

# 滚刀刀圈材料的激光熔覆硬度强化试验研究

康 斌<sup>1</sup>, 李慧鹏<sup>1</sup>, 朱燕毕<sup>1</sup>, 陈 玮<sup>1</sup>, 唐莉梅<sup>2</sup>, 于瑞龙<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国水利水电第十四工程局有限公司设备运营中心, 云南 昆明

<sup>2</sup>武汉恒立工程钻具股份有限公司, 湖北 武汉

<sup>3</sup>天津科技大学, 天津

收稿日期: 2021年10月24日; 录用日期: 2021年11月17日; 发布日期: 2021年11月24日

## 摘 要

近年来, 随着我国城市化进程的快速发展, 土地资源短缺问题越来越明显, 地下空间的开发显得越来越重要。盾构法以其对环境的干扰较小、效率较高、较为安全等特点成为隧道工程的首先考虑的施工方法。盾构机主要靠刀盘上的刀具进行挖掘作业, 在硬岩地质下滚刀是主要的切削部件, 因此需要刀圈具有足够的硬度进行破岩工作。其工作环境非常的恶劣, 若经常更换刀圈会严重影响施工效率。基于此, 本文中以激光熔覆技术对盾构机滚刀刀圈表面进行AlCoCrFeNi系列高熵合金加原位自生TiB<sub>2</sub>作为增强相改性处理。通过试验确定了此系列合金粉末合适的热输入范围, 结果表明, 熔覆层硬度明显高于基材的硬度, 提高了大约有337 HV2.0。

## 关键词

滚刀刀圈, 盾构法, 激光熔覆, 高熵合金

# Research on Hardness Strengthening Test of Laser Cladding for Hob Ring Material

Bin Kang<sup>1</sup>, Huipeng Li<sup>1</sup>, Yanbi Zhu<sup>1</sup>, Wei Chen<sup>1</sup>, Limei Tang<sup>2</sup>, Ruilong Yu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Equipment Operation Center, Sinohydro Bureau No.14 Co., Ltd., Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Wuhan HL Engineering Tool Co., Ltd., Wuhan Hubei

<sup>3</sup>Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

Received: Oct. 24<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 24<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In recent years, with the rapid development of China's urbanization process, the shortage of land resources has become more and more obvious, and the development of underground space has

become more and more important. The shield method has become the first considered construction method for tunnel engineering because of its characteristics of less interference to the environment, higher efficiency, and more safety. The shield machine mainly relies on the cutters on the cutter head for excavation operations. In hard rock geology, the hob is the main cutting component, so the cutter ring is required to have sufficient hardness for rock breaking work. The working environment is very harsh, and frequent replacement of the cutter ring will seriously affect the construction efficiency. Based on this, in this paper, laser cladding technology is used to modify the surface of the shield machine hob cutter ring with AlCoCrFeNi series high-entropy alloy plus in-situ  $\text{TiB}_2$  as the reinforcing phase. The appropriate heat input range for this series of alloy powders was determined through experiments, and the results showed that the hardness of the cladding layer was significantly higher than that of the base material, increasing by about 337 HV2.0.

## Keywords

Hob Cutter Ring, Shield Tunneling Method, Laser Cladding, High-Entropy Alloy

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在硬岩的地质条件下, TBM 滚刀虽然是较为高效的破岩工具[1], 在盾构施工中不可避免地会造成滚刀的磨损失效, 但是因为其消耗费用占比较大, 一旦刀具发生失效, 就要使盾构机停止下来进行更换刀具[2], 大大降低了生产效率, 所以滚刀的性能成为影响盾构施工进度的决定性因素[3]。

