

激光处理高强度钢板 CCT 试件 裂纹尖端的研究

李再光 郑启光 李光霞 黄培彦 李家镛 李适民 李长春

(华中工学院)

提要: 本文探讨用大功率 CO_2 激光处理 25CrMnSi 钢板 CCT 试件的裂纹端部, 对比激光处理的试件与未处理试件的结果表明, 激光处理后能提高 ΔK_{th} , 提高疲劳寿命 2 倍以上, 能降低 $\frac{da}{dN}$ 。通过对试件的微观组织分析和微观硬度测量, 找出了激光热处理高强度钢板的初步激光热处理规范, 并对试验结果进行了统计分析, 得到了疲劳裂纹扩展循环数 N 与激光处理参数的近似关系式。

Laser treatment of end-cleavage of high strength steel CCT samples

Li Zaiguang, Zheng Qiguang, Li Guangxia, Huang Peiyan

Li Jiarong, Li Shiming, Li Changchun,

(Huazhong Institute of Technology)

Abstract: The end-cleavage of 25CrMnSi steel CCT samples treated by a high-power CW CO_2 laser are investigated for improving the microstructure of the material, changing the stress distribution of the end-cleavage and enhancing the performances of the fatigue failure resistance of the material. It has been shown that ΔK_{th} of the materials is increased, the fatigue lifetime is prolonged by over two times and $\frac{da}{dN}$ is reduced after laser treatment. The approximate empiric formula is obtained relating the cycle number N of the fatigue crack spread to the laser treatment parameters by means of statistic analysis of the experimental data.

一、引言

在低、中应力水平范围, 经过激光处理能使金属组织中的晶粒细化及材料内的局部应力松弛, 因而能提高材料疲劳裂纹扩展

阈值 ΔK_{th} 及降低裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 。

本文着重从宏观力学参量 $\frac{da}{dN}$ 、 ΔK_{th} 和疲劳寿命 N 以及材料的金相组织、断口形

收稿日期: 1983年12月5日。

貌等方面入手, 探讨激光处理对材料疲劳裂纹扩展规律的影响, 并试图获得合理的激光参数规范及必要的预处理措施。

二、实验条件与装置

本实验采用几何尺寸为 $1.2 \times 250 \times 90$ 毫米的中心穿透裂纹试件(简称 CCT 试件, 见图 1), 预制裂纹长度为 $2a_0 = 20$ 毫米, 试件材料为 25CrMnSi。

试件在激光处理前先进行常规热处理, 将试件加热至 $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 保温 7 分钟, 油淬, 再在 270°C (或 450°C)回火, 保温 3 小时, 油冷, $\delta_s = 135$ 千克/毫米², $\delta_b = 155$ 千克/毫米²。

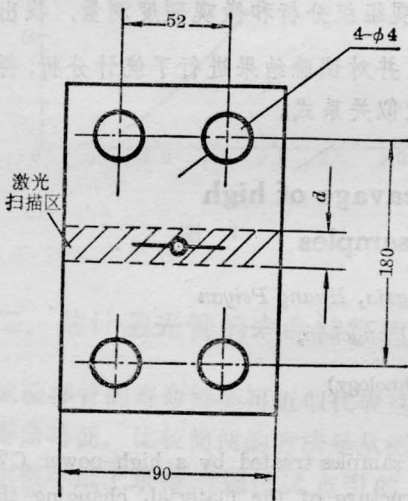


图 1 CCT 试件示意图

为克服金属表面反射激光辐射, 分别采取涂碳素墨水和磷化处理(用酸式磷酸锰磷化)。磷酸锰盐对 10.6 微米的 CO_2 激光辐射具有很高的吸收率, 通常可达 70~80% 以上。

激光处理是在千瓦级 CO_2 激光试验机上进行的, 使用功率为 2000 瓦, 输出的光束为多模结构, 光斑约 25 毫米, 用焦距 $f = 120$ 毫米的透镜聚焦。

