

低密度钢连杆锻造微裂纹分析

周逸浩¹, 满廷慧^{1, 2}, 韦习成^{1, 2}, 董瀚^{1, 2}

(1. 上海大学 材料科学与工程, 上海 200438; 2. 上海大学(浙江)高端装备基础件材料研究院, 浙江 314100)

Analysis on cracking of the low density steel during forging forming process

ZHOU Yi-hao¹, MAN Ting-hui^{1,2}, WEI Xi-cheng^{1,2}, DONG Han^{1,2}

(1. Material science and engineering, Shanghai University, Shanghai 200438, China; 2. Zhejiang Institute of Advanced Materials, SHU, Zhejiang 314100, China)

Abstract: 低密度钢是近几十年汽车零部件用钢的研究热点,也是汽车轻量化的发展趋势。连杆作为发动机动力输出的关键零部件之一,直接影响和决定了发动机的耐久性和可靠性。本文通过微观组织、断口形貌观察及热塑性研究,对Fe-22Mn-9Al-0.6C低密度钢在连杆锻造过程中产生的微裂纹进行分析。发现其锻后组织为奥氏体和长条状的 δ -铁素体。因此,锻造时 δ -铁素体和 γ 两相界面产生的应力差较大,使两相界面开裂。同时当锻造温度降至850~900℃时,由于形成了硬而脆的B2结构的(Fe, Mn)Al相,热塑性降低,从而导致连杆大头端与小头端产生微裂纹。

摘要: In recent years, the low density steel has attracted more attention as steel for automotive components and is one trend for automotive lightweight. The connecting rod is as one of the major contributors to engine power output, which controls engine's longevity and dependability. This study investigates the microcracks casued in the Fe-22Mn-9Al-0.6C low density steel during the forging forming process through the examination of microstructure, fracture morphology, and thermoplasticity. It is found that the microstructure after forging is austenite and strip δ -ferrite. As a result, during forging, there is a significant stress difference in the interface of the δ -ferrite and γ phases, which causes the interface crack. Moreover, the thermoplasticity diminishes owing to the production of the hard and brittle (Fe,Mn) Al phase with B2 structure when the forging temperature falls to 850 °C~900 °C, which causes microcracks at the connecting rod's big end and small end.

关键词: 低密度钢; 连杆锻造; 热塑性; B2 析出相

Key words: low density steel; connecting rod forging forming; thermoplasticity; B2 phase

中图分类号: TK4*** (请查阅中图分类法第5版)

文献标识码: A

0 概述

Fe-Mn-Al-C 钢是一种新兴的钢铁材料,拥有优异的性能和减重特性,强度远高于传统铝合金、镁合金,比强度、比刚度可与钛合金媲美,其综合制造成本与不锈钢相当,其焊接、加工等工艺性能显著优于传统钛合金轻质结构材料。作为新型轻量化材料,在未来有望实现批量化生产,应用于汽车发动机等领域。其中,连杆是发动机中运动及其复杂的零部件之一,是负责传递动力的重要零部件,其

可靠性和寿命在很大程度上决定了发动机的可靠性和寿命。连杆一旦失效,会给整台发动机带来极其严重的影响^[1,2,3]。在现代柴油发动机中,在低转速下实现的大扭矩值会导致活塞、曲轴、连杆和其他发动机零部件承受高应力^[4,5]。这就要求连杆具有优秀的综合力学性能,高的强度、韧性和抗疲劳性能以及良好的结构刚度;同时,高速运动条件下产生的惯性力又要求发动机连杆具有轻巧的结构^[6,7,8]。本文对 Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢在连杆锻造过

收稿日期:

作者简介: 周逸浩 (1999), 男, 硕士生, 主要研究方向为低密度钢, E-mail: 1192323737@qq.com;

满廷慧 (联系人), E-mail: mantinghuilove@163.com。

程中产生的微裂纹进行分析，通过微观组织、断口形貌观察及热塑性研究微裂纹产生的原因。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢在连杆锻造成型过程中大头端、小头端产生了裂纹，如图 1 所示。详细的锻造工艺参数见表 1。

