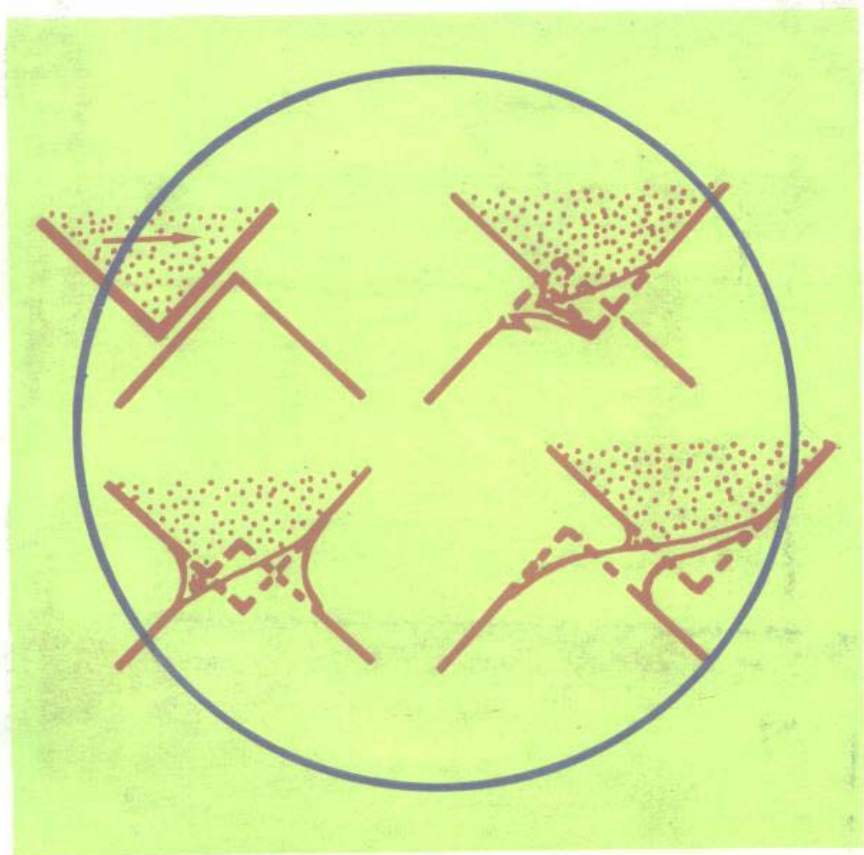


材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书



激光表面强化

材料耐磨抗腐蚀及其表面技术丛书 编委会主编

(京) 新登字054号

本书是“材料耐磨抗蚀及其表面技术”丛书的第六分册，它介绍了激光表面强化技术的概况和它在工业上实用的情况。第一章激光表面强化工艺原理及装备；第二章激光表面强化的国内外试验；第三章激光表面强化对各种性能的影响和在工业上的试验及应用，本书内容新颖，文字深入浅出，图文并茂，是一本激光（或电子束）表面强化技术的入门读物。

本书可供从事材料表面强化方面工作的具有中专以上水平的工程技术人员阅读，也可供其它有关科技人员及大专院校师生参考。

激 光 表 面 强 化

材料耐磨抗蚀及其
表面技术丛书编委会 主编
李志忠 编著

*

责任编辑：常燕宾 版式设计：胡金瑛
封面设计：刘 代 责任校对：熊天荣
责任印制：路 琳

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $7^{3/8}$ · 字数 162 千字

1992年10月北京第1版·1992年10月北京第1次印刷

印数 00 001—1 300 · 定价：7.00 元

*

ISBN 7-111-01669-6/TG · 464



出
版
社

丛书编委会顾问 陈南平 邵荷生 王小同

主编 刘家濬

副主编 周平安 孙希泰 廖乾初

编委会委员 (按姓氏笔划)

