

文章编号: 0258-7025(2004)12-1533-05

# 激光熔覆立铣刀的制造研究

陆 伟, 侯立群, 陈 锐, 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

**摘要** 采用同步送粉激光熔覆方法, 在 45# 钢立铣刀坯材的刃带部位, 熔覆一层钴基自熔合金作为立铣刀的加工刃。研究了激光熔覆工艺参数对激光熔覆层形状和开裂的影响, 结果表明, 熔层宽度的关键因素是激光的有效光斑尺寸, 它是由激光功率密度与熔覆速度决定的; 熔层高度的关键因素是粉末的线送粉速率, 它是由送粉器的送粉速率与熔覆速度的比值决定的; 提高激光功率可显著降低熔层开裂倾向。同时, 薄的熔层形状可以降低熔层开裂的倾向。进行了激光熔覆立铣刀工装设备和工艺研究; 采用优化工艺, 在 45# 钢铣刀坯材上熔覆成功无裂纹, 成型良好、硬度分布满足使用要求的功能层; 通过了国标 GB/T122.4.3-90 规定的立铣刀切削性能试验。以激光熔覆新工艺完成了立铣刀的制造。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 熔覆工艺; 立铣刀; 钴基合金

**中图分类号** TN 249; TG 156.99 **文献标识码** A

## Study on Laser Cladding Manufacturing End Mill

LU Wei, HOU Li-qun, CHEN Kai, ZUO Tie-chuan

(National Center of Laser Technology, College of Laser Engineering,  
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** Co-base self-fluxing alloy was deposited on helical land as cutting lip of end mill which body was made of 45# steel by laser cladding with synchronous feeder. The effect of laser cladding processing parameters on shape and crack of coating was studied, it showed that width of cladding was decided by the effective size of laser beam, which was depended on the power density and the scanning speed. Height of cladding was decided by the ratio of powder feeding rate to the scanning speed, higher laser power can significant reduce crack, and thin cladding shape was valuable to lower the tendency of cladding crack. The special equipment and processing were researched for laser cladding manufacturing end mill. With optimizing parameters using laser cladding technology, functional layers meeting the specification have been achieved on end milling body made of 45# steel. The coating were with crackless, good shape and satisfying hardness, passed cutting test with GB/T122.4.3-90 standard.

**Key words** laser technique; laser cladding; cladding processing, end mill; Co-base alloy

## 1 引 言

铣刀在机加工中的应用仅次于车刀和钻头, 随着数控车床的应用普及, 铣刀的使用数量、应用品种规格越来越多。立铣刀是铣刀种类中尖齿铣刀的一种, 立铣刀又分为小加工范围的“棍铣刀”和大加工范围的“盘铣刀”。常规的立铣刀是由高速钢加工而

成的, 铣刀在加工中与加工材料接触受力的部位只是螺旋刃带, 加工一段时间后刃口就会出现磨损, 需要重新研磨刃口, 如果在加工中刃口部位出现崩刃, 或研磨尺寸超标, 则整个铣刀报废, 造成高速钢材料的大量浪费。如果使用功能过渡层来制造铣刀, 即在刃口部位使用硬质合金, 其他部位使用普通材料, 就可以节约大量的合金材料, 目前很多“盘铣刀”的

收稿日期: 2003-11-11; 收到修改稿日期: 2003-12-30

基金项目: 北京市教委科研项目(01KJ-011)资助课题。

作者简介: 陆 伟(1969—), 男, 北京工业大学激光工程研究院在读博士研究生, 主要从事激光熔覆方面的研究。E-mail: luwei@emails.bjut.edu.cn

生产,就是在刃口部位镶嵌焊接上硬质合金。采用激光熔覆技术在普通材料的基体上熔覆一层硬质合金,使硬质合金起到刃口的作用,是生产立铣刀的一种新工艺。

## 2 激光熔覆立铣刀对熔覆层形状和性能的要求

铣刀是一种多齿刀具,如图 1 所示。目前生产的高速钢铣刀的材料一般为 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr2V2。其热处理后的硬度可达到 HRC60~64。

激光熔覆制造的立铣刀是目前机械加工中常用的莫氏锥柄立铣刀,3 个螺旋刃带,其刃带螺旋角为  $45^\circ$ ,刃带宽度为 1.5 mm,刃带外径为  $\phi 20$  mm。首先用 45# 钢按直径为  $\phi 20$  mm 的高速钢铣刀形状加工出铣刀坯材,然后按螺旋刃带的形状进行激光熔

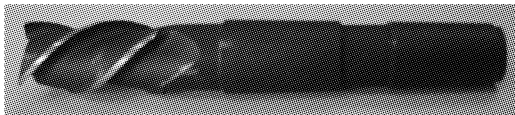


图 1 立铣刀  
Fig. 1 End mill

表 1 钴基合金的化学成分(重量百分比)

Table 1 Chemical composition (wt.-%) of Co-base alloy powder

Elements	Cr	W	Ni	Fe	B	Si	Mo	Mn	C	Co
wt.-%	20~25	3~6	2~5	3	2.4	1.6	0.2~0.8	0.3	0.1	Bal.

