

## 激光熔覆超音速火焰喷涂陶瓷复合涂层的结构和性能

杨晖

(第二炮兵工程学院 501 室, 陕西 西安 710025)

**[摘要]** 对 YAG 激光器产生的矩形激光束及在熔覆超音速火焰喷涂陶瓷复合涂层过程中激光功率对涂层组织和性能的影响进行了研究。采用扫描电镜分析了激光熔覆后的涂层组织结构, 比较了采用不同激光输出功率 2、3、4kW 所得熔覆层的显微硬度和耐磨性能。结果表明: 激光熔覆层与基体为冶金结合, 熔覆层的硬度较喷涂层的硬度有所提高, 并随着激光功率的提高而增加。激光熔覆层的磨损失重远低于喷涂层。

**[关键词]** 超音速火焰喷涂; 激光熔覆; 涂层; 矩形激光束

**[中图分类号]** TG174.442; TG174.453

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2007)06-0022-03

## Improvement of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Carbide Composite Coatings by Laser Irradiation Treatment

YANG Hui

(Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**[Abstract]** High velocity oxy-fuel sprayed WC-12Co and NiCrBSi composite coatings were irradiated by kaleidoscope installed YAG laser. The laser power and the scanning velocity employed from 2kW to 4kW and 10mm/s, respectively. Scanning electron microscope was used to examine the composite coatings. In order to optimum technology parameter, the laser power effect on hardness and wear resistance of the carbide composite coatings were investigated. The results show that there is metallurgical combination interface between composite coatings and substrate. The highest microhardness and density of composite coatings are also enhanced when the laser output power increases. The wear-out rate of irradiated spray coating is lower than that of the HVOF spray coating.

**[Key words]** High Velocity Oxy-fuel Spraying (HVOF); Laser Cladding; Carbide Composite Coatings

### 0 引言

超音速火焰喷涂因具有火焰速度高、温度相对较低的特点, 在喷涂金属陶瓷材料中能有效地抑制碳化物等硬质相的分解, 可获得结合强度高、致密性好、碳化物含量高、耐磨性能优越的涂层。目前, 以 WC-Co 为代表的金属陶瓷粉末, 被广泛地采用超音速火焰喷涂方法制备成耐磨涂层, 用于提高零部件的使用寿命。但它还有缺点: 涂层与基体间是机械结合, 抗冲击性能差; 耐腐蚀和抗氧化性能差; 涂层组织不均匀, 性能不稳定。为了克服这些缺点, 首先采用 NiCrBSi 合金与 WC-12Co 金属陶瓷混合粉末进行喷涂, 然后对涂层进行激光熔覆表面改性, 进一步改善其使用性能<sup>[1]</sup>。

对于 WC-12Co 金属陶瓷与 NiCrBSi 混合粉末 (Metco 34F), 采用超音速火焰喷涂方法在 45 钢基材上喷涂复合涂层。由于 NiCrBSi 喷涂粉末颗粒较大, 喷涂中熔化不充分, 涂层中存在一定数量未完全熔化的粒子, 影响复合涂层的使用性能。使用氮气作为保护气体, 采用带有光学积分器的 YAG 激光器产生的矩

形模型激光束照射涂层, 进行熔化处理, 可获得高质量熔覆层。

### 1 适合表面处理的矩形激光束

激光束的尺寸决定了试样表面的功率密度。可以通过散焦或其它办法增加激光束尺寸, 减少试样单位体积的热能输入, 使涂层熔深减小、熔宽增加。激光束的能量分布可由激光束的模型来描述, 不同激光束模型能量分布不同。与激光束传输系统相关联的激光构型有 4 种模型, 包括高斯模型、多模型、矩形型和凹顶型, 见图 1 所示<sup>[2-3]</sup>。高斯光束最适合切割和焊接应用, 而不太适用于表面处理。它倾向于使基体深处发生气化和熔融, 多道熔覆时, 在熔覆层搭接处容易产生塌陷、孔隙等严重缺陷。相反, 多模、凹顶和矩形构型的激光更适合于表面合金化。这些构型的激光可保证合金化过程具有更高的覆盖率和均匀的熔深。矩形型光束多道熔覆时, 由于光斑尺寸较大, 搭接少, 而且在搭接处无严重缺陷。

