

多次辐照条件下 YAG 脉冲激光熔敷层 开裂敏感性研究

张 松* 陈 江 王茂才 吴维斌

(中国科学院金属腐蚀与防护所金属腐蚀与防护国家重点实验室 沈阳 110015)

提要 采用 Nd:YAG 固体脉冲激光器,在镍基高温合金上激光熔敷镍基自熔合金,对激光多次辐照条件下熔敷层的开裂问题进行了探索性研究。试验结果表明:脉冲激光多次辐照,对熔敷层的组织及硬度影响不大;激光辐照次数的增多,促进了熔敷层裂纹萌生,其裂纹形态为沿晶高温液化裂纹;对基材热输入的增多,促进了基材再热裂纹的萌生。

关键词 脉冲激光,多次辐照,熔敷,开裂

激光敷层强化,是在不改变零件基体材质的条件下获得表面组织及成份的改性。这一技术已在航空发动机的设计、制造与维修等工业领域获得了应用^[1-4]。然而,在激光敷层强化工艺的应用中尚存在一些问题:由于受激光器能量密度所限,激光熔敷存在一极限厚度。为修复磨损严重的烟机涡轮盘等零件,需采用堆接式敷层强化方法;为获得大面积的激光熔敷层,需采用搭接式激光扫描;在修复航空发动机热端部件时,由于受修复区尺寸的限制,为减少对基材的热输入,需采用激光熔铸技术等等^[5]。上述诸情况,均存在激光重复多次辐照问题。目前激光多次辐照条件下熔敷层的开裂问题已成为激光敷层强化技术应用、发展的最大障碍。本文针对激光敷层强化工艺过程中存在的共性问题,利用 Nd:YAG 固体脉冲激光器,探讨多次辐照条件下激光熔敷层的开裂敏感性问题。

1 试验材料及方法

基材为 In718 镍基高温合金,其化学成份(wt-%)为: C 0.04, Cr 18.6, Mo 3.1, Nb 5.0, Al 0.4, Ti 0.9, Fe 18.5, Mn 0.2, Si 0.3, 其余为 Ni。熔敷用合金粉末为自行配制的高温合金用镍基自熔合金粉末。基材试样尺寸为 40 mm×15 mm×8 mm。底层合金粉末预置厚度为 1.0 mm,在 JJ-D-400 型 Nd:YAG 固体脉冲激光器上进行多道搭接熔敷处理,输出能量为 30 J,频率为 4 Hz,速度为 1.1 mm/s,焦距为 150 mm,搭接率为 60%,熔敷层搭接扫描激光辐照分别为 1 次,3 次,6 次。为研究多次辐照条件下熔敷层开裂的敏感性,在多次辐照时,每次预置粉末

* 联系人:张松。原在沈阳工业大学材料科学与工程系,现为中国科学院金属腐蚀与防护研究所定向博士研究生。

厚度减薄为 0.2 mm。

将激光熔敷后的试样制成金相样品, 采用 10% 草酸溶液电解刻蚀后在 Philips XL-30 型扫描电子显微镜下进行微观分析, 采用 Olympus 显微硬度计测试多次辐照条件下熔敷层硬度的变化。

2 试验结果及分析

2.1 多次辐照对 YAG 脉冲激光熔敷层组织的影响

在本试验条件下, YAG 脉冲激光熔敷层的冷速很高, 从而在熔敷层内形成了极其细密的枝晶组织, 枝晶沿冷速方向呈现出明显的方向性, 如图 1 所示。试验表明, 激光多次辐照对熔敷层组织形态及显微硬度影响不大。熔敷层内部组织的再次熔化, 使其枝晶的结晶方向有了一定的改变, 而熔敷层内合金元素的烧损及蒸发很少, 显微硬度测试结果表明, 图 1 熔敷层组织的显微硬度均在 Hv280~ 286 范围内, 这与 CO₂ 激光多次辐照重熔的情形不同, 主要是由于

