

大面积激光熔覆 Ni 基涂层性能研究

邱星武, 李刚, 倪晓明

辽宁工程技术大学材料科学与工程系, 辽宁阜新 (123000)

E-mail: fallenrain922@163.com

摘要: 采用 CO₂ 激光器及 LASERCELL-1005 六轴六联动三维激光加工机床在 40Cr 钢上进行激光熔覆处理。采用微观分析及力学性能测试手段对熔覆层组织、硬度、磨损、腐蚀性能进行研究。结果表明: 熔覆层的表面硬度、耐磨性和耐蚀性与基体相比均有较大的提高; 大面积激光熔覆层的显微硬度、耐磨性、耐蚀性均不及单道激光熔覆层; 多道搭接熔覆层的性能优于多层叠加熔覆层; 大面积激光熔覆层极易产生裂纹, 裂纹主要由应力叠加所致。

关键词: 激光熔覆; Ni 基涂层; 性能; 大面积

中图分类号: TG156.99

1. 引言

激光熔覆由于其优异的耐磨、耐蚀、抗高温氧化、抗疲劳等综合性能, 成为激光表面改进技术研究和发展的热点, 并且得到越来越多的工业应用, 但由于受激光功率、光斑尺寸、扫描速度和送粉量的限制, 单道熔覆所获得的面积十分有限, 限制了其工业应用的范围。因此制备大面积激光熔覆层已成为必然, 大面积激光熔覆层可通过多道搭接和多层叠加的方式获得, 即从横向和纵向两个方向进行加工处理。目前国内外对激光熔覆研究报导很多^[1-4]。但针对大面积激光熔覆的研究很少。其原因在于大面积激光熔覆很难获得无裂纹、气孔、夹渣等缺陷的高质量熔覆层。本文围绕熔覆层性能对大面积激光熔覆进行了研究, 探讨了影响熔覆层性能的原因。

2. 实验材料、设备及方法

2.1 实验材料

基体材料选用 40Cr, 它是一种常用的调质钢, 具有较高的强、韧、塑性配合, 在机械结构中应用很广泛, 经常用来制造在重载荷和冲击下工作的耐磨件, 如制造重要螺母、螺栓、支重轮轴、导向轮、传动轮、重型汽车曲轴及连杆等。其化学成分如表 1 所示。

表 1 40Cr 的化学成分
Table. 1 Chemical constituents of 40Cr

元素	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu
含量	0.37~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	≤0.030	≤0.030	≤0.25	≤0.030

熔覆材料选用 Ni60B 镍基自熔性合金粉末, 其粒度范围为: -140~320 目; 熔点 1024℃, 耐磨性、耐蚀性、抗滑动磨损性好, 可作拉丝滚筒等极易磨损件硬面。其化学成分如表 2 所示。

表 2 Ni60B 镍基自熔性合金粉末组成
Table. 2 Compositions of Ni60B self-fluxing powder

元素	Cr	B	Si	C	Fe	Ni
含量	17.0	3.5	4.0	1.0	<12	余量

2.2 实验设备

实验设备选用大连光洋科技工程有限公司 TURMPF TLF-3200 快速轴流 CO₂ 激光器及 LASERCELL-1005 六轴六联动三维激光加工机床。

2.3 实验方法

2.3.1 材料预处理

先将基体试样用磨床磨平,再用丙酮溶液对基体表面进行清洗,除去表面的污垢和油垢,以减少对试样的污染。将合金粉末用有机溶剂调匀后预涂覆在 40Cr 钢基材表面上,室温挥发干后进行激光熔覆处理。