在材料表面状态相同时, 激光处理试件

的表面温度和激光加热深度与激光功率 P 、光斑直径等工艺参数有关, 并与激光照射时间的平方根成正比^[1,4]。鉴于被处理试件的厚度仅 1.5 毫米, 如扫描速度太慢, 则因热影响区加大导致试件变形大, 故我们选取扫描速度在 40 毫米/秒以上。为了增加总的激光处理深度, 采用对试件正反两面处理。在功率密度较高, 扫描速度较快时, 采用两次重复扫描方案, 并继而采用正交设计方法, 用多种不同的激光工艺参数对 CCT 试件进行处理。

三、疲劳试验

将激光处理后的 25CrMnSi 钢板 CCT 试件在 PW₃-10 型程序控制万能疲劳试验机上进行疲劳试验。裂纹长度 a 用 30 倍读数显微镜从试件两侧读出, 实验所加应力比为 0.15, 为测定裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 采用恒幅值交变循环载荷作拉-拉疲劳试验。试验最大载荷为 600 千克, 最小载荷为 90 千克, 频率为 115 赫, 测出 a , 记录 N 值, 相应的 $a-N$ 曲线和 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 曲线示于图 2、图 3。本实验取 $\frac{da}{dN} = 10^{-7}$ 毫米/次对应的 ΔK 值为阈值 ΔK_{th} 。考虑环境因素的影响, ΔK_{th} 的测定采用分级卸载法。

四、试验结果的分析与讨论

1. 裂纹扩展循环数 N 的统计分析

在裂纹从 $a_0 = 15$ 毫米扩展到 $a = 30$ 毫米的范围内选取数点 (a_i, N_i) , 求出未经激光处理试件的平均 N 值和激光处理的工艺参数为 $F = 1.8 \times 10^4$ 瓦/厘米²、 $t = 0.08$ 秒、 $d = 4.8$ 毫米的一组试件的平均 N 值, 作出它们的 $a-N$ 曲线(见图 2)。

考虑到条件误差和偶然误差的影响, 采

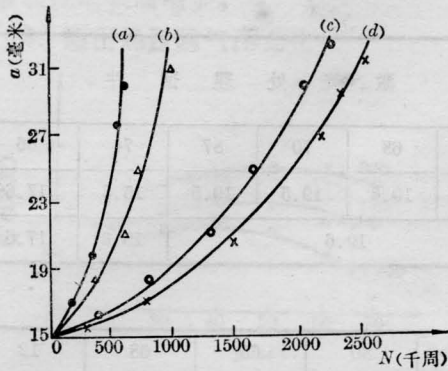


图 2

(a) P - a - N , (b) 平均 a - N (未处理试件);
(c) P - a - N , (d) 平均 a - N (激光处理试件)

用成组对比法对实验数据进行统计分析。

假定对数裂纹扩展循环数

$$x_{ij} = \lg N_{ij}, \quad i=1, 2, \dots, 10, \\ j=1, 2, \dots, 5,$$

遵循正态分布, 上式中 i 为 a 的计算点数, j 为试件号。

子样平均值为:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{z=1}^n x_{iz} \quad (1)$$

式中 n 为子样大小 (即试件数量)。子样标准差为

$$S_i = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \right)^2 \right) \quad (2)$$

具有存活率 P 的对数裂纹扩展循环数为:

$$x_{iP} = \bar{x}_i + n_P S_i \quad (3)$$

式中 n_P 为标准正态偏量, 当取 $P=99\%$ 时, 可查表得 $n_P = -2.326$ 。

显著度检验:

(1) F 检验

设 S_I 和 S_{II} 分别为未辐射试件和激光处理试件的疲劳裂纹扩展循环数 N 的方差,

$$S_I^2 = (0.057)^2 = 0.0032$$

$$S_{II}^2 = (0.0210)^2 = 0.0004$$

于是, $F = S_I^2 / S_{II}^2 \approx 8.0000$ 。取显著度 $\alpha = 5\%$, 则

$$P(F > F_\alpha) = \int_{F_\alpha}^{\infty} f(F) dF = \frac{\alpha}{2} = 2.5\%$$