## 3.2 激光熔覆工艺参数对熔层形状的影响

实验在 45# 钢做成的试板上以单道激光熔覆方式进行,结果如图 2~5 所示。

由图 2 和图 3 可以看出,在激光功率和熔覆速度一定的情况下,送粉速率对熔覆层的宽度影响不大,而对熔覆层的高度有影响,随着送粉速率的增大,熔层的高度增加,尤其是在低速的情况下,影响明显;由图 2~图 5 可以看出,在激光功率和送粉速率一定的情况下,熔覆速度对熔覆层的宽度有影响,随着熔覆速度的增加,熔覆层的宽度变窄,熔覆层的高度随着熔覆速度的增加而显著降低;由图 4 和图 5 可以看出,在熔覆速度和送粉速率一定的情况下,激光功率对熔覆层的宽度有影响,随着激光功率的加大,熔覆层的宽度加大,在熔覆速度低的时候明显,随着熔覆速度的增加,这种变化减弱,而激光功率对熔覆层高度的影响不明显。

覆,最后按立铣刀的技术要求研磨刃带成型。立铣刀的特殊刃带形状要求单道熔层的高度大于 1 mm,并且熔覆层内硬度曲线要有合理的梯度分布,熔层硬度值要大于  $Hv_{0.2} 700$ 。

## 3 激光熔覆工艺参数对熔层形状和性能的影响

### 3.1 实验设备及材料

实验中使用的是 Rofen 公司的 CW-025 YAG 激光器,最大输出功率 2.5 kW,采用光纤传输,光纤直径 600  $\mu\text{m}$ ,配以国产 SF2 型自动送粉器。送粉头为我院自行研制的同轴气保护粉末自汇聚送粉头;采用的激光熔覆方式为旁轴同步送粉。激光器头和送粉头固定在机器人手臂头上,依靠机器人的运动实现激光熔覆,机器人手为首钢 6 轴 MOTOMAN-SK16X 型,工作半径为 1555 mm,定位精度为 0.1 mm。

立铣刀的工作层采用高温性能好的钴基合金粉末(成分见表 1)。基体材料为 45# 钢,加工成 120 mm $\times$ 80 mm $\times$ 12 mm 的试板。送粉气和保护气均使用氩气。

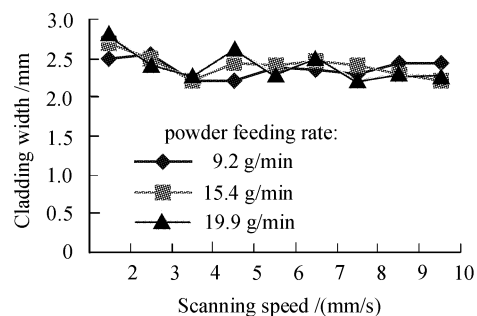


图 2 熔覆速度和送粉速率对熔覆层宽度的影响  
Fig. 2 Effect of the scanning speed and powder feeding rate on cladding width  
laser power=1 kW; defocus length=15 mm;  
shielding gas rate=8 L/min

因此,决定熔覆层宽度的本质因素是有效激光光斑尺寸  $r_e$ ,它表示在一定工艺参数下,激光束与粉

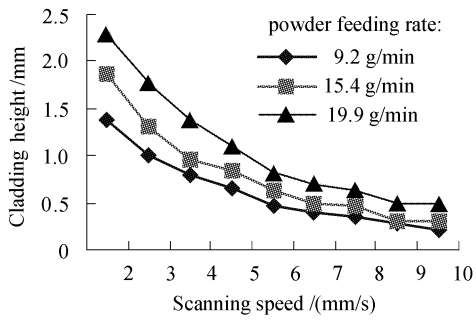


图 3 熔覆速度和送粉速率对熔覆层高度的影响

Fig. 3 Effect of the scanning speed and powder feeding rate on cladding height

laser power=1 kW; defocus length=15 mm;  
shielding gas rate=8 L/min

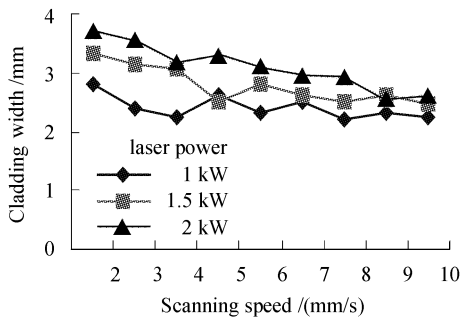


图 4 激光功率和熔覆速度对熔覆层宽度的影响

Fig. 4 Effect of laser power and the scanning speed on cladding width

powder feeding rate=19.9 g/min; defocus length=15 mm;  
shielding gas rate=8 L/min