正方形和矩形模型光束是由光学积分器产生的。光学积分器是由许多安装在球形表面上彼此分隔的平行小反射镜封闭在暗盒中构成, 见图 2 所示<sup>[1]</sup>。高斯光束进入积分器后, 每个小反射镜都在反射面上产生一束所需大小的矩形光。在光束的传送系统中用旋转反射镜使高斯光束做高频振动, 因为材料的热惯

**[收稿日期]** 2007-07-16

**[作者简介]** 杨晖 (1965-), 男, 陕西周至人, 副教授, 在读博士, 主要从事热喷涂技术研究。

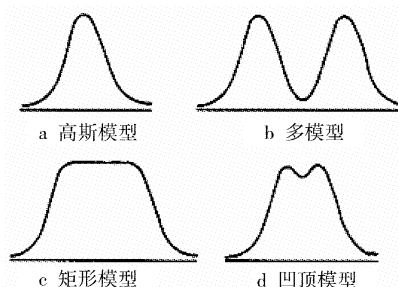


图1 激光表面合金化光束的构型<sup>[2]</sup>

Figure 1 Beam profiles of laser surface treatment

性起到激光能量均匀化作用,这样就可以产生正方形或矩形的光束。

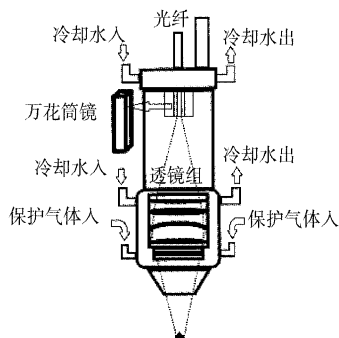


图2 光学积分器示意图

Figure 2 Schematic diagram of YAG laser gun equipped with a kaleidoscope

在激光熔覆的过程中,光斑尺寸是影响激光熔覆质量的重要参数。它与激光的功率密度有着密切的关系,当激光器的输出功率一定时,激光的功率密度与光斑尺寸成反比。激光熔覆处理时,将试样置于光束的焦点内,以减少激光在介质中传输过程的能量损失,有利于试样获得更高的能量。对在不同功率和不同光斑尺寸下的激光熔覆宽度与深度进行观察表明,激光的输出功率一定时,随着光斑尺寸的增大,熔覆的宽度将增大,熔深将减少。不同激光束的能量分布见图3<sup>[1]</sup>,图右边部分为普通激光在不同焦距(DF)下的能量分布,单束普通激光通常为这种高斯分布;图左边部分为矩形激光束在不同光斑尺寸下的能量分布。当熔覆深度满足涂层与基体冶金结合的前提时,激光熔覆后的熔覆宽度越宽越好,而在实际的熔覆过程中必须对激光熔覆的质量进行综合考虑,选择合适的熔深和熔宽。

## 2 激光功率对熔覆层组织的影响

对于给定的预置涂层,在合适的工艺参数下,通过激光熔覆能够大幅度提高涂层与基体的结合强度和熔覆层的显微硬度等性能。而在有些工艺参数条件下,熔覆层会产生裂纹和孔洞等现象,熔覆层的熔覆质量较差,不能满足实际的应用要求。因此,必须对激光熔覆的工艺参数进行合理选择,即工艺参数的优化。在激光重熔过程中,影响熔覆层质量的因素很多,应针对不同涂层材料选择合适的激光功率、光斑尺寸及扫描速度。

激光处理涂层时,存在最佳的功率值。激光功率低于最佳值时,陶瓷层熔化不完全,致密度差;当激光功率高于最佳值时,又会导致陶瓷层和基材熔化。激光功率密度是影响激光熔覆质

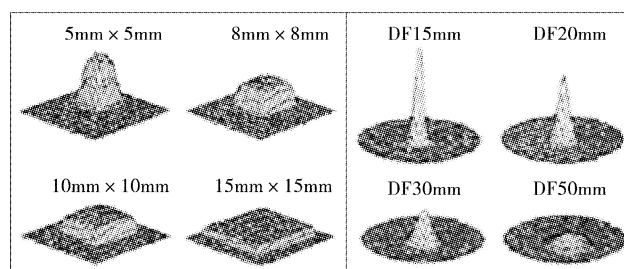


图3 矩形光束与高斯光束在不同光斑尺寸下的能量分布

Figure 3 Comparison of beam profiles between conventional and kaleidoscope-installed YAG laser

