

激光加工在汽轮机叶片中的应用现状

全威, 李松林

上海电气电站设备有限公司 上海 200240

摘要: 利用激光作为热源的多种加工方法均能获得与传统加工方法相当的加工效果, 如果充分利用激光高能量密度的特性, 还能取得更高的精度、更佳的性能, 并且可以解决传统加工方法无法解决的工程难题。简要介绍了激光加工的基础并回顾了激光加工技术在汽轮机制造中叶片制造、表面改性、叶片修复等典型应用, 论述了目前的应用状态, 展望了未来面临的挑战。

关键词: 激光加工; 汽轮机; 叶片; 表面改性

1 序言

激光具有高亮度、高方向性、高单色性以及高相干性等特性, 基于这些优良特性, 激光已经成为一种极具吸引力的工具和研究对象, 因此自激光技术问世以来就受到诸多领域的关注。而在表面改性领域, 传统的技术有火焰淬火、电镀、堆焊以及热喷涂等, 但随着技术进步与市场需求的增加, 企业的发展趋势将向着高质量、低成本、交货周期短、制造流程柔性大、环境友好等方向前进^[1-3]。

激光加工由于具备易保证产品质量、高生产效率、加工余量少(如果需要)、易实现自动化生产、材料适用范围广、材料利用率高、环境影响小、与工件无直接接触以及更小的热效应影响等独特的优势, 被作为替代上述若干传统技术的新的理想工艺^[4]。激光技术的飞速进步也带动了激光应用的迅猛发展, 其中基于激光加工技术的产品再制造与表面改性已经有着较为成熟的应用。本文将在论

述激光加工技术发展的基础上, 主要介绍激光表面改性以及3D打印在汽轮机叶片中的应用情况。

2 激光加工技术

2.1 激光器的发展

激光作为由人类所创造的光源, 无疑是20世纪最伟大的发明之一。

受激辐射的理论最初由爱因斯坦在1917年提出, 而后在1960年, Maiman T H首次研制出红宝石激光器, 并成功制造出波长为694.3nm的脉冲激光, 此后激光开始在科研领域受到高度重视。随后, 激光器经历了从1962年到1968年的快速发展, 几乎所有重要的激光器类型, 包括半导体激光器、Nd:YAG激光器、CO₂激光器、染料激光器和其他气体激光器等, 都是在这个时期发明的。表1列举了主要激光器类型的发明及实现商业应用的时间。自1968年后, 激光器的设计和制造具有了更好的可靠

[33] 林鑫, 黄卫东.高性能金属构件的激光增材制造[J].中国科学: 信息科学, 2015, 45 (9): 1111-1126.

[34] 张讯, 葛建彪.激光增材制造技术在民机复杂结构上的应用及研究[J].应用激光, 2018, 38 (6): 1022-1027.

[35] 钛之家.世界最大3D打印发动机钛合金加强框架

研制成功[EB/OL].[2019-2-19].https://m.sohu.com/a/295608897_120059843.

[36] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等.航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J].中国激光, 2020, 47 (5): 32-55.

表1 主要激光器的发明及应用时间

激光器	发明时间/年	商业应用时间/年
红宝石激光器	1960	1963
Nd-玻璃激光器	1961	1968
半导体激光器	1962	1965
He-Ne激光器	1962	1964
CO ₂ 激光器	1964	1966
Nd:YAG激光器	1964	1966
氦离子激光器	1964	1966
染料激光器	1966	1969
铜蒸气激光器	1966	1989
准分子激光器	1970	1976

性和耐用性。到20世纪70年代中期,更可靠的激光器使得激光可用于切割、焊接、钻孔和打标等工业应用。在20世纪80年代和90年代初,开展了激光器

在热处理、熔覆、合金化和薄膜沉积等相关领域应用的探索,并逐渐走向成熟。进入21世纪,由于光学技术的进步,激光器向着更加小型化、更高光学质量、更长使用寿命、更大能量密度以及更低全生命周期使用成本的方向发展,对激光及其应用的研究也向纵深方向推进,光学技术在未来将发挥更大的作用。

