

文章编号: 1005 - 8893 (2006) 02 - 0001 - 04

## 减速器渗碳齿轮断裂失效分析

谢 飞<sup>1</sup>, 潘建伟<sup>1</sup>, 杨卫民<sup>2</sup>

(1. 江苏工业学院 材料科学与工程系, 江苏 常州 213164; 2. 普威热处理公司, 江苏 常州 213105)

**摘要:** 对齿轮断裂部位的形貌特征、裂纹走向、齿面加工状况等进行了观察, 从断裂区组织与硬度、齿轮材质、渗碳层深度、硬度与组织等方面对断裂的渗碳齿轮进行了检测。分析结果表明, 轮齿断裂系疲劳断裂, 裂纹起源于齿轮端面与齿面的磨削裂纹。齿轮工作时, 损伤最为严重的磨削裂纹在交变工作应力作用下最先扩展, 当裂纹扩展到一定程度, 轮齿有效承载面积不足以承受工作载荷时, 发生断裂。给出了避免与减少磨削裂纹的措施。

**关键词:** 齿轮; 断裂; 渗碳; 磨削裂纹; 组织

**中图分类号:** TG 115. 21; TB 303; TH 132. 41

**文献标识码:** A

## Failure Analysis of the Breaking of Reducing Carburized Gear

XIE Fei<sup>1</sup>, PAN Jian - wei<sup>1</sup>, YANG Wei - min<sup>2</sup>

(1. Department of Materials Science and Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China; 2. Power Heat Treatment, Inc., Changzhou 213105, China)

**Abstract:** The morphology of the gear's breaking part and nearby crack, and the surface machining quality were investigated. The depth, hardness and structure of carburization case, quality of raw materials, structure and micro-hardness in cracking zone were assessed. The results indicated that the breaking was the result of fatigue. And the fatigue cracks originated from grinding cracks on the gear surface and the side surface. The severest cracks propagated when the gear was cyclically loaded. When the cracks propagated to certain extent, the decreased cross section area of the gear could not bear the load any more and then the gear broke. Precautions for avoiding and reducing grinding crack were suggested.

**Key words:** gear; breaking; carburization; grinding crack; structure

某减速器齿轮箱制造公司生产的某批次齿轮箱渗碳齿轮在使用时, 个别轮齿局部断裂。该批次齿轮材料为 20CrMnTi, 生产流程为: 下料 毛坯锻造 滚齿 渗碳淬火、低温回火 磨端面、磨齿。对轮齿渗碳层深要求为 1.2 ~ 1.5 mm, 齿面硬度要求为 HRC58 ~ 62。为避免齿轮产品今后再出现类似问题, 提高产品质量, 对齿轮端面开裂原因进行了分析。

### 1 试验条件

从出现断裂的 3 个齿轮上的 4 个断裂部位及附近未断裂部位切取 (线切割) 了 12 块样品, 其中一块经等温退火 (850 加热 15 min, 650 等温 1 h, 空冷) 后, 用于测量渗碳层深度及判别是否存在成分偏析。采用 Olympus - CK40M 型金相显微镜以不同倍率 (5 ~ 200) 对断裂部位及齿面的形

收稿日期: 2006 - 01 - 09

作者简介: 谢飞 (1964 - ), 男, 上海人, 博士, 副教授, 主要从事新材料与材料表面工程方面的研究与教学。

貌特征进行观察；对轮齿表面与心部组织、断裂部位及其附近区域组织与渗碳层进行检测分析。用 HXD - 1000TMC 型显微硬度计（载荷 200 ~ 1 000 g）对齿轮不同部位组织的硬度进行测试。

## 2 试验结果

### 2.1 断口分析

宏观观察表明，断齿面除少部分有剪切唇，为最后断裂处外，基本无明显塑性变形，呈现脆性断裂特征（图 1a），在同一个断齿的几个局部可见到

贝纹特征（图 1b），对贝纹区进一步放大观察，则显现为脆性疲劳条纹（图 1c）。这说明轮齿的断裂主要是脆性疲劳断裂，其疲劳源有的在靠端面的齿面附近，有的在齿面根部或中上部。