2.3.2 激光熔覆处理

激光功率 $P=3200$ W; 光斑直径 $D=4$ mm, 扫描速度 $V=0.5$ m/min, 氩气保护, 试样编号见表3。

表 3 试样编号
Table3 Number of samples

A	B	C
多道搭接	多层叠加	单道熔覆

2.3.3 组织观察与性能测试

- 1) 用 XJL-02 型立式金相显微镜观察激光熔覆试样的熔覆区、结合区、基底热影响区及基体的金相组织。
- 2) 用 DMH-2LS 型显微硬度计沿熔覆层横截面测定激光熔覆试样的显微硬度, 载荷 $G=25$ g, 加载时间 15 s。
- 3) 用 ML-10 型磨料磨损试验机测定激光熔覆试样的耐磨性。实验过程中加载 3 kg。
- 4) 用 FDY/-03E 型盐雾实验机测定激光熔覆试样的耐蚀性。实验采用 5%的 NaCl 溶液进行喷蚀, 连续喷雾 24 小时, 利用失重法测试不同熔覆层的耐蚀性能。

3 实验结果分析

3.1 大面积激光熔覆涂层的显微硬度

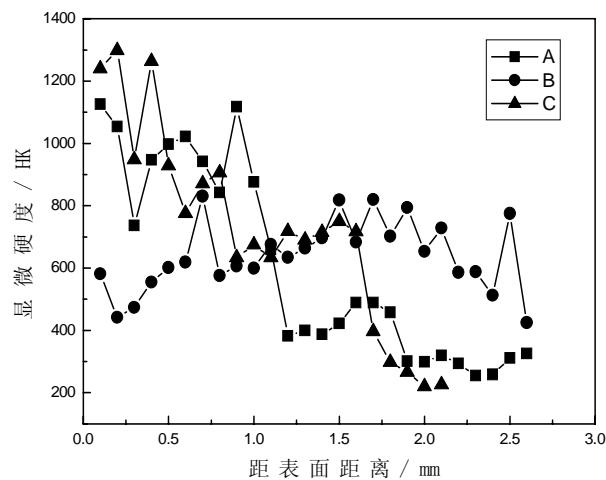


图 1 熔覆试样的显微硬度

Fig. 1 Microhardness of laser cladding samples

对单道熔覆和大面积熔覆层显微硬进行度测量。结果表明：单道熔覆的显微硬度在750HK~1320HK之间；大面积熔覆层显微硬度值在420HK~1150HK之间，二者均具有较高的硬度。由于熔覆层快速凝固，组织极其致密，熔覆层具有较高的硬度；另一方面，颗粒相的弥散强化、合金元素的固溶强化和马氏体相变强化对熔覆层显微硬度的提高也有一定的作用。图1是从熔覆层顶部到基体材料的显微硬度变化曲线。从熔覆层表层到结合界面熔覆层的显微硬度变化不大。这与熔覆层显微组织的变化规律是对应的。从熔覆层的顶部到底部显微组织由细小等轴晶、树枝晶到粗大的树枝晶，熔覆层的显微硬度增加；但另一个方面，从顶部到底部，共晶程度的降低将导致熔覆层显微硬度的降低。马氏体相变的发生，增加了强化相和相界面，合金渗碳体的形成对熔覆层显微硬度的提高也有贡献。综合起来，熔覆层的强化机制主要有合金元素的固溶强化、复合碳化物的弥散强化、晶粒细化、马氏体相变强化等。大面积激光熔覆硬度不及普通单道激光熔覆高，这是因为多道搭接熔覆前的试样由于上一道的熔覆加热已使得其具有较高的温度，随搭接道数的增加温度往往高达几百度，必然减小熔融金属与基体的温差，减小凝固时的冷却速率和过冷度。因此，冷却速率较大的单道熔覆比冷却速率较小的多道熔覆具有更加细小的熔覆区组织，从而具有较高的硬度。多层叠加时，紧邻下一熔覆层的前道熔覆层，所经历的回火温度高，硬度下降也快。激光熔覆的总层数越多，越靠近基材的底层熔覆层经历的回火次数越多，硬度下降得越多。在层间停光极短时间的情况下，残留于熔覆层中的热量来不及扩散出去，前一道熔覆层由于尚保持较高的温度实际上对下一熔覆层起着高温回火作用。先前完成的熔覆层数越多，热量积累越多，试样的整体温度也越高，对后一熔覆层回火温度越高，后一熔覆层的组织越接近平衡凝固组织，因此硬度也就越低，导致试样靠近基材的熔覆层硬度高于远离基材的熔覆层硬度。

