激光表面强化技术及其应用

华中科技大学材料科学与工程学院 (430074) 胡木林 谢长生 陶曾毅

[编者按] 激光表面强化技术至今已有20多年的历史，各方面取得了长足的进步，部分技术已经在工业实际应用中取得了显著的效果，但其推广并未达到人们所期望的效果。

本文作者简要论述了激光相变硬化、激光冲击硬化、激光上釉、激光表面合金化及激光熔覆等激光表面强化技术的工艺性能以及存在的问题，有助于广大读者对此项技术有一个全面、客观的认识。

疲劳、腐蚀、摩擦和磨损引起的工程构件的失效大多发生在表面，这一现象促使材料科学工作者对材料表面的极大关注，并促使材料表面强化技术的迅猛发展。人们希望在材料整体保持足够的韧性和强度的同时，使材料表面获得较高的、特定的使用性能，如耐磨、耐蚀和抗氧化等。激光由于其优异的性能，越来越被广泛地应用到军事、通信、医学和工业等领域。激光技术在材料科学中的应用使得材料学科无论在理论还是在工艺方面均获得重要的进展。激光的引入，使得材料工作者可以根据应用背景来进行更广泛意义上的材料设计；激光的引入，也使得材料加工工艺前进了一大步。同时，激光的引入又不断地给材料工作者提出新问题。激光表面强化技术包括激光表面相变硬化、激光冲击硬化、激光上釉、激光表面合金化和激光熔覆等。其中，激光表面合金化和激光熔覆是通过改变表面成分和组织来实现强化目的。利用高功率激光表面强化的好处在于节约具有战略价值和昂贵的合金元素、形成非平衡相和非晶态、晶粒细化、微观结构均匀化、提高合金元素的固溶度和改善铸造零件的成分偏析等。激光表面强化技术已有20多年的历史，各方面已取得长足的进展，如激光表面淬火技术在汽车缸套的表面强化方面取得了显著的效益。但是目前激光表面强化技术的推广并未达到人们所期望的效果。其原因是多方面的，如设备投资较高，激光强化工艺的不稳定、移植性差，在激光表面合金化和激光熔覆中还常常出现裂纹等问题。这有待于材料科学工作者更进一步深入研究激光表面强化的基础理论和应用技术。

一、激光相变硬化

1. 激光相变硬化工艺

激光是一种功率密度极高的能量流，当其辐照金属材料表面时，材料表面极薄的一层将激光注入的能量转换为热而使温度迅速升高，当激光作用停止后，由于金属是良导体，材料基体的热扩散作用使激光作用区的温度迅速下降，从而使材料表层经历了一个与常规淬火相似的热循环过程，淬火的结构与材料热影响区所经历的热循环有关，通过控制作用激光的功率、功率密度分布、激光作用时间（扫描速度）等参数，可以改变热循环，从而完成材料表层的激光淬火工艺。

与传统的热处理技术相比，激光淬火具有许多独特之处：加热速度快，质量好，效率高，变形极微小，控制方便可以应用于许多方面。例如，要求局部或全部表面硬化或易磨损零件，特别是要求变形小，用常规热处理不能或很难实现的硬化等，均可使用激光相变硬化。我们在对武汉钢铁公司热轧厂热剪的修复中，对剪刀刃部进行局部淬火，取得了很好的效果，降低了该厂的生产成本。

激光相变硬化通常发生在工件的表面，其表层的硬度呈梯度分布。在激光快速加热和高速冷却过程中，晶体缺陷密度激增，导致硬化层具有较高的硬度。此外，激光相变硬化过程中，淬火层内发生弹塑性变形，在工件表层产生相当大的残余压应力，增强了工件的疲劳强度。

如果不对激光淬火提出过高的要求，利用连续输出功率在千瓦级的二氧化碳激光设备进行铁基材料表面的热处理并不困难。然而，不同激光设备之间的工艺移植并非易事。即使是使用同一台激光设备，采用同一个热处理工艺，对同类工件进行同样的处理，也会得到有时是不能忽视的热处理差别，工业生产中，维护激光淬火工艺的可重复性是保证

产品质量的需要。但是，对激光淬火的深入研究表明，这是一个涉及光束质量、工件的热物理特性、工件的几何形状以及光作用方式等众多因素的复杂技术，对设备的配置以及操作人员的素质都有较高的要求。为了发挥激光淬火的优点，实现激光热处理的柔性加工，研究者们利用计算机来对加工过程中的众多因素进行综合考虑，在此基础上完成激光淬火的工艺、组织和性能设计以及激光淬火的具体实施。