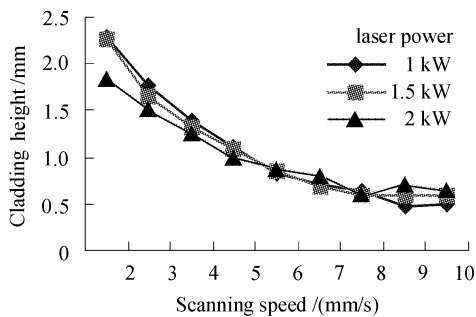


图 5 激光功率和熔覆速度对熔覆层高度的影响

Fig. 5 Effect of laser power and the scanning speed on cladding height

powder feeding rate=19.9 g/min; defocus length=15 mm;  
shielding gas rate=8 L/min

末相互作用,使得粉末熔化的光斑半径 $r_e$ 是由激光能量密度 $q^*$ 与熔覆速度 $v$ 决定的。在离焦量一定的情况下,随着激光功率的增加,有效激光光斑半径增大,熔层宽度增加;而当提高熔覆速度时,使得有效激光光斑尺寸减少,熔层宽度变窄。

对熔层高度的影响,是由线送粉速率决定的。线送粉速率 $m_v$ 可由下式表示

$$m_v = m/v$$

式中, $m$ 为送粉器送粉的速率。其他条件不变的情况下,加大送粉速率,则线送粉速率增大,使得熔层高度加厚。单独提高熔覆速度,不仅使得激光的有效光斑尺寸减少,而且线送粉速率也减少,熔化的粉末量减少,使得熔层高度下降。

### 3.3 激光熔覆工艺参数对熔层性能的影响

工艺参数对熔层形状产生影响的同时,观察到这种钴基合金的开裂敏感性很大,为此同时记录下每种工艺参数情况下的裂纹条数,比上每道熔层的长度,得出每种工艺下的单位熔覆长度的裂纹率,如图 6 和图 7 所示。

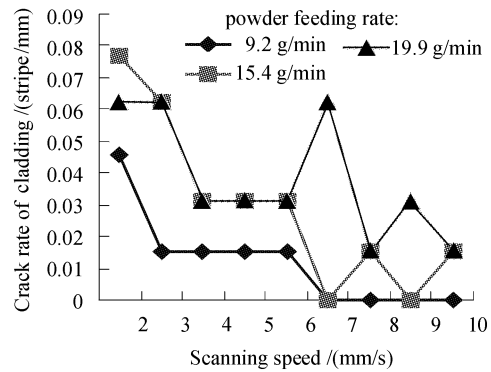


图 6 熔覆速度和送粉速率对熔层开裂性的影响

Fig. 6 Effect of the scanning speed and powder feeding rate on tendency of crack of cladding

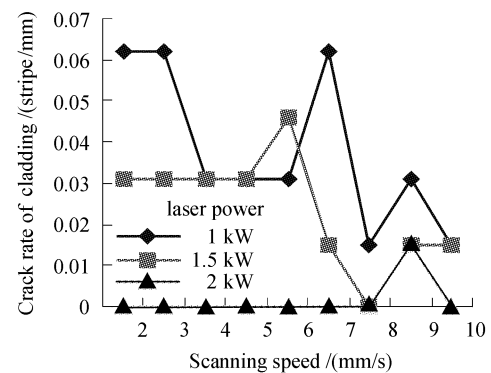


图 7 激光功率和熔覆速度对熔层开裂性的影响

Fig. 7 Effect of laser power and the scanning speed on tendency of crack of cladding

由图 6 和图 7 可以看出熔层开裂趋势:在其他条件不变的情况下,熔层开裂倾向随熔覆速度的增加而降低,随熔覆送粉速率的加大而加大,最明显的是随着激光功率的加大而降低。结合工艺参数对熔