王小同 刘家濬 刘英杰 孙希泰 李诗卓

李志芳 陈玉民 周平安 范玉殿 倪瑞澄

高彩桥 郇振声 常燕宾 廖乾初

前 言

在国民经济和国防建设中，各种机械产品的零件由于磨损与腐蚀引起的早期失效与报废，从而造成能源与材料的消耗是十分惊人的。各主要工业国家都有这方面的调查统计。如美国每年由于摩擦磨损和腐蚀造成的损失各约 1000 多亿美元，各占国民经济总产值的 4%。我国据有关部门的不完全统计，每年摩擦学损失达 400 亿元，腐蚀方面的损失也将近 200 亿元。同时，材料的磨损与腐蚀也是影响近代机械产品的性能质量和寿命，从而影响其竞争能力的重要问题。作为机械产品的设计原则，目前已从单纯的强度设计发展到针对材料强度、磨损与腐蚀三大失效原因的综合设计。因此，解决材料的耐磨与抗蚀问题，已受到国内外机械设计与制造部门、材料研究与生产部门的普遍重视。

材料的磨损与腐蚀是个相当复杂的边缘学科，它受到一系列因素的影响。解决的途径应从分析失效的原因出发，从调整或改变工况条件，改善构件设计，合理选择材料，改进工艺措施和进行表面防护等各个方面，由整个系统角度去确定解决方案。原则是从实际出发且经济有效。为此需要通过近代研究方法，弄清系统中各因素的相关关系，即弄清楚磨损与腐蚀的基本规律和失效机理，以便正确指导这方面的工程实践。因此，中国机械工程学会材料学会于 1982 年决定成立“材料耐磨抗蚀及其表面技术委员会”，其任务就是要推动综合研究解决材料耐磨抗蚀问题的学术交流活动，为节约

能源与材料消耗,提高机械产品质量发挥积极作用。为了尽快地,广泛地把这方面的基本理论知识和研究成果介绍给广大的有关工程技术人员,使其能在生产及科研实践中应用并收到实效,为此,学会决定编写一套“材料耐磨抗蚀及其表面技术”丛书,由机械工业出版社出版,为此成立了丛书编委会及顾问组。第一批丛书包括丛书概论等十个分册(分册名称附后),每册大约15~25万字左右。本套丛书共分四大部分,第一部分材料的摩擦与磨损;第二部分材料的腐蚀与防护;第三部分材料表面强化;第四部分材料的表面分析。

材料的腐蚀与防护只在第一分册概论中作一般的介绍,详细的论述将待再版时继续补充。

本丛书选材力求先进、全面,尽量作到在内容上具有一定理论深度,概念准确。为避免与其它专业丛书重复,本书力求突出材料的耐磨与抗蚀,重点放在应用上,同时内容通俗易懂,便于自学掌握。

第三分册激光表面强化共分三章,由李志忠同志编著,全书由北京钢铁学院宋沂生教授审阅。

由于作者知识水平有限,经验阅历不多,书中缺点错误在所难免,恳请广大读者和专家提出批评指教。

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书编委会

1984.11.

目 录

第一章 激光表面强化工艺原理及装备	1
一、概述	1
二、激光的原理及特点	3
(一) 激光的原理	3
(二) 激光的特点	8
三、激光表面强化装备	9
(一) 工业 CO ₂ 激光器	9
(二) 激光表面强化用外围装置	21
四、激光表面强化工艺原理	41
(一) 高能密度激光束加热金属的过程	41
(二) 强化前的表面预处理	47
(三) 各种表面强化工艺概念	53
第二章 激光表面强化的国内外试验	56
(一) 激光相变硬化	56
(二) 激光熔化—凝固处理	97
(三) 激光表面合金化及涂敷部分	130
(四) 激光化学热处理	146
(五) 激光冲击硬化	159
第三章 激光表面强化对各种性能的影响和在工业上 的试验及应用	161
一、激光表面强化对各种性能的影响	161
二、零件的试验及生产	191

(一) 处于试验试用阶段的零件	192
(二) 已大量生产的两种零件	209
(三) 国内实验生产概况	212
(四) 大功率 CO ₂ 激光吸收体的试制	214
(五) 综合分析及补充	216
三、今后的发展趋势	220
附录	228
主要参考资料	229