根据分子和分母的自由度

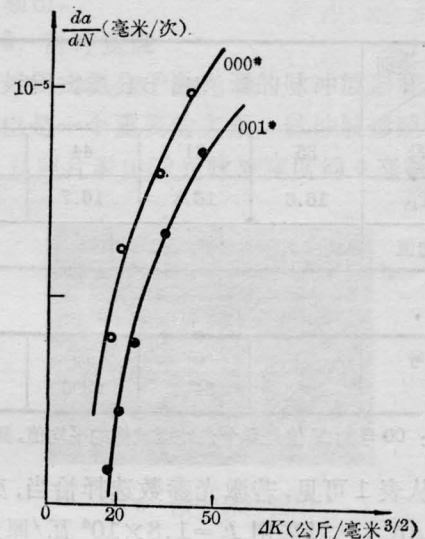


图 3

$$V_I = n_I - 1 = 4 \quad V_{II} = n_{II} - 1 = 3$$

由 F 函数表可查得 $F_\alpha = 9.12$, 故有

$$F < F_\alpha$$

因此两个子样标准差相同, 这就满足了成组对比的先决条件。

(2) t 检验

统计量 t 为

$$t = \frac{(\bar{x}_{iP})_I - (\bar{x}_{iP})_{II}}{\sqrt{\frac{(n_I - 1)S_I^2 + (n_{II} - 1)S_{II}^2}{n_I + n_{II} - 2}} \sqrt{\frac{1}{n_I} + \frac{1}{n_{II}}}}$$

式中 n_I 、 $(x_{iP})_I$ 以及 n_{II} 、 $(x_{iP})_{II}$ 分别为未处理和已处理试件的个数及对数安全裂纹扩展循环数。

将 $(\bar{x}_{iP})_I = 2.8994$, $(\bar{x}_{iP})_{II} = 3.3352$ 和其它数据代入上式, 可算得:

$$t = -14.5332$$

由自由度 $V = n_I + n_{II} - 2 = 7$, 取显著度 $\alpha = 5\%$, 查表可得 $t_\alpha = 2.365$ 。

因为 $|t| > t_\alpha$, 故未处理的安全裂纹扩展循环数 $(N_I)_{P=99\%}$ 和已处理的试件的安全裂纹扩展循环数 $(N_{II})_{P=99\%}$ 有显著差异。

2. 疲劳裂纹阈值 ΔK_{th} 的比较

如前所述, ΔK_{th} 由分级加载法测出, 并列于表 1。

表 1

类别 项目	未 处 理 试 件				激 光 处 理 试 件					
	件号	35	31	44	73	67	68	70	87	74
ΔK_{th}	16.6	16.8	16.7	18.6	19.7	19.6	19.5	19.5	15.3	17.6
平均值	17.0				19.6				15.3	17.6

表 2

件号	00	67	70	87	74	80	66	68	12
	1083	2474	2295	2363	862	1850	1205	2560	1942

注: 00 号的 N 值是 5 个未处理试件的平均值, 其余为激光处理试件号。

从表 1 可见, 若激光参数选择恰当, 亦可提高 ΔK_{th} 。对采用 $F=1.8 \times 10^4$ 瓦/厘米²、 $t=0.08$ 秒、 $d=4.8$ 毫米这组参数进行处理, 其 ΔK_{th} 比未经激光处理的试件提高 9.4~18.7%。

3. 激光处理试件的疲劳寿命估计式

由各激光处理试件的 $a-N$ 曲线可得到 $a_0=15$ 毫米到 $a=30$ 毫米的疲劳裂纹扩展循环数 N , 将其列于表 2。

对激光处理的试件和未处理的试件的疲劳裂纹低速扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 进行统计分析, 可知疲劳裂纹扩展的循环数 N 与激光工艺参数 $F\sqrt{t}$ 有密切联系。疲劳裂纹扩展循环数 N 与工艺参数 $F\sqrt{t}$ 的关系曲线如图 4 所示。由图中看出, 激光处理试件的 N 与 $F\sqrt{t}$ 成线性关系, 利用最小二乘法回归, 得:

$$N = -4893.6 + 1.3765F\sqrt{t}$$

上式说明在一定的激光热处理温度范围内, 试件的疲劳寿命 N 与激光照射时间的平方根和激光功率密度之积成正比。因此根据上式由激光工艺参数可近似估计出试件的疲劳寿命。

