

激光打孔工艺缺陷的检测*

关 锷 何世平 沈黎明

(中国科技大学力学与机械工程系, 合肥, 230026)

董本涵

(航空工业部六〇六所, 沈阳, 110015)

摘要 本文应用扫描电子显微镜与扫描声学显微镜分别对 45# 钢板和某特种材料板激光打孔孔周材料进行了缺陷检测。在孔周 $200\mu\text{m}$ 的范围内发现材料发生了明显的相变, 并存在大量的微裂纹。文中给出了裂纹的长度和深度信息。

关键词 扫描电镜, 扫描声镜, 激光打孔, 缺陷检测。

1 引言

叶片是喷气涡轮发动机的重要部件之一。工作状态下, 该部件在高温燃气中高速旋转。为提高叶片的耐高温性能, 人们正在积极研制一种新型叶片。该叶片具有特殊的中空结构, 并在表面用激光打孔工艺制作了一系列与中空部分贯通的小孔 ($\phi 0.2-0.5\text{mm}$)。工作时, 向叶片中空部分不断灌入冷气, 经小孔泄出后在叶片表面形成冷气保护膜。这样, 叶片虽处于高温燃气之中, 其本身温度相对而言并不很高。显然, 这种设计极大地改善了叶片的耐高温性能, 有益于延长叶片的使用寿命。但另一方面, 小孔的存在, 降低了叶片的强度, 更严重的是, 在激光打孔过程中, 可能会在孔周引进大量复杂损伤。这些问题可能损害叶片的疲劳寿命。事实上, 在叶片的研制过程中已经发现, 经一定时间的疲劳后, 会在孔的周围出现较为严重的宏观裂纹。因而, 检测孔周材料的工艺缺陷, 改进激光打孔工艺是十分必要的。

本文使用扫描电镜和扫描声镜分别在一种新型叶片材料板和 45# 钢板上, 对激光打孔孔周材料进行了较为细致的检测研究。

2 应用扫描电镜检测孔周缺陷

扫描电镜是检测样品表面形态的有效手段之一。它具有极高的分辨率, 对样品表面的相变、微裂纹、空洞等均能够有效分辨。

本文样品均为 $30\times 30\times 2$ 平板 (块状材料上线切割得到毛坯, 磨床磨平, 水砂纸打磨, 并

* 本文于 1995 年 9 月 12 日收到第 1 稿, 1996 年 6 月收到修改稿

抛光) 打孔间距 10m m , 为检测样品材料的深层情况, 作了逐层抛光的对照实验。下面的照片为检测结果。

2. 1 45# 钢样品的检测结果

1) 抛光前的结果 (图 1~ 2), 可见较为严重的相变与裂纹。

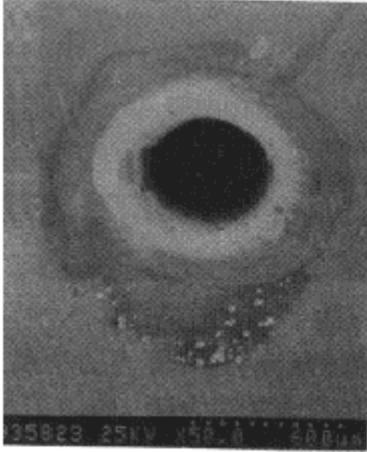


图 1 孔周的相变及径向裂纹

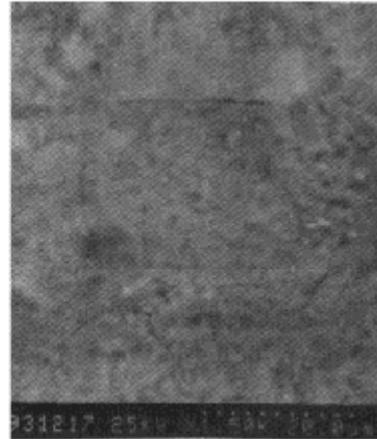


图 2 距孔边 $100\mu\text{m}$ 的网状裂纹 (CO_2 激光)

2) 抛光后, 未见孔周较为明显的相变区, 网状裂纹基本消失, 但打孔溅出物覆盖下的较深的周向裂纹显现出来 (图 3)。

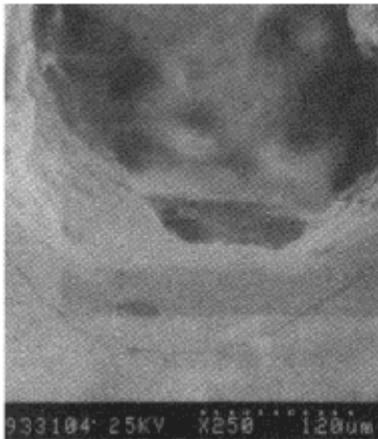


图 3 周向裂纹

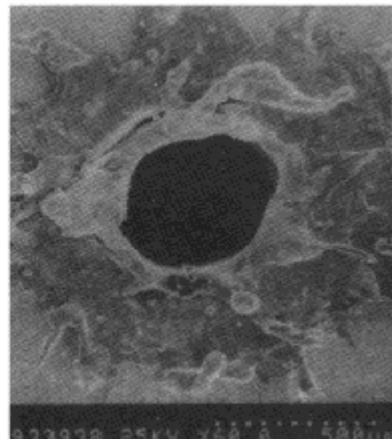


图 4 打孔溅出物

2. 2 叶片材料的检测结果

对该材料的检测共分五个步骤进行:

- 1) 打孔后不经表面处理, 直接检测。由图 4 可见打孔溅出物覆盖了孔周相当大的范围。
- 2) 浅层抛光, 仅去除表面的溅出物, 检测结果表明, 孔周存在大量的微裂纹, 孔周材料中的原始孔洞有明显的开裂 (图 5, 6)。

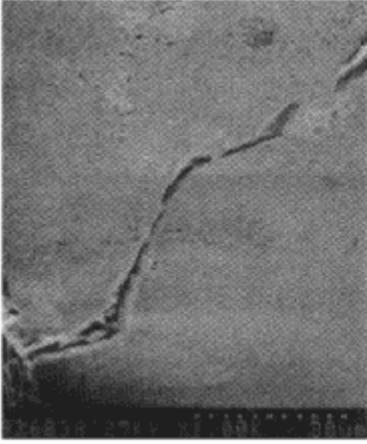


图5 孔周的径向裂纹

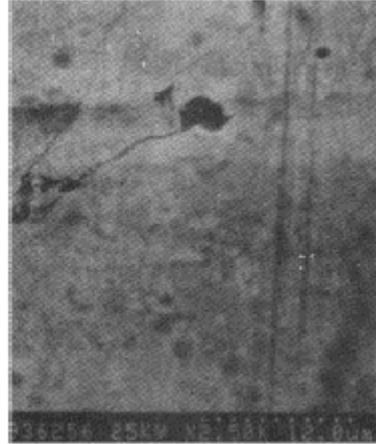


图6 原始缺陷的开裂

3) 经磨去厚度为 0.02mm, 0.05mm, 0.07mm, 0.10mm 的连续抛光, 样品表面呈现与图 5, 6 相似的状态, 至 0.1mm 时, 缺陷数量开始明显减少, 图 7 为抛光深度为 0.14mm 时的结果, 此时只能见到断续的裂纹底部。

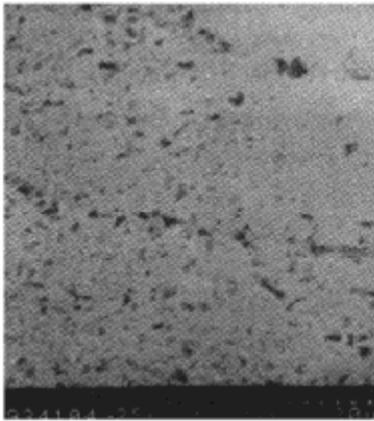


图7 裂纹底部

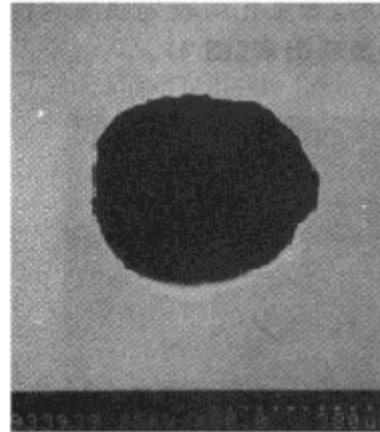


图8 裂纹消失

4) 深层抛光, 深度为 0.20mm。裂纹均已不见, 结果见图 8。

需要指出, 由于激光打孔直径很小 ($\phi. 2 \sim 0.5$), 打孔对材料造成的影响仅存在于孔周几毫米的范围内, 其它区域仍保持原始状态。因而, 在探测各抛光深度孔周缺陷的同时, 可以通过对远离孔周材料的探测获得该深度材料原始状态。大量观测表明, 材料的原始组织中除少量空洞 (如图 9) 外, 基本没有缺陷。

3 扫描声学显微镜的检测结果

扫描声学显微镜^[1]是一种新型测试技术, 与光学显微镜和扫描电镜相比, 声学显微镜不仅

可以获得物质表面图像, 而且能获得物体亚表面甚至内部的信息。所得图像能够反映样品的力学参量, 如密度、弹性模量等, 尤其对裂纹界面更为敏感。需要指出, 声镜图像反差是由声阻抗等多种因素引起的, 归结到材料上看, 相变、晶错、微裂纹等都可能产生类似的效果。因而, 具体地区分材料中上述的各种缺陷是一件相当困难的工作。

本实验使用德国 Ernst Leitz 公司生产的 EL-SAM 水耦合反射型扫描声显微镜, 工作频率 0.8~2.0GHz。结果如图 10, 11, 放大倍率 2000 \times 。从照片上看, 至少在深度为 150 μm 的表面以内, 激光打孔在材料上可以引发大量缺陷。

