

激光重熔 Co 基合金堆焊层的组织和耐热疲劳性的研究

洪永昌¹, 夏正文²

(1.安徽工业大学 材料科学与工程学院,安徽 马鞍山 243002;2.浙江久力集团股份有限公司,浙江 湖州 313012)

摘要:利用金相显微镜、扫描电镜与 X 射线衍射仪等分析手段,对经不同激光工艺参数重熔的 Co 基合金堆焊层进行了组织结构分析和耐热疲劳性试验的研究。试验结果表明:经焊条电弧焊(SMAW)获得的堆焊层经激光重熔后,组织变得细小、均匀和致密,主要由大量细小初生枝晶固溶体 γ -Co 与其间的共晶组织 γ -Co+Cr₂₃C₆组成。不同激光工艺参数处理的重熔堆焊层的耐热疲劳性均比原始堆焊层好。重熔堆焊层在 700℃时的耐热疲劳性要好于 900℃时的耐热疲劳性。综合比较结果,激光功率为 2.5 kW,扫描速度为 4 mm/s 获得的重熔堆焊层,在 700℃时的耐热疲劳性最好。

关键词:激光重熔;钴基合金;堆焊层;组织;耐热疲劳性

中图分类号:TG456.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2303(2007)04-0050-05

Study on microstructure and thermal fatigue resistance of laser remelting

Co-based alloy hardfaced layers

HONG Yong-chang¹, XIA Zheng-wen²

(1.College of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China; 2.Zhejiang Jiuli Group Co., Ltd., Huzhou 313012, China)

Abstract: By means of optical microscope(OP), scanning electron microscope(SEM) and X-ray diffraction instrument(XRD), remelting hardfaced layers of Co-based alloy which were made with different parameters of laser remelting were studied. Microstructure and thermal fatigue resistance of the were also tested. After laser remelting, it showed that microstructure turned to be fine, uniform and compact. And it was composed of primary phase(γ -Co) and eutectic microstructure(γ -Co+ Cr₂₃C₆). Compared with the original hardfaced layers, thermal fatigue resistance of the remelting hardfaced layers with different laser parameters was all improved. And at the temperature of 700℃, thermal fatigue resistance of the remelting hardfaced layers was better than that at the temperature of 900℃. It was best when laser power was 2.5 kW, scanning speed was 4 mm·s⁻¹ at the temperature of 700℃.

Key words: laser remelting; Co-based alloy; hardfaced layers; microstructure; thermal fatigue resistance

随着我国工业技术的迅猛发展,机器制造业对材料的性能要求越来越高,特别是用于冶金、矿山、电力等工业部门的主要机械零部件的使用性能要求越来越高,若单纯采用高性能材料制成零部件,成本又太高。大量失效分析表明,许多工件主要是由于表面首先被破坏而导致失效。因为表面性能如硬度、耐

磨性、耐蚀性、抗氧化性、耐热疲劳性等,在许多情况下取决于金属材料的成分组成和表面的组织状态。较传统的表面改性技术,如喷涂、刷镀、电镀等,由于较差的层间结合力以及受平衡溶解度小、固态扩散性差的限制,在许多较恶劣的工况条件下应用效果并不理想。因此,人们寻求新的表面改性技术,来提高工件在较恶劣工况条件下的使用性能。堆焊是一种修复和改善机械零部件表面性能的简单、经济且行之有效的方法。对于采用高成本材料制成的零部件,现可通过在低成本母材上堆焊一层高成本、满足其使用性能的合金,同样能满足实际生产的要求,并

收稿日期:2007-03-02

基金项目:安徽省教育厅自然科学基金项目(2005KJ036)

作者简介:洪永昌(1952—),男,上海人,副教授,主要从事焊接冶金学、金属学、热处理等课程的教学和材料可焊性、表面改性技术的研究与应用工作。发表论文 30 余篇。

大大降低了生产成本,获得可观的经济效益。然而研究表明,目前普遍存在的问题是堆焊层成分不均匀,稀释率高,组织粗大且不均匀,不致密,以及当焊接工艺措施选择不当时,高合金堆焊层焊后开裂倾向较大。尽管堆焊表面改性技术可降低成本,提高经济效益,从而获得一定的应用^[1-6],但堆焊的某些不足促使人们研究新的工艺手段来进行弥补。