3.2 大面积激光熔覆涂层的相对耐磨性

相对耐磨性是指试验材料的耐磨性与对比材料的耐磨性之比，在评定各种试验材料的耐磨性时，采用一种“对比材料”作为参考试样，用其与参考试样在相同条件下进行试验的结果来进行衡量，在一定程度上可以避免磨损过程中由于参数变化及测量误差等造成的系统误差，因此可以比较科学而精确地评定材料的耐磨性能^[5]。

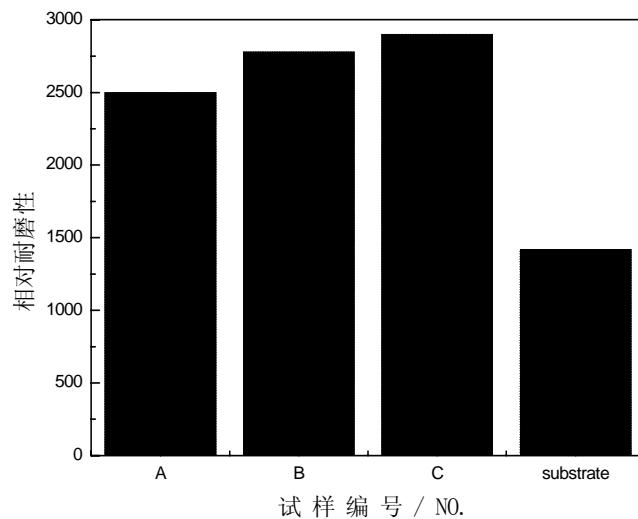


图 2 熔覆试样的相对耐磨性
Fig. 2 Ware resistance of laser cladding samples

材料的耐磨性能要综合考虑材料的硬度、韧性、互溶性、耐热性、耐蚀性等一系列性质。不同类型的磨损,由于其磨损机理不同,可能侧重于这些性质的某一方面或某两方面^[6]。因此,在设计或选择熔覆材料,尤其是在进行熔覆再制造时,不能孤立考虑单个零件的问题,必须注意该摩擦副配偶表面的匹配性。图 2 为熔覆层的相对耐磨性,从左至右依次为试样 A、B、C 及基体的失重量,从图中可以看出,激光熔覆处理后可以显著地提高材料的相对耐磨性。其中大面积激光熔覆层的相对耐磨性与单道激光熔覆层相比不理想,这主要是因为大面积激光熔覆层表面硬度不及单道激光熔覆层高,同时表面裂纹的存在也使得耐磨性能相对下降。

3.3 大面积激光熔覆涂层的耐蚀性

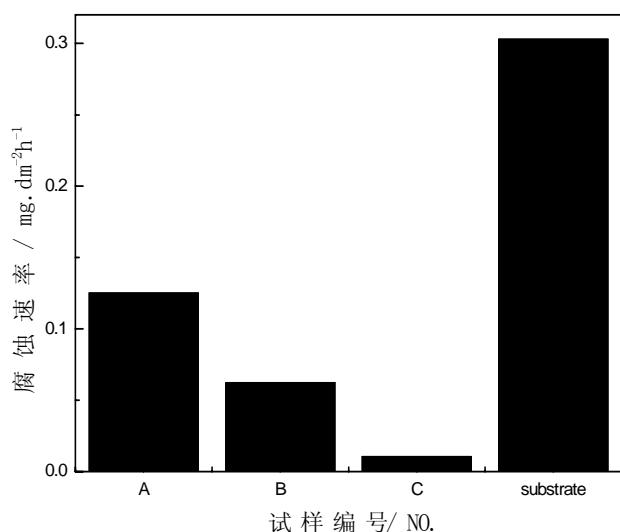


图 3 熔覆试样的耐蚀性
Fig. 3 Corrosion resistance of laser cladding samples

对于金属腐蚀,人们最关心的就是腐蚀速度,本试验采用失重法测量腐蚀速度。所谓失重法是用试样在腐蚀前后单位面积、单位时间内的失重表示腐蚀速度的方法。腐蚀速率越大,耐蚀性越差。从图 3 中可以看出,激光熔覆处理后耐蚀性能明显增强。主要是因为 Ni 基合金粉末具有良好的耐蚀性能。多道搭接试样 A 和多层叠加试样 B 的腐蚀速率比普通单道激光熔覆试样 C 相比腐蚀速率高,说明耐蚀性不及试样 C 理想。主要是因为大面积激光熔覆过程中表面的裂纹的导致了组织缺陷,在腐蚀过程中裂纹处形成微小的原电池,导致腐蚀速率与单道激光熔覆相比有所增加。