层形状的影响规律可以得出,熔层薄则不容易开裂,熔层厚则容易引起开裂。

熔覆层开裂是激光熔覆钴基合金遇到的首要问题,裂纹的发生、扩展是一个相当复杂的过程,它和基材与熔覆层的冶金因素(化学成分、组织状态、有害杂质含量等)、力学因素(热应力、组织应力等)、工艺因素(激光功率、熔覆速度、光斑直径等)有关<sup>[1~6]</sup>。金属开裂的本质在于金属材料受到力的作用要发生形变,由于材料本身的塑性储备不足于抵消外部的应变,就会产生裂纹。

具体到激光熔覆,由于熔覆层冷却速度极快,熔覆层金属结晶速度极快,因而熔层结晶组织方向性强,一般熔层组织大部分由柱状晶和树枝晶构成,钴基合金熔覆材料中加有不少合金元素,这些合金元素熔覆时形成碳化物和金属间化合物,或固溶到基体中,起到弥散强化和固溶强化的效果,但在快速不平衡结晶状况下,这些合金元素的化合物或未溶解的合金元素在晶界处容易形成缺陷;有些元素和氧气反应生成气体,在快速结晶状况下,来不及逸出熔池形成气孔,这些晶界处形成的夹杂物、脆化相、位错、气孔等缺陷,都是形成裂纹的来源。激光熔覆过程中由于热的不平衡而产生的热应力及由熔层构件自身的拘束度所造成的拘束应力,都是造成熔层易开裂的原因。

### 3.4 模拟立铣刀的激光熔覆工艺的选择

为了控制熔覆层的开裂倾向,结合立铣刀的具体特点,实验中,在45#钢板上开出宽度1.5~2 mm的台阶(图8所示),降低试板对熔覆层的拘束度,同时模拟立铣刀螺旋刃带激光熔覆。考虑到激光熔覆立铣刀对熔覆层形状和性能的要求,应选择偏小的激光功率参数,使得基材对熔覆层性能的影响尽量降低,以提高熔层内的硬度梯度,满足对熔层硬度过渡的要求。

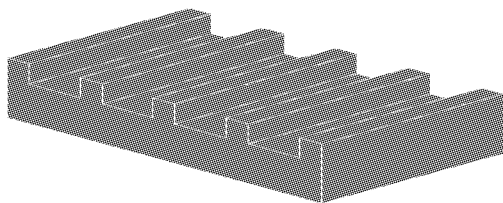


图8 试板

Fig. 8 Test plate

具体参数为:激光功率700~800 W,离焦量分别为+11 mm,+15 mm,+18 mm,送粉速率为10

~20 g/min,熔覆速度为2~4 mm/s。实验发现,在模拟试板上进行的激光熔覆,其裂纹敏感性比前述在平板上的要小。这主要是平板上的散热条件和台阶上的散热条件不同,导致在台阶上熔覆层的冷却速度变慢。同时,由于台阶的宽度为1.5~2 mm,小于平板上激光熔覆的熔覆层宽度,在液态合金粉末熔池的表面张力作用下,不会沿台阶壁流淌下来,使得熔层在台阶的接触边缘不像平板上熔覆那样,在熔层和基材接触的边缘上存在未完全熔化的颗粒。而实验情况表明,此类缺陷很容易成为熔覆层的开裂源。

综合分析熔覆成型、熔覆层稀释率及熔覆层的显微硬度等实验结果,最终确定激光熔覆立铣刀的工艺参数为:激光功率700~800 W,离焦量+18 mm,送粉速率15.4 g/min,熔覆速度2~3 mm/s。

## 4 激光熔覆立铣刀的制造与切削性能的对比如

制造激光熔覆立铣刀时,将立铣刀坯材固定在转台上,转台由数控电机精确控制转速,可通过控制面板调节转速。

在实际熔覆立铣刀的生产中,激光熔覆速度是由两个速度合成的:一个是机器手沿铣刀杆的方向进行的匀速直线运动,一个是沿铣刀杆轴心的旋转速度,两者速度矢量始终保持垂直。

激光熔覆的立铣刀经专业厂的刃带磨削成型,并按照GB/T122.4.3-90的标准,与高速钢铣刀(材料为W6Mo5Cr2V2)共同进行对比切削性能实验。实验结果表明,在铣削过程中,激光熔覆制造的立铣刀工作平稳,无噪音。被铣削工件的发热程度可用手触摸。铁屑呈卷状,银白色,被加工材料表面粗糙度符合国标要求。经铣削性能实验后,立铣刀的周齿略有磨损,同高速钢铣刀实验情况相似。

## 5 结 论

1) 实现激光熔覆技术生产立铣刀的制造。激光熔覆技术生产立铣刀,可以节约大量的合金元素,同时可以简化常规高速钢立铣刀生产中的多次热处理,对使用中报废的立铣刀可进行再次激光熔覆,实现铣刀的重复使用。