TBM 滚刀要依靠刀圈的挤压对硬岩进行破岩工作[4], 因此提高滚刀刀圈材料表面的硬度成为首要选择[5]。当下对材料表面改性的方法主要有化学热处理、电化学、激光表面淬火和热喷涂等, 然而喷涂技术和化学热处理等工艺存在着工艺要求高、工艺时间长、涂层薄、非冶金结合、环境污染大等特点, 此外, 激光加热淬火处理对性能提升的空间有限。随着科技的发展, 大功率激光的出现, 激光熔覆技术作为表面改性技术的一种, 因其冶金结合、可获得理想厚度、能降低材料成本、成型性良好、无宏观裂纹等优点, 得到了迅速的发展[6]。激光熔覆使用不同配比的金属粉末然后还可以添加一些陶瓷相作为增强相[7], 例如 WC、 $\text{TiB}_2$ 、SiC 等来提高熔覆层的硬度等性能[8]。段松[9]在 40CrNiMo 钢板通过激光熔覆 Ni 基碳化钨复合熔覆层发现添加铸造碳化钨的熔覆层显微硬度值最大, 与基材相比提高了 2.27 倍。许圣操[10]以滚刀材料为基材通过激光熔覆铁基和镍基合金与 WC 复合粉末探究 WC 对复合熔覆层的强化机理, 发现熔覆层的质量随着 WC 含量的增多而变差, 当 20% WC 时熔覆层质量最好; 涂层硬度受 WC 颗粒的影响较大, 当达到 WC 含量达 50%时, 复合强化覆层的硬度最高。近年来人们把目光从传统的 Fe 基、Ni 基、Co 基合金粉末转向高熵合金粉末, 高熵合金是指由五种或五种以上金属或非金属元素以等摩尔比或近等摩尔比组合而成, 且各元素所占摩尔含量在 5%~35%之间的粉末, 在高熵合金粉末中加入陶瓷颗粒, 构成高熵合金复合粉末, 研究表明高熵合金粉末比传统合金粉末具有更高的硬度和耐磨性等性能。郝文俊[11]等在 45 号钢为基材通过激光熔覆 CoCrFeNiSi<sub>x</sub> 系列高熵合金, 研究发现随着 Si 含量的提升, 涂层的显微硬度升高, 在  $x = 2.0$  时, 可达 566.5 HV0.5。在众多的研究中, 人们对改变高熵合金中主元素的含量进而研究涂层性能变化的研究较多, 而对在高熵合金中原位自生陶瓷相进行提高复合涂层性能的研究较少。

基于此,本文在 40Cr 板材表面激光熔覆 AlCoCrFeNi 系列高熵合金加原位自生  $\text{TiB}_2$  作为增强相来进行表面强化处理,研究涂层硬度,以期为其实际应用提供参考。

## 2. 试验方法

试验的基材选用 40Cr,化学成分(质量分数,%)为: C 0.37~0.44; Si 0.17~0.37; Mn 0.50~0.80; S 允许残余含量  $\leq 0.035$ ; P 允许残余含量  $\leq 0.035$ ; Cr 0.80~1.10; Ni 允许残余含量  $\leq 0.030$ ; Cu 允许残余含量  $\leq 0.030$ , 首先把 40Cr 通过线切割进行加工处理,加工尺寸为  $100\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 17\text{ mm}$ 。将基体分别用 60 #、120 #、240 #、600 # 的砂纸进行逐级打磨,去除表面的氧化层和杂质,表面粗糙度为  $R_a = 0.2\ \mu\text{m}$ ,之后用丙酮溶液清洗表面的杂质与油污,然后将试样放干燥箱中烘干备用。选用高纯度的 Al、Co、Cr、Fe、Ni (纯度超过 99.5%,粒度为 300 目)粉末作为熔覆层材料,然后在高熵合金中加入摩尔比为 2:1 的 B 和 Ti 元素以期原位自生  $\text{TiB}_2$  作为增强相,构成摩尔比为  $\text{AlCoCrFeNi}_{0.08}\text{Ti}_{0.04}$  的复合粉末,利用奥豪斯万分之一电子天平进行称量所需粉末的质量,复合粉末的具体成分见表 1。待粉末混合均匀后,为了去除粉末中的水汽,把混合粉末放入干燥箱中进行烘干 2 小时的预处理,烘干温度为  $100^\circ\text{C}$ 。待粉末烘干完毕后,采用预置粉末法将混合均匀且烘干的粉末用铺粉工具预先铺在基体表面,厚度约为 1.5 mm。