4. 淬火内应力分析

工件在常规淬火时, 通常会产生各种应力(简称淬火内应力), 其中包括热应力、组织应力和附加应力等。影响应力状态、大小及分布的因素很多, 如加热温度、冷却速度、工

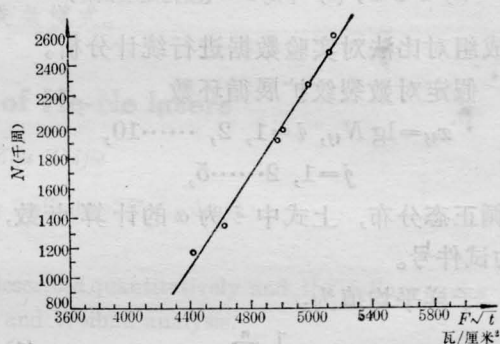


图 4 裂纹扩展循环数 N 与激光参数 $F\sqrt{t}$ (瓦/厘米²·秒) 的关系
(图中功率密度是按第二次扫描计算)

件几何形状、钢的化学成份及淬火前的原始组织等。淬火内应力危害很大, 它是造成热处理工件变形甚至开裂的主要原因, 尤其是残余拉应力, 它是大大降低工件疲劳寿命的重要因素之一。但是激光淬火时能产生残余压应力^[2], 我们用 X 射线衍射仪对裂纹尖端前沿区域的应力进行测试, 也证明了残余压应力的存在, 这种残余压应力能改善原常规淬火的内应力分布, 并能使裂纹尖端的应力松弛。

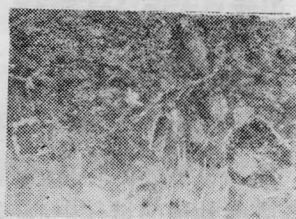
5. 显微组织分析

表 3 示出几种试件的显微组织及硬度值。

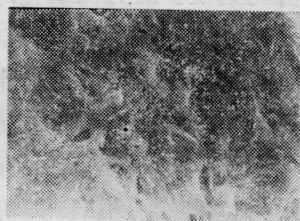
图 5、6 示出激光处理与未处理试件的电镜扫描照片。试件的基体组织主要为回火屈氏体, 有部分试件由于预处理时回火温度在

表3 激光处理参数及硬度值

项 目	件 号								未处理试件
	19	026	42	023	029	010	67	12	
激光功率(瓦)	1770	1770	1770	1770	1540	2000	1480	1270	
扫描速度 (毫米/秒)	① 59 ② 65.2	① 51.4 ② 51.4	① 60.5 ② 75.4	52.7	65.7	① 52.7 ② 60.5	① 48.0 ② 60.5	① 48 ② 60.5	
激光淬火深度 (毫米)	0.27	>1	0.25	>1	>1	>0.5	0.14	0.12	
回火软带深度 (毫米)	无明显软带	无明显软带	0.27	无明显软带 (软带区很窄)	无明显 软带	0.27	0.24	0.31	
激光淬火区硬 度高值(H_v)	H_v 506	H_v 498	H_v 518	H_v 508	H_v 505	H_v 515	H_v 510	H_v 450	
软带区硬度 低值(H_v)			H_v 276	H_v 322		H_v 302	H_v 308	H_v 305	
基体硬度值 (H_v)	H_v 245~ H_v 397	H_v 286~ H_v 386	H_v 387 (平均值)	H_v 385 (平均值)	H_v 386 (平均值)	H_v 375 (平均值)	H_v 385 (平均值)	H_v 385 (平均值)	
基体组织(预处 理回火温度)	主要为回火 索氏体、部 分回火屈氏 体(450°C回 火)	主要为回火 索氏体 (450°C回 火)	主要为回火 屈氏体 (270°C回 火)	主要为回火 屈氏体 (270°C回火)	主要为回 火屈氏体 (270°C 回火)	主要为回 火屈氏体 (270°C 回火)	主要为回 火屈氏体 (270°C 回火)	主要为回 火屈氏体 (270°C 回火)	主要为回火 屈氏体 (270°C回火)
激光淬火组织	细板条马 氏体	细板条马 氏体	细板条马 氏体	细板条马 氏体	细板条马 氏体	细板条马 氏体	细板条马 氏体	细板条马 氏体	