2.2 激光加工简介

激光加工是指使用激光照射作为能量输入,通过照射产生的热效应来实现诸如切割、焊接等工作的一种加工方法。为便于分类,可根据被加工零件状态变化将激光加工工艺分为3个主要类别,即仅被加热(无熔化及汽化)、被加热熔化(无汽化)以及被加热汽化。不同激光加工工艺分类如图1所示。

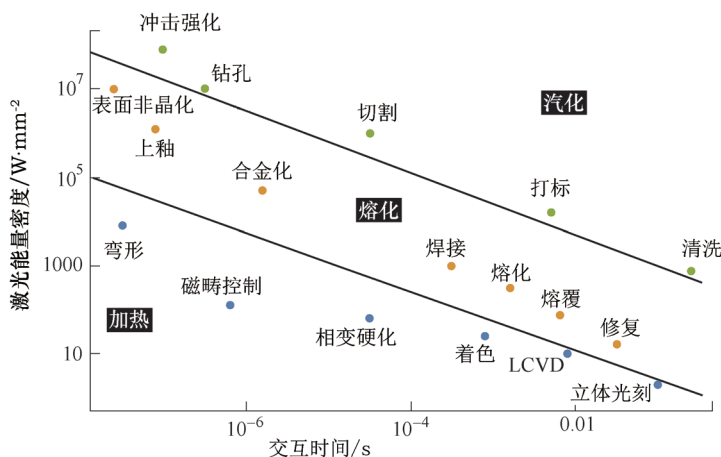


图1 激光加工工艺分类

一方面,诸如激光弯形、激光淬硬等工艺仅需将表面加热,因此只需较小的功率密度即可实现;另一方面,激光合金化、激光焊接、激光熔覆等工艺需要将被加工零件表面熔化而需要更高的功率密度来实现;同样地,激光冲击强化、激光切割等加工工艺需要汽化并去除被加工零件的一部分,因而需要在短时间内提供更高的功率密度。

3 激光淬硬技术在汽轮机叶片中的应用

3.1 激光淬硬技术

由于激光加热区域尺寸相对于整个零件小得多,因此当激光光斑继续向前扫描时,加热区域中的热量迅速向较低的区域工件整体扩散(自淬火)。根据激光加工工艺、基体材料几何/物理特性的不同,冷却速度可达 $10^2 \sim 10^6 \text{ K/s}$ 。

基于激光加工的这一特性,激光可作为替代热源完成可淬硬材料的淬火,且激光淬火具有以下优点:①淬火零件不变形,激光淬火的热循环过程快,对零件尺寸不敏感。②几乎不破坏表面粗糙度。③激光淬火不易开裂,不改变工件整体应力状态。④可对局部、沟、槽进行精确定位的选区淬火。⑤淬火层组织致密、强韧性好^[5]。

3.2 激光淬硬技术在叶片中的应用

由于末级长叶片长期工作在湿蒸汽区,排汽湿度甚至可达12%~14%。当蒸汽在叶栅中达到饱和时,便开始形成微小水滴。水滴在静叶表面形成水膜并随着时间延长不断聚集、长大。最后从静叶脱落,以水滴的形式并以一定的角度和很快的速度撞击到动叶上,在动叶的进汽侧形成如图2所示的损伤,这种损伤就是水蚀。水蚀损伤的存在会影响

机组的运行效率，甚至可能诱发叶片断裂，造成严重损失。而通过表面强化将显著提升叶片的使用寿命。

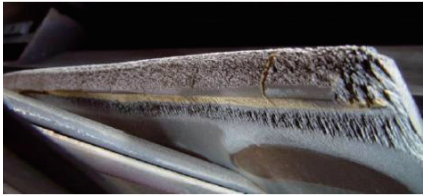


图2 汽轮机叶片水蚀

传统的强化方法是在进汽侧钎焊司太立合金片以及感应淬火。前者是叶片防水蚀应用最广泛的一项技术，在上海汽轮机厂、原美国西屋、三菱、阿尔斯通等汽轮机生产企业均有批量应用，工艺相对成熟。但在进行更长叶片，尤其是核电机组的末级叶片强化时，大面积高温钎焊会造成焊接变形量大、叶片基体材料疲劳强度下降的问题；而后者是通过磁场感应出的感应电流加热完成的淬火处理，淬火不仅在表面进行，也在整个叶片基体上进行，除会产生一定的残余应力外，还对叶片材料的性能造成了一定的影响。