2) 激光熔覆中,熔覆层宽度随激光熔覆工艺参数的影响变化不大,决定熔层宽度的关键因素是激

光的有效光斑尺寸,它是由激光功率密度与熔覆速度决定的。熔覆层的高度受激光工艺参数的变化影响明显,决定熔层高度的关键因素是粉末的线送粉速率,它是由送粉器的送粉速率与熔覆速度的比值决定的,提高送粉器的送粉速率或降低熔覆速度,都可使熔覆层的高度增大。

3) 作为熔覆立铣刀的钴基合金在激光熔覆时,熔覆层对开裂敏感。提高激光功率可显著降低熔层开裂倾向,同时,薄的熔层形状可以降低熔层开裂的倾向。

4) 按照 GB/T122.4.3-90 标准,进行激光熔覆立铣刀与高速钢铣刀的切削性能对比实验,证明激光熔覆的立铣刀已达到国标规定的切削性能,可以满足使用要求。

### 参 考 文 献

- 1 Song Wulin, Zhu Peidi, Cui Kun *et al.*. The effects of the laser cladding layer on its cracking susceptibility [J]. *Applied Laser*, 1995, **15**(3):122~124
- 2 J. H. Ouyang, S. Nowotny, A. Richter *et al.*. Characterization of laser clad yttria partially-stabilized ZrO<sub>2</sub> ceramic layers on steel 16MnCr5 [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, **137**(1):12~20
- 3 Zhong Minlin, Liu Wenjin, Jean-Claude Goussain *et al.*. Experimental research on cracking behavior during high power CO<sub>2</sub> laser cladding [C]. *SPIE*, 2000, **3888**:307~311
- 4 Tao Xilin, Cao Qing, Xia Chunhui *et al.*. Influences of technology on microstructure and cracking behavior of laser cladding Co-based-alloy coating [J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(5):206~208
- 5 陶锡麟,曹庆,夏春怀等. 工艺参数对钴基合金熔覆层显微组织及开裂性的影响[J]. *应用激光*, 1999, **19**(5):206~208
- 6 Zhao Haiou, Li Chunhua. Investigation on process and crack sensitivity during laser cladding [J]. *Metal Heat Treatment*, 2001, **26**(1):18~21
- 7 赵海鸣,李春华. 激光熔覆工艺特性及裂纹敏感性研究[J]. *金属热处理*, 2001, **26**(1):18~21
- 8 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Comparative research on cracking tendency in powder feeding laser cladding stellite and NiCrSiB alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1031~1036
- 9 钟敏霖,刘文今. Stellite 和 NiCrSiB 合金激光送粉熔覆裂纹倾向的比较研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11):1031~1036

## 第十届全国光学测试学术交流会在洛阳召开

由中国光学学会光学测试专业委员会主办,中国人民解放军洛阳 63891 部队承办的第十届全国光学测试学术交流会于 2004 年 10 月 25 日~28 在古都洛阳召开。来自全国十九个省市的五十多个科研单位、大专院校及光学期刊编辑部的 112 名代表参加了此次会议。

大会在光学测试专业委员会代主任潘君骅院士与中国人民解放军 63891 部队总工程师陈永光大校热情洋溢的讲话中开幕。会上姜文汉院士、潘君骅院士、李景镇教授、沙定国教授、夏留根大校分别作了题为哈特曼—夏克波前传感器在光学测量中的应用、谈谈光学检测的指导思想、极高速过程时空信息的多维测量技术研究、光学测量与先进生产力、光电装备的发展与需求的大会报告。大会报告后按照学科分三个分会场进行了学术交流,共宣读论文 76 篇。

据了解,本次会议共收到会议论文 120 篇,内容覆盖了光电仪器及装备、空间光学和遥感、兵器光学、光辐射度学、色度学、干涉计量学、各类探测器、可见及红外光学材料、系统及元器件、激光等领域的光学参数计量与测试,以及生物光子学领域。文章充分反映了我国“十五”后期在光学测试领域内的新动向和最新科研成果。

会议期间,节目委员会还举行了产品信息交流发布会,一些公司代表、光学期刊联合编辑部编辑在交流会上分别介绍了自己的产品和编辑部工作情况。会议期间,还举行了第四届光学测试专业委员会第二次委员会议,会议总结了近三年的工作并提出了今后的工作设想,并决定第十一届全国光学测试学术交流会于 2006 年在青岛举行,由国防光电子计量一级站承办。

(段家喜)