

激光熔覆处理对 2Cr13 钢腐蚀 疲劳寿命的影响

朱蓓蒂 曾晓雁 李红雨

(华中理工大学材料系, 武汉 430074)

张之栋 杨崇铨 蔡 徽

(北京电力设备总厂, 北京 102401)

郑守礼 姚治铭

(中国科学院沈阳金属腐蚀与防腐研究所, 沈阳 100015)

提要 测定了 2Cr13 钢及其激光熔覆试样在 3.5% NaCl (PH=7) 水溶液中频率为 50 Hz 时的腐蚀疲劳寿命曲线, 研究了其腐蚀疲劳断裂行为特征。结果表明, 激光熔覆试样的腐蚀疲劳裂纹起源于 2Cr13 钢基材表面蚀坑。由于激光合金层抑制了腐蚀疲劳裂纹的萌生, 使其腐蚀疲劳寿命明显高于 2Cr13 钢。该结果为激光熔覆技术的应用开辟了新的道路。

关键词 2Cr13 钢, 激光熔覆, 腐蚀疲劳

1 引言

近年来, 随着激光表面强化技术的发展, 一些发达国家已开始将激光熔覆技术应用于汽轮机末级叶片(下简称叶片)进气边的保护, 以延长叶片的工作寿命^[1]。由于大多数叶片早期失效的主要原因之一是在 NaCl 腐蚀介质及循环应力共同作用下产生的腐蚀疲劳, 因此激光熔覆处理后是否会影响整体材料的腐蚀疲劳寿命一直是人们共同关心的问题。一些研究已经表明, 常规的表面强化方法可以有效地提高材料的腐蚀疲劳性能^[2,3], 但至今为止未见有关激光熔覆处理后试样腐蚀疲劳性能的报道。本文研究了叶片常用材料 2Cr13 钢及其激光熔覆试样在 NaCl 水溶液中的腐蚀疲劳特性, 为激光熔覆技术应用于叶片等腐蚀疲劳易损件提供了依据。

2 试验方法

2.1 试验材料

本试验所用基材为 2Cr13 马氏体不锈钢, 其化学成分为 0.20% C, 13.4% Cr, 0.08% Ni, 0.45% Si 及 0.47% Mn (Wt-%)。经 970 °C 油淬, 680 °C 回火处理, 组织为回火索氏体, 力学性

能见表 1。

激光熔覆试验粉末为钴基自熔合金,其化学成分为 0.83% C, 22.1% Cr, 14.2% Ni, 4.6% W, 5.6% Fe, 2.05% Si, 3.21% B,其余为 Co(wt-%)。

Table 1 Mechanical properties of 2Cr13 steel after treatment

σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	δ (%)	φ (%)	α_2 (J/cm ²)	H_B
630.5	788.1	22.6	5.5	110	239

2.2 试样

2.2.1 2Cr13 钢激光熔覆试样

模拟叶片的实际工作条件,在尺寸为 250×32×5 mm 的 2Cr13 钢板状试样的单面上预涂 70×25×2 mm 的钴基自熔合金粉末,用 2 kW CO₂ 激光器进行激光熔覆,激光输出功率为 2 kW,光斑直径为 5 mm,激光扫描速度为 5.5 mm/s,多道搭接率为 50%,激光束扫描方向为平行于试样的长度方向。激光熔覆后试样经 640 °C×3 h 去应力处理,然后再进行 X 射线无损探伤检测,证明熔覆层中确无裂纹存在后,再将试样以线切割加工成图 1 所示尺寸,将表面层磨平并保留熔覆层厚度为 1 mm。然后再将试样进行探伤,证明明确无磨削裂纹等加工缺陷后,将试样表面用金相砂纸由粗到细磨至 800# 后备用。