将传统表面堆焊技术(SMAW)与激光重熔表面改性技术(LSM)相结合是一种新的尝试。利用高能量密度激光束的热源集中、加热和冷却速度快的特点,不但处理的表面比较光洁缺陷少,而且使堆焊层显微组织结构得到良好的改善,可进一步提高其综合使用性能^[7-9],从而获得更好的经济效益。本研究以原始堆焊层为参照,重点比较不同激光工艺参数对重熔堆焊层组织和耐热疲劳性的影响,为实际生产上的推广应用提供试验依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验选用基体材料为马钢生产的 Q345 钢,试板尺寸 100 mm×50 mm×20 mm。焊接材料采用上海司太立有限公司生产的 φ 4 mm 的 Stellite12 钴基金堆焊焊条,其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 堆焊合金的主要化学成分 %

ω (C)	ω (Mn)	ω (Si)	ω (Cr)	ω (W)	ω (Fe)	ω (Mo)	ω (Co)
1.4	1.0	1.4	29.0	8.0	3.0	1.0	Bal.

1.2 试验方法

按 GB984-85 要求采用 SMAW 在基体材料上堆焊 4 层 7 道制备堆焊试板。焊接工艺参数: $I_f=160$ A, $U_f=26\sim 27$ V, $v_{焊}=30$ cm·min⁻¹。直流反接。

堆焊后,将堆焊层表面用磨床磨制成 10 mm 宽,以便进行激光重熔。在激光重熔前,为了提高堆焊层表面对激光束的吸收率,对堆焊层表面涂墨汁进行黑化烘干处理,然后将试板放入电炉进行 350 °C×3 h 的预热。用配备六轴四连动数控系统的 TJ-HL-T5000 型横流 CO₂ 激光器,按表 2 设定的不同激光工艺参数进行多道扫描,每道搭接率为 50%。经扫描后快速放入预热炉中,再进行 350 °C×3 h 消除应力处理。经激光重熔处理后,试板用线切割方法沿横向切取宽度 10 mm 的试样,并对试样进行编号,制成的金相试样经王水深腐蚀后,用 OLYMPUS-PME3 型金相显微镜、PHILIP-XL30 型扫描电镜对重熔堆焊

层进行金相组织观察分析、照相;并在 XD-3A 型 X 衍射仪上对重熔堆焊层进行物相分析。

表 2 不同激光重熔工艺参数

功率 P/kW	扫描速度 v/mm·s ⁻¹	功率 P/kW	扫描速度 v/mm·s ⁻¹
1.5	2.0	2.5	4.0
2.0	2.0	2.5	8.0
2.5	2.0		

将切取的宽度 10 mm 的试样磨制成进行热疲劳试验的试样。重熔堆焊层与原始堆焊层呈圆弧过渡,无倒角,整个试样要求表面光滑。按表 2 设定的相同激光扫描速度三种不同功率、相同激光功率三种不同扫描速度工艺参数处理的试样,分别放入采用 DWT-702 型精密温度控制仪控制的 SXR-5-12 型箱式电阻炉中加热、冷却进行热疲劳试验。设定加热温度分别为 700 °C、900 °C;每保温 10 min 取出试样进行水淬;经砂纸磨制、擦净,在 20×放大镜下仔细观察,并测量重熔堆焊层出现的热疲劳裂纹,然后再放入炉中进行重复加热,水淬,观察和测量;如此为一个周期,循环反复进行。二种温度都进行 70 次循环周期试验。试验中观察、记录重熔堆焊层第一次出现裂纹的次数、位置和尺寸,以及测量最终循环周期的裂纹尺寸,最后将试样制成金相样品,在金相显微镜和扫描电镜下进行热疲劳裂纹形成的位置和扩展路径的观察并拍照。根据试验结果分析比较不同激光功率、不同激光扫描速度和两种不同加热温度下的重熔堆焊层耐热疲劳性。