而激光淬硬技术诞生已经超过40余年，从1991年开始，汽轮机叶片的激光淬硬就被科研机构关注，使用CO₂激光器进行了材料为410类马氏体不锈钢的叶片进汽侧淬硬，成功地将叶片表面硬度提高1倍以上^[6]，并在后续几年发展中逐渐实用化、经济化，最终实现商业应用。典型410类马氏体不锈钢叶片的激光淬硬横截面及淬硬硬度如图3、图4所示。

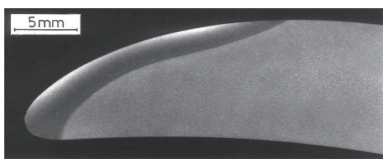


图3 典型汽轮机叶片激光淬硬

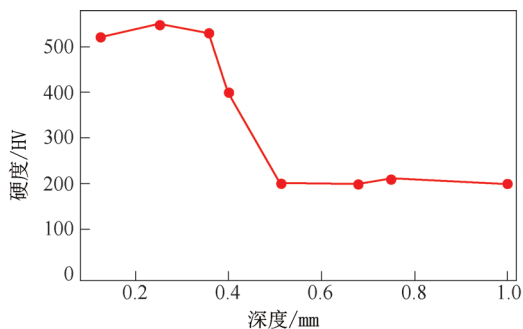


图4 典型汽轮机叶片激光淬硬硬化层^[5]

激光淬硬的工艺参数选择主要取决于两个因素：一是所需淬硬的深度，针对特定叶片，激光淬硬过程中某一点的温度由激光扫描该点后的持续经历的时间与该点的深度相关，为达到产品所需的淬硬深度，则需准确匹配激光功率与扫描速度；二是所要淬硬区域大小，这影响到光斑的形状与尺寸。因为当采取多道扫描完成淬硬时，后续激光扫描将对前序淬硬区的局部产生回火效应，所以会影响淬硬区性能的一致性。事实上，激光淬硬的最佳光源为平顶（非高斯）的矩形光斑，光斑宽度与待淬硬区域宽度相一致，以便通过单道扫描即完成淬硬加工。

而对于一些特定的叶片，进汽侧的背弧处也会发生水蚀，此时则需对叶片进汽侧两端同时淬硬。为了解决这一问题，可选择使用两束激光光束同时进行淬硬，但更为常用的做法是选择如图5所示的光学手段。使用反光镜能够降低系统的复杂程度，提高激光加工的可靠性和效率。

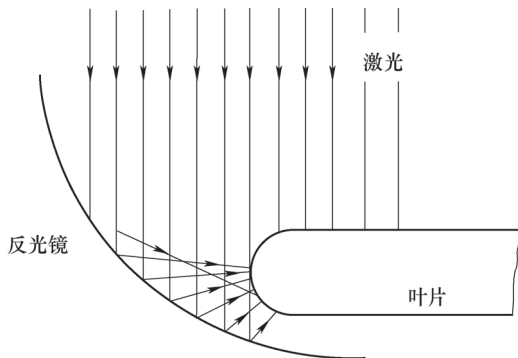


图5 背弧侧激光淬硬示意

而对于另一类汽轮机末级叶片材料——沉淀硬化型不锈钢（17-4PH等），特别提出了激光固溶强化技术，是指在同一个激光加工过程中，利用温度在不同区域的差异，通过元素固溶扩散和析出实现固溶强化，达到整体复合强化的效果^[7]。经过激光固溶强化，材料表面耐汽蚀性能较之叶片的基体提升1倍或更多。薛承感等^[8]采用激光固溶加时效的表面强化工艺对17-4PH沉淀硬化不锈钢进行表面处理，结果发现表面硬度明显提高，表面具有比基体更加优异的抗汽蚀性能。