第一章 激光表面强化工艺原理及装备

一、概 述

光对人类的生产和生活有着极为密切的关系。人们通过光和物质的相互作用，逐步对光的性质得到认识。太阳光是地球上多种能量的源泉。利用光作为热源，在我国古代早就有所认识和应用。远在纪元左右，古籍《淮南子·天文训》中就有关于用凹反射镜取火的记载。多年来有许多关于光具有极大威力的幻想，例如阿基米德曾经想利用多面大镜子反射太阳的光来烧毁敌人的战船。我国古代小说封神榜、西游记等中亦有多处用能发出强光的法宝来杀伤对方的幻想描述。还有 1897 年出现的科学幻想小说“宇宙大战”中所渲染的“死光”威力更大，能使被照射的物体在瞬间燃烧，铅变成水，水立即爆发成为蒸汽。这种幻想曾风靡一时，成为人们日常谈论并带恐怖感的一个内容。这些都表示人类对光的强大能力的利用寄予着非常大的希望。

这种幻想终于在 1960 年美国加利福尼亚州 Hughes 研究所得初步实现。该所研究人员 Maiman 用 $\phi 6\text{mm}$ 、长 45mm 的红宝石单晶发射出波长为 $0.6943\mu\text{m}$ 的红色脉冲激光。在 1960 年 7 月 8 日“纽约日报”的记载中，曾把它命名为“比太阳还亮的原子放射光”，使人们为之震惊。嗣后各种激光器和激光的应用技术如雨后春笋般地发展起来，大有不可一日之势。由于激光技术的出现促使很多科技领域进行革

新及发展，同时激光技术本身也随之极快地发展起来。

利用激光作为热源进行材料的加工，从激光出现不久即取得了很大的成就。人们所配带的手表中钻石的孔，就是激光打出来的。但是由于初期的激光器功率较小，效率也很低，仅能用于电子器件，微型零件的打孔、切割、修整及焊接上。最近，能长时间在工业环境中连续工作的大功率、高效率激光器不断出现，提高了打孔、切割、焊接的能力，扩大了使用规模，且从 70 年代初期已开始研究试验它在金属表面强化方面的作用。

机械零件的失效，有一些是由于整体机械性能不足引起，但大部分是直接或间接地由于表面耐磨、耐蚀性极低造成的，在一般情况下，不耐磨所占比重更大。已具有整体综合性能的零件，只要在其所需的局部部位施以适当的表面强化处理，提高其耐磨性和耐蚀性，就能显著延长其服役时间。这样，由于使用寿命的增加，而提高了技术经济效益，所以就促进了各种表面强化技术的发展，新发展的高能密度表面强化技术更引人注目。高能密度表面强化，是在材料的表面施加极高的能量，使之发生物理、化学变化，以达到强化的目的。其特点是，工序比较简单；过程非常迅速；零件变形较小；生产效率高。

激光表面强化是高能密度表面强化技术中的一种主要手段。在一些特定情况下它具有传统表面强化技术或其它高能密度表面强化技术不能或不易达到的特点，这使得激光表面强化技术在表面强化的领域内占据了一定的席位。目前，我国及许多国家均进行了大量的试验研究工作。有的已用在生产上，有的正逐步地为实际生产所采用，收到了很大的技术经济效果。它已成为高能粒子束表面强化方法中的一种最主

要的手段。下面概括而有重点的介绍一下这方面的情况。

二、激光的原理及特点

(一) 激光的原理

1. 原子的能级分布

原子是由位于中心的带正电性的原子核及环绕着它带负电性的电子组成。电子的个数与原子序数 Z 是相同的，当 $Z > 2$ 时，电子分布在原子内的多层轨道上运动。当由于某种原因电子在原子中的运动从一个轨道跃迁到另一个所允许的轨道上时，电子的能量就发生变化，同时也反映为整个原子的能量变化。表示原子能量的方法，一般如图 1-1 所示。图中每一条横线表示原子的一个能级。其中最低的能级 E_0 ，叫做基能级。处于这个能量状态上的原子称为基态。这相应于电子分布在其最低的轨道上运动。其它各能级 E_1 、 E_2 、 E_3 等都叫做激发能级，或原子能量状态处于激发态。这里需注意的是能级的分布都是离散的，而不是连续的。