1.2 实验方法

在 Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢连杆毛坯件大头、小头和工字形处取样，利用 LEIKA DM2700M 光学

显微镜和 ZEISS Sigma 300 场发射扫描电子显微镜观察基体组织。对 Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢裂纹处取样，观察裂纹起裂源处的组织情况，分析起裂原因。在 Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢锻坯上取热拉伸试样，利用 INSTRON 高低温拉伸试验机进行测试。先将试样以 10 °C/s 加热至 1180 °C保温 10 min，再以 5 °C/s 分别降至拉伸试验温度（1100、1050、1000、950、900、850、800 °C），保温 10 min 后进行拉伸试验，应变速率 1 mm/min。并利用 ZEISS Sigma 300 场发射扫描电子显微镜对断口形貌及断口附近截面组织进行分析，确定其断裂方式。

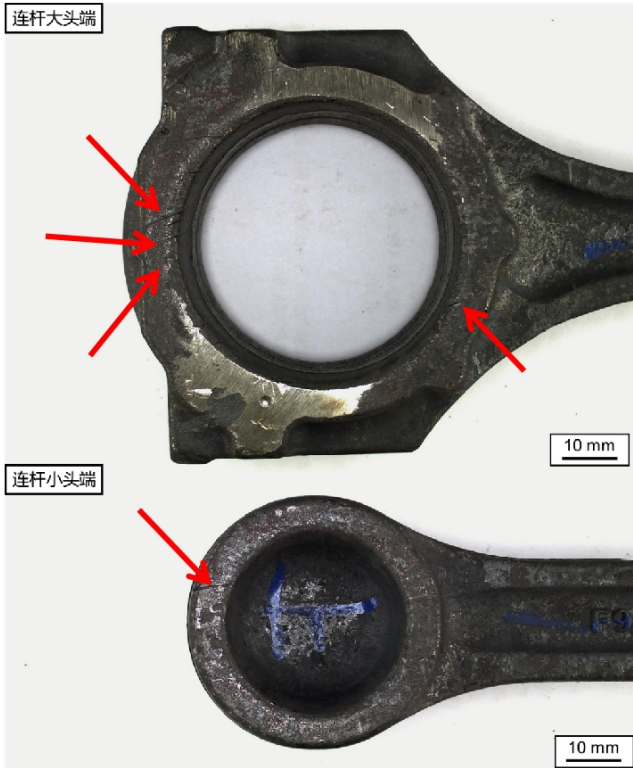


图 1 连杆毛坯件大头端、小头端

表 1 连杆锻造工艺参数

锻造工艺	加热温度	开锻温度	终锻温度	冷却方式
参数	1085℃	1050℃	930℃	锻件箱（600~650℃）保温 10h 取出空冷

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 2 分别是 Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢连杆大头端和小头端的微观组织的 OM 图片，其中(a)为原始组织，(b)为大头端组织，(c)为小头端组织。从图 2 中可以发现，大头端和小头端的为奥氏体+少量长

条状 δ -铁素体；由于热变形程度深，导致 δ -铁素体长宽比增加，多以细长条或颗粒状分布，而奥氏体比原始组织更为细小，这是由于热变形过程中的再结晶行为受到 δ -铁素体的约束，抑制奥氏体晶粒长大。

2.2 裂纹分析

图 3 是 Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢连杆大头端和小头端的裂纹形貌 OM 图片，红色方框为裂纹尖端的局部放大图，蓝色方框为裂纹扩展区的局部放

大图，绿色箭头均为裂纹周围存在的 δ -铁素体。从图 3 中可以看出，起裂位置位于 δ -铁素体与奥氏体相界处，另外，还发现裂纹更易沿着相界面扩展。图 3(b) 中绿色圆圈中的颗粒为析出相。