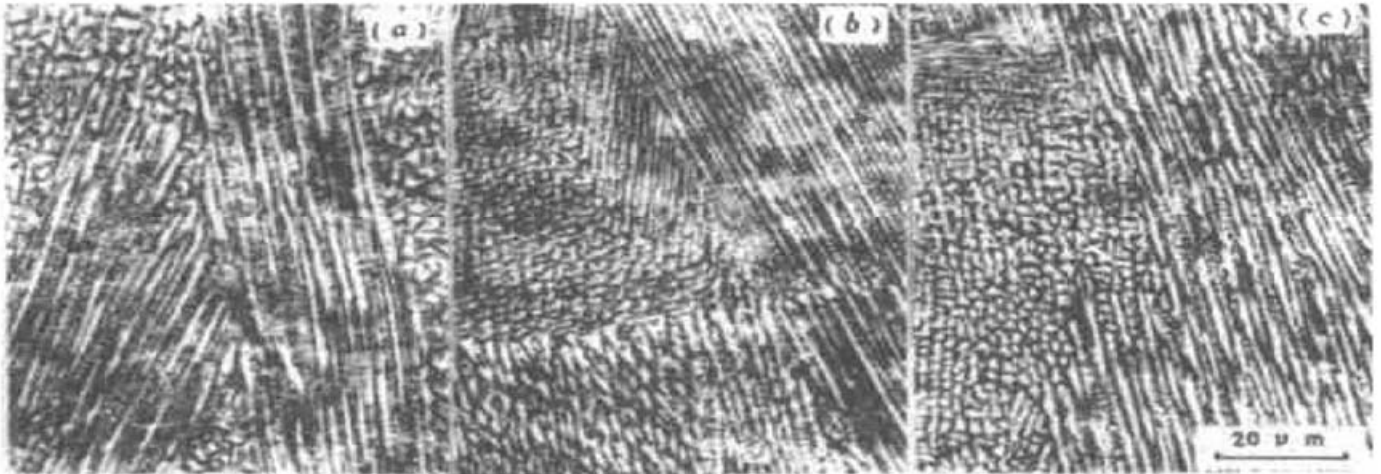


图 1 激光熔敷层组织

激光辐照 (a) 1 次; (b) 3 次; (c) 6 次

Fig. 1 Microstructures of laser clad layers formed after irradiation for different times

(a) one time; (b) three times; (c) six times

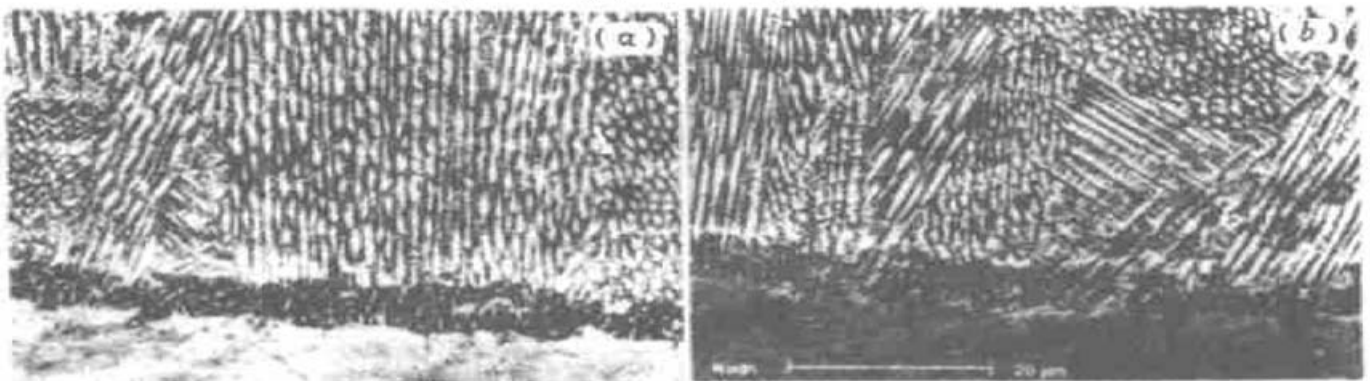


图 2 熔敷层与基材的结合界面

激光辐照 (a) 1 次; (b) 6 次

Fig. 2 The interface microstructures between the substrate and laser clad layers formed after different irradiation times