在正常状态下，原子在各个不同能级上的分布是遵从玻耳兹曼定律的，如下式所示：

$$N_i = N \exp \left(-\frac{E_i}{KT} \right) \quad (1-1)$$

式中， N_i 是能级处于 E_i 的原子数目， N 是全部原子的总数。 K 是玻耳兹曼常数，它等于 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； T 是热平衡时开尔文温度 (K)。从式中可以看出，当温度为 T 时，在能级 E_2 上的原子数目 N_2 ，与在能级 E_1 上的原子数目 N_1 之比为：

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp \left[\frac{-(E_2 - E_1)}{KT} \right] \quad (1-2)$$

用图来表示时，如图 1-2。从图中可以看出，能级愈高，处于这个能级上的原子数目愈少。这种分布是原子在能级上的正常分布。

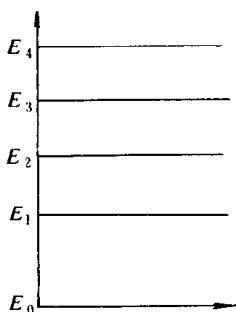


图 1-1 原子的能级

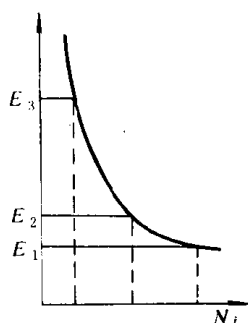


图 1-2 不同能级上分布的原子数目

2. 自发辐射和受激辐射

处于激发态的原子是不稳定的，它总是力图向低能级跃迁。由于它并不是受到外界的作用而完全是自发产生的，所以称为自发跃迁。如图 1-3 那样，由于原子从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 上，要释放出多余的能量。释放能量有两种形式。一种是变为热运动，叫做无辐射跃迁；另一种是以光的形式辐射出来，叫做辐射跃迁，图 1-3 所辐射出光子的频率 ν_{21} 为：

$$\nu_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1-3)$$

式中， h 为普朗克常数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$)。自发辐射的特点是：由于原子的跃迁都是自发地独立地进行，彼此之间毫无联系。所以辐射出来的光子在发射方向上，初始位相上都是任意的。

若原子本来处于低能级 E_1 上，如有一个频率恰好为

ν_{21} 的光子趋近它时，就将有这样的可能，即原子吸收了 $h\nu_{21}$ 的能量，以低能级 E_1 激发到高能级 E_2 上去，如图 1-4。这个过程称为受激吸收。

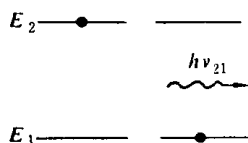


图 1-3 自发辐射跃迁

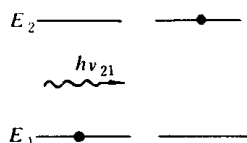


图 1-4 受激吸收

受激吸收的特点是：这个过程不是自发产生，必须有外来光子的“刺激”，而且要求光子的频率严格符合式 (1-3)，但对方向位相则无限制。

如果处于高能级 E_2 上的原子，当有光子趋近它时，而且光的频率又刚好是 ν_{21} 。那么就有这种可能，此原子受到外来光子的“刺激”，从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 上去，并发射出一个同样的光子。这样，原来的一个光子就变成了两个光子（图 1-5）。称这个过程为受激辐射。

早在 1917 年爱因斯坦从纯粹的热力学出发，用具有离散能级的原子模型来推导普朗克辐射公式。在这一工作中爱因斯坦就预言了受激辐射的存在。经四十余年之后，由于世界第一台激光器开始运转，爱因斯坦的预言得到有力的证实。

这里应特别注意的是自发辐射和受激辐射的区别，同时要注意受激辐射不是自发地产生，必须有符合式 (1-3) 条件的光子束“刺激”才会发生。而且尤其重要的是由受激辐射所产生的那个光子和原来入射的光子性质状态完全相同。换言之就是和原来入射光子同方向、同频率、同相位、同偏振

