

激光和电子束表面强化处理都可以进行表面淬火、表面合金化、冲击淬火等作业,都有“自淬火”、变形小等特征.但是在实际应用中,它们还是各有特色.比较它们的优缺点,对我们选择合理的表面强化技术将是非常有益的.表2是激光束和电子束对钢进行淬火的特征比较.

表2 激光束和电子束的比较

项目	激光束	电子束
能量效率	未涂敷 15 %	99 %
防止反射	需涂敷反射防止剂,反射率为 40 %	不需要防止反射,反射率为零
气氛条件	在大气中进行(但需辅助气体)	在真空中进行
能量传送	平行光路系统的激光束传送	通过真空器内的移动透镜或电子枪的移动来传送能量
对焦	由于透镜的焦距是固定的,所以要移动工作台(约 150mm)	通过控制聚焦透镜的电流调节(100—600mm)
束偏转	要使激光束偏转,必须更换反射镜等,图形是固定的	用电控制可选择任意图形(电子束偏转、面偏转等)
设备运转费	7—14 (电、激光气体、辅助气体等)	1 (以电子束设备运转费为 1)

4.1 经济性

电子束不像激光束那样需要激光气体及辅助气体,同时电子束的能量效率又极高,因此电子束表面强化处理的成本比激光表面强化处理要低得多.此外,电子束加热的功率范围比激光大.目前,电子枪的功率一般可达 30—60kW,最高的可达 150kW.而最大的工业激光器,目前只能达到 15—20kW,大多数设备则在 1—5kW 之间.

4.2 表面强化自由度

激光束对焦时,必须移动工作台,而电子束对焦是通过控制聚焦透镜的电流,因此可以在任意位置上对焦.另外,电子枪对电子束轰击表面的角度没有特殊限制,而激光束则最好是垂直入射.对于一些盲孔表面的加热,电子束用很小的磁性偏转线圈操纵光束转动,只需简单地通过变更计算机的软件即可实现,比激光用带水冷的反射镜操纵光束要更方便.由此可见,电子束表面强化处理的自由度比激光束表面强化大很多.

4.3 可控性和定位

激光具有极高的可控性能,可精确地瞄准工件要加热的部位;而电子束的可控性则较激光为差,加工定位也不如激光容易实现。

4.4 气氛条件

激光束在空气中表面强化处理必须采用辅助气体来隔绝空气,与此相反,电子束表面强化处理则要求在真空条件下进行电子束照射。因此,激光束对于大型零件的表面强化处理是较为有利的。但另一方面,电子束的真空条件可以给工件造成一个无灰尘和无氧化和氮化的环境,从而获得更光洁的强化处理表面。

4.5 能量的传送

激光束的能量传送较电子束优越,一台振荡器可以向几个工件传送激光束,因此激光束在高效生产线中的利用价值较大。

5 结束语

人们对激光和电子束表面强化技术已进行了大量的研究,积累了许多有关激光和电子束表面强化的研究资料,获得了较为充分的实验结果且在实际应用方面也取得了许多重要进展。但是,现有的工作多为工艺摸索的结果,经验较多而理性化水平很低。迄今为止,人们对激光束和电子束表面强化处理中的传热、传质、流动以及相变等热物理过程及其与材料行为间的耦合作用尚不十分清楚,这直接限制了人们预测及调控微观组织结构(包括各种缺陷)以便提高加工质量和性能的能力。此外,目前对电子束表面强化技术的研究远远不及激光表面强化技术,特别是二者的比较研究更是少见。因此,今后激光束和电子束表面强化技术的研究发展趋势将主要集中在上述几个方面。可以预料,随着研究的不断深入,激光束和电子束表面强化处理将成为工业应用中的竞争对手,就其发展前途来看,电子束表面强化技术

也许有后来居上的可能。

参 考 文 献

- [1] Lim Y S, Suh J H, Kuk I H *et al.* Metall. Trans., 1997, 28A:1223
- [2] Pan Q Y, Huang W D, Song R G *et al.* Surf. Coat. Technol., 1998, 102:245
- [3] Khor K A, Vreeling A, Dong Z L *et al.* Mater. Sci. Eng., 1999, A266:1
- [4] Tauqir A, Zaigham H, Hashmi F H *et al.* J. Mater. Sci., 1997, 32:465
- [5] Muller G, Schumacher G, Strau D. Surf. Coat. Technol., 1998, 108-109:43
- [6] Majumdar J D, Weisheit A, Mordike B L *et al.* Mater. Sci. Eng., 1999, A266:123
- [7] Ramous E. J. Mater. Process. Technol., 1996, 57:1
- [8] 宋武林,朱蓓蒂,甘翠华等.中国激光,1995, 22A(4):309 [SONG Wu-Lin, ZHU Bei-Di, GAN Cui-Hua *et al.* Chinese Journal of Lasers, 1995, 22A(4):309(in Chinese)]
- [9] 裴宇韬,李冬琪,雷廷权等.中国激光,1996, 23A(3):265 [PEI Yu-Tai, LI Dong-Qi, LEI Ting-Quan *et al.* Chinese Journal of Lasers, 1996, 23A(3):265(in Chinese)]
- [10] 李强,雷廷权,王富耻等.中国有色金属学报,1998, 8(3):420 [LI Qiang, LEI Ting-Quan, WANG Fu-Chi *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(3):420(in Chinese)]
- [11] Munitz A, Abbaschian R. J. Mater. Sci., 1998, 33:3639
- [12] Choo S H, Lee S, Kwon S J. Metall. Trans., 1999, 30A:1211
- [13] Tauqir A, Nowotny H, Strutt P R. Metall. Trans., 1990, 21A:3021
- [14] 曲敬信,汪泓宏.表面工程手册.北京:化学工业出版社, 1998. 493—510 [QU Jing-Xin, WANG Hong-Hong. Handbook of Surface Engineering. Beijing: Chemical Industry Press, 1998. 493—510(in Chinese)]
- [15] Basu B, Sekhar J A, Schaefer R J *et al.* Acta Metall. Mater., 1991, 39:725
- [16] Tosto S, Vanhille P, Vignaud C. Surf. Coat. Technol., 1993, 58:137