2 试验结果与分析

2.1 不同激光功率对重熔堆焊层组织的影响

焊条电弧焊 SMAW 原始堆焊层表面金相显微组织形态如图 1a 所示。可以明显看出,原始堆焊层树枝状晶组织非常粗大,并且很不均匀和致密。

图 1b、图 1c、图 1d 分别为相同激光扫描速度(2 mm/s),三种不同功率(1.5 kW, 2.0 kW, 2.5 kW),重熔堆焊层表面金相显微组织形态。比较分析可以看出,原始堆焊层经激光重熔后,组织变得细小、均匀和致密,组织形态发生了很大变化和改善。经 X 衍射物相分析表明,其组织主要由细小初生枝晶固溶体 γ -Co 与其间的共晶组织 γ -Co+Cr₂₃C₆ 组成。在激光扫描速度一定情况下,随着功率的提高,重熔堆焊层细化的程度有所不同。试验结果表明,重熔堆焊层组织形态由类似胞状枝晶逐渐转变为形成局部枝晶较发达棒槌状组织。这主要是由于堆焊层受到高能量密度激光束的快速加热熔化和快速冷却作用,对

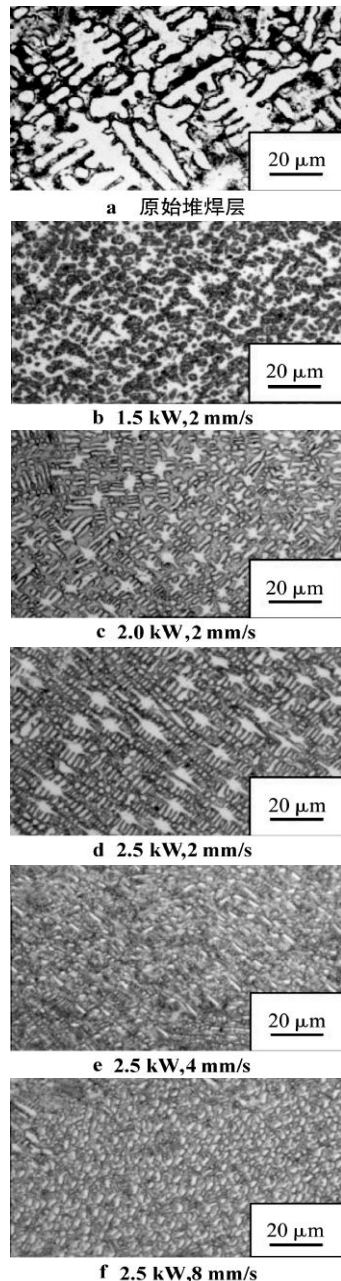


图 1 不同激光工艺参数重熔堆焊层的表面组织(OP)

重熔后熔池重新结晶过程中形核、长大造成的影响而导致的;重熔堆焊层表现出不同组织形态主要受激光功率大小控制。

2.2 不同激光扫描速度对重熔堆焊层组织的影响

图 1d、图 1e、图 1f 分别为相同激光功率(2.5 kW), 三种不同扫描速度(2 mm/s, 4 mm/s, 8 mm/s)重熔堆焊层表面金相显微组织形态。比较分析可以看出, 在激光功率一定情况下, 随扫描速度的提高, 其规律与激光扫描速度一定, 不同功率获得的重熔堆焊层组织形态有

所不同。主要表现为:随着扫描速度的提高, 当扫描速度由 2 mm/s 逐渐提高到 8 mm/s 时, 堆焊层重熔后的组织不但得到明显的细化, 且组织形态变化是由局部枝晶较发达棒槌状组织逐渐转变为一种均匀、细小等轴晶组织。这是因为激光重熔时, 熔池内温度很高, 但由于熔池冷却速度极快(大于 10^4 K/s), 大约需 10^{-2} s 就可将熔池边界区域的熔体冷至其液相面温度以下, 使其固液界面前沿的局部熔体实际上处于过冷状态, 则在同一基体晶粒上将有众多形核的有利位置, 可使凝固晶粒超细化;随着扫描速度提高, 由于同比单位时间内输入的功率减小, 使得长大速度相对较小, 形成了图 1d、图 1e、图 1f 所示的组织形态的规律性变化。