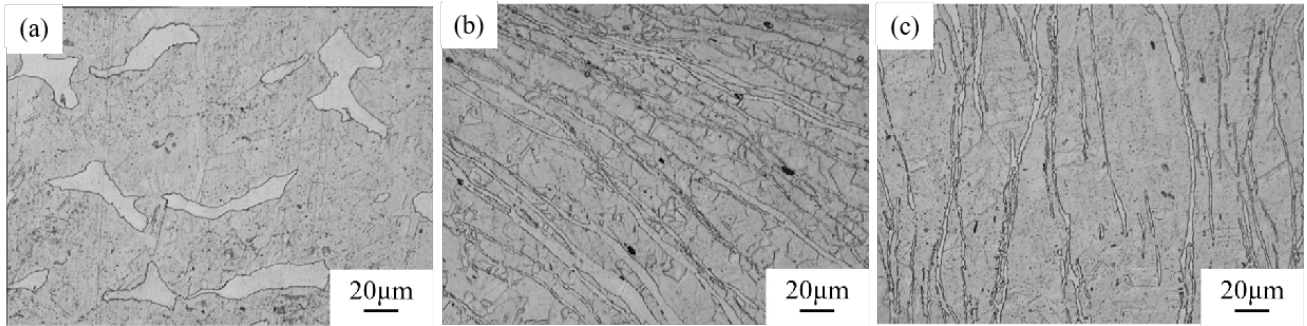


图 2 (a)原始组织；(b)大头端组织；(c)小头端组织；

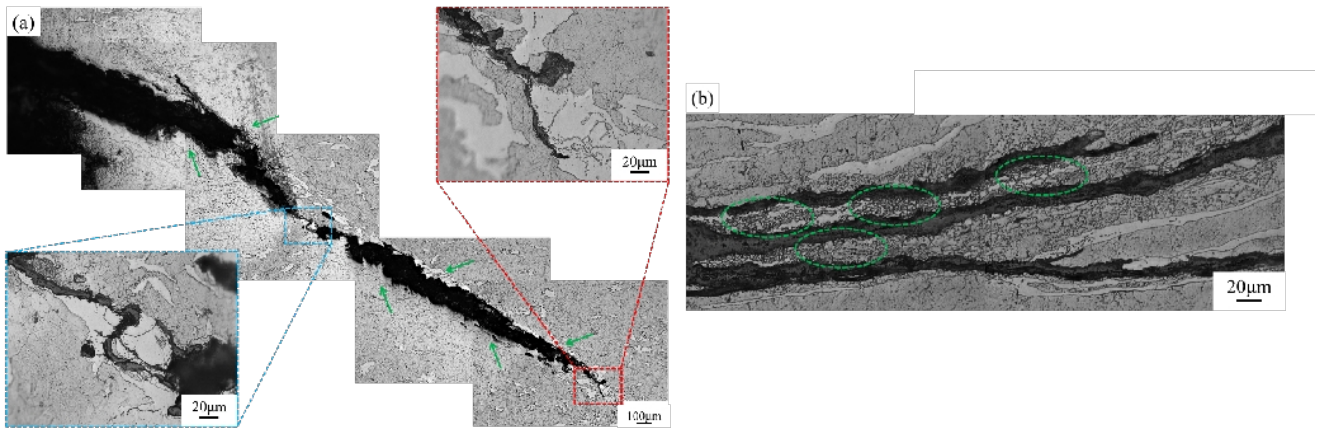


图 3 (a)大头端裂纹；(b)小头端裂纹

2.3 热塑性

图 4 为 800℃~1100℃ 下的工程应力-应变曲线。

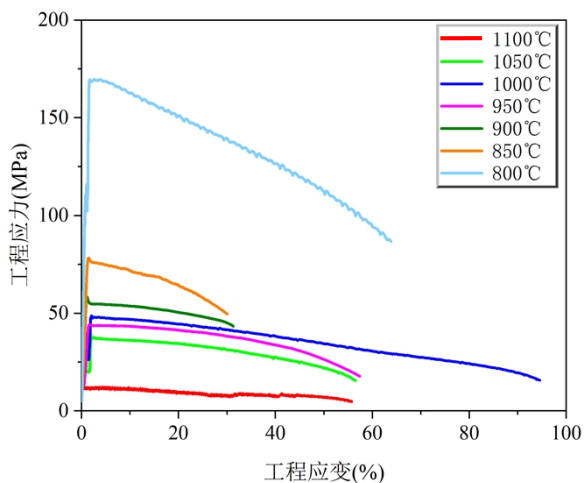


图 4 800℃~1100℃ 下的工程应力-应变曲线

图 5 为断后伸长率和断面收缩率与试验温度的关系图。从图中可以看出，在 900℃ 和 850℃ 时，塑性降低。

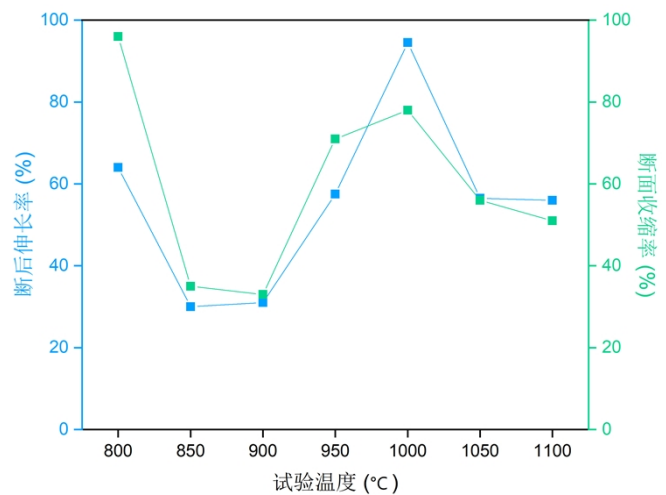


图 5 断后伸长率和断面收缩率与试验温度的关系图

图 6 为 Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢在不同实验温度下的热拉伸断口截面组织，从图中可以看出裂纹基本在奥氏体和铁素体晶界及铁素体晶内扩展，这表明 B2 相在晶界沉淀，造成局部应力集中，然后产生微裂纹。在变形过程中，这些微裂纹会沿着晶界和铁素体晶内传播，最终导致裂纹的产生。同时热拉伸断口周围的晶粒随着温度的上升发生了晶

粒细化，出现了很多细小的晶粒。

图 7 是 Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢在不同实验温度下的热拉伸断口 XRD 谱图。由图 7(a) 可知，Fe-22Mn-9Al-0.6C 低密度钢热拉伸试样的晶体结构为 fcc 和 bcc，即奥氏体和 δ -铁素体。在实验温度为 950℃ 时，且未发现析出相 (B2、 κ -碳化物、 β -Mn) 的衍射峰；由图 7(b) 和 7(c) 可知，在 850℃~900℃，有 B2 相析出，这应该是导致塑性下降的原因。