轮齿断口疲劳源在齿面根部或中上部附近截面处的裂纹特征如图 2 所示。临近断口的齿面上有垂直于齿面的裂纹，与断口起始面近似平行，并且已经深深扩展进内部。显然，再进一步扩展，必将导致这部分齿面断裂。断口截面及裂纹附近组织没有氧化、脱碳特征。

为寻找疲劳开裂的原因，进行了如下工作。

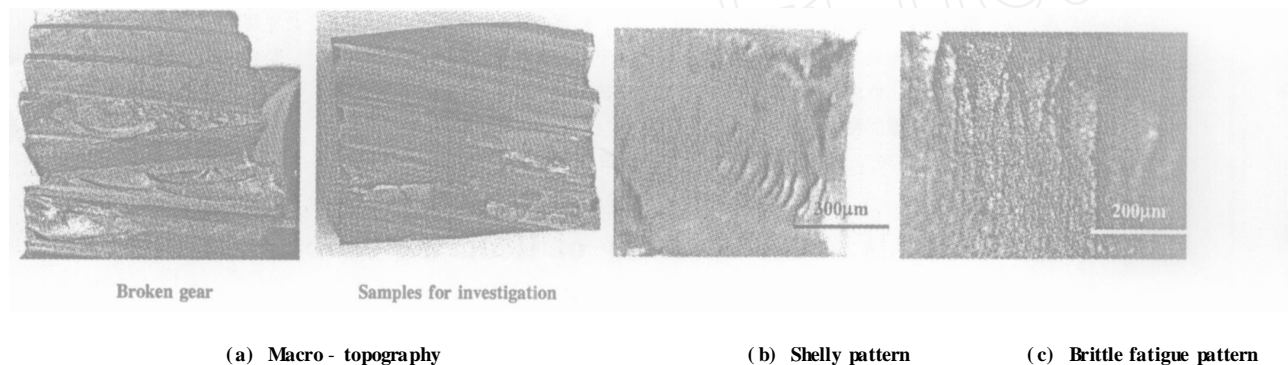


图 1 断裂轮齿断口形貌

Fig. 1 Topography of the broken gear

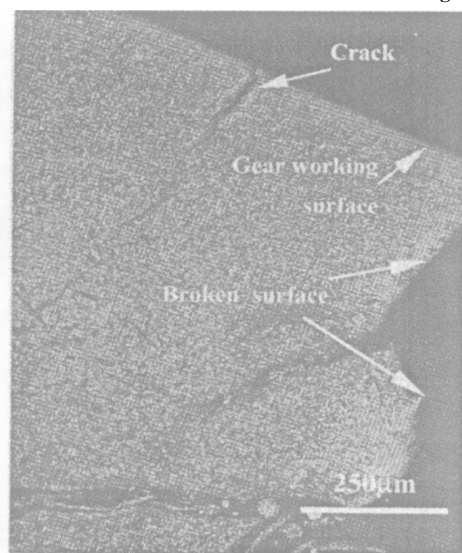


图 2 轮齿断口疲劳源附近截面上的裂纹特征

Fig. 2 Gear's broken surface features near the source of fatigue cracks

首先检查齿轮内部是否存在锻造裂纹。因为该厂有一批次部分齿轮在热处理后磨端面 and 齿面时曾发现锻造裂纹<sup>[1]</sup>，所以首先检查了断裂轮齿和同一齿轮非断裂轮齿的端部、中部截面。对十余个截面的观察没有发现具有锻造裂纹特征的裂纹。但却

在端部发现了大量网状裂纹（也称龟裂）（图 3a）。在较高倍下观察裂纹内部及其附近组织与远离裂纹区的没有差别（图 4a），无氧化脱碳痕迹，故不是锻造裂纹（参见图 4b 的锻造裂纹特征）。实际上，裂纹的形态特征已表明它是一种典型的磨削裂纹。这主要是由于磨削时，工艺参数选择不当，或操作不当，冷却不充分，磨削温度在 200℃ 以上时，表面回火马氏体进一步分解，这时表层发生体积收缩，而中心则不收缩，使表层拉应力超过脆断抗力而出现龟裂现象<sup>[2]</sup>。观察表明，这种裂纹有的已延展至端部轮齿面和轮齿根部（图 2）。靠端面的齿面附近的疲劳源就是发源于这种裂纹。磨削龟裂在渗碳件磨削时易发生，尤其是当渗碳层回火不足而残余应力较大、残余奥氏体含量较高时<sup>[2]</sup>。

