

金属表面激光熔化后的表面开裂研究

刘江龙 韩志范 邹至荣

(重庆大学, 630044)

提要: 本文从理论上分析了激光熔化表面的开裂原因。提出了预防激光熔化表面开裂的途径, 并实验验证了可行性。

关键词: 激光熔化, 表面开裂

A study of cracking metal surface melted by laser

Liu Jianglong, Han Zhifan, Zou Zhirong

(Chongqing, University, Chongqing)

Abstract. The reason for cracking of the metal surface melted by laser was analyzed theoretically. The ways of preventing the metal surface melted by laser from cracking were pointed out and its feasibility was verified experimentally.

Key words. laser melting, surface cracking

一、前言

激光快速熔凝金属是用强激光直接辐照金属表面, 当表面上的功率密度超过 10^4 W/cm^2 时, 可使表层处于熔化状态。一旦强激光的作用停止, 熔化表层依靠其基体的自冷, 迅速结晶, 同时发生固态相变, 冷至室温。在这个过程中, 往往会产生金属表面的开裂, 对金属铸铁材料, 尤为严重。本文试图从理论上探讨金属表面激光熔化后产生开裂的基本原因, 提出解决这一问题的有效方法。实验表明所提出的解决金属表面开裂问题的方案是可行的。

二、实验条件和其结果

激光熔化金属表面时, 采用的激光功率为 900~1300 W, 透镜焦距为 300 mm, 光斑直径为 $\phi 3.0 \sim 5.0 \text{ mm}$, 扫描速度为 0.2~1 m/min。

试验材料采用 QT60-2, 其成分为 C: 3.6~3.8%; Si: 2.0~2.4%; Mn: 0.5~0.7%, 其余为 Fe。另外, 还采用了钒钛珠光体铸铁, 其成分为 C: 3.55~3.9%; Mn: 0.6~1.00%; Si: 1.9~2.6%; V: 0.18~0.25%; Ti: 0.05~0.15%; 其余为 Fe。

试验表明, 两种牌号的铸铁在激光熔化之后, 其熔化表面均出现了许多细长的裂纹。其长度甚至可达 10 mm 左右, 严重时, 细长的裂纹可贯穿整个激光扫描带表面。在低倍放大镜下,

这些裂纹清晰可见。进一步的研究表明: 熔化金属表面的开裂有两种情况: 激光辐射处理之后, 其熔化表面立即开裂; 激光辐射处理之后, 其熔化表面并未开裂, 放置一段时间以后, 在熔化扫描带表面出现裂纹。观察表明: 这些细而长的裂纹主要是冷裂。另外, 在显微组织中存在显微裂纹。

三、开裂形成的原因探讨

众所周知, 当液态金属结晶转变成固态金属, 并冷至室温时, 该金属的体积将发生收缩。从冶金物理角度看, 其收缩量来自三个组成部分, 它们分别是液态金属的收缩, 凝固时的收缩, 和固态金属的收缩。对于金属的体积收缩而言, 有

$$V_1 = V_0 [1 - \alpha_V (T_0 - T_1)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_V = \frac{V_0 - V_1}{V_0} = \alpha_V (T_0 - T_1) \times 100\% \quad (2)$$

式中: V_1 和 V_0 分别是金属在 T_1 温度和 T_0 温度时的体积, 其单位是 cm^3 。 α_V 是该金属的体积收缩系数。 T_0 是该金属的最高加热温度。 T_1 是室温。 ε_V 是该金属的体积收缩率。

从(1)、(2)式可知, 金属的总收缩量与其温度差 ΔT 和 α_V 有关。一般而言, ΔT 越大, 其总收缩量相对增加。大的过热度 and 温度梯度是激光热处理的特征。它导致了激光熔化金属表面后, 其收缩量较大, 同时受到未熔边界区域的拘束, 从而使开裂的可能性增加。

对于液态金属而言, 在其冷却过程中, 发生了体积收缩。由于其收缩量可以得到液态金属内的液态金属相互流动而补偿, 所以在此阶段不会发生开裂。在液态金属转变成固态金属的过程中, 由于其转变是逐步完成的, 所以金属凝固时的收缩量, 可以得到尚未凝固液态金属的及时补充, 因此, 在这一阶段内, 也不会产生宏观裂纹。激光熔化金属表层后, 其表面产生开裂只可能出现在其固态收缩阶段内。熔化金属表面在其固态收缩阶段内产生开裂的原因是其凝固层的固态收缩受到阻碍, 因而出现拉应力状态, 一旦该拉应力的值超过了该材料在某一温度下的强度极限值, 则产生开裂现象。