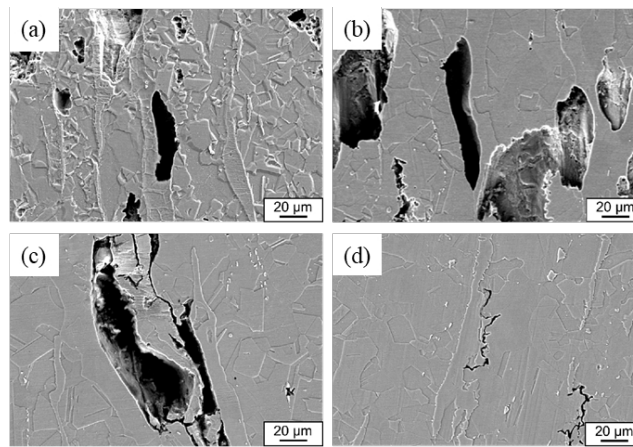


图 6 热拉伸断口试样横截面组织微观形貌 SEM 图：(a)900 °C，(b) 950 °C，(c) 1000 °C，(d) 1050 °C

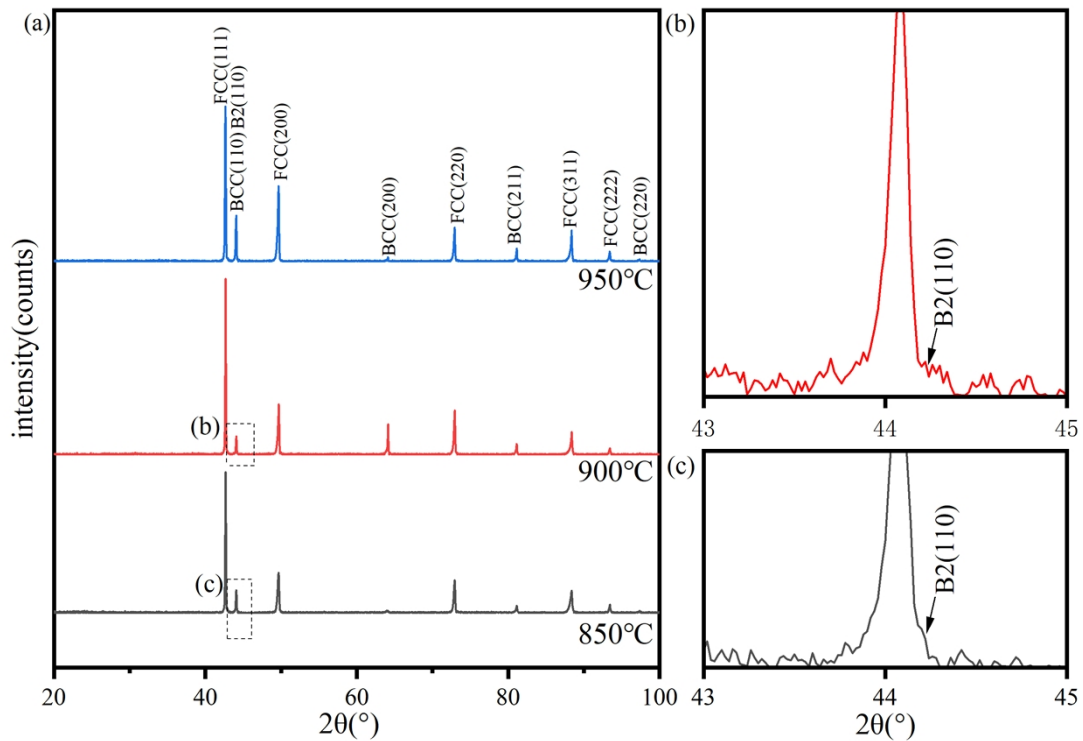


图 7 不同变形温度下的热拉伸断口试样横截面 XRD 谱图

3 结论

(1) 锻造时内应力较大, δ -铁素体和 γ 两相界面产生的应力差较大, 沿着两相界面开裂;

(2) 连杆锻造成型过程中大头端、小头端出现微裂纹的原因应是 B2 相大量析出在奥氏体与 δ -铁素体相界面处, 使界面局部应力集中增大。

参考文献:

- [1] 邓君, 王延亮. 某汽油机连杆断裂失效分析[J]. 内燃机与配件, 2020 (13): 29-31.
- [2] 高学敏, 于志伟, 许晓磊. 42CrMoA 钢连杆断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2008 (05): 100-101.
- [3] 何元章, 夏国祥, 王文建等. 某发动机连杆断裂原因分析的研究[J]. 内燃机与配件, 2012 (02): 23-25+29.
- [4] Witek, L., 2016. Failure and thermo-mechanical stress analysis of the exhaust valve of diesel engine. Engineering Failure Analysis 66, 154-165.
- [5] 王晓峰, 黄磊, 杨静等. 汽车发动机连杆断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2013, 38 (07): 122-124.
- [6] 张明贺, 岳文忠, 张翼. 连杆疲劳破坏的分析综述[J]. 中国农机化学报, 2014, 35 (03): 187-189.
- [7] 王荣滨. 连杆失效分析与影响调质钢力学性能的因素[J]. 热加工工艺, 2006 (06): 73-75.
- [8] 张兵, 刘纯. 发动机连杆失效分析[J]. 湖南电力, 2007 (02): 30-31.