在发生断裂的齿轮各齿面上都可看到大量明显的有规则排列（近似平行）的裂纹，与磨削方向垂直（图 1a，图 5）。此特征显示其为一种磨削裂纹<sup>[2]</sup>。为了解其在轮齿内部的特征，将齿中部按图 5 所示截开，制成金相试样，观察表明，裂纹垂直于齿面，延伸进轮齿内部（图 6），其内部特征与图 2 疲劳断裂源附近断口上的垂直于齿面的裂纹

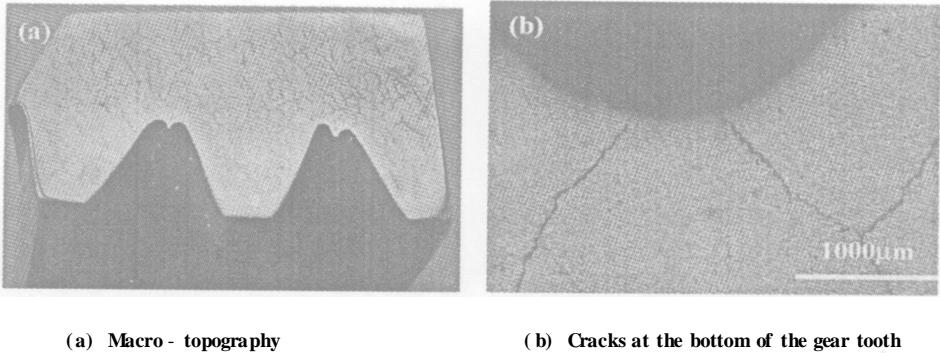


图 3 端面网状裂纹

Fig. 3 Net cracks at the side of the gear

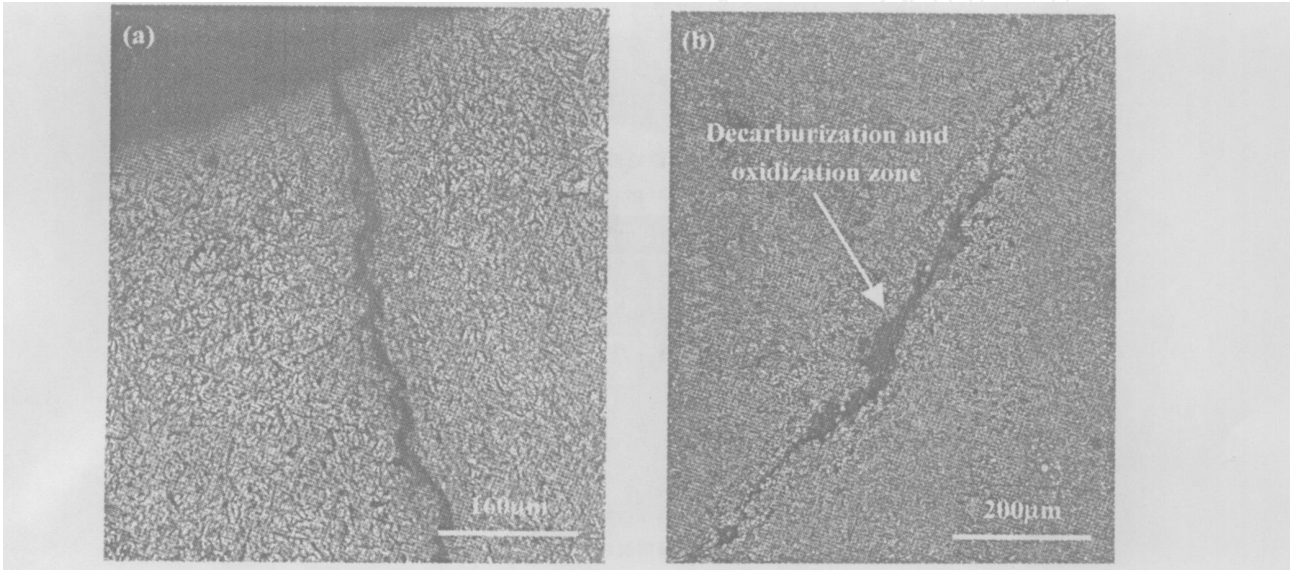


图 4 龟裂与锻造裂纹附近组织特征对比

Fig. 4 Comparison of the turtle crack and the forging crack

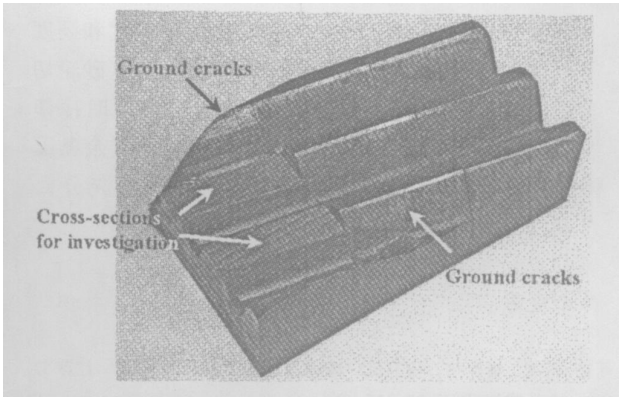


图 5 齿面磨削裂纹的宏观形貌与试验分析截面方式

Fig. 5 Macro - topography of the ground cracks and the gear teeth sections for investigation