2.3 不同激光功率对重熔堆焊层耐热疲劳性的影响

相同扫描速度(2 mm/s), 不同激光功率的重熔堆焊层热疲劳试验结果如表 3 所示。比较可知:当热疲劳试验温度较高时, 出现第一条裂纹的循环周期较短, 裂纹扩展的速度较快;当激光功率较高时, 第一条裂纹出现的循环周期较长, 裂纹长度也较短, 相对来说, 裂纹扩展速度较慢。对于激光功率为 2.5 kW 的重熔堆焊层来说, 经 700 °C 热疲劳试验的第一条裂纹出现在循环周期 70 次后, 只扩展了 1.22 mm; 而经 900 °C 热疲劳试验表明, 在循环周期为 70 次后最少扩展了 5.18 mm。由此说明在相同激光功率、不同热疲劳试验温度条件下, 重熔堆焊层裂纹的扩展速度在 900 °C 时的要高于 700 °C 时的, 进一步说明温度对重熔堆焊层耐热疲劳性影响也较大。

相同激光扫描速度(2 mm/s), 不同激光功率经 700 °C 和 900 °C、循环周期为 70 次的重熔堆焊层热疲劳裂纹表面宽度测量结果如表 4 所示。比较可以看出, 随激光功率的提高, 在相同热疲劳试验温度和循环周期条件下, 重熔堆焊层的裂纹表面宽度呈逐渐减小;当扫描速度一定(2 mm/s)时, 相比于其他功率获得的重熔堆焊层, 激光功率为 2.5 kW 时获得的重熔堆焊层出现裂纹的周期较晚, 循环 70 次后裂纹扩展的长度较短, 最终的表面裂纹宽度也较窄, 表现出耐热疲劳性较好。

2.4 不同激光扫描速度对重熔堆焊层耐热疲劳性的影响

相同激光功率(2.5 kW), 不同扫描速度下的重熔堆焊层热疲劳试验结果如表 5 所示。比较可知, 在两种热疲劳试验温度条件下, 原始堆焊态的试样出现第一条热疲劳裂纹的周期相对较短, 并随扫描速

表 3 不同激光功率的重熔堆焊层热疲劳试验结果

功率 P/kW	第一条裂纹出现的循环次数 $n/\text{次}$		第一条裂纹的长度 l/mm		循环 70 次后裂纹长度 l/mm	
	700 °C	900 °C	700 °C	900 °C	700 °C	900 °C
1.5	10	7	1.98	1.32	8.24	6.70
2.0	11	8	5.96	1.38	7.54	6.68
2.5	13	8	2.94	1.26	4.16	6.44

表 4 不同激光功率重熔堆焊层热疲劳裂纹表面宽度

功率 P/kW	裂纹表面宽度 b/mm	
	700 °C	900 °C
1.5	0.035	0.225
2.0	0.012	0.180
2.5	0.005	0.110

度提高,出现第一条裂纹的周期延长;900 °C时形成的热疲劳裂纹扩展速度大于 700 °C时的扩展速度。试验结果表明,当扫描速度为 8 mm/s 时,热疲劳裂纹长度较短。在 700 °C热疲劳时,出现的第一条裂纹尺寸为 0.96mm;循环 70 次后,仅扩展延伸了 2.06 mm,是

所有相同循环周期内裂纹扩展速度最慢,扩展长度最短的;经 900 °C热疲劳时扩展了 4.06 mm。其次是扫描速度为 4 mm/s 的重熔堆焊层,经 700 °C和 900 °C热疲劳后,从第一条裂纹的出现到循环 70 次后,分别扩展了 2.28 mm 和 4.42 mm。由此说明,在一定激光功率条件下,经相同循环周期的热疲劳试验,较高扫描速度的重熔堆焊层耐热疲劳性优于较低扫描速度的;同时,在相同激光工艺参数条件下,虽然 700 °C时热疲劳出现裂纹的周期较晚,但第一次出现裂纹的长度较 900 °C时的要长,可能是由于经热疲劳使得材料内部内应力积累到一定程度后突然释放,而只能以开裂的方式得到松弛的缘故。

表 5 不同激光功率的重熔堆焊层热疲劳试验结果

扫描速度 $v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	第一条裂纹出现的循环次数 $n/\text{次}$		第一条裂纹的长度 l/mm		循环 70 次后裂纹长度 l/mm	
	700 °C	900 °C	700 °C	900 °C	700 °C	900 °C
0	11	9	3.26	2.58	6.02	8.24
2	24	8	2.94	1.26	4.16	6.44
4	28	15	2.50	1.32	4.78	5.74
8	30	15	0.96	1.02	3.02	5.08