4. 大面积激光熔覆涂层缺陷分析

熔覆层厚度、预热温度和搭接宽度等参数会对熔覆层的裂纹敏感性产生影响。此外,激光熔覆层的残余应力状态受熔覆层材料及基材影响,也受激光熔覆工艺参数影响。一般认为,激光熔覆层裂纹主要是凝固裂纹,其形成机理是由于熔覆层凝固时,初生的发达枝晶会相互连接成网,造成枝晶间的液体封闭,残存的液体不易流动从而造成枝晶间液态金属凝固收缩时没有足够的液体补充,加上枝晶间组织结晶温度低,低熔点的杂质多集中在此处,从而导致枝晶间开裂敏感性大,在应力作用下产生裂纹^[7]。常规的镍基、钴基自熔覆层极易出现裂纹^[8]。激光熔覆由于加热冷却速度极快,熔池寿命很短,常使熔层中可能存在的氧化物、硫

化物和其它杂质常来不及释放出来。它们存于覆层中,很容易成为裂纹源。另外,熔覆层在瞬间凝固结晶,晶界位错,空位增多,原子排列极不规则,凝固缺陷也增多,同时热脆性增大,塑韧性下降,开裂敏感性也就增大。覆层越厚,以上情况就越明显。

在熔覆层和基体交界处,材料之间的物理性能也不尽相同,显著的表现为热膨胀系数、弹性模量、泊松比等参数不一样,影响最大的是热膨胀系数。不同的热膨胀系数使得在激光熔覆热作用的整个过程中,各层之间的热膨胀速率和收缩速率不一致而产生应力。同时由于各层材料发生了塑性和蠕动变形,在冷却过程终点处,这个界面上的残余应力将不会消失;变形越来越大,以及内部应力的传播叠加,将使该界面上的残余应力越来越大。同时,随着温度的上升,材料的塑性将随之降低,当这个累积的残余应力达到材料的强度极限时,熔覆层和基体界面上将产生裂纹,由于沿着扫描方向处应力值最大,因而它沿着与扫描速度垂直的方向传播。

在加热过程中,基体熔池温度很高,研究表明熔池的升温速度达 $10^7^{\circ}\text{C}/\text{s}$,熔池里已熔化的部分材料受热膨胀,但受到周围及心部区域材料的约束即受到压应力作用,这种应力也成为约束应力。由于熔池区域和周围区域温度梯度较大,熔池边界处压应力最大,当压应力值大于熔覆材料的强度极限时,便会发生断裂。当扫描光束离开后,被扫描区域迅速冷却,温度下降很快,相对于周围区域,被扫描区域相对缩短、变窄或减小。但是,由于材料的整体性,熔化区域在随后的凝固过程中不可能自由地收缩,其收缩变形将受到周围及心部区域的束缚,因此,在凝固过程中,熔覆区域将受到较大的拉应力作用,熔覆层组织在凝固时晶界处的残余液相受这一拉应力作用时将导致晶界处液膜分离。

