

非调质钢曲轴感应淬火裂纹失效分析

菅宝柱^{1,2}, 蒋清华^{1,2}, 米丰亮^{1,2}, 朱洪磊^{1,2}, 王广春¹, 李建祖²

(1. 山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061; 2. 中国重汽集团济南铸锻中心, 济南 250116)

摘要: **目的** 分析非调质钢曲轴感应淬火时出现裂纹的原因。**方法** 首先统计了裂纹的分布规律, 并确定了裂纹源位置, 之后通过金相检验、低倍检验, 从锻打工艺、材料偏析等角度对裂纹进行了原因分析。**结果** 产生在分模面位置的裂纹, 是因产品结构造成该区域材料在锻打过程中发生流速不均, 当材料的框型偏析位置在锻造挤压下流动到此处时, 偏析的材料产生了微细空洞, 该微细空洞在后续感应淬火时成为裂纹源而引起开裂。**结论** 该裂纹的产生与材料框型偏析有直接关系。研究对控制非调质钢曲轴生产中的裂纹缺陷, 提高曲轴生产质量, 具有重要应用价值。

关键词: 非调质钢; 感应淬火; 裂纹分析

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.015

中图分类号: TG316.1⁺92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457 (2016)04-0078-05

Failure Analysis of Induction Hardening Crack for Non Quenched and Tempered Steel Crankshaft

JIAN Bao-zhu^{1,2}, JIANG Qing-hua^{1,2}, MI Feng-liang^{1,2}, ZHU Hong-lei^{1,2}, WANG Guang-chun¹, LI Jian-zu²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Sinotruck Jinan Casting & Forging Center, Jinan 250116, China)

ABSTRACT: To analyze the causes for induction hardening crack of non quenched and tempered steel crankshaft, this study firstly analyzed the crack distribution and determined the source of crack position, then analyzed the causes of cracks from the aspects of the forging process and material segregation through metallographic examination and acid corrosion test. According to the test results, crack in the position of parting surface was caused by the uneven regional material flow during forging process due to the structure of product. When the material of the box type segregation position under the forging extrusion flowed to here, micro holes were formed on the segregated materials. The micro holes became sources of crack in the subsequent induction quenching and consequently caused cracking. Therefore, the existence of cracks is directly related to the segregation of the material frame. Research on crack control of non quenched and tempered steel crankshaft production has important application value for improving the production quality of crankshaft.

KEY WORDS: non quenched and tempered steel; induction hardening; analysis of crack

曲轴作为汽车发动机驱动的关键部件^[1], 其性能对发动机寿命具有直接影响。生产过程中对影响曲轴性能的质量缺陷十分重视, 尤其对裂纹的重视程度极高, 一般都进行探伤 100%检测后才允许装机使用^[2]。

非调质钢曲轴在感应淬火之前, 因没有像调质钢一样经历过组织的剧烈变化, 故在感应淬火时无法明确其组织应力的承受能力, 导致在生产中若操作人员、设备、材料、工艺、环境某个环节控制不当, 易于出现

收稿日期: 2016-05-18

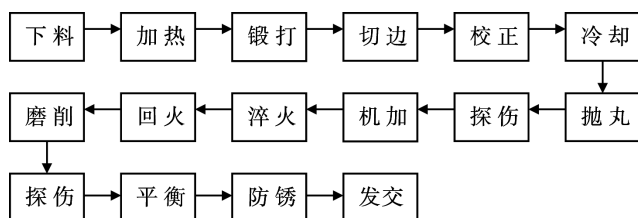
作者简介: 菅宝柱 (1982—), 男, 山东滨川人, 硕士生, 工程师, 主要研究方向为铸锻件的失效分析。

质量问题^[3]。文中针对某非调质钢曲轴在批量生产验证过程中发现的淬火裂纹问题,从曲轴锻造成形工艺^[4]、原材料状况等方面分析裂纹产生的原因,以改进生产工艺条件,提高曲轴产品的质量。