2. 激光相变硬化存在的问题

（1）光斑功率密度及不均匀性影响淬火工艺的稳定性　激光束的功率密度分布是由光束的模式决定的，根据激光理论，激光束的模式主要取决于激光谐振腔的结构形式，由于不同型号激光设备谐振腔的结构不相同，输出光束的模式也不相同。实验研究表面，两种激光器在不同功率输出时，无论功率密度分布或是光斑外轮廓均发生明显变化，在激光对金属材料进行淬火的情况下，这种变化必然引起热作用的差异，因此，不但这两种设备之间的淬火工艺很难存在一种简单的移植关系，甚至对于同一台设备，由于光束的功率密度分布在形式及范围上都随光束功率发生变化，即使在同一功率下，有时也会由光学部件热畸变或受污染等原因造成功率密度分布甚至光斑形状的变化，使淬火质量产生明显的波动，给工艺制定带来极大的不便。

（2）光斑形状对淬火层均匀性的影响　在同一功率和扫描速度条件下，如果光斑形状及功率密度分布不同，所获得的激光淬火硬化带形貌及力学性能可能有明显的差别。近十多年来，国内外研制出了不少光束变换系统，然而，在实际应用中，许多工件需强化的区域并非平面，考虑到工件的特殊形状，这种光斑事实上可能导致很不理想的结果。由于实际应用问题的千变万化，未来的光束转换装置就须根据实际需要变换出不同形式的功率密度分布。

（3）大面积激光淬火硬化层均匀性难以确保　实际应用中，常遇到许多要求大面积均匀淬火的工件，如塑料模具、齿轮、木材削片机飞刀等。由于激光光斑宽度有限，只能进行搭接淬火，此时除了重复淬火区外，还会出现淬火带对前一淬火带的回火作用，而产生相应的硬度下降区（其硬度低于常规淬火硬度）。同时，激光大面积淬火时，当工艺控制参数恒定时，每道淬火带深度会逐步增加，甚至导致熔化现象，这是由于工件温度逐步升高的缘故。因此，目前要实现激光大面积淬火的深度均匀性及硬度均匀性仍有较大的难度。

（4）工件初始状态对激光淬火质量的影响　在其他工艺参数不变的情况下，工件的初始状态，如工件的形状、原始组织状态、淬火区的边界条件、表面粗糙度、表面吸光涂层等均对其激光淬火质量产生不容忽视的影响。在研究中发现：带刃口的工件如各种刀具、刃具在激光淬火时就极易造成刃口熔化现象，这主要是由于刃口处热传导困难及表面能过大造成的。工件表面形状对光束入射角（入射角与工件表面法线的夹角）影响很大，因此影响淬火质量。原始组织为常规淬火或调质组织的工件，其激光淬火深度优于退火组织的激光淬火深度，表面粗糙度的不同可导致淬火深度相差达 30%。

二、激光冲击硬化

1. 激光冲击硬化工艺

激光冲击处理（LSP），主要是利用强激光与材料表面相互作用产生的力学效应——强应力波来改善材料性能。当作用在金属材料上的激光功率密度大于 $10^8 W/cm^2$ 时，材料表面受热气化并产生等离子体，由于等离子体的爆炸将在金属材料表面产生冲击波，在此作用下，材料的力学性能得到明显的改善。

激光冲击强化与传统的强化工艺，如喷丸强化和锻打相比，是一种洁净、无公害的处理方法。由于激光冲击处理的柔性强，因此可处理工件的圆角、拐角等应力集中部位。由于激光冲击应力波的持续时间极短（微秒），特别是指有效地处理成品零件上具有应力集中的局部区域，例如提高成品零件上拐角、孔、槽等局部区域的疲劳寿命，所以 LSP 技术的工程应用前景较好。

国外进行激光冲击强化研究所用的钕玻璃激光器，输出能量为 80～100J，脉宽为 3～30ns，光斑直径约为 1cm。当光束聚焦在金属表面时，金属表面气化达到很高的温度（约为 10000K）并产生高压力的等离子体（GPa 量级），等离子体爆炸后产生与炸药爆炸类似的冲击波。近年来，我国从 3 个方面开展对激光冲击处理的研究：①激光冲击处理对金属性能的影响及工程应用。②激光冲击强化的

