

锻前加热次数对C70S6非调质钢连杆组织与性能的影响

韩亚辉, 陈荣标, 姜爱龙, 伍启华

潍柴动力股份有限公司 山东潍坊 261061

摘要: 连杆生产时, 经常出现坯料被反复加热的情况, 反复加热的坯料是否能再次利用, 则关系到原材料成本。以C70S6非调质钢为研究对象, 将其进行反复加热, 探究了加热次数对C70S6钢连杆组织与性能的影响。结果表明: 加热次数低于4次的坯料可以正常使用, 加热次数对C70S6连杆的力学性能影响不大, 抗拉强度始终 $>950\text{MPa}$, 屈服强度始终 $>550\text{MPa}$; 随着加热次数的增加, C70S6钢连杆中铁素体尺寸增大, 珠光体片层间距也逐渐增大, 抗拉强度和屈服强度逐渐减小。

关键词: C70S6非调质钢; 加热次数; 力学性能

Effect of heating times before forging on microstructure and mechanical properties of C70S6 connecting rod

HAN Yahui, CHEN Rongbiao, JIANG Ailong, WU Qihua

Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China

Abstract: In the production of connecting rod, the billet is often heated repeatedly. Whether the billet heated repeatedly can be used again is related to the cost of raw materials. In this paper, the C70S6 non-quenched and tempered steel was repeatedly heated, aiming to study the influence of heating times on the microstructure and properties of C70S6 connecting rod. The results showed that billets heated less than 4 times can be used normally and it had little effect on the mechanical properties of C70S6 connecting rod when the heating times were less than 4 times. The tensile strengths were always greater than 950MPa and the yield strength greater than 550MPa . With the increase of heating times, the grain size of ferrite and pearlite lamellar spacing increased, and the tensile strength and yield strength decreased gradually.

Keywords: C70S6 non-