相同激光功率(2.5 kW),不同扫描速度经 700 °C和 900 °C循环 70 次的不同处理态重熔堆焊层热疲劳裂纹表面宽度测量结果如表 6 所示。由此可以看出,随激光扫描速度的提高,由于获得的重熔堆焊层组织更为细小,在相同加热温度热疲劳和循环周期条件下,重熔堆焊层裂纹表面宽度逐渐减小;但由于受到搭接宽度的影响,扫描速度为 8 mm/s 时重熔堆焊层的表面裂纹宽度反而变大;原始堆焊层表面裂纹宽度为最大。在热疲劳试验温度为 700 °C时,原始堆焊层表面裂纹宽度是扫描速度为 2 mm/s 或 4 mm/s 重熔堆焊层表面裂纹宽度的 17 倍;在热疲劳试验温度为 900 °C时,大约是扫描速度为 4 mm/s 重熔堆焊层表面裂纹宽度的六倍多。综合比较结果表明,当激光功率一定(2.5 kW),扫描速度为 4 mm/s 时获得的重熔堆焊层,在 700 °C时的耐热疲劳性较其他扫描速度获得的重熔堆焊层要好,而原始堆焊层的耐热疲劳性最差。

2.5 不同重熔堆焊层组织对耐热疲劳性影响

对比不同激光工艺参数重熔堆焊层经 900 °C \times

表 6 不同激光功率重熔堆焊层热疲劳裂纹表面宽度

扫描速度 $v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	裂纹表面宽度 b/mm	
	700 °C	900 °C
0	0.085	0.45
2	0.005	0.11
4	0.005	0.07
8	0.044	0.26

70 次热疲劳试验后的试样形貌,可以明显看到,试样的基体部分比重熔堆焊层不但氧化得严重,而且出现变形脱落、凹坑现象,基体出现龟状裂纹;重熔堆焊层只是出现由表向内垂直扩展的纵向裂纹,没有发现龟状和横向裂纹。由此说明,重熔堆焊层不但具有良好高温抗氧化性能,且具有较好的高温耐热疲劳性。比较激光功率为 2.5 kW,扫描速度分别为 4 mm/s、8 mm/s 重熔堆焊层的裂纹状况,虽然两者都出现了两条纵向裂纹,但后者裂纹较宽。说明较快的扫描速度虽然能使重熔堆焊层获得细晶组织,但由于受搭接宽度的限制,只有在保证获得足够搭接宽度

重熔堆焊层的前提下,提高扫描速度才是对提高高温耐热疲劳性有利的。

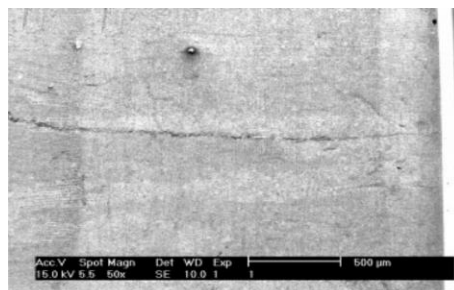
图 2 为激光工艺参数(2.5 kW, 4 mm/s)重熔堆焊层同一条热疲劳裂纹穿过原始堆焊层和重熔堆焊层时的形貌和宽度对比。经扫描电镜(SEM)仔细观察可以看出,裂纹首先在重熔堆焊层表面形成,在重熔堆焊层中扩展时,裂纹宽度相对较细小,而裂纹扩展到原始堆焊层时,裂纹的宽度明显变大。由此可知,获得细小、致密以及一定熔深的重熔堆焊层有阻碍裂纹扩展的效果,从而可进一步提高堆焊合金耐热疲劳性。在相同激光功率条件下,随扫描速度的提高,重熔堆焊层的冷却速度加快,组织越细化(见图 1)。因此,在热疲劳过程中,一定深度的重熔堆焊层较原始堆焊层有更加均匀、致密、细小的组织,且几乎没有空隙率,对裂纹的产生有较大的阻力,使得裂纹在重熔堆焊层扩展的通道减少,出现裂纹的几率下降,甚至在相当长的周期内不出现热疲劳裂纹;当热疲劳裂纹一旦在重熔堆焊层表面形成,在随后扩展到原始堆焊层的过程中,因为重熔堆焊层组织细小,大量的晶界被看作是阻止裂纹扩展的障碍。当裂纹尖端到达晶界时,如果裂纹面的位向与裂纹尖端下一晶粒的取向相差较大,则裂纹扩展将受到较大的阻力,使其扩展速率降低甚至停止扩展。即使裂纹不停止也继续扩展,共晶组织中细化了的碳化物减少了基体与界面的应力集中,也对延缓疲劳裂纹的扩展有积极作用;同时由于重熔堆焊层的细小组织使裂纹扩展过程中的转向次数增加,使扩展速率变慢。然而当激光扫描速度一定,激光功率越大,熔深越大,导致裂纹通过重熔层的时间进一步延长,从而可更加明显地提高重熔堆焊层的耐热疲劳性能。