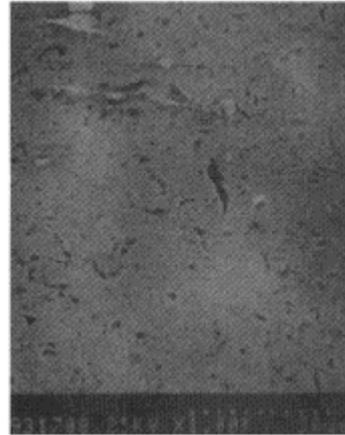


图 9 原始空洞

4 结论

综合电镜与声镜的检测结果, 可以认为, 目前的激光打孔工艺会在孔周 200 μm 以内造成大量的微裂纹, 并可能发生相变。对不同的材料, 缺陷的种类、深度等有所不同。叶片材料上的裂纹长可达 100 μm 以上, 深度至少可达 150 μm 。但所有各类缺陷仅存在于表面至 200 μm 以内的表层, 激光打孔并不在材料的深层造成明显的缺陷。



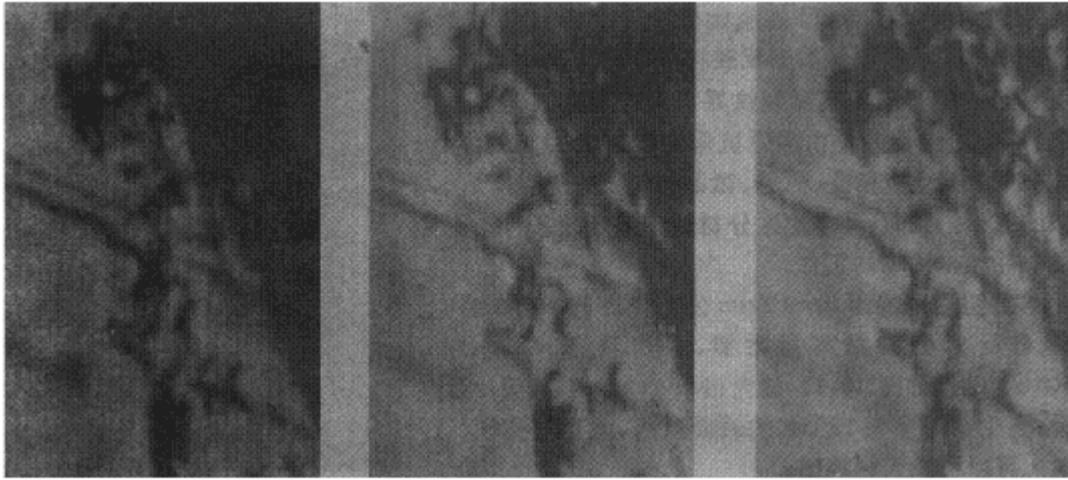
a. 表面像

b. 50 μm 深层像

c. 150 μm 的深层像

图 10 孔周的径向裂纹 (CO₂ 激光)

此外, 对不同激光打孔工艺 (如 CO₂ 激光、YAG 或调制 YAG 激光) 孔周的对比检测 (如图 12 与图 10, 图 13 与图 2) 表明, 各种工艺均能引发缺陷, 尤以 CO₂ 激光打孔工艺更为严重。



a. 表面像

b. 50 μm 深层像c. 150 μm 的深层像

图 11 孔周的复杂缺陷

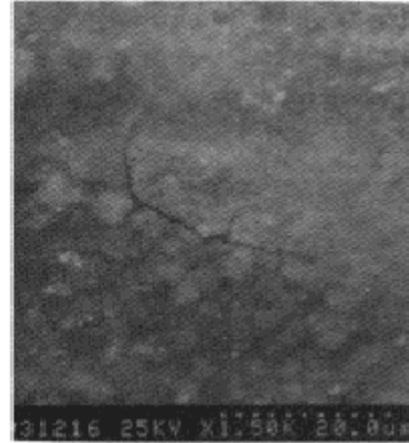
图 12 YAG 激光打孔孔周的声镜像 (50 μm)

图 13 YAG 激光打孔孔周电镜像

感谢中国科技大学内耗与固体缺陷实验室和结构中心为本文工作提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] Quate C F. Acoustic microscopy with mechanical scanning: A Review, Proc. IEEE, Vol. 67, 1979

The NDT for Defects around the Holes Punched by Laser Beam

Guan E He Shiping Shen Liming

(University of Science and Technology of China)

Dong Benhan

(Shenyang Aeroengine Research Institute)

Abstract The defects around the holes punched by laser beam are detected using Scanning Electron Microscope (SEM) and Scanning Acoustic Microscope (SAM). Considerable phase transition and a great number of micro-cracks are found within the fringe areas of $200\mu\text{m}$ width. Information for the cracks' length and depth is also given.

Key words SEM, SAM, NDT, punching with Laser Beam.