的，就等于对光子进行了放大。

3. 粒子数反转与激活媒质

激光是受激辐射的产物。只有在受激辐射占优势时才能发射出激光。受激辐射占优势在一般平衡状态是很难达到的。因为根据玻耳兹曼分布定律，处于高能级上的原子数总是比低能级上的原子数目少。只有当高能级的原子数目多于低能级上的原子数目才能满足受激辐射占优势的条件，这种状态称为“粒子数反转”。但对于两个能级为 E_2 、 E_1 的体系来说，虽然可以采用各种强的“刺激”手段如光激励、放电激励、化学激励等，也只不过使高能级的粒子数目 N_2 等于低能级的粒子数目 N_1 而已，还是达不到“粒子数反转”。

现在讨论一个三能级的原子体系（图 1-6）。如果采用一种激励手段，例如光泵激励，光的频率是 ν_{31} 时，就可以将处于低能级 E_1 的原子激励到高能级 E_3 上去，当达到饱和时， N_3 可以和 N_1 接近。这时 $N_3 > N_2$ ，形成了“粒子数反转”的状态，从而提供了可以放大频率为 ν_{32} 光的可能。

$$\nu_{31} = \frac{E_3 - E_1}{h} \quad (1-4)$$

$$\nu_{32} = \frac{E_3 - E_2}{h} \quad (1-5)$$

把某两个能级间能呈现“粒子数反转”的物质叫做激活媒质。上面是以原子为例来介绍的。实际上离子、分子等粒子都具有能量和能级，只不过其能量的存在形式不同而已。例如气体分子的能量表现为分子的振动，但它们在一定的情况下也可以呈现“粒子数反转”状态。

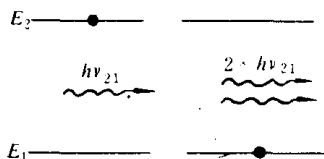


图 1-5 受激辐射过程

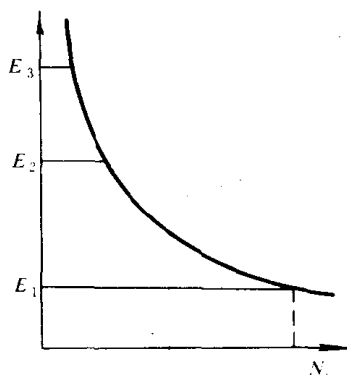


图 1-6 一种三能级体系示意图

4. 光学谐振腔与激光器

上面介绍过，受激辐射与“粒子数反转”是光放大的必要条件。但为了高效率地获得强激光束，人们更关心激光振荡器，也就是通常说的激光发生器。为了使激光放大器转变为激光振荡器，人们利用了光学的干涉技术和电子学的反馈放大技术，将激活媒质放在两个反射镜之间（图 1-7），其中一个反射镜是反射率为 100% 的全反射镜，另一个则约为 50~90% 的部分反射镜。

当其中的激活媒质受到外界激发产生辐射时，在光学谐振腔内，其传播方向与腔体轴向相同的光子将引起其它激发态的激活媒质产生连锁性的感应跃迁（即受激辐射），得到迅速的增强。其它方面的光子则很少引起连锁反应就离开了腔体消失掉。例如当一个光子沿轴线方向运动时，可以产生 2 个，2 个产生 4 个，4 个产生 8 个……受激辐射的光子。因两端有反射镜，所以能沿轴向方向不断连锁地进行下去。到达部分反射镜时仅放出一部分光子，其它大部分仍反射回来，进行反馈。当这种增强所得到的增益能补偿由于其它原

因（如界面透射、吸收、散射、衍射等）的损失时，则这种连锁性的感应跃迁就会持续地进行下去，形成光振荡，并由部分反射镜的输出端发射出来光子就成为激光束。

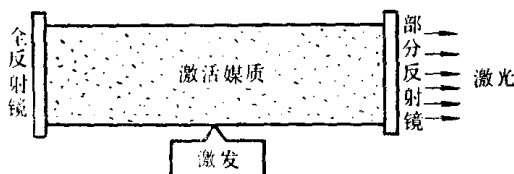


图 1-7 光学谐振腔示意图

实际上激光器是由“激活媒质”，光学谐振腔和激光装置组成。激发装置是使激活媒质呈现“粒子数反转”的外部输入能源。红宝石激光器、掺钕的钇铝石榴石（YAG）激光器，钕玻璃激光器等均属于固体激光器，都采用光泵激发的方式。对 CO_2 气体激光器来说， CO_2 是激活媒质，它是用电来激发的。由于输出功率高（可达几十千瓦），电光转换效率高。能长时间连续工作。光的波长为 $10.6\mu\text{m}$ ，属于中红外线范围。金属表面强化大都使用这种激光器。