虽然激光淬硬技术成熟，在国内已应用多年，但激光淬硬技术受到两个因素的制约：一是强化效果受到基体材料自身强化潜力的限制；二是为保证

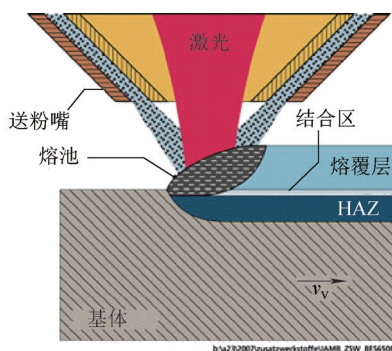
强化过程中不出现熔化现象，在能够保证淬硬效果的温度梯度下，硬化层深度存在一定的上限。

激光熔覆技术则完全摆脱了上述限制。

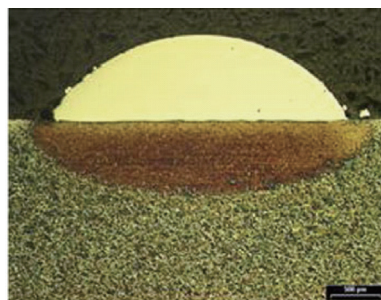
4 激光熔覆技术在汽轮机叶片中的应用

4.1 激光熔覆技术

20世纪80年代以来，随着激光器光源质量的提升、激光效能的增加，激光熔覆作为一项重要的表面处理技术在耐磨与耐蚀等工业领域应用逐渐成熟。在激光熔覆过程中，通过高能量密度（一般在 $10^2 \sim 10^4 \text{ W/mm}^2$ ）的激光束照射熔化较薄的一层基体材料，与同样被熔化的填充材料混合，并产生一定厚度的热影响区，在基体表面形成与之呈冶金结合的熔覆层，改善了抗氧化性、耐磨损以及耐腐蚀等性能。图6所示为激光熔覆原理及应用。



a) 一种同轴送粉的激光熔覆原理



b) 单道Stellite 21激光熔覆横截面宏观形貌

图6 激光熔覆原理及应用

填充材料添加方式有预置与实时添加两种，其中预置熔覆材料的方式由于工艺道序多、成本相对较高，故已较少在工业生产中应用。

熔覆材料的形式通常为丝或粉，通过旁路或同轴送入熔池。三种填丝/送粉的方式如图7所示。其中旁路送粉/填丝无法实现复杂路径的熔覆；环形同轴送粉由于重力对粉末流的作用无法倾斜 20° 以上；为实现全位置的激光熔覆则需选择多路式同轴

送粉方式。

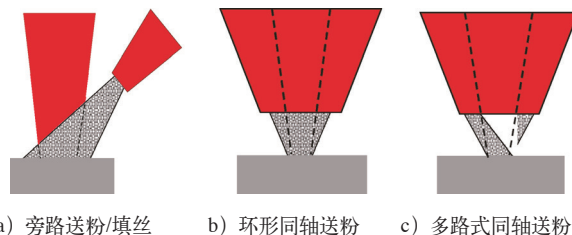


图7 激光熔覆填丝/送粉示意

综上所述，激光熔覆可以通过使用不同熔覆材料来获得不同性能的熔覆层，并且可以获得厚度范围更大的改性层，考虑到激光加工相对传统改性技术本就有诸多优势，因此激光熔覆技术在汽轮机中的应用潜力十分巨大。

4.2 激光熔覆在叶片中的应用

透平叶片上的激光熔覆按应用场景主要分为两个类别：一是为了应对燃气轮机叶冠的高温摩擦，通常在镍基合金叶片上进行镍基合金/钴基合金的堆焊；二是为了应对汽轮机末级叶片的水蚀，通常在马氏体钢叶片基体上进行钴基合金的堆焊。

透平叶片的激光熔覆研究开始较早。早在1980年，英国罗-罗公司就完成了第一项在燃气轮机叶片叶冠部位熔覆钴基合金的专利^[9]。截至2000年，阿尔斯通、原美国西屋公司等汽轮机制造企业均已实现了汽轮机叶片激光熔覆司太立合金的商业应用（见表2）。

