

激光熔覆技术及其应用（上）

原中国航空精密机械研究所（北京 100076） 荣烈润

一、概述

1. 激光熔覆技术的原理

激光熔覆（也称激光色覆）是材料表面改性技术，其原理是先在基材表面熔覆一层具有特殊物理、化学或力学性能的材料，利用高功率密度激光束（ $10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ ）辐照金属表面，通过迅速熔化、扩展及迅速凝固（冷却速度可达 $10^2 \sim 10^6 \text{ K/s}$ ），从而在材料表面构成一种新的复合材料，以弥补基体材料所缺少的高性能，这种复合材料可充分发挥两者的优势，弥补相互间的不足。

激光熔覆与合金化都是利用高功率密度的激光束所产生的快速熔凝过程，在基材表面形成与基材相互熔化的且具有完全不同成分与性能的合金覆层。两者的差别仅在于：激光熔覆中覆层材料完全熔化，而基材熔化层极薄，因而对覆层的成分影响极小；而激光合金化则是基材的表面熔融层内加入合金元素，从而形成以基材为基础的新的合金层。

2. 激光熔覆技术的特点

激光熔覆可根据工件的工况要求，熔覆各种设计成分的金属或非金属，制备耐热、耐蚀、耐磨、抗氧化、抗疲劳，或具有光、电、磁特性的表面覆层。与工业中常用的堆焊、热喷涂及等离子喷焊等相比，具有以下优点：①熔覆热影响区小，工件变形小，熔覆成品率高。②熔覆层晶粒细小，结构紧密，其硬度相对较高，耐磨、耐蚀性等较好。③由于激光作用时间短（纳秒级），基体的熔化量较小，对熔覆层的稀释率相对低（5%~8%），故可在熔覆层比较薄的情况下，获得所要求的成分及性能，从而节省昂贵的覆层材料。④高的冷却速度（可达 10^6 K/s ）使凝固组织细化，甚至产生新性能的组织结构，如亚稳态、非晶态、超弥散态等。⑤

激光熔覆过程易实现自动化，且熔覆层质量稳定。

3. 激光熔覆技术的理论基础

在激光熔覆技术中，除基体与粉末，工艺参数也对涂覆层的质量影响显著，如保护气体种类及流量（影响熔覆层的形貌、深度及界面稀释率）、粉末的流量及送粉的位置，激光器的功率、粉末喷嘴的直径大小、激光扫描速度，以及离焦量、预热温度等。为此，有必要从激光与金属的相互作用和过程中的物理化学现象两方面进行讨论。

（1）金属对激光的吸收及影响因素 金属熔覆是基于光热效应的热加工，关键是激光能够被加工材料所吸收并转化的热量。金属对激光的吸收与激光、材料的特性以及表面状态等诸多因素有关。①波长。随着激光波长的缩短，金属对激光的吸收增加。多数金属对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长的 CO_2 激光器吸收率约有 10%，而对 $1.06 \mu\text{m}$ 的 YAG（掺钕钇铝石榴石）激光的吸收率为 30%~40%。在激光加工时，激光波长应小于被辐照金属的临界波长。②激光功率密度。即单位光斑面积内的功率大小。不同功率密度的激光作用在材料表面会引起材料的不同变化，从而影响材料对激光的吸收率。在激光熔覆过程中，激光功率密度是一个很重要的参数，用较大功率的激光器来进行熔覆最好，但受条件和成本限制，一般不易实现。经试验可知，熔化并不总是随着吸收率的提高而提高，功率大幅提高有可能导致吸收率的降低。如果激光功率密度达到 10^6 W/cm^2 量级时，材料表面将在激光束的照射下强烈气化并形成小孔；而当超过 10^7 W/cm^2 量级时，将会出现等离子体对激光的吸收产生屏蔽现象。为此，激光功率的选择对激光熔覆也有影响。此外，功率密度的选择还应考虑涂层的塌陷问题。③激光的热有效利用率。试验和理论计算都表明激光热熔覆处理过程中激光的有效利用率很低。④材料的性质。材料导电性的

优劣决定了金属对激光吸收率的高低。⑤材料的表面状态。金属表面的吸收率随着其表面粗糙度值、各种缺陷及杂质的增加而增加。可以增加一倍。为了提高其吸收率,可在表面涂覆粉末中添加一些利于激光吸收的物质,如石墨等。常采用惰性气体保护被辐照的材料表面来减少最佳涂层厚度,并提高激光加工功率。此外,入射角的偏振以及表面氧化等都对激光吸收率产生影响。