金属表层在固态冷却过程中, 主要存在两种应力状态, 即热应力状态和由于固态相变作用而产生的组织应力状态。对于激光局部加热金属表层而言, 热应力所引起的应力状态分布特征是其表层为拉应力状态而其次表层处于压应力状态。与此相反, 组织应力所引起的应力状态分布特征是其表层为压应力状态而其次表层处于拉应力状态。金属表层开裂与否主要决定于热应力与组织应力的综合作用结果, 当综合应力呈现拉应力状态时, 可能导致金属表面开裂。反之, 当综合应力呈现为压应力状态时, 熔化的表面不会开裂。

实验表明, 本实验条件下, 熔化表面在其固态收缩的低温阶段内处于较大的拉应力状态。A. Solina 的 X 射线应力分析结果^[4]也证实了金属在激光快速熔凝处理之后, 其表面呈现为拉应力状态。其主要原因是: 在激光辐射金属之后, 由于依靠其基体自冷, 即超快速冷却, 使金属表层熔区内各处的冷却极不均匀, 其冷却速度差异很大, 造成其各处的体积收缩的极大的不同步性。因而, 热应力的影响与组织应力的影响相比, 前者占主导地位。

对于普通的钢材, 其导热系数在 $77.07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 左右。而普通的铸铁, 其导热系数约为 $33.72 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。两者相差约 130%。这说明铸铁的导热能力较差。与钢相比, 铸铁更容易产

表 1 添加合金元素对金属开裂倾向性的影响

基本材料	添加元素	熔区深度 H	熔区宽度 W	$\frac{W}{H}$	开裂倾向	
					添加元素前	添加元素后
45 钢	Ni-Cr-Si, Si, <15%wt.	0.6 mm	4.5 mm	7.5	+	---
QT60-2	Ni-Cr-Si, Si, <15%wt.	0.7 mm	4.0 mm	5.7	+++	---
QT60-2	Fe-Si, Si <15%wt.	0.6 mm	4.2 mm	7.0	+++	---
V-Ti 珠光体铸铁	Si/C < 2	0.5 mm	4.5 mm	9.0	++	---

“+” 开裂。“+” 号越多, 裂纹越多。“-” 未裂。

生大的温度梯度, 因而铸铁的开裂倾向比钢的开裂倾向大得多。我们的实验也证实了这一点。

四、预防冷裂的途径

4.1 降低热应力, 改善表面应力状态

对于激光熔化金属而言, 在其固态收缩过程中, 大部分金属将发生奥氏体分解, 即高温奥氏体转变成马氏体或其它产物。由于奥氏体的比容相对最小, 而奥氏体的其它产物, 如珠光体、贝氏体、马氏体的比容较大, 所以, 在其固态相变中, 必然产生组织应力。可以利用组织应力来部分抵消热应力。在激光熔化铸铁表面时, 必须设法降低其奥氏体中的含碳量。这可以通过加入合金元素来实现, 如 Cr、Mo、Co、Ti、W、V 等合金元素。当这些元素加入铸铁表面熔区后, 在熔化铸铁的冷却过程中, 它们优先与熔化区域内的碳元素相结合, 以合金碳化物的形式析出, 从而减低了奥氏体中的含碳量。当熔化组织的含碳量下降时, 其 M_s 点升高, 则奥氏体转变成马氏体的量增大, 这就增加了激光熔化表面在其固态收缩中的组织应力, 从而可以在一定程度上有效地抵消热应力的负作用。

铸铁材料的热应力 σ_H 正比于其内部温度梯度 $\Delta T = T - T_0$, T_0 为其基体温度。所以, 激光熔化铸铁金属材料时, 应预热其基体, 以降低其热应力值。

近来的研究^[2]表明, 调整铸铁中的 Si/C 比值对铸铁产生残余应力的倾向有明显的影响。Si/C 比值较高的铸铁产生的残余应力明显大大低于 Si/C 比值较低者。因为高 Si/C 铸铁在相同碳当量 C. E. % 的条件下, 可使该材料的强度极限 σ_b 与残余应力 σ_r 之比 (σ_b/σ_r) 增大, 这表明该材料抵抗开裂和变形的能力增加。在用激光熔化铸铁时, 可用高 Si/C 比, 以减少其开裂倾向。