1 曲轴生产流程及裂纹状况

1.1 曲轴生产流程

曲轴从下料到成品的整个生产流程^[5]如下:



生产的曲轴产品如图 1 所示。



图 1 曲轴产品
Fig.1 Crankshaft

1.2 裂纹分布

在上述生产流程中,经超声检测,个别曲轴锻件多处发现裂纹。通过对某一班生产的曲轴出现的裂纹情况统计分析发现,裂纹主要集中在固定位置,即第七主轴与法兰分模面结合处,如图 2 所示。此处裂纹数量占裂纹总数的 70%,同时几个辅板处也发现了裂纹,如图 3 所示,2 辅板、4 辅板、12 辅板处的裂纹各占裂纹总数的 10%。



图 2 第七主轴与法兰结合处的裂纹
Fig.2 Crack in the joints of seventh shaft and flange



图 3 辅板的裂纹
Fig.3 Auxiliary plate crack

1.3 裂纹源分析

产品固定位置出现裂纹,应该与生产工艺条件的波动密切相关。为寻找确定裂纹产生的原因,首先应探明裂纹源的位置。由于曲轴产品的裂纹主要发生在第 7 主轴与法兰结合处,下面重点分析该处裂纹的裂纹源位置。

该处裂纹的具体位置位于曲轴锻件的分模面处,如图 4a 所示。图 4a 中,横向纹理为机加工倒角,其最低端距离裂纹上端面 3.5 mm。为查找裂纹源位置,采取沿图 4 垂直裂纹方向,在倒角位置下端每间隔 1 mm 用线切割进行解剖取样(试样 1 与试样 2 为第一次线切割分开的试样上端与下端,考虑到线切割过程有 0.1 mm 烧损,因此从试样 2 开始每次线切割间隔为 0.9 mm,而实际距离上端的距离为间隔 1 mm),连续线切割 5 次,进行宏观裂纹长度测量、金相组织杂物等检测,根据宏观裂纹形态(如图 4b 所示)及其长度,分析判定裂纹源的区间,从而最大限度地精确定位裂纹源位置。裂纹宏观长度如表 1 所示。

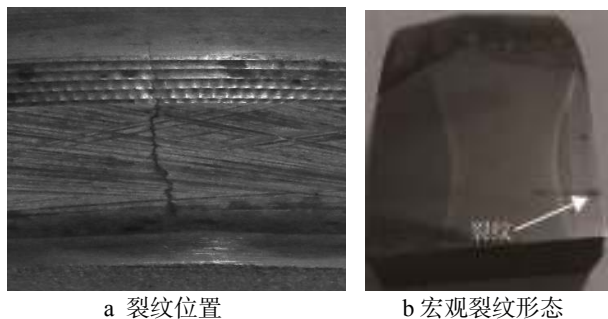


图 4 曲轴分模面处的裂纹
Fig.4 Crack in parting surface of crankshaft

根据表 1 数据可以初步判断,裂纹源位于试样 4 层面附近,即距离端面(5.6±1) mm 附近,下面重点分析试样 4 以确定裂纹出现的原因。

表 1 金相试样检测的裂纹尺寸
Table 1 Crack of metallographic specimen

试样名称	距离法兰周向端面 距离/mm	淬硬层深度 /mm	主裂纹长度/mm	裂纹总长度/mm
试样 1	3.5	2.5	4.0	4.7
试样 2	3.6	2.8	4.8	5.5
试样 3	4.6	3.1	5.0	9.8
试样 4	5.6	3.0	14.3	22.9
试样 5	6.6	2.8	14.2	20
试样 6	7.6	2.4	14.1	20