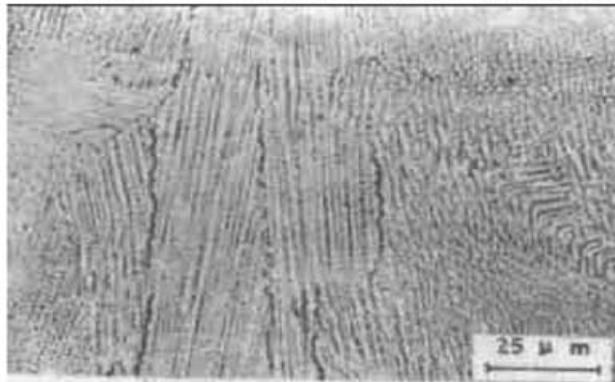
(a) one time; (b) six times

YAG 脉冲激光瞬时加热、快速急冷的工艺特点决定的。在激光熔敷工艺过程中, 基体微熔, 熔敷合金与基体材料形成了牢固的冶金结合带, 该区域具有明显的外延生长特征。由图 2 可以看出, 多次辐照情况下由于严格控制了向基材的热输入, 故互溶区未产生粗化和宽化的现象, 这对保证熔敷合金优异性能, 减少对基体材料的热损伤和开裂倾向至关重要。

2.2 激光多次辐照条件下, 熔敷层开裂情况的微观分析

2.2.1 熔敷层结晶组织与裂纹敏感性

采用 YAG 脉冲激光熔敷时, 熔敷层结晶组织沿热流方向呈现出明显的方向性, 这样在激光脉冲热循环峰值温度作用时, 由于底层熔敷合金



被重新熔化, 在拉应力的作用下, 易产生高温液化裂纹, 导致沿不同结晶方向的晶界产生开裂, 其形貌如图 3 所示。这种现象的产生与激光熔敷过程的力学因素和冶金因素有关。

首先, 由于脉冲激光的热输入是瞬间完成的, 向基材的热输入很少, 合金熔池中存在极大的温度梯度。这样沿不同结晶方向快速生长的枝晶组织在凝固过程中将会产生强烈的组织碰撞, 从而在晶界上产生微观应力。此外, 由于激光的多次辐照, 产生较大的热应力, 也会诱发裂纹的萌生。由金属的高温强度理论^[6]可知, 金属的强度主要取决于金属的晶内强度 σ_c 和晶间强度 σ_0 。它们均随温度的升高而降低, 如图 4 所示, 然而 σ_0 下降较快。当温度达到一定时, $\sigma_c = \sigma_0$, 此时存在一等强温度 T_0 。当温度高于 T_0 时, 则 $\sigma_c > \sigma_0$, 这时晶界为强度薄弱区域, 裂纹易在此处萌生。多次辐照条件下, 激光熔敷层的开裂就是这种情形, 裂纹主要是沿两种不同取向枝晶凝固组织的界面扩展, 呈现为沿晶裂纹。

图 3 激光熔敷合金层高温液化裂纹形貌
Fig. 3 Morphology of high temperature liquification cracks in a laser clad layer

首先, 由于脉冲激光的热输入是瞬间完成的, 向基材的热输入很少, 合金熔池中存在极大的温度梯度。这样沿不同结晶方向快速生长的枝晶组织在凝固过程中将会产生强烈的组织碰撞, 从而在晶界上产生微观应力。此外, 由于激光的多次辐照, 产生较大的热应力, 也会诱发裂纹的萌生。由金属的高温强度理论^[6]可知, 金属的强度主要取决于金属的晶内强度 σ_c 和晶间强度 σ_0 。它们均随温度的升高而降低, 如图 4 所示, 然而 σ_0 下降较快。当温度达到一定时, $\sigma_c = \sigma_0$, 此时存在一等强温度 T_0 。当温度高于 T_0 时, 则 $\sigma_c > \sigma_0$, 这时晶界为强度薄弱区域, 裂纹易在此处萌生。多次辐照条件下, 激光熔敷层的开裂就是这种情形, 裂纹主要是沿两种不同取向枝晶凝固组织的界面扩展, 呈现为沿晶裂纹。