从断裂力学理论可知, 平面应力状态比平面应变状态具有较好的塑性和韧性。因此应尽量降低激光作用金属熔化层的厚度, 熔化层的厚度越薄, 其越接近平面应力状态, 以降低其开裂倾向(表 2)。

4.2 提高材料的强度极限

许多合金元素如 Mn、Ni、V、Ti、Cr、Mo、W、Si 等溶入固溶体后, 将会产生强化效应, 使固溶体的强度提高。另一方面, 在有特殊碳化物, 如 MC 型、 M_2C 型或合金渗碳体存在的情况下, 将明显地使熔化组织的晶粒细化。被强化后的熔化组织具有较高的强度极限。当激光熔化金属表层的综合应力为拉应力, 且为某一值时, 如果熔化组织的强度极限值越高, 其开裂的倾向

(下转第 653 页)

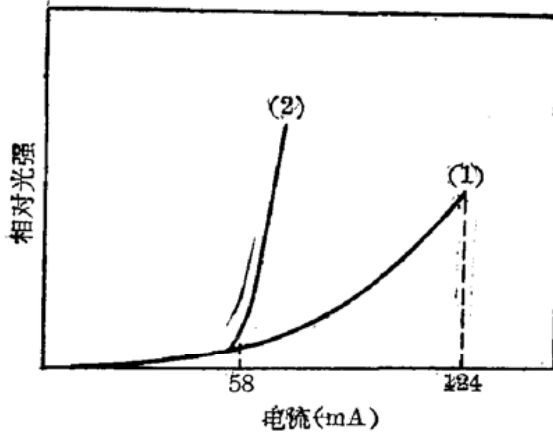


图4 激光器的输出特性
(1) 镀增透膜激光二极管; (2) 外腔激光器

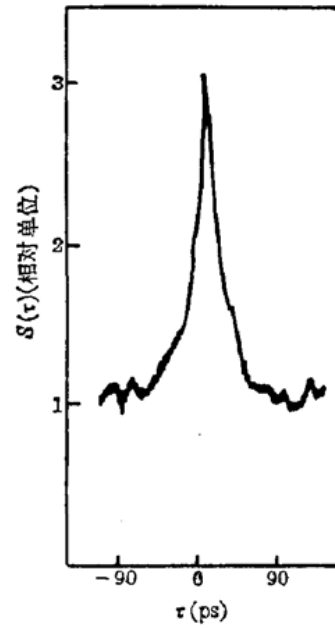


图5 完全锁模脉冲 SHG 曲线
 $L=162\text{ mm}; f_0=925\text{ MHz}; I_D=I_{th};$
 $I_m=0.156 I_{th}; f_m=915\text{ MHz}$

10 MHz。调制频率偏离最佳频率 $\pm 5\text{ MHz}$ 时, Δt 约增加一倍^[4]。

陈肇武、姚宝伦等同志对设计制作微带阻抗匹配器给予指导及帮助, 杨培生、郭良等同志提供激光二极管, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 P. T. Ho *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **33**(3), 241(1978)
- 2 E. P. Ippen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **37**(3), 267(1980)
- 3 H. Ito *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**(5), 663(1981)
- 4 石晓宏, 高以智 *et al.*, 清华大学学报, 增 3, 1988. (待发表)
- 5 吴松, 高以智, 中国激光(待发表)

(上接第 671 页)

表 2 熔化层厚度对开裂倾向性的影响

基体材料	添加元素	熔区深度 H	熔区宽度 W	$\frac{W}{H}$	开裂倾向
QT60-2	无	0.2 mm	4.1 mm	20.5	---
QT60-2	无	1.0 mm	4.4 mm	4.4	+++
CrWMn	无	0.5 mm	4.0 mm	8.0	---
CrWMn	无	1.2 mm	5.0 mm	4.2	++

性越小。所以, 可以利用固溶强化、晶粒细化等方法来消除激光熔化表面的开裂现象。

参 考 文 献

- 1 A. Solina, *J. Heat Treating*, **3**, 272 (1986)
- 2 李龙城, 球铁, **4**, 34 (1988)