表2 汽轮机叶片激光熔覆的商业应用

企业	零部件	激光熔覆方法及材料
罗-罗	燃机叶片叶冠	送粉激光熔覆 Triballoy/ Nimonics
普惠	燃机叶片叶冠	预置材料激光熔覆 PWA694/ Nimonics
石川重工	核电锅炉管道	预置材料激光熔覆钴基合金
阿尔斯通	汽轮机叶片	送粉激光熔覆 Stellite 6
西屋公司	汽轮机叶片	预置材料 Stellite/ Colmonoy

我国也于20世纪90年代初期开始了汽轮机叶片激光熔覆防水蚀的工艺性研究^[10]，验证了激光熔覆在叶片防水蚀领域的可行性。但受限于产品对激光熔覆技术的需求不足以及激光加工成本较高，汽轮机叶片激光熔覆强化的研究主要集中在研究院所与高校，期间对于主要的末级叶片材料的激光熔覆技术、熔覆层组织性能、激光熔覆中的光学、传热等基础理论进行了进一步的研究^[11-14]。

随着电站机组技术的发展,全球各大汽轮机制造企业都在开发更大排汽面积的长叶片。上海汽轮机厂已成功开发出具有自主知识产权的系列长叶片,长度达到1905mm,正在开发的长叶片达到2050mm。当叶片加长后,水蚀现象变得更加严重,而且核电机组的运行状况进一步加剧了水蚀的伤害,必须采取诸如激光熔覆的强化效果更加明显、更适宜大范围强化的方法进行防水蚀处理,而激光熔覆的抗水蚀效果优于激光淬硬与钎焊司太立合金片。

图8为上海汽轮机厂进行的长叶片激光熔覆防水蚀应用,图9为典型的熔覆层与基体之间的熔合界面。通过对接头进行各项测试显示,大面积激光熔覆Stellite 6合金涂层的硬度均匀性好,司太立熔覆层与叶片基体为冶金结合,熔覆层内无裂纹、气孔等缺陷,接头疲劳性能满足要求。熔覆层硬度约500HV,且在熔覆层厚度方向上以及垂直于熔覆层生长方向上都均匀分布。激光熔覆进行叶片抗水蚀的表面改性技术成熟可靠,已获得广泛应用。

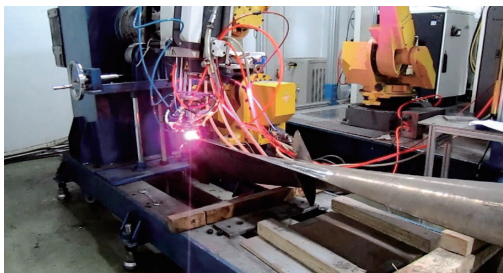


图8 长叶片激光熔覆

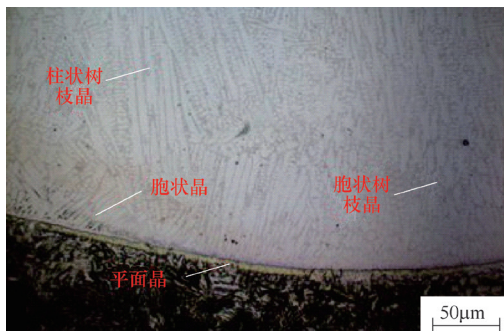


图9 熔覆层与基体间的熔合界面

5 激光3D打印在汽轮机叶片中的应用

5.1 激光3D打印技术

激光在材料加工中的最新应用之一是3D打印技术,利用计算机完成零件的切片后,使用激光作为

热源逐点熔结金属,完成零件的制造。3D打印技术的发展与完善,意味着在零件制造过程中摆脱了由坯料进行加工去除多余部分获得零件的限制,实现了按需逐点、逐层增加材料构成零件,实现增材制造。

3D打印由于其增材制造的特性而拥有以下优势:

- 1) 节省材料,通过制造接近精加工形状的零件,可以降低原材料的消耗。
- 2) 提高零件的复杂度,尤其是针对传统意义上无法通过加工实现的内部构造。
- 3) 小批量零件可快速制造,减少由设计到成品的制造周期。
- 4) 对于传统制造方法需进行装配的结构,可通过合理的设计直接通过零件的方式打印完成,优化了产品的生产方式。