微观机理。③激光冲击处理的强化效果的无损检测。

激光冲击强化可分为有约束层（confined-plasma）和无约束层（direct ablation）两种类型。在有约束层的情况下，冲击波的峰值压力可以达到10GPa。国内外的研究表明，激光冲击强化可有效地提高铝合金、碳钢、钛基、镍基合金、不锈钢和铸铁等金属材料的硬度和疲劳寿命。

大量研究表明，激光冲击强化可显著地提高材料的硬度。从这些研究中可得出硬度提高的机理主要有三方面：①试样表层中存在的高密度位错是硬度提高的主要原因。②对各种铁基合金冲击后位相的转变（如γ相转变为α相），也是材料硬度提高的一个原因；在激光冲击处理的退火态T8钢中看到了由于激光冲击诱发相变而产生的马氏体组织，解释了硬度提高2倍的原因。③冲击处理后材料结构的改变（例如缠结），也能极大地提高表面硬度。

材料疲劳寿命的提高，主要是由于表面残余压应力的存在。同时，冲击后在材料中存在的高密度位错和位相的改变，使材料的硬度和弯曲应力得到提高。2024T3铝合金经激光冲击强化后，疲劳寿命提高4倍。江苏理工大学及南京大学对2024T62铝合金进行激光冲击处理，激光冲击区的硬度提高42%，在95%置信度下，LSP试件的中值疲劳寿命是未激光冲击试样的5.4～14.5倍。江苏理工大学也对常用的45钢进行激光冲击处理，LSP区硬度提高32%，LSP试件的中值疲劳寿命是未冲击试件的1.1～2.133倍（置信度95%）。华中理工大学的研究工作表明，激光冲击处理大幅度提高LY12-CZ铝合金的疲劳寿命的微观机理是激光冲击后的位错密度提高21倍以及在材料表面产生49.43MPa的残留压应力。再按照压电转化原理，计算出激光冲击在LY12-CZ铝合金中形成的瞬态冲击波的量值为MPa级，并且激光冲击波是由一系列不同频率的波叠加的结果，其中高频波所占比例较大。

南京大学提出用表面粗糙度和微凹坑两个表面质量指标并分成4个等级，作为在实际生产应用中判别和控制激光冲击强化效果的无损检测手段。由上所述，我国已在激光冲击硬化的应用基础方面做了大量的研究，得到了比较明确的研究结果，现在问题的关键是要尽快推出具有合适性能价格比的LSP工业应用装备。

2. 激光冲击硬化存在的问题

现在激光冲击强化的研究仍存在以下难题：激光冲击效果的无损检测，目前测表面残余压应力主要使用射线衍射仪，这种方法设备昂贵，需由专业人员操作，只适合实验室使用；新型约束层的选择研究；冲击参数的优化研究；高能量、高频率激光器的研制。

三、激光上釉

激光上釉又称激光上光，它同激光淬火相比，所用能量密度更高（$10^7 \sim 10^8 W/cm^2$），可使金属表面快速熔化，在表面上形成一层非常薄的熔化层。当激光快速移走后，金属本身对熔化区进行"自淬"，冷却速度高达$10^4 \sim 10^8 ℃/s$，通过这种快速熔化—凝固过程，使金属表面产生特殊的非晶层（金属玻璃）。

1976年Breinan等提出了"激光上釉"新工艺，引起了中外学者浓厚的兴趣。美联合工艺研究中心首先用激光获得金属非晶层，厚度一般为1～10μm，表面硬度可达1000HV以上。由于在韧性好的金属表面形成极薄的玻璃态，从而克服了玻璃具有高脆性的弱点。试验证实了"激光上釉"区比母材具有高得多的抗裂纹性。

四、激光表面合金化及激光熔覆

1. 激光熔覆层材料体系、组织结构与性能

激光表面熔覆和激光表面合金化是通过表层合金的设计，使工件获得较高的使用性能，如耐磨、耐蚀和隔热等。激光表面强化层的性能取决于强化层的组织和相组成，而其化学成分和工艺参数又决定了表层的组织结构。激光熔覆和表面合金化层组织结构大体上分为三部分：熔化区、过渡区及热影响区。不同的合金成分及工艺条件下的实际形态有一定的差别。激光熔覆合金体系主要有铁基合金、镍基合金、钴基合金和金属陶瓷等。激光熔覆铁基合金适于要求局部耐磨且容易变形的零件。铁基合金深层的基材多用铸铁和低碳钢；熔覆镍基合金适于要求局部耐磨、耐热腐蚀及抗热疲劳的构件，所需的激光功率密度要比熔覆铁基合金的略高；钴基合金涂层适于要求耐磨、耐蚀和抗热疲劳的零件；陶瓷涂层在高温下有较高的强度，且热稳定性好，