2 裂纹原因分析

2.1 金相组织

该裂纹沿分模面方向开始, 裂纹开口基体组织为马氏体^[5], 穿过约 3 mm 后, 组织为马氏体+珠光体+铁素体混合组织, 再往里为珠光体+铁素体组织^[6]。初始为穿晶裂纹, 裂纹尾端为沿晶裂纹, 尾端裂纹发生明显的“拐弯”, 特别是中部以及尾部裂纹的分支较多, 连接裂纹为极为细小的裂纹, 延伸至 22.9 mm, 裂纹尾端内部存在明显硫化物, 裂纹附近硫化物的走向与裂纹平行, 说明裂纹的扩展与原材料的夹杂物有直接关系^[7], 这也可以解释为何试样 3 与试样 4 间隔 1 mm, 而裂纹长度差异较大。裂纹尾端明显的“拐弯”与锻造过程金属流动^[8]有关, 金属流动方向存在轻微变化, 造成硫化物^[9]方向发生变化, 淬火过程中裂纹因夹杂物走向延伸中发生转向, 具体如图 6 所示。

腐蚀后获得的金相组织图谱如图 7 所示。根据图 7 所示的金相组织图谱可见, 试样基体组织为珠光体+铁素体, 裂纹沿夹杂物流向延伸。

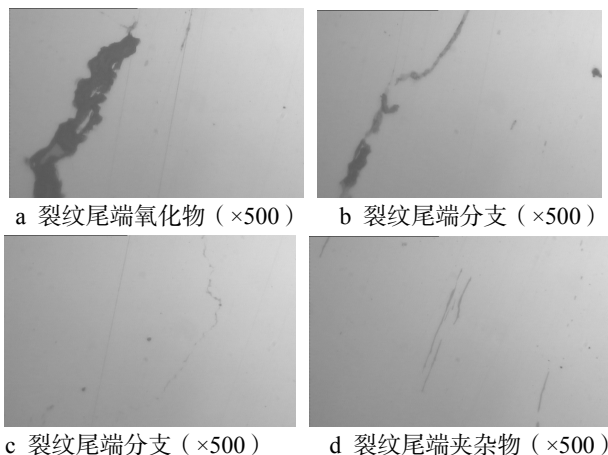


图 6 裂纹的金相组织

Fig.6 Metallographic structure of the crack

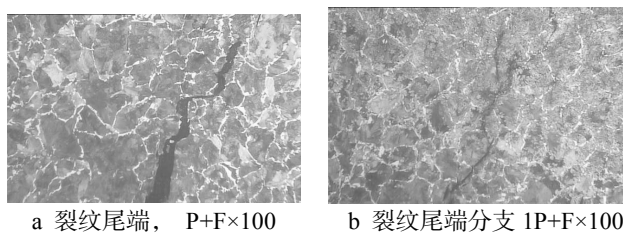


图 7 腐蚀后裂纹的金相组织

Fig.7 Metallographic structure of the crack

2.2 低倍宏观对比分析

为查找裂纹产生的原因, 选取此位置感应淬火无裂纹的国产曲轴 (图 8a) 与进口曲轴 (图 8b) 进行低倍对比分析, 发现淬火未开裂的国产曲轴与进口曲轴在分模面裂纹位置无明显的框型偏析^[10], 而带有裂纹的曲轴有明显的框型偏析 (如图 9 所示)。

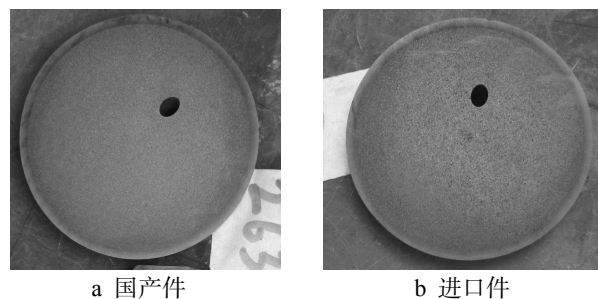


图 8 无裂纹的曲轴件 (低倍)

Fig.8 Macroscopic examination about crankshaft without cracks

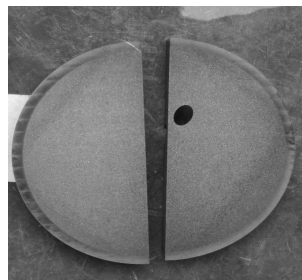


图 9 国产裂纹件 (低倍)