**Table 1.** The mole percentage of each element of the alloy powder

**表 1.** 合金粉末各元素的摩尔百分比

| Elements | Al | Co | Cr | Fe | Ni | B    | Ti   |
|----------|----|----|----|----|----|------|------|
| Mol%     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0.08 | 0.04 |

试验所用的激光器是功率高达 3 KW 的大功率二氧化碳激光器,在基材表面进行激光熔覆试验,光斑为直径 2.8 mm 的圆形光斑,激光功率为 800 W、1100 W、1400 W、1700 W、2000 W,扫描速度为 5 mm/s、8 mm/s、11 mm/s、14 mm/s、17 mm/s,各激光功率和扫描速度进行组合,焦距为零焦距,用高纯度的氩气进行保护,流量为 350 L/hr,进行单道激光熔覆试验,形成了 25 组不同的试验组。因为复合粉末中各粉末的熔点不同,其中 40Cr 基材和复合粉末中各个元素的熔点分别为:基材  $1500^\circ\text{C}$ 、Al  $660^\circ\text{C}$ 、Co  $1495^\circ\text{C}$ 、Cr  $1907^\circ\text{C}$ 、Fe  $1538^\circ\text{C}$ 、Ni  $1453^\circ\text{C}$ 、B  $2075^\circ\text{C}$ 、Ti  $1668^\circ\text{C}$ ,因此需要通过多组试验进行对照,选取最优的工艺参数,以此来探究复合粉末合适的热输入范围,热输入的计算公式为  $E_s = P/DV$ ,式中 P 是指激光的功率, D 是指光斑直径, V 是指激光的扫描速度。待单道激光熔覆完毕后,观察熔覆层的表面形貌,选择熔覆层形貌较好的组对其表面分别用 600 #、1000 #、1500 # 的砂纸进行打磨,磨掉表面的氧化层,然后在磨抛机上用抛光布加金刚石抛光液进行抛光,抛光完毕后用硬度仪测量其硬度,所用的载荷是 2.0 Kgf,载荷的保持时间是 15 s,每组试样的表面分别取 5 个点,去掉最大值和最小值,其余的三个值取平均值。激光不同参数的组合及热输入如表 2 所示。

**Table 2.** Different combinations of laser parameters

**表 2.** 激光不同参数组合

| 序号 | 扫描速度 mm/s | 功率/W | 热输入 $\text{J}/\text{mm}^2$ |
|----|-----------|------|----------------------------|
| 1  | 5         | 800  | 57.14                      |
| 2  |           | 1100 | 78.57                      |
| 3  |           | 1400 | 100                        |
| 4  |           | 1700 | 121.43                     |
| 5  |           | 2000 | 142.86                     |

Continued

|    |    |      |       |
|----|----|------|-------|
| 6  |    | 800  | 35.71 |
| 7  |    | 1100 | 49.11 |
| 8  | 8  | 1400 | 62.5  |
| 9  |    | 1700 | 75.89 |
| 10 |    | 2000 | 89.29 |
| 11 |    | 800  | 25.97 |
| 12 |    | 1100 | 35.71 |
| 13 | 11 | 1400 | 45.45 |
| 14 |    | 1700 | 55.19 |
| 15 |    | 2000 | 64.94 |
| 16 |    | 800  | 20.41 |
| 17 |    | 1100 | 28.06 |
| 18 | 14 | 1400 | 35.71 |
| 19 |    | 1700 | 43.47 |
| 20 |    | 2000 | 51.02 |
| 21 |    | 800  | 16.81 |
| 22 |    | 1100 | 23.11 |
| 23 | 17 | 1400 | 29.41 |
| 24 |    | 1700 | 35.71 |
| 25 |    | 2000 | 42.02 |