一样, 并且裂纹深度沿齿向逐渐增加, 表明在工作时, 裂纹在内部还在扩展。在该截面上, 裂纹深度为 0.4 ~ 1 mm 不等。伴随这些裂纹, 轮齿表层经常有一薄层二次淬火层。观察到的截面上的所有裂

纹均与齿面磨削裂纹一一对应, 未发现其它裂纹, 这说明图 4 断口疲劳断裂源的裂纹不是渗碳后的淬火裂纹, 而是磨削裂纹在齿内的进一步扩展。图 7 显示, 这种裂纹还会分枝, 进而以近似平行于表面扩展, 最终又在表面露头, 将会形成疲劳剥落坑。造成这种磨削裂纹的主要原因是: 磨削时由于工艺参数不当, 或操作不当, 冷却不充分, 磨削形成的热量足以使表面薄层重新奥氏体化, 并被冷却液淬火而形成马氏体, 同时磨削形成的热量使零件表面温度升高极快, 组织应力和热应力的双重作用导致表面出现磨削裂纹<sup>[2]</sup>, 形成齿面的疲劳源。

通过对齿面磨削加工现场操作人员与技术人员的调查, 证实在以往的齿面磨削加工中, 曾多次不同程度出现过这种磨削裂纹。

## 2.2 组织与性能分析

### 2.2.1 渗碳层

渗碳层深度：齿顶为 1.3 ~ 1.4 mm，齿面为 1.1 ~ 1.2 mm，齿根为 1.0 ~ 1.2 mm。渗碳齿轮齿面表层为细针状马氏体（已低温回火）+ 细粒状弥散分布的碳化物 + 少量残余奥氏体。根据有关标准<sup>[3,4]</sup>，判定齿面各种组织的级别分别为：马氏体