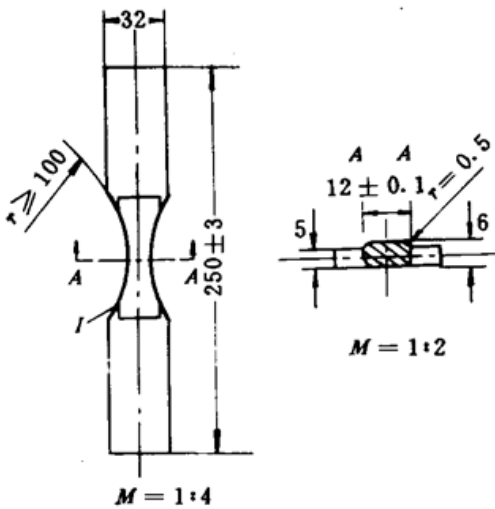


Fig. 1 Coprosion-fatigue sample of 2Cr13 steel by laser cladding

2.2.2 2Cr13 钢基材试样

为保证结果的可比性,2Cr13 钢基材的预处理工艺与激光熔覆的相同,试样尺寸亦相同,如图 1 所示。

2.2.3 腐蚀疲劳试验设备及条件

试验是在日本岛津公司制造的 EHF-EA5-10 型伺服疲劳试验机上进行,轴向加载,载荷波形为正弦波,应力比为 -1,频率为 50 Hz,腐蚀介质为 3.5% NaCl 水溶液,PH 值为 7.0±0.2。试验时试样工作段泡在有腐蚀介质的有机玻璃容器内,溶液不流动,每 24 h 更换一次溶液,溶液温度为 16~18 °C。

为了使实验结果能真实地反映激光熔覆处理后试样的腐蚀疲劳抗力,在试样的背面及侧面(未熔覆合金的位置)涂覆了一层防腐胶,以便能有效地保证上述部位在腐蚀疲劳试验过程中不优先腐蚀。

由于疲劳试样结果存在一定的分散性,因此本实验结果中每个试验点均采用 3~5 个试样进行测试,并取其平均值。

2.2.4 金相组织及断口分析

将工作段的横截面制成金相试样,用光学显微镜观察金相组织,用扫描电镜观察试样断口。

3 试验结果

3.1 激光熔覆合金层的金相组织

图 2 是激光熔覆层中 Co 基合金层的金相组织, 它由 α -Co(Ni) 过饱和固溶体枝晶及枝晶间的碳化物、硼化物等多元共晶体组成, 表面硬度 H_v600 。在各道之间的搭结区有以等轴晶为特征的明显分界线。合金层与基材的界面有一白色带, 表明已呈良好的冶金结合。临近界面的基材受热影响已淬火成马氏体, 但经 $640\text{ }^\circ\text{C}$ 高温回火后, 已转变成回火索氏体。

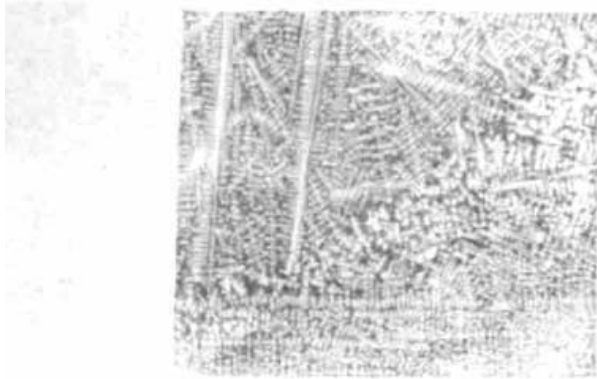


Fig. 2 Metallography of laser cladding coating ($\times 200$)

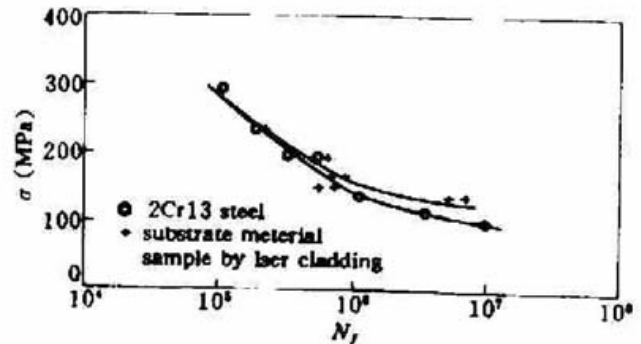


Fig. 3 Corrosion-fatigue life curves (σ - N curves)

3.2 腐蚀疲劳寿命

图 3 是 2Cr13 钢及基材激光熔覆试样的腐蚀疲劳寿命, 即 σ - N 曲线。由图可见, 在疲劳应力幅值高于 196 MPa 时, 两试样的腐蚀疲劳寿命接近。在应力幅值低于 166.6 MPa 时, 激光熔覆试样的腐蚀疲劳寿命已有较大的增高, 且增高的幅度随应力幅值的降低而增大。当应力幅度为 137.2 MPa 时, 2Cr13 钢基材的腐蚀疲劳寿命 N_f 只有 10.84×10^5 周次, 而激光熔覆后试样的腐蚀疲劳寿命 N_f 增至 58.40×10^5 周次, 提高了 4.4 倍。它表明在低应力幅值下, 激光熔覆处理能更有效地提高 2Cr13 钢的腐蚀疲劳寿命。