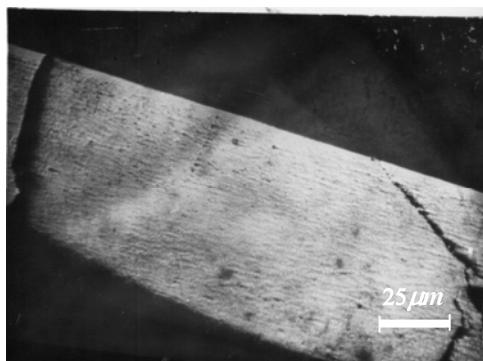


图 4 试样 A 熔合区附近裂纹 400×
Fig.4 The crack near the fusion zone sample M 400×

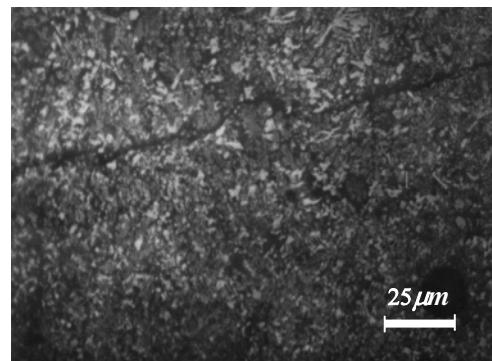


图 5 试样 B 熔合区处裂纹 400×
Fig.5 Fusion zone crack sample N 400×

图 4 为多道搭接熔覆处理试样 A 熔合区附近组织,图中有两条裂纹,由于在多道搭接过程中后道对前道的影响导致的残余应力相互叠加,致使熔覆层开裂,裂纹呈主裂纹带有少量分枝状,且几乎穿透整个熔覆层。

图 5 为采用多层熔覆处理的试样 B 靠近熔合区处组织,图中有一条裂纹,其产生原因与试样 A 相似,多层叠加过程中,后层对前层的影响同样导致残余应力相互叠加,致使熔覆层开裂。

5. 结论

1) 单道和多道搭接熔覆层的显微硬度值在 420HK~1320HK 之间,这是颗粒相弥散强化、细晶强化、固溶强化和马氏体相变强化等共同作用的结果。

- 2)大面积激光熔覆层的显微硬度、耐磨性、耐蚀性均不及单道激光熔覆层。
- 3)多道搭接熔覆层的性能优于多层叠加熔覆层。
- 3)大面积激光熔覆层易产生裂纹,裂纹主要由应力叠加所致。

参考文献

- [1] 刘喜明. Co 基自熔合金+WC 送粉激光熔覆层再加热冷却过程中的显微组织变化特征[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(4):621-624.
- [2] 李刚, 张伟强, 郝胜智. 熔覆 Zr65Ni7.5Cu17.5 非晶纳米晶复合涂层组织结构[J]. 化工进展,2007,26(8):1132-1135.
- [3] 李宝灵, 刘旭红, 翁波. 激光熔覆技术应用于轴类零件表面修复的实验研究[J]. 应用激光,2007,27(4):290-294.
- [4] 孙荣禄, 牛伟, 王成扬. 钛合金表面激光熔覆 TiN-Ni 基合金复合涂层的组织和磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(1):7-10.
- [5] 王砚军. 山东建材水泥球磨机衬板耐磨损性测定方法的探讨[J]. 1996(5): 25-26.
- [6] 葛中民, 等.耐磨损设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 82.
- [7] 冯志刚, 韩志范, 邹至荣.球墨铸铁激光涂层裂纹的研究[J]. 金属热处理学报,1995,16 (1):31-34.
- [8] Dekumbis R. Controlling residual stressing laser cladding layer[C]. LIM6, Birmingham U.K. May,1989.

Study on Microstructure and Properties by Large Area Laser Cladding

Qiu Xingwu, Li Gang, Ni Xiaoming

Department of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning (123000)

Abstract

CO_2 laser and the LASERCELL-1005 six axes sixlinkages three dimensional laser processing machine tools were used to laser cladding process on 40Cr steel, the microstructure, hardness, wear resistance, corrosion resistance of cladding coating were researched by means of micro-analysis and mechanical property testing. The result indicated that, after the laser cladding, the hardness, wear resistance and corrosion resistance of cladding coating greatly enhanced compared with the substrate. The microhardness, ware resistance and corrosion resistance of large area laser cladding were inferior to that of single cladding. Properties of overlapping Clad coating superior to that of multilayer overlay. Large area laser cladding coating is extremely easy to appear cracks, the crack mainly caused by stress superposition.

Keywords: laser cladding, Ni-based coating, property, large area

作者简介: 邱星武, 男, 1982 年生, 硕士研究生, 研究方向为材料表面改性。