基于这些优点,汽轮机制造厂也对激光增材制造技术在涡轮叶片中的应用进行了探索。

5.2 激光3D打印在叶片中的应用

先进的燃气透平在高于1000℃的极端高温下运行,许多情况下需要涡轮叶片具备复杂的内腔结构以实现冷却功能,因此对加工的要求非常高,3D打印技术则完美契合了燃气透平涡轮叶片结构需求。西门子公司已经完成了激光3D打印叶片的设计优化与产品制造^[15],如图10所示的叶片已经成功安装在其SGT-400工业燃气轮机上,并已经实现商业运行。新型叶片的应用成功地改进了叶片的冷却性能,提高了燃气轮机的总体效率。



图10 3D打印燃机叶片

上海汽轮机厂针对激光3D打印也进行了创新应用的尝试。使用增材制造的方式可以比较方便地获得末级隔板中的静叶片的空心结构,上海汽轮机厂

在某垃圾焚烧发电项目的末级隔板上首次应用3D打印技术进行了叶片的制造。图11展示了使用选区激光熔化（SLM）的方式成功制造的静叶坯料。由于3D打印的高精度，在后续的精加工道工序中仅需很少的加工量即可获得最终的精加工表面，提高了加工设备的效率。



a) 3D打印叶片坯料

b) 隔板成品

图11 3D打印汽轮机叶片

但激光3D打印在进行大批量的零件制造时显现出其加工效率低、制造成本高的劣势。如果没有利用3D打印的优势，在零件设计阶段优化设计以获得更佳的使用效果，单纯使用3D打印的手段替代传统的加工方法将产生更高的成本与更长的制造周期。因此，如何结合制造工艺与产品设计，在产品设计阶段充分发掘3D打印的潜力也是未来激光3D打印技术研究的重点之一。

6 激光加工在汽轮机叶片再制造中的应用

近年来，随着对碳排放要求的升级、对环境问题的重视，在产品的设计与制造中越来越强调对环境的友好性，再制造这一能够通过技术手段延长产品寿命，以有效地降低能源消耗与成本支出的技术就变得越发重要。传统上通常使用焊接的方法完成零部件的再制造，但对于汽轮机中的许多零部件材料来说，焊接不但可能会对零件材料本身造成损伤，而且焊接效果更多取决于操作者的技能水平，因此对于高附加值、难修复的零部件，激光熔覆是一种理想的再制造方法。

激光熔覆再制造的一个重要应用是叶片的激光熔覆修复。汽轮机叶片的现场修复需面临以下挑战：①熔覆设备在狭小空间完成修复的可达性。②修复后叶片的变形情况。③熔覆层的性能。

最早的汽轮机叶片现场修复记录发生于2004年的澳大利亚^[16]，该项目完成了一台200MW机组低压转子中6片叶片的现场修复，如图12所示，并在2005年的停机检修时对所修复叶片进行了检测，各叶片

工作状态良好。项目验证了汽轮机叶片现场修复的可行性，修复层性能符合工作要求。通过项目的执行情况可知，合理的熔覆参数以及熔覆路径能够获得性能良好的熔覆层，并有望将叶片的变形控制在0.3mm以内。



图12 汽轮机叶片再制造

图13是激光熔覆在叶片再制造中的另一类应用。透平叶片尤其是燃气轮机叶片工作在高压、高温、高负载的极端环境下，对叶片的变形、烧蚀、裂纹以及磨损等缺陷的修复是延长叶片使用寿命的关键。完全清除损伤部位后，在计算机辅助建模并规划熔覆路径后，可通过激光熔覆的方法，3D打印完成叶片的再制造。

由于激光熔覆再制造对于传统意义上“不可修”零件修复的适用性以及更加便于实现柔性制造的特性，因此在对资源消耗趋紧的未来将迎来更广阔的应用。

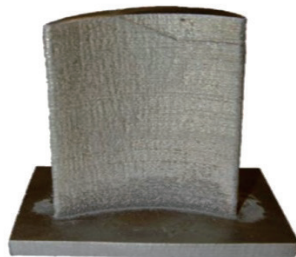


图13 激光熔覆叶片修复

7 结束语

激光加工技术在汽轮机制造领域已经得到了广泛应用，其中激光淬硬已作为一种传统技术在叶片耐水蚀强化领域应用多年；激光熔覆由于其熔覆层性能可控、熔覆过程可将稀释率控制在较低水平，以及熔覆过程易实现自动化等优势而获得了较多的关注；激光3D打印已经显示出其特有的应用价值。