量的最主要参数,当光斑直径和扫描速度一定时,功率密度取决于激光的输出功率。在矩形激光熔覆的过程中,其它工艺参数一定的情况下,随着激光输出功率的增加,熔深增加,熔宽几乎与功率无关,见图4。涂层中白色部分为WC-12Co金属陶瓷,灰色部分为NiCrBSi合金,部分以球形粉末形态存在于涂层中。随着激光输出功率的增加,以球形粉末形态存在于涂层中的灰色部分NiCrBSi合金消失,白色WC-12Co颗粒弥散分布其中,表明NiCrBSi合金已经熔化,熔深增加。

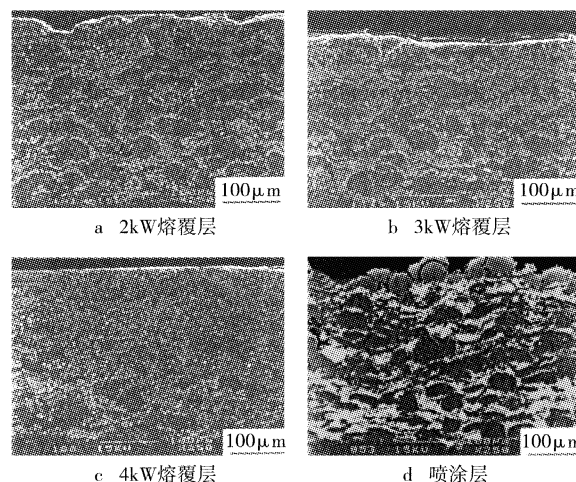


图4 激光功率对熔覆层组织的影响

Figure 4 The effect of laser output power on laser cladding coating

激光功率对熔深的影响比熔宽显著是由于激光束焦点中心的功率密度比较高。在基体表面上均匀地移动光斑时,沿移动光斑中心线以下部位的温度高于两侧的温度,中心部分最先达到材料的熔点。在激光功率增加时,基体表面熔化区域的宽度几乎不增加,涂层与基体实现熔合,熔覆层裂纹逐渐减少。在高温条件下,熔化的涂层对流、搅拌程度加剧,这有利于液态合金材料的流动和混合均匀,从而减少因组织应力所产生的裂纹;试样表面温度高,凝固速率相对较慢,这有利于熔覆层气体的逸出,减少了裂纹形成。

## 3 激光功率对熔覆层性能的影响

激光输出的功率太低时,激光与材料交互作用时间短,熔覆层吸收的能量不足,不能达到涂层材料的熔点,涂层不能熔化。随着输出功率的升高,涂层开始熔化,当功率不足以使基体表面

熔化时,表面熔覆材料本身熔化,母材未熔化,此时熔化了涂层材料冷却时,在表面张力的作用下凝固成颗粒,分布在基体表面上,在宏观上熔覆层表面呈现局部起球、孔洞等外观形貌,呈现不连续的泪滴状表面,不能形成冶金结合。熔覆的宽度主要受光斑尺寸控制,功率对其影响不大,此时深宽比减少,当其比值减少到一定的值时,熔化的深度低于涂层的厚度,涂层与基体不能实现冶金结合,结合强度也就相当于喷涂层,不能满足实际应用的要求。当功率较高时,光束与材料的交互作用时间增大,涂层吸收的能量增大,此时激光不仅将涂层熔化,而且基体熔化较为严重,导致稀释率急剧增大,这样将会使得基材成分迅速上浮,熔化了涂层材料被基体稀释后,性能发生较大的改变,达不到激光熔覆的目的。当输出功率过大时,熔覆材料产生过热现象,熔融金属出现蒸发或烧穿,表面呈现裂纹,熔覆层不平整度增加,且基材对熔覆层的稀释率将大大增高,熔覆层的组织成分发生较大的改变,硬度显著下降,抗磨性能下降。