化学稳定性高，适用于耐磨、耐蚀、耐高温和抗氧化性的零件。所用基体材料广泛，有碳素钢、合金钢、铸铁以及铝合金、铜合金、镍基高温合金等。此外，材料科研人员还开发了铜基合金、银基合金、非晶态和准晶涂层。

(1) 涂层合金体系　镍基合金：镍基合金的合金化原理是运用钼、钨、铬、钴、铁等元素进行奥氏体固溶强化；运用 Al、Ti、Nb、Ta 获得金属间化合物 γ′相沉淀强化；添加 B、Zr、Co 等元素实现晶界强化。激光熔覆镍基合金粉末的合金元素选择也是基于以上几个方面来选择的，但考虑到激光熔覆工艺的特点，合金元素的添加量有所差别。文献在 Y4 模具钢上熔覆镍基合金时的合金元素为 Cr、Fe、Mo、W、B、Si 和 C，从镍基合金元素选择不难发现其强化方式主要是固溶强化，B、Si 的加入可以改善工艺性能，碳的加入可以获得一定的碳化物，形成弥散强化相，进一步提高其耐磨性，文献在 H13 钢基体上分别熔覆两种成分的镍基高温合金，均得到了基体 γ 相 + 弥散分布碳化物颗粒 + 共晶组织，区别在于弥散颗粒和共晶组织中的碳化物相，其中 MCrAlY 的性能最好，其涂层硬度随温度升高下降较缓，表明稀土元素对镍基高温合金的热稳定性有利。此外，稀土元素对合金高温抗氧化性、耐硫腐蚀等也均有重要作用。为提高涂层的耐磨性，研究表明添加一定量的碳化物可显著提高涂层的耐磨性。熔覆 Ni 基高温合金 + 30% (vol.) WCp，得到的组织为：γ 基体上分布 3 ~ 6μm 的质点（球形或短棒状），还有细小的片状共晶组织，球形质点为 (W、Ti) C1-x，棒状质点为 W_2C 和 WC，共晶组织中存在 $M_{12}C$ 型碳化物 $(Fe、Cr、Ni、Co)_6(W、Mo、Fe)_6$，由于基体的稀释作用，下半区的 $M_{12}C$ 要比上半区多，由于 WC 颗粒在熔覆过程中存在着溶解和重新析出，使得第二相质点呈现多种形态，如棒状、球状甚至片状共晶 $M_{12}C$ 的出现，这必然影响到熔履层及基体的组织和结构。在结合区组织方面，文献对基材为 45 钢和 4CrB 施行熔覆 Ni 基合金系列试验。组织观察发现，扫描速度及添加的陶瓷相的类别（可溶、部分溶解及熔化后不互溶）对微观组织、结合区组织和形态有很大影响。在铝合金基体上熔覆镍基耐磨合金方面，文献在 ZL109 上分别研究了 3 种成分的涂层 Ni45B、Ni45B + RE 和 Ni45B + Si，得到了等轴晶 + 少量柱状晶组织，其相组成特别复杂。研究表明，加入 RE 和 Si 对提高形核率（变质作用）有一定效果。

(2) 钴基合金　激光熔敷钴基合金主要用于钢或铁基合金基体上。钴基合金的成分设计上，品种比较少，所用的合金元素主要是 Cr、W、Fe、Ni 和 C，此外添加 B、Si 以形成自熔合金。在 2Cr13 基材上熔覆 Stellite 合金时，熔覆层的结构分为 3 层：合金层、过渡区和热影响区。合金层的组织为粗细不均匀，且方向紊乱的树枝晶，热影响区在去应力退火前为马氏体组织，去应力退火后为保持马氏体位向的回火索氏体。对 Y4 和 34CrNi3Mo 等钢的研究表明，钴基合金是最佳的选择。

2. 激光表面合金化及激光熔覆面临的问题

激光熔覆工艺方面，前人的研究大多集中于激光加工中各工艺参数对熔覆层或合金熔化区的宏观形貌（形状系数）、组织以及涂层的使用性能的影响上。对各种具体情况优选出一种最佳综合工艺参数。对诸多工艺参数中，分别提出综合工艺参数，如：比能、线能量密度等等，并未取得共识，还有待于进一步的研究激光熔覆的热力学和动力学，以揭示其本质规律。

在激光熔覆及激光合金化层的组织及性能方面，现有的研究还只是局限于对所得到的组织形貌的形成的解释。对相应条件下的使用性能也仅仅是从材料的角度去说明，还没有达到性能与组织的规律阶段，更没有达到以性能去选择组织这一更高层次。