截至目前,激光加工在汽轮机行业中积累了一定的应用案例,主要应用是针对高附加值零部件的制造与再制造。

其他激光加工方法诸如激光冲击强化、激光打孔、激光合金化以及激光焊接加工工艺有望实现在汽轮机领域的应用,但激光加工相对于传统工艺仍有加工效率低(如激光打孔、激光合金化)、成本高(如3D打印)等劣势,简单使用激光加工工艺替代传统工艺方法并不能完全发挥激光加工的优势,而如何从设计源头发掘激光加工的优势也应受到相应的关注。

随着社会的发展,激光加工作为一种安全可靠、性能稳定且适应性更广的加工方法将进一步展现其良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 姚建华,李传康.激光表面强化和再制造技术的研究与应用进展[J].电焊机,2012,42(5):15-19.
- [2] 方志民,谢颂京,姚建华.激光加工在先进制造技术中的应用[J].机械工程师,2003(8):27-30.
- [3] 顾波.激光加工技术及产业的现状与应用发展趋势[J].金属加工(热加工),2020(10):37-42,47.
- [4] MATSUNAWA A.Laser Processing of Materials in Japan[J].Materials and Processing Report,1989,4(9):495-562.
- [5] 王梁.马氏体沉淀硬化不锈钢汽轮机叶片激光复合强化机理研究[D].杭州:浙江工业大学,2009.
- [6] CAMOLETTO A, MOLINO G, TALENTINO S.Laser hardening of turbine blades[J]. Materials and Manufacturing Processes,1991,6(1):53-65.

- [7] 姚建华,叶钟,沈红卫.激光加工技术在汽轮机叶片制造中的应用[J].激光与光电子学进展,2012,49(3):104-109.
- [8] 薛承感,潘慧斌,丁银萍,等.17-4PH汽轮机叶片激光固溶强化抗汽蚀性能研究[J].动力工程学报,2020,1(13):82-88.
- [9] MACINTYRE R M.Laser hardfacing of RB 211 turbine blade shroud interlocks[C]//Proc. 2nd Int. Conf. on Applications of Lasers in Material Processing,1983.
- [10] 朱蓓蒂,曾晓雁,胡项,等.汽轮机末级叶片的激光熔覆研究[J].中国激光,1994(6):526-529.
- [11] 任超.17-4PH不锈钢表面激光熔覆Stellite6涂层组织及性能研究[D].上海:上海交通大学,2017.
- [12] 张晖峰.激光直接金属沉积中激光-粉末相互作用的模拟研究[D].北京:北京工业大学,2016.
- [13] 王东.汽轮机叶片材料表面激光熔覆制备Stellite 6合金涂层的研究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [14] 王东,李铸国,王晓娟,等.尾吹保护对激光熔覆Stellite 6合金涂层组织和力学性能的影响[J].中国表面工程,2014,27(2):52-56.
- [15] 西门子.西门子3D打印技术在发电装备制造中的应用[J].世界制造技术与装备市场,2017(2):82-84.
- [16] BRANDT M, SUN S, ALAM N, et al.Laser cladding repair of turbine blades in power plants: From research to commercialisation[J].International Heat Treatment and Surface Engineering,2009,3(3):105-114.

MW 20210120

《金属加工(热加工)》2021年第3期广告目次

单位名称	查询编号	位置
易孚迪感应设备(上海)有限公司	1492	封面
北京金威焊材有限公司	1161	封二
伊达新技术电源(昆山)有限公司	1925	封三
天津天高感应加热有限公司	1943	封底
AMTech2021 中国国际先进制造技术展览会	5342	前彩1

单位名称	查询编号	位置
第十九届中国国际工业炉及热工技术展览会	6347	前彩2
中国国际金属成形展览会	5699	前彩3
第二十一届西部国际热处理与工业炉展览会	6349	前彩4
2021 慕尼黑光博会	8039	III
第25届北京埃森焊接与切割展览会	1380	V