3.3 断口观察

图 4(a) 是激光熔覆试样的腐蚀疲劳断口宏观形貌。图中 I 为激光熔覆的合金层, II 为 2Cr13 钢基材。显然, 断口由裂纹源区、裂纹扩展区和瞬断区组成。裂纹源区位于 2Cr13 钢基材与 NaCl 水溶液直接接触的外表面, 有两个裂纹源, 它们为黄褐色的半圆形蚀坑。源区外侧较为细洁, 具有明显的放射花样, 两个裂纹源在各自的平面沿垂直于轴向应力向界面方向扩展, 相遇后通过撕裂而相互连接形成台阶。瞬断区由部分基体及合金层组成, 基体上有剪切唇特征。合金层断口平滑, 具有金属光泽, 未见锈斑。

图 5(a~c) 分别为激光熔覆试样腐蚀疲劳断口三个区域的扫描电镜照片。由此看出, 腐蚀疲劳源起始于点蚀坑, 一个蚀坑可以诱发多条腐蚀疲劳裂纹。裂纹沿晶扩展并有微坑, 在裂纹扩展区还呈有明显“轮胎花样”的疲劳纹, 熔覆的合金层为沿固溶体树枝晶界断裂的晶间断口。

图 4(b) 的 2Cr13 钢基材的断口形貌与激光熔覆试样类似, 所不同的只是没有合金层的断口。

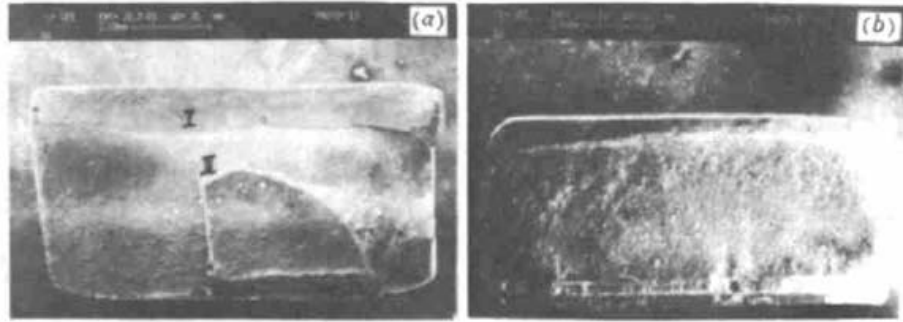


Fig. 4 Macro fracture image of 2Cr13 steel with and without laser cladding coating

4 分析与讨论

4.1 关于本试验方法

本实验中,疲劳试件采用激光单面熔覆板条,试件只有一个表面得到处理。这样的方法能否真正反映激光熔覆后 2Cr13 钢基材腐蚀疲劳的抗力,是一个值得认真考虑的问题。经过反复探索与查阅国内外资料,我们认为这个方法是可行的,能够基本反映所要解决的问题。主要理由如下:

(1) 大部分激光表面处理工件都是单边处理,故此本实验条件下的测试方法能反映一些共性问题;

(2) 本实验中试样为薄平板试样,如果采用两边处理,则第二边的处理条件必然影响到第一边,且应力状况更加复杂,亦不能真正反映合金层的腐蚀疲劳抗力;

(3) 可以采用圆柱型试样代替平板试样,但那样应力状态完全不同,与我们实际要了解的结果相去甚远;

(4) 腐蚀疲劳抗力往往只是衡量材料性能的指标之一。本文的试验结果甚少说明,采用激光熔覆技术处理 2Cr13 钢基材,只要合金成分与激光熔覆工艺参数选择合适,其腐蚀疲劳抗力是可以提高的。

4.2 关于腐蚀疲劳失效机理

文献[4]指出钢在液相中的腐蚀疲劳类型与其在溶液中的腐蚀类型有关。当钢对环境具有点蚀敏感时,钢的腐蚀疲劳多归结于以点蚀坑为起源的裂纹形机理。试验观察表明,2Cr13 钢浸泡在 NaCl 水溶液中,其表面很快变粗糙,随后出现锈斑及蚀坑,坑底应力集中,在变应力作用下产生滑移台阶,破坏了钢表面的钝化膜,然后进一步活化溶解形成裂纹。可见,蚀坑的数目越多,钢表面钝化膜被交变应力所破坏之处愈多,由此会形成较多的活性缺口,使裂纹源的数目激增。试验中用称重法测定的 2Cr13 钢及熔覆合金层在 NaCl 水溶液中浸泡 700 h 的腐蚀速率表明,2Cr13 钢极易点蚀,其腐蚀速率比合金层高近 60 倍。点蚀坑的早期和大量出现,使裂纹萌生的孕育期大大缩短,加速了 2Cr13 钢的腐蚀疲劳进程。