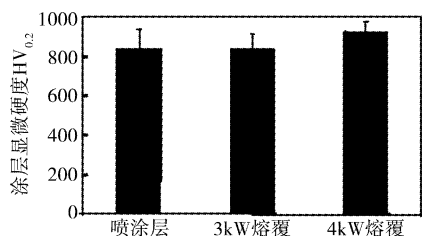


图5 熔覆层与喷涂层硬度比较

Figure 5 Microhardness changes of coatings by post-laser treatment



图6 熔覆层表面磨损痕迹

Figure 6 Micrograph of worn surface of coating

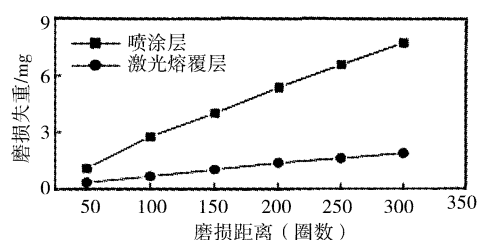


图7 熔覆层与喷涂层耐磨性比较

Figure 7 Wear resistance comparison of cladding coating and spraying coating

## 4 结论

1) 不同功率和不同光斑尺寸下的激光熔覆宽度与深度不同;激光的输出功率一定时,随着光斑尺寸的增大,熔覆的宽度将增大,熔深将减少。

2) 随着激光输出功率的增加,涂层中球形未完全熔化的NiCrBSi合金粉末开始熔化,涂层孔隙率减少,Wc-12Co金属陶瓷与NiCrBSi合金混合均匀并弥散分布于其中。

3) 激光熔覆层与基体为冶金结合,熔覆层的硬度较喷涂层的硬度有所提高。

4) 激光熔覆层经磨粒磨损试验后,磨痕细小、均匀,无颗粒脱落现象。

在激光熔覆的过程中,材料表面的硬度随着功率的增加经历一个由小到大,再由大到小的过程。不同激光熔覆功率下熔覆层硬度与喷涂层硬度的对比见图5。在熔覆层的组织方面,由图4c可知,虽然激光熔覆层孔隙率减少,涂层中NiCrBSi喷涂粉末颗粒熔化充分,涂层与基体为冶金结合。但是在图5中,激光熔覆层的硬度较喷涂层的硬度提高幅度不大,这主要是因为涂层中WC部分分解的缘故。对4kW激光输出功率制得的熔覆层试样表面进行磨粒磨损试验,在扫描电镜下观察发现:涂层磨痕细小、均匀,无颗粒脱落现象,Wc-12Co金属陶瓷和NiCrBSi合金都出现了较浅的犁沟,NiCrBSi合金局部出现较深的犁沟,Wc-12Co金属陶瓷颗粒起到了硬质点支撑作用,如图6所示。对4kW激光输出功率的熔覆层与喷涂层进行磨粒磨损试验对比,结果见图7。由图7可以看到,涂层磨损量随磨损距离的增加而呈线性增加,激光熔覆层具有良好的抗磨粒磨损性能,其磨损损失远低于喷涂层。

5) 激光熔覆层具有良好的抗磨粒磨损性能,其磨损损失远低于喷涂层。

## [参考文献]

(上接第14页)

[8] Cunha L, Andritschky M, Pischow K, et al. Microstructure of CrN coatings produced by PVD techniques[J]. Thin Solid Films, 1999, 355/356(3): 465-471

[9] Fan B W, Jeng J L, Jeng G D. Evaluation of the mechanical properties and tribological behavior of the CrN coating deposited on mild steel modified with electroless Ni interlayer[J]. Thin Solid Films, 2000, 377/378(2): 354-359

[10] Mayrhofer P H, Willmann H, Mitterer C. Oxidation kinetics of sputtered Cr-N hard coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 146/147(1): 222-228

[1] Chwa S O, Ohmori A, Yang H. Surface modification of plasma sprayed coating by using YAG laser equipped with a kaleidoscope[A]. Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium[C]. Singapore: Christopher C Berndt, 2001. 575-582

[2] 董允, 张廷森, 林晓娉. 现代表面工程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 301-305

[3] 闫毓禾, 钟敏霖. 高功率激光加工及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994. 3-6

[11] 王永康, 熊仁章, 雷廷权, 等. Al含量对Ti<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N涂层组织结构的影响[J]. 材料工程, 2002, (8): 24-25

[12] Man B Y, Guzman L, Miotello A, et al. Microstructure, oxidation and H<sub>2</sub>-permeation resistance of TiAlN films deposited by DC magnetron sputtering technique[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 180/181(1): 9-14

[13] 汪涛, 鲁玉祥, 祝美丽, 等. 颗粒增强金属基原位复合材料的制备技术回顾与展望[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(1): 12-17

[14] 王守仁, 张景春, 王砚军. 高温合金中Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化膜与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化膜的比较[J]. 山东建材, 2002, 22(99): 35-36