(a) 基体组织 5000×



(b) 激光淬火区组织 5000×

图 5

450°C, 基体也出现回火索氏体组织。经过激光淬火后的淬火区组织为细板条马氏体, 与基体组织相比, 晶粒要细密得多, 且组织分



图6 激光处理过渡区组织
(右边为激光淬火区组织, 左边为
软带区组织) 800×

布均匀。在金属中晶粒越细小, 其综合机械性能越好, 不仅能提高硬度, 还能提高材料的阈值 ΔK_{th} 和降低裂纹的扩展速率 $\frac{da}{dN}$, 因而能使材料具有较好的抗疲劳性能。

图7、8给出67号和23号试件的显微硬度分布, 从图中看到采用二次重复扫描, 特别是在先慢速后快速扫描, 淬火区的下层和基体之间出现回火软带区(见图7), 该区组

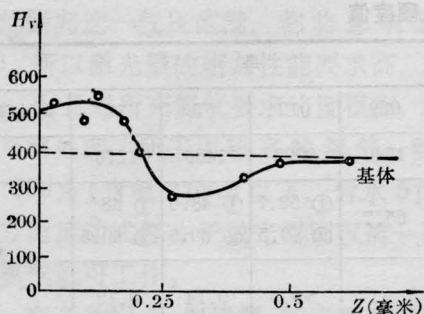


图7 67号试件的显微硬度分布

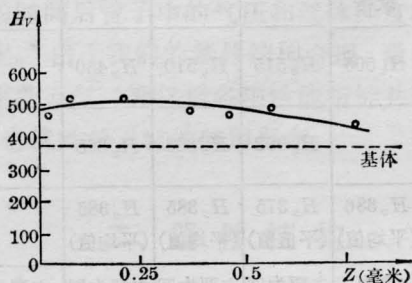


图8 23号试件(单次扫描)的显微硬度分布

织出现粗化(见图6),且组织均匀性比淬火区差,并存有较多的残留奥氏体,硬度值降低到比基体还低。这是因为在重复扫描中,由于第二次扫描速度比第一次快,这样第二次激光扫描的热影响区温度使第一次扫描时已被淬火的部分区域(靠淬火区下部)回火,因而产生回火软带。而在单次扫描或先快后慢的重复扫描中则不出现明显(或很窄)的回火软带(见图8)。

实验结果证明两次激光重复扫描的试件比单次扫描试件的抗疲劳性能要好,我们认为这可能是第二次激光重复扫描时可得到比单次扫描更稳定些的淬火组织,并可使材料内的应力进一步松弛之故。此外,在基体主要为回火索氏体的试件中,如果激光功率密度太高,扫描速度太快,会使淬火区马氏体转变不完全,使残留奥氏体增多,并有颗粒状的碳化物析出(见图9),这类试件的抗疲劳性能有所降低。

图10为试件的断口形貌(照片的取向平行 z 轴,与裂纹扩展方向垂直)。从图10(b)

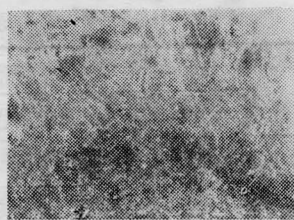
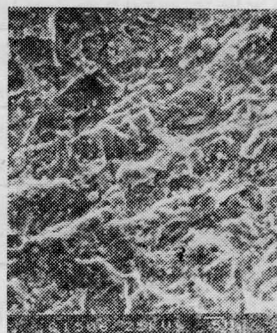


图9 19号试件的激光淬火区组织

5000×



(a) 未经激光处理的试件的断口形貌(1600×)



(b) 67号试件B区的断口形貌(1600×)