Fig.9 Macroscopic examination about homemade crankshaft with cracks

原材料的框形偏析在锻打过程中, 恰被放置到方角向上, 在锻打后形成菱形, 菱角位置在分模面聚集, 因偏析位置的 C 和 S 相对富集^[11], 而夹杂物如 MNS 在高温锻造过程中发生变形, 可以与本体分离而产生微细裂纹; 也因此位置 C 和 S 相对富集, 在感应淬火中淬火应力较其他位置偏大, 超出材料本身承载应力极限而发生开裂^[12], 同时在淬火过程聚集的夹杂物也加剧了裂纹的扩展。

2.3 金属流动分析

七主轴与法兰分模面裂纹都集中于一侧, 但框型偏析的菱角在分模面两侧都存在, 感应淬火后两侧偏析位置在感应淬火中产生的组织应力、热应力^[13]基本一致, 但裂纹集中在一侧, 说明裂纹与两侧的金属流动差异存在一定关系, 如图 10 所示。



图 10 裂纹位置锻造毛边流向

Fig.10 Forging flash flow direction about crack position

根据两处飞边流动的方向可以看出, 由于分模以及成形需求, 锻打时法兰两边的流料存在差异^[14]。根据毛边纹路显示, 裂纹位置的金属材料在向毛边排出过程中, 因阻挡墙作用而发生变向, 同时排出毛边的流动速度也因挡墙作用存在不一致, 裂纹位置的材料流动速度更快, 这两处的材料在流动方向上存在明显差异, 速度超过一定极限时便会产生微细空洞^[15], 微细空洞使得产品的淬火承受能力变差, 易于开裂。

3 结论

非调质钢曲轴生产中, 在感应淬火时发生开裂, 开裂位置多位于法兰分模面处。此位置因阻挡墙成形结构要求, 造成该处材料在锻打过程中局部流动方向存在明显差异, 当材料的框型偏析位置在锻造挤压下流动到分模面时, 偏析的材料在此位置因材

料流速不均而产生微细空洞, 微细空洞在后续感应淬火中成为裂纹源, 在组织应力作用下引起开裂。因为偏析位置金属夹杂物特别是硫化物相对富集, 在开裂后沿夹杂物流动方向延伸, 形成裂纹。

参考文献:

- [1] 孙捷, 王丽远, 曹新鑫, 等. 汽车发动机曲轴的失效分析[J]. 金属热处理, 2004, 29(12): 79—81.
SUN Jie, WANG Li-yuan, CAO Xin-xin, et al. Failure Analysis of Crankshaft Fracture in Automobile Engine[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(12): 79—81.
- [2] 朱华明, 刘勋丰, 刘富绪. 发动机曲轴的失效分析[J]. 国外金属热处理, 2002(4): 45—46;
ZHU Hua-ming, LIU Xun-feng, LIU Fu-xu. Failure Analysis of Engine Crankshaft[J]. Heat Treatment of Metals Abroad, 2002(4): 45—46.
- [3] 董世运, 石常亮, 徐滨士, 等. 重型汽车发动机曲轴断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2009(8): 138—142.
DONG Shi-yun, SHI Chang-liang, XU Bin-shi, et al. Failure Analysis of Crankshaft in a Eavy-duty Vehicle Engine[J]. Failure Analysis And Prevention, 2009(8):138—142.
- [4] 何开文, 张全新. 模锻汽车曲轴分模面裂纹原因分析[J]. 重庆钢研, 2009(1): 20—23.
HE Kai-wen, ZHANG Quan-xin. Analysis on Cracks in Parting Face of Die Forging Automotive Crankshaft[J]. Chongqing Steel Research, 2009(1): 20—23.
- [5] 杜浩钧, 武亚鹏. 曲轴产生裂纹的原因分析[J]. 金属加工: 热加工, 2015(5): 69—71.
DU Hao-jun, WU Ya-peng. Analysis on Crack of Crank-shaft[J]. Machinist Metal Forming, 2015(5): 69—71.
- [6] 赵阳, 吕梦国, 姜全会, 等. S38MnSiV 非调质钢曲轴裂纹产生原因分析[J]. 金属热处理, 2012, 37(12): 114—116.
ZHAO Yang, LYU Meng-guo, JIANG Quan-hui, et al. Analysis on Crack Formation of 38MnSiV Micro Alloyed Forging Steel Crankshaft[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(12): 114—116.
- [7] 黄重国, 董红磊, 袁清华, 等. XCQ16 和 20Mn2 车轴用钢疲劳失效的微观机理[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(8): 988—994.
HUANG Chong-guo, DONG Hong-lei, YUAN Qing-hua, et al. Microscopic Mechanism of XCQ16 and 20Mn2 Axle Steel Fatigue Failure[J]. Beijing University of Science and Technology, 2009, 31(8): 988—994.
- [8] 史艳兵, 李瑞彬. 垂直分模平锻机曲轴裂纹分析[J]. 热处理技术与装备, 2007, 28(3): 50—52.
SHI Yan-bing, LI Rui-bin. Crank Crack Analysis of Vertical Division Plane Horizontal Forging Machine[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2007, 28(3): 50-52.
- [9] 简龙, 陈伟庆, 孟金霞, 等. 含硫非调质钢中硫化物形态的控制[J]. 钢铁, 2006(10): 74—77.