1 级，残余奥氏体 1 级，碳化物 1 级。齿顶马氏体 4 级，残余奥氏体 4 级，碳化物 1 级。齿顶马氏体、残余奥氏体级别虽偏高，但仍属合格范围。

齿端面离齿顶 0.1 mm 处的硬度为 710 HV<sub>1</sub> 相当于洛氏硬度 60 HRC。

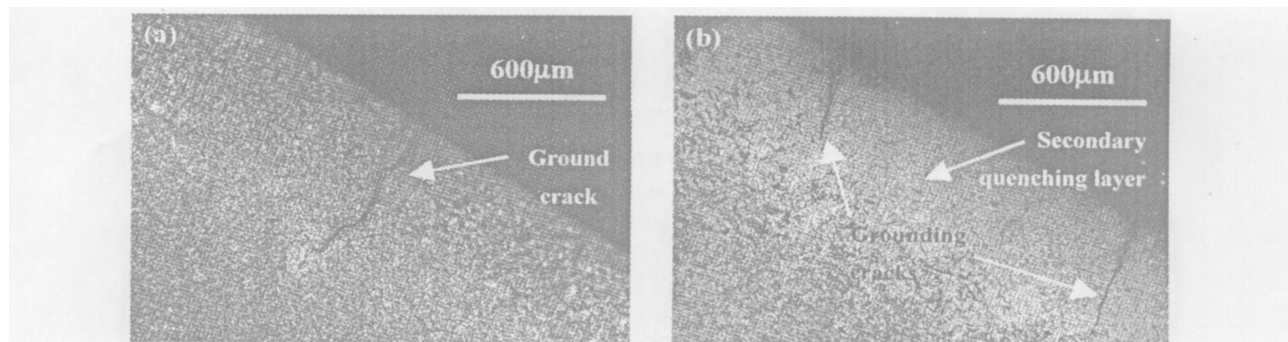


图 6 延伸进轮齿内部的磨削裂纹

Fig. 6 Ground cracks penetrating into the gear tooth

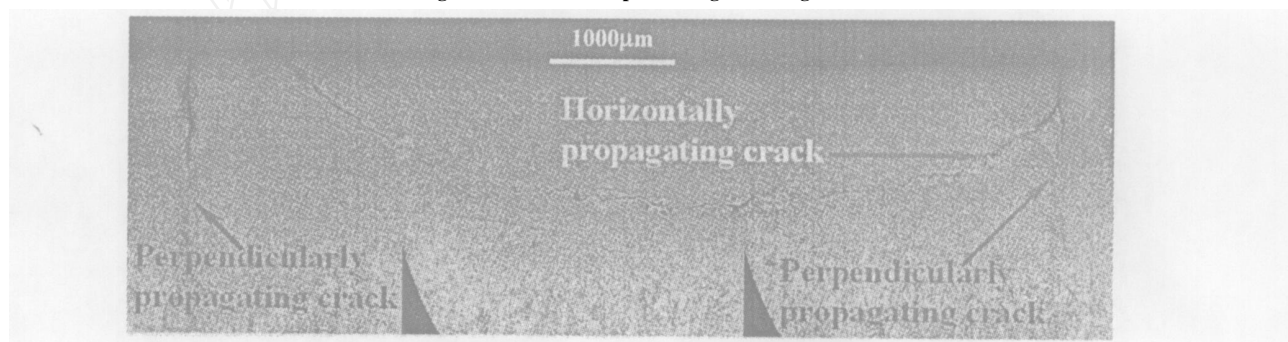


图 7 磨削裂纹的分枝扩展

Fig. 7 Multi-direction propagating of ground crack

### 2.2.2 心部

对失效齿轮心部及等温退火轮齿心部的高倍、低倍金相观察及硬度测试表明，其组织、性能、材质均匀性等均符合有关基本质量要求<sup>[3,4]</sup>。

由于齿面经过磨削，已无法确切了解其磨削前的组织状态。但根据齿顶组织，可以推断如其残余奥氏体级别较高的话，也会加剧齿面磨裂。

## 3 结论

轮齿断裂系疲劳断裂，裂纹起源于磨削端面与齿面时产生的磨削裂纹。齿轮工作时，损伤最为严重的磨削裂纹在交变工作应力作用下最先扩展，当裂纹向齿内扩展到一定程度，轮齿有效承载面积不足以承受工作载荷时，最终发生断裂；该齿轮材质和齿轮的热处理与轮齿断裂无直接关系。

## 4 措施

为防止磨削裂纹产生，选用的砂轮粒度和硬度需与零件硬度相适应，磨削速度不宜过快（砂轮切线速度要选适当），进磨量不宜过大，磨削时冷却液要充分供给。另外，热处理后即使齿面残余奥氏体级别在合格范围，也要尽可能减少，应充分回火，以减小磨裂倾向。

### 参考文献：

- [1] 谢飞, 潘建伟, 杨卫民. 减速器齿轮开裂分析 [J]. 江苏工业学院学报, 2005, 17 (2): 34 - 36.
- [2] 王广生, 石康才, 周敬恩, 等. 金属热处理缺陷分析及案例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997. 80 - 82, 455 - 461.
- [3] 全国热处理标准化技术委员会. 中国机械行业标准汇编 - 金属热处理卷 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002. 495 - 506.
- [4] 王国佐, 王万智. 钢的化学热处理 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1980. 99 - 107.