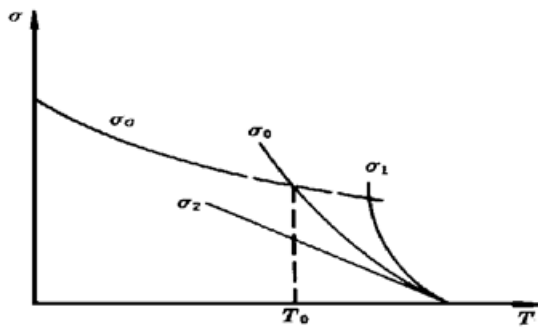


图 4 金属强度随温度的变化与拉伸应力的关系
Fig. 4 Curves of the dependence of σ_0 , σ_c - T on tensile stress

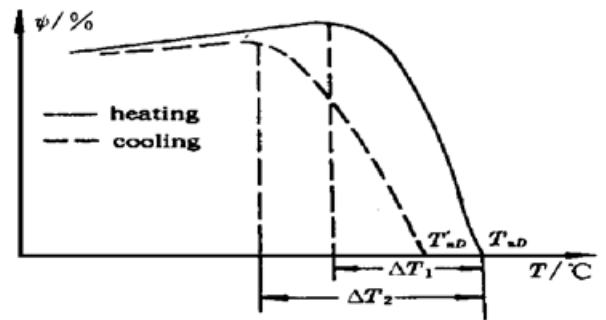


图 5 液化裂纹的脆性温度区
Fig. 5 The fragile temperature zones of the liquification crack during heating and cooling processes

其次, 由于熔敷层受激光多次辐照, 在脆性温度区金属的塑性和强度都急剧下降, 如图 5 所示。在加热过程中, 金属塑性在 ΔT_1 范围内发生了陡降, 由图 5 可以看出, 从塑性最高的温度到无塑性温度 T_{nd} , 即从晶间低熔组成物开始熔化的温度到它全部熔化的温度范围, 这一温度范围为 ΔT_1 。在冷却过程中, 由于 YAG 脉冲激光产生的快速凝固具有极大的过冷度, 使塑性

恢复的温度总是低于加热时塑性开始下降的温度, 所以冷却过程的脆性温度区 (ΔT_2) 比加热时 ΔT_1 要大, 这样在收缩应力的作用下, 处于薄弱状态的晶界将在更长的时间内承受应变, 为裂纹的萌生创造了有利的条件。

第三, 从冶金学方面分析, 晶间多存在气孔、低熔点相, 如图 6 所示, 从而在激光多次辐照重熔过程中受力而开裂。熔敷层扫描电镜观察可以看出, 由于每一熔敷层液态合金的结晶总是在前一熔敷层基础上生长, 层与层之间沿柱状枝晶界有贯通的渠道, 这样有些液化裂纹可以从上一层向下一层晶界扩展(图 3 所示), 而扩展的方向要由受力的状态而决定。