(2) 金属工艺参数与稀释率的关系 所谓“稀释率”指在激光熔覆过程中,由于熔化基材的混入而引起了熔覆合金成分的变化程度,通常用基材合金在熔覆层所占的百分数来表示。稀释率是激光熔覆工艺控制的重要参数。稀释率过大、过小都会造成熔覆层的不良结果。过大,既损害熔覆层固有的性能,又会加大熔覆层开裂、变形的倾向;过小,则不能在熔覆层与基体界面形成良好的冶金结合,熔覆层容易脱落。为此,控制稀释率是获得良好熔覆层的关键。经大量试验证明,获得优良熔覆层的先决条件为:熔覆材料与基体理想的结合应是在界面上形成致密的低稀释率和较窄的交互扩散带。

计算稀释率的方法有两种,一种为按熔覆横截面积测量值计算稀释率,称为几何稀释率。因而可通过控制熔覆横截面积来控制稀释率,而基体熔化面积是由激光能量决定的。还有一种为按照熔覆层成分的实测值来计算稀释率。

影响稀释率的主要因素有熔覆材料特性及工艺参数两个方面,其中熔覆材料特性主要是指熔融合金的润湿性、自熔性和熔点。工艺参数指激光功率、光斑尺寸、送粉率及扫描速度等。

稀释率与激光功率、光斑尺寸和扫描速度3个参数关系可采用“比能量”加以概括。在同等的条件下,稀释率随着比能量(kJ/cm^2)的增加而增加。这是由于单位面积的激光能量增加造成了更多基材熔化的缘故。比能量对稀释率的影响还与粉末层的预置厚度有关,粉末层越薄,其稀释率随比能量的增加就越快;粉末层越厚,吸收大部分激光能量,从而限制了基材的熔化量。在相同的比能量下,稀释率会随着激光功率密度的提高而增大。这主要是与基材的热传导有关。在同步送粉法中,若激光功率及光斑尺寸相同,稀释率会随着送粉速率的增大而显著下降,为此可以认为送粉速率是决定

熔覆层质量的最为关键的因素。

总之,在实际工艺中必须统筹设计,选择合适的熔覆材料与基体材料体系、送粉方式和工艺参数匹配,才能达到稀释率的控制,进而达到成分、组织和性能的设计要求。

二、激光熔覆材料

1. 激光熔覆材料设计的一般原则

在设计涂层材料时,不能只强调涂层材料的使用性能,还需考虑涂层材料是否具有良好的涂覆工艺性,尤其是与基材在一些热物理性能上是否具有良好的匹配关系。

(1) 熔覆材料与基材热膨胀系数的匹配 目前,多数研究是按照激光熔覆层与基材热膨胀系数的匹配原则进行熔覆材料的选择及成分设计。这是因为熔覆合金与基材之间热膨胀系数的差别是在熔覆层中产生开裂、裂纹的重要原因之一。考虑到激光熔覆的工艺特点,基材和涂层的加热和冷却过程不同步,故两者的热膨胀系数不一定须满足同一性原则,熔覆层的热膨胀系数在一定范围内越小,熔覆对开裂越不敏感。

(2) 熔覆材料与基材熔点的匹配 在激光熔覆技术中,若熔覆合金与基材的熔点之间差异过大,就无法形成良好的冶金结合。若是熔覆材料熔点过高,会使得涂层表面粗糙度高且基体表层过烧,严重污染熔覆层。反之,熔覆材料熔点过低,则使熔覆层过烧,且与基体间产生孔洞和夹杂。因而,力求两者的熔点相匹配。

(3) 熔覆材料对基体的润湿性 在熔覆过程中,除了考虑熔覆材料的热物理性能外,还应考虑其在激光快速加热下的流动性,化学稳定性,硬化相质点与粘结相金属的润湿性,以及高温快冷时的相变特性等。润湿性也是一个重要的因素。

2. 激光熔覆材料的分类及特点

激光熔覆材料常采用:热喷涂类材料和热喷焊类材料,包括自溶性合金材料、碳化物弥散或复合材料,以及陶瓷材料等。这些材料具有优异的耐磨、耐蚀性能,并通常以粉末的形式使用,熔覆时采用火焰喷焊,可以获得表面光滑并与基材结合较好的熔覆层。**MW** (待续) (20120526)