- JIAN Long, CHEN Wei-qing, MEN Jin-xia, et al. Sulfide Shape Control in Non Quenched and Tempered Steel Containing Sulphur[J]. Steel, 2006(10): 74—77.
- [10] 宇文杰. 轧后冷却速度对非调质钢组织性能的影响[J]. 河北冶金, 2015(9): 23-39.
- YU Wen-jie. Influence of after —Rolling Cooling Rate on Structure Property of Non Quenched and Temped Steel[J]. Hebei Metallurgy, 2015(9): 23—39.
- [11] 常开地, 赵焕春, 张慧峰等. 含硫非调质钢轧后硫化物夹杂形貌的观察[J]. 金属热处理, 2006(9): 60—64;
- CHANG Kai-di, ZHAO Huan-chun, ZHANG Hui-feng etc .Observation on Sulphide Inclusions Morphology of Sulphur-containing Micro-alloyed Steel After Rolling[J]. Heat Treatment of Metals, 2006 (9): 60—64;
- [12] 丁洁, 张英建, 陈蕴博. 控锻控冷对非调质钢 38MnVS5 的组织影响[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(5): 35—38.
- DING Jie, ZHANG Ying-jian, CHEN Yun-bo. Influence of the Micro-structure on Forging and Cooling Controlled About Non-tempered Steel 38MnVS5[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(5): 35—38.
- [13] 赵欣, 蒋陵平, 肖鹏. 感应淬火层内的裂纹分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 57—59.
- ZHAO Xin, JIANG Ling-ping, XIAO Peng. Analysis of Cracks in Induction Hardening Layer[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2011, 30(3): 57—59.
- [14] 关绍臣, 孙军, 林栋. 曲轴模锻件分模面裂纹的分析与预防[J]. 内燃机和动力装置, 2008(2): 50—52.
- GUAN Shao-chen, SUN Jun, LIN Dong. Analysis and Prevention of Split Line on Die-Forging Crankshaft[J]. Internal Combustion Engine & Power-plant, 2008(2): 50—52.
- [15] 文成, 杨忠, 郭俊国. 曲轴用非调质钢 C38N2 的缺陷分析[C]. 第九届中国钢铁年会论文集, 2015.
- WEN Cheng, YANG Zhong, GUO Jun-guo. The Defect Analysis of Non-quenched and Tempered Steel C38N2 For Crankshaft[C]. Ninth China Iron and Steel Symposium, 2015.