激光熔覆合金层良好的抗蚀性主要由下列原因引起:

(1) 合金层的化学成分中比 2Cr13 钢含有较多的抗点蚀合金元素如铬、镍等;

(2) 激光熔覆的快速凝固过程,提高了合金层过饱和固溶体中合金元素的固溶度。同时由于快速定向凝固组织的形成,减少了因晶粒取向差造成的原电池效应而加速腐蚀的倾向;



Fig. 5 SEM metallography of corrosion-fatigue fracture sample by laser cladding

(a) cracks initiating from the pits and propagating along the crystal interface;

(b) the "tire image" in the crack spreading zone; (c) the crystal interface fracture in laser cladding coatings

(3) 激光熔覆后所采取的高温去应力处理,有效地降低了因激光处理在合金层和热影响区所产生的残余应力。实验已经证明,在相同条件下,高温去应力处理的激光熔覆试样的腐蚀疲劳寿命高于低温去应力的激光熔覆试样;

(4) 合金层与基材良好的冶金结合,避免了界面不连续性而引起的局部腐蚀损伤,减少了裂纹源^[5]。

必须指出,本实验中预先涂覆在试样背面的防腐蚀层并未起到预期的作用,主要是在交互载荷下这类胶状物首先破裂所致。

5 结 论

(1) 激光熔覆试样在 NaCl 水溶液中的腐蚀疲劳裂纹主要起源于 2Cr13 钢基材表面蚀坑;

(2) 激光熔覆合金层的腐蚀疲劳断裂为沿固溶体枝晶界的晶间断裂;

(3) 2Cr13 钢表面激光熔覆钴基合金后,在 3.5% NaCl 水溶液 (PH=7) 中的腐蚀疲劳寿命得到提高。疲劳应力幅值愈低,提高的幅度愈大;

(4) 减少激光熔覆合金层表面缺陷,提高其与基材的界面结合强度,降低激光处理产生的残余应力,可有效地延长激光熔覆试样的使用寿命。

参 考 文 献

- 1 朱蓓蒂,曾晓雁,胡 须等. 汽轮机末级叶片的激光熔覆研究. 中国激光, 1994, 21(6): 526
- 2 刘 慷,藏启山等. Ni-P 镀层对海洋结构 A537CL1 腐蚀疲劳寿命的影响. 腐蚀科学及防护技术, 1990, 2(4): 34
- 3 袁金才,开维成等. 腐蚀科学及防护技术, 1991, 3(3): 11
- 4 郑文龙,于 青. 钢的环境敏感断裂. 北京: 化学工业出版社, 1988. 225
- 5 J. Congleton, W. Chen. The fatigue life of a 13% Cr turbine blade steel. *Int. J. Fatigue*, 1990, 12(2): 98

Effect of Laser Cladding Treatment on Corrosion Fatigue Lifetime of 2Cr13 Steel

Zhu Beidi Zeng Xiaoyan Li Hongyu

(*Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074*)

Zhang Zidong Yang Zhongguan Cai Hui

(*Beijing Power Equipment Group, Beijing 102401*)

Zheng Yuli Yao Zhiming

(*Institute of Metal Corrosion & Protection, Academia Sinica, Shenyang 10015*)

Abstract This paper reports studies of the corrosions, fatigues, and fracture characteristics of cobalt-base cladded coating on 2Cr13 steel substrates, performed at 50 Hz in 3.5% NaCl solution (PH=7). The corrosion fatigue lifetime curve was determined. The results show that almost all corrosion fatigue cracks of laser cladded specimens derive from pits on the surface of 2Cr13 steel substrates. Cobalt-base laser cladding coatings on the specimens gave a greatly increased corrosion fatigue lifetime compared with 2Cr13 steel specimens because the initiation of corrosion fatigue cracks is restrained by the laser cladded coating. From the results, it may open up a new way to the application of laser cladding technology.

Key words 2Cr13 steel, laser cladding treatment, corrosion fatigue