（二）激光的特点

激光的特点有如下几个方面：

1. 高方向性

一般的光源（如电灯、日光灯等）所发出的光都是向四面八方散开的，而激光不同于普通光的特点之一就是它具有非常高的方向性。光束的发散角可以小于一到几个毫弧度，可以认为光束基本上是平行的。

2. 高亮度性

激光器发射出来的光束非常强，大功率激光器所发射出来的光束具有很高的能量及功率密度，再结合上它的高方向性，通过聚焦能使它集中到一个极小的范围之内。可以获得更高的能量密度或功率密度。

表 1-1 为几种能源的比较，从表中可以看出只有电子束的功率密度才能和激光相比拟。

表 1-1 几种能源的比较

	氧-乙炔焰	太阳光	电子束	激光
最小光斑面积 (cm^2)	10^{-2}	10^{-3}	10^{-7}	10^{-5}
功率密度 (W / cm^2)	10^4	10^5	10^7	10^9

激光参数 功率 10^4W ，发散角 $= 10^{-3} \text{rad}$ 焦距 $f = 3 \text{cm}$

3. 高单色性

激光器所发出来的光不同于普通光的另一个特点是它的频率范围非常狭。比过去认为单色性最好的光源如 Kr^{86} 灯的谱线宽度还狭几个数量级。

激光的三种特殊性能都是相互关联的。虽然在金属强化表面时，对它的单色性要求并不高，但只有单色性好的光在它传播的过程中保持平行，而避免大的扩散，才能把光波的能量传输到较远处。

三、激光表面强化装备

(一) 工业 CO_2 激光器

目前工业上用来进行表面强化的激光器，多为 CO_2 大功率激光器。其中小功率者大都作为实验室之用。比较实用化的多为 $2.5 \sim 5 \text{kW}$ 左右。 $6 \sim 20 \text{kW}$ 虽有商品，但由于种

种原因，还未运用在生产上，仅在高级实验室内作为一种通用的激光加工机的光源。100kW 的激光器也已研制出来，但还未商品化。国内虽然研制工作开展较晚，500W 级的直型管，于 1979 年之前已研制出来。1kW 级横流型激光器于 80 年研制成功。2kW 级的已于 82 年进行鉴定。5kW 的在 84 年已有两种通过了初步鉴定。目前，1~2kW 级的正向生产性应用过渡。

1. CO₂ 气体激光器的特点

CO₂ 气体激光器是以 CO₂ 气体为激活媒质，发射的是中红外波段，波长为 10.6μm 的激光。一般是连续波（简称 CW），但也可以脉冲式地工作。它容易获得高的功率（数百瓦~数十千瓦），并能在大功率下长时间连续地稳定工作。其特点有：

- 1) 电—光转换功率高，理论值可达 40%，一般约在 10~20%。其它类型的激光器如红宝石的仅为 2%。
- 2) 单位输出功率的投资低。
- 3) 能在工业环境下，长时间连续地稳定工作。
- 4) 易于控制，有利于自动化。

因此，在金属加工系统中，特别是金属表面强化中，主要使用这种类型的激光器。

2. CO₂ 激光器的简单原理

CO₂ 是一个三原子气体。C 原子在中间，两个 O 原子各在一边呈直线排列。虽然分子的能态系由电子能态 E_0 、振动能态 E_N 及转动能态 E_r 组成，但在发射激光的过程中，CO₂ 分子的电子能态并不改变，仅振动能态起主要作用。其振动形态有：两个 O 原子均同时接近和远离 C 原子的对称振动能态，称为 100 能级；两个 O 原子同时一个远