3 结论

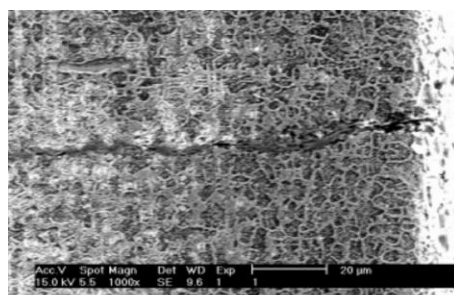
(1)不同激光工艺参数重熔后的 Co 基合金重熔堆焊层组织变得细小、均匀、致密;主要由大量细小初生枝晶固溶体 γ -Co 与其间的共晶组织 γ -Co+Cr₂₃C₆ 组成。

(2)不同激光工艺参数条件下获得的重熔堆焊层,较原始堆焊层耐热疲劳性均得到不同程度的提高;相同条件下,在 700 °C 时出现热疲劳裂纹的周期较晚,但第一次出现热疲劳裂纹的长度较 900 °C 时的要长些。

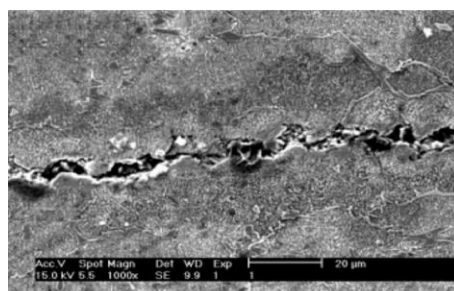
(3)当激光工艺参数的功率为 2.5 kW,扫描速度为 4 mm/s 时获得的重熔堆焊层,在 700 °C 时的



a 堆焊层裂纹宏观形貌



b 裂纹穿过重熔堆焊层时的形貌



c 裂纹穿过原始堆焊层的形貌

图 2 不同部位的热疲劳裂纹形貌(SEM)

耐热疲劳性最好,而原始堆焊层耐热疲劳性最差。

参考文献:

- [1] 单际国,董祖珏,徐滨士.我国堆焊技术的发展及其在基础工业中的应用现状[J].中国表面工程,2002(4):19-22.
- [2] 扬庆祥,高聿伟,廖波,等.中高碳钢堆焊技术的应用及研究进展[J].燕山大学学报,2001,25(4):301-304.
- [3] 王建国,刘晓刚,徐平,等.16Mn 钢坯剪切机刀片的堆焊修复研究[J].包头钢铁学院学报,1999,18(1):73-75.
- [4] 苏志东,王德权.核级阀门堆焊钴基合金工艺的研究[J].阀门,2000(5):15-18.
- [5] 干美君.双辊可逆式轧机轧辊的堆焊技术[J].上海金属,2001,23(1):39-41.
- [6] Koteckl D J, Ogborn J S. Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys[J]. Welding Research Supplement, 1995 (8): 269-278.
- [7] 洪永昌,夏正文.不同激光功率对 Co 基合金堆焊重熔层组织和性能的影响[J].电焊机,2005,35(12):41-45.
- [8] 洪永昌,夏正文.激光扫描速度对 Co 基合金堆焊重熔层组织和硬度的影响[J].热处理,2006(1):31-35.