图10

中看到,经激光处理的试件中心部分的断口裂纹较细,并与裂纹扩展方向垂直,呈准解理断裂。未经激光处理的试件的河流花样较多(见图10(a)),与激光处理的试件相比,更接近解理断裂。由于激光处理后的试件裂纹扩展的阻力较大,故疲劳寿命增加。

五、结 论

1. 激光处理25CrMnSi高强度钢板试样的裂纹尖端,在合适的激光热处理温度范围内,采用高功率密度,快速扫描(例如

$F=1.8 \times 10^4$ 瓦/厘米², $t=0.08$ 秒), 可使材料组织的晶粒细化, 均匀性提高, 因而可提高材料的抗疲劳性能。

2. 实验结果表明, 在一定的激光热处理规范下疲劳裂纹扩展循环数 N 与激光辐射的功率密度和照射时间的平方根之积成正比, 其近似估计式为:

$$N = -4893.6 + 1.3765F\sqrt{t}。$$

3. 激光辐射可产生残余压应力, 这对改善裂纹尖端的应力分布, 使裂纹尖端区的应力松弛以及提高材料的疲劳寿命有利。

4. 在激光处理 25CrMnSi 这类低合金钢中, 采用高激光功率密度, 两次重复快速扫描(先慢后快)时, 在淬火区下层会形成回火软带区, 该区出现组织粗化, 硬度值下降到比基体还低。而在低激光功率密度, 先快后慢的两次重复扫描中或单次激光扫描则不出现明显(或较窄)的回火软带。

5. 激光处理之前, 有必要对试件进行黑化预处理, 以增加对 CO₂ 激光的吸收率。实验中发现采用磷化处理的效果比涂碳素墨水显著。

本试验在微观分析中得到了马咸尧、曹治蓉、李志远、奚素碧等同志的热情帮助, 在力学试验研究过程中, 还得到了李灏教授的指导与支持, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. Mazumder; *J. Metals*, 1983, **35**, No. 5, 18226.
- [2] 李昌华; 《金属热处理》, 1982, No. 6, 20~26.
- [3] 川澄博通; 《机械与工具》, 1979, **23**, No. 2, 101~107; No. 3, 115~124.
- [4] V. Gregson; "Laser Heat Treatment", Paper No. 15, in Proc. Ins. Joint US/Japan Int. Laser Processing Conf., Laser Institute of America Toledo, Ohio, 1981.
- [5] C. Wick; *Manufacturing Engineering*, 1976, **76**, No. 6, 35~37.

(上接第 685 页)

对应于样品距激光器输出窗为激光器半腔长奇数倍的情况, 这时两个纵模的反馈延迟相

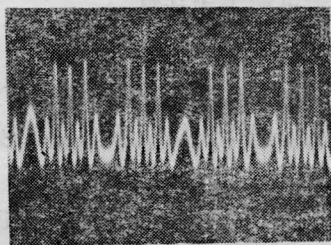


图 6

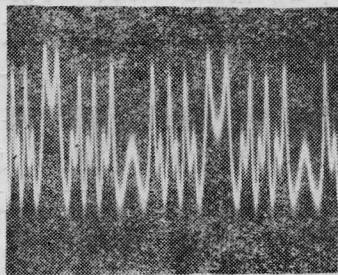


图 7

差 π 的奇数倍, 在这种情况下, 当一个纵模反馈增强时, 另一个反馈减弱。样品振动时, 检测器的输出波形与两个模的相对强度有关。当激光器有模漂移时, 信号的波形是不稳定的, 若两个纵模强度相等, 则检测器的光电信号的波形严重失真, 幅度也大大减小。图 6 和图 7 表示出这种两个模的增强与减弱不同步时, 检测器输出的信号波形。显然, 测量不宜在这种条件下进行。

参 考 文 献

- [1] P. G. R. King *et al.*; *New Scientist*, 1963, **17**, 180.
- [2] D. E. T. F. Ashby, D. F. Jephcott; *Appl. Phys.*, 1963, **3**, 13.
- [3] D. M. Clunie, N. H. Rock; *J. Sci. Instrum.*, 1964, **41**, 489.
- [4] 中国计量科学研究院等; "反馈调制激光测振仪的研制及现场测试方法的研究", 1981 年 11 月。