### 3. 试验结果分析

#### 3.1. 单道熔覆层表面质量分析

激光熔覆有 3 个重要的工艺参数，分别是激光功率、光斑直径和熔覆速度。当激光功率过小时，只能使金属粉末的表面熔化，基体可能会出现未熔化或者熔化过少的问题，导致熔覆层的表面出现起球和空洞问题。随着功率的增加熔覆的粉末数量和熔覆层的深度就会增加，熔化的液态金属剧烈波动，动态凝固结晶，气孔减少，使熔覆层的表面质量提高。熔覆层深度达到最大的深度后，若激光功率继续增加，基材表面的温度过高，使基材过度熔化，从而污染合金涂层，导致合金涂层的性能下降；激光熔覆的速度和激光功率对熔覆层的影响是相似的，当速度过高时，合金粉末不会完全熔化，得不到理想的熔覆效果。若激光熔覆的速度过低，会使激光束在熔池的存在时间过长，粉末存在过烧现象，并且增加基材的变形量；光斑直径对表面层的质量也有很大的影响，本实验中每一组的光斑直径都是一样的，因此只作简要分析。一般来说较小的光斑直径熔覆层的质量较好，但是如果光斑直径过小的话不利于获得大面积的熔覆层。激光的各个参数对熔覆层表面的影响不是独立的，而是互相的。为了说明他们三者共同作用下对熔覆层的影响，提出了比能量来表征热输入。通过观察图 1 可以看出 1 组、2 组、8 组、9 组、10 组、14 组、15 组，这几组的表面形貌较好，6 组、7 组、11 组、12 组、13 组、16 组、17 组、18 组、19 组、20 组、21 组、22 组、23 组、24 组、25 组这几组表面层质量较差，存在着气孔过多或者熔覆层与基材的冶金结合成度较低。3 组、4 组、5 组这几组熔覆层的厚度和其他组相比较来说较薄，且熔覆层的四周存

在着瘤状熔融物。从热输入来看, 1组、2组、8组、9组、10组、14组、15组这几组的热输入在  $55\sim 90\text{ J/mm}^2$ , 在此热输入区间高熔点的粉末能够完全熔化, 低熔点的粉末也不会出现过烧现象。6组、7组、11组、12组、13组、16组、17组、18组、19组、20组、21组、22组、23组、24组、25组这几组热输入低于  $55\text{ J/mm}^2$ , 热输入过低使金属粉末的表面熔化, 甚至高熔点粉末未熔化, 导致熔覆层的表面出现起球和空洞问题。3组、4组、5组热输入大于  $90\text{ J/mm}^2$ , 热输入过高使复合粉末出现过烧现象、基材过度熔化, 熔覆层的稀释率过大, 使熔化的基材污染熔化的复合合金粉末, 因此复合粉末的热输入在  $55\sim 90\text{ J/mm}^2$  时可以得到较为理想的表面质量。