图 6 沿激光熔敷合金层晶界分布的气孔

Fig. 6 The gas holes existing along the crystal boundaries in a laser clad layer

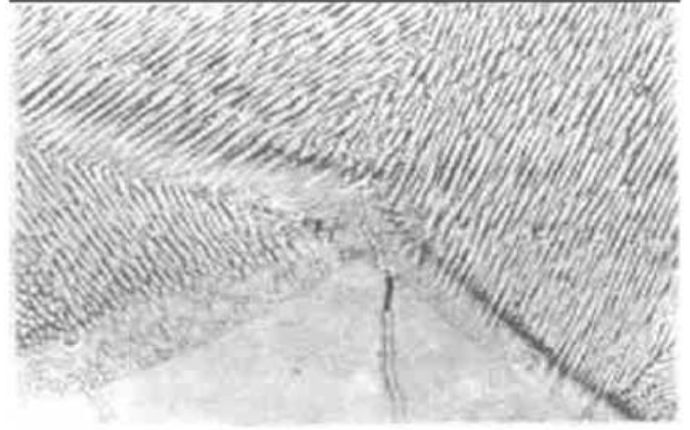


图 7 基材热影响区再热裂纹

Fig. 7 The morphology of the re-heated crack in heat effecting zones of the substrate

2. 2. 2 热影响区再热裂纹的萌生

In718 是合金元素 Cr, Mo, Nb 含量较高的镍基高温合金, 这些元素均为再热裂纹敏感性元素^[6], 与熔敷层相毗邻的基材热影响区在激光一次辐照时, Cr, Ni, Nb 等元素形成的碳化物及合金中的沉淀相 γ' 相 $[\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})]$, 因受热而固溶(高于 1100°C), 在随后的快速自冷时不能析出。而在激光多次辐照时, 若工艺参数选择不当, 对基材循环的过量热输入, 促进了晶界析出碳化物及沉淀相, 使晶界强化, 而应力松弛所需的塑性变形多集中于晶界, 当晶界塑性不足时, 就会产生再热裂纹, 如图 7 所示。因而采用激光熔敷工艺修复再热裂纹敏感合金的零件时, 应严格控制向基体的热输入, 避免过量的热输入使热影响区萌生再热裂纹, 导致基材热影响区开裂。

3 结 论

1. 采用 YAG 脉冲激光进行激光熔敷时, 多次辐照不影响熔敷层的组织及硬度, 且熔敷层与基体的冶金结合带不产生宽化和粗化现象。
2. 激光多次辐照, 增加了熔敷层组织的开裂倾向, 裂纹为沿晶型高温液化裂纹。过量的热输入, 促进了基材热影响区再热裂纹的萌生。

参 考 文 献

- 1 J. Singh, J. Mazumder. Microstructures of laser clad Ni-Cr-Al-Hf alloy on a γ' strengthened Ni-base superalloy. *Metall. Trans.*, 1988, **A19**(8): 1981~ 1990

- 2 A. Frenk, C. F. Marsden, J. D. Wagniere. Influence of an intermediate layer on the residual stress field in a laser clad. *Surface and Coating Technology*, 1991, **45**: 435~ 441
- 3 Zhang Song, Kang Yuping, Zhu Jingpu. Application of laser cladding to air-blower vane. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(5): 395~ 400 (in Chinese)
- 4 Liu Jiafu. The application of laser fabrication on the aero engine repair. *Aviation Production Engineering*, 1993, **10**: 32~ 34
- 5 Wu Weitao, Wang Maocai. Laser surface imitation process method for aero-blades. CN. 92 1 06197. 8; 1993. 11
- 6 Zhou Zhenfeng, Zhang Wenyue. Welding metallurgy and metal weldability. Beijing: Machine Industry Press, 1988. 203, 248 (in Chinese)

Study of Cracking Sensitivity of Clad Layers Induced by Multi-irradiation of a YAG-pulsed Laser

Zhang Song Chen Jiang Wang Maocai Wu Weitao

*(State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Corrosion and Protection of Metals,
The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015)*

Abstract The influence of irradiation manner of a YAG-pulsed laser on the microstructure and cracking behavior of claddings was characterized. It follows that the microstructures of the cladding may not show a visible change after multi-irradiation with the YAG-pulsed laser beam, however, multi-irradiation do promote the appearance of cracking on claddings. The tendency of cracking of the same cladding may increase with the increase of the number of irradiation. The formed cracks show a feature of along grain boundary like hot cracking. Additionally, more heat input during the process may increase the tendency of initiation of the re-heat cracking in the substrate alloy as well.

Key words pulse laser, multi-irradiation, cladding, cracking