在涂层的质量控制方面，现有的研究主要是通过工艺试验，优化出不产生宏观裂纹的一组或多组工艺参数。

在强化区的微结构方面，现有的研究已有对高倍下的微细结构及新相的初步研究，并针对一些宏观开裂现象或性能的定性解释。新相形成的热力学解释依然停留在可逆过程热力学上。很明显，这种解释只能是定性的和粗略的，要进一步深入地认识激光熔覆及合金化的机理，在热力学方面需要扩充非平衡态热力学。

在强化层的裂纹问题上，现有的研究仅对凝固裂纹（即铸造过程中的热裂纹）作了较深入的研究，而对凝固后所形成的裂纹（如在相界面等处，

（下转第 74 页）

（续）

使用温度/℃	盐浴成分及配比（%）	使用条件	使用效果
950～1050	94.8$BaCl_2$ + 5MgF_2 + 0.2B		
	96.9$BaCl_2$ + 3MgF_2 + 0.1B		
	96.4$BaCl_2$ + 3$Na_2B_4O_7$ + 0.6B	硼砂经焙烧盐浴稳定性好	经一昼夜后，钢片试验结果 w_C = 1.40%～1.30%以上。经45h可保持1.1%。

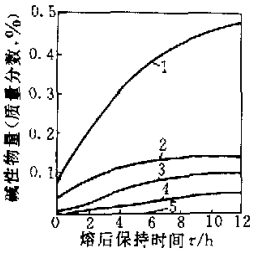


图1 70% NaCl + 30% $BaCl_2$ 盐浴在800℃时的老化

1—盐浴表面饱和水蒸气 2—常温大气压下饱和水分 3—含水分的 N_2 4—干燥空气 5—干燥 N_2

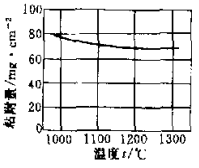


图2 $BaCl_2$ 单盐的粘附量和温度的关系

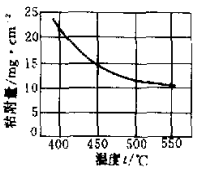


图3 $NaNO_3$ 浴的粘附量和温度的关系

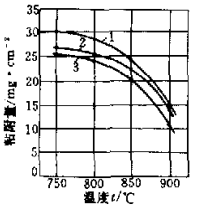


图4 $BaCl_2$ + NaCl 混合浴的粘附量和温度的关系

1—30% NaCl 2—50% NaCl 3—70% NaCl

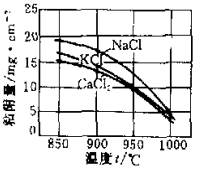


图5 NaCl、KCl、$CaCl_2$ 单盐的粘附量和温度的关系

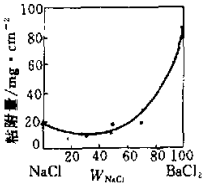


图6 $BaCl_2$ + NaCl 混合浴粘附量随成分的变化（900℃）

（20030328）

（上接第8页）

由于热应力或残留应力引起）未见报道。这也许是由于微观力学分析方面较为欠缺所引起的。

在强化层的宏观应力的分布方面，实验测试结果的报道居多；理论方面的分析仍然是考虑整体及涂层的热膨胀系数不一致而得出的简单的计算方法，其结果是非常粗略的，目前还未见从材料的热物性出发并结合涂层的组织形貌特征来对宏观应力分布进行理论研究。要作这方面的研究，需要对组织形貌进行分析，提取其特征参数，并建立相应的力学模型，这样才能定量，至少是半定量地进行研究。

在涂层材料设计方面，目前还沿用热喷涂的合金设计，或在此基础上加以优化，以保证熔覆质量。还未见到以改善微观组织的界面相为目的的设计出现，这属于化学相溶性方面的设计。如果进一步结合材料各组成部分的热物性和涂层结构设计（即物理相容性），这将是涂层材料设计的真正意义上的材料设计，这些工作有待于深入研究。

在激光熔覆层和合金化区的服役条件下的开裂问题还没有相关的报道。文献中的强度试验是用于解释涂层的薄弱环节，并未给出涂层材料的韧性指标。在裂纹体问题方面，断裂力学理论发展比较深入，有必要将其引入激光熔覆的性能评价中来。损伤力学理论在分析涂层的宏观及微观缺陷方面也将是一个很好的手段。这些工作有待于开展。

（20030218）