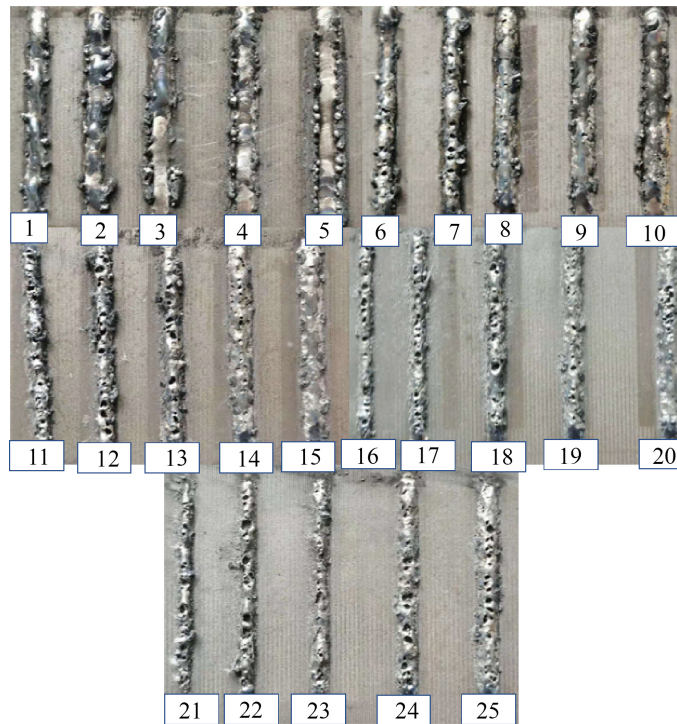


Figure 1. Single-pass laser cladding morphology  
图 1. 单道激光熔覆形貌

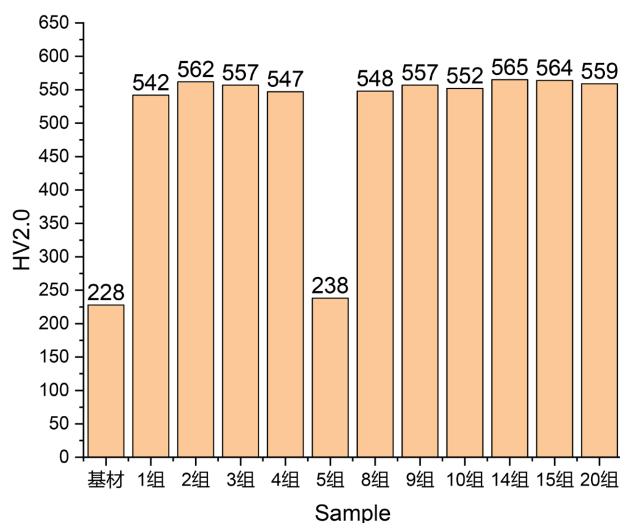
### 3.2. 硬度分析

选择表面质量较好的 1 组、2 组、8 组、9 组、10 组、14 组、15 组测试其硬度, 并且与可测试硬度且质量较差的组进行比较, 分别取 5 个点, 去掉最大值和最小值, 其余的 3 个值取平均值, 基材和熔覆组硬度测试结果如表 3 所示(单位:  $\text{HV}2.0$ )。通过 Origin 作柱状图, 更能直观比较基材和单道激光熔覆层的硬度大小, 其硬度对比如图 2 所示。从图中可以看出熔覆层的硬度值均远远高于基体。40Cr 基材的平均硬度是  $228\text{ HV}2.0$ , 其他的硬度也都在  $540\text{ HV}2.0$  以上, 硬度最高的是第 14 组, 硬度值为  $565\text{ HV}2.0$ 。质量较差的组的硬度与质量较好组的硬度值差不多, 但是 5 组的硬度值和基材差不多, 可能的原因是其热输入过高, 基材过度熔化, 熔化的基材污染了熔覆层。

激光熔覆过程中是一个短时间内的非平衡的凝固过程, 过冷度很大和较快的冷却速度, 使涂层中的不均匀形核增加, 形成组织均匀、细小, 使熔覆层的晶粒得以细化, 复合金属粉末的各个粉末之间互相固溶形成新的硬质相, 这些硬质相弥散分布在激光熔覆层中也起到了弥散强化的作用, 因此熔覆层的硬度值较基体而言得到了较大的提升。

**Table 3.** Hardness test results of different groups (Unit: HV2.0)  
**表 3.** 不同组别的硬度测试结果(单位: HV2.0)

| 组别 | 第一次   | 第二次   | 第三次   | 第四次   | 第五次   | 平均值 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 基材 | 229.1 | 229.8 | 227.6 | 221.6 | 235   | 228 |
| 1  | 531.3 | 560.7 | 542.5 | 526.1 | 552.3 | 542 |
| 2  | 553.3 | 564.0 | 569.1 | 574.0 | 545.9 | 562 |
| 3  | 534.3 | 572.0 | 551.0 | 552.7 | 567.5 | 557 |
| 4  | 550.1 | 550.3 | 568.9 | 539.9 | 535.7 | 547 |
| 5  | 244.6 | 227.3 | 266.5 | 237.8 | 233.0 | 238 |
| 8  | 571.3 | 541.1 | 558.1 | 544.2 | 535.1 | 548 |
| 9  | 541.5 | 572.7 | 566.6 | 548.2 | 557.0 | 557 |
| 10 | 567.3 | 533.7 | 530.5 | 555.9 | 563.8 | 552 |
| 14 | 556.6 | 585.5 | 551.0 | 552.7 | 587.4 | 565 |
| 15 | 558.3 | 563.3 | 570.4 | 570.0 | 558.1 | 564 |
| 20 | 519.8 | 553.1 | 570.9 | 558.7 | 566.2 | 559 |



**Figure 2.** Hardness histogram of different groups  
**图 2.** 不同组别硬度柱状图

#### 4. 结论

本文采用激光熔覆的方法在 40Cr 基材制备了  $\text{AlCoCrFeNiB}_{0.08}\text{Ti}_{0.04}$  高熵合金复合涂层, 探究了不同的热输入对熔覆层表面形貌和硬度的影响, 获得了以下结论:

(1) 利用激光熔覆技术在 40Cr 表面成功制备了 AlCoCrFeNi 系列高熵合金加原位自生  $\text{TiB}_2$  作为增强相的复合涂层, 找到了此类复合粉末的最佳热输入范围是  $55\sim 90 \text{ J/mm}^2$ 。在此热输入范围内涂层表面质量较好; 无明显缺陷; 熔覆层和基体形成了良好的冶金结合。

(2) 熔覆层的硬度高达 565 HV2.0, 基材的硬度值只有 228 HV2.0, 提高了大约 337 HV2.0, 远远高于基材的硬度值。

(3) 本次试验虽然找到了此类粉末的最佳热输入范围,但是没办法研究功率、扫描速度的变化对硬度值的影响,因此下一步计划在最佳热输入范围内进一步探索功率和扫描速度对硬度值的影响。

## 参考文献

- [1] 张宁川. TBM、盾构盘形滚刀硬岩掘进的刃口磨损形状分析及优化对策[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(4): 657-665.
- [2] 李绍宏, 何文超, 张旭, 等. H13 型热作模具钢表面改性技术研究进展[J]. 钢铁, 2021, 56(3): 13-22+40.
- [3] 刘文波, 杨学锋, 万壮, 等. 盾构机刀具失效形式与改进方案探析[J]. 工程机械与维修, 2020, 293(4): 35-37.
- [4] 陈秋实. 硼元素和铁元素对 AlCoCrFeNi 基高熵合金的改性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [5] 冯英豪. 陶瓷相对激光熔覆 AlCoCrFeNi 高熵合金组织与性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2019.
- [6] 车金涛. 含 B 高熵合金的微观结构及力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [7] 陈秋实, 董勇, 张峻嘉, 等. AlCoCrFeNiB<sub>x</sub> (x = 0, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0)高熵合金的微观结构与性能(英文) [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(3): 651-656.
- [8] 张旭. 40Cr 刀杆表面激光熔覆硬质合金涂层及其切削性能[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [9] 段松. 盾构机滚刀刀圈材料激光熔覆镍基硬质合金的研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
- [10] 许圣操. 激光熔覆盾构滚刀组织及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [11] 郝文俊, 孙荣禄, 牛伟, 等. 激光熔覆 CoCrFeNiSi<sub>x</sub> 高熵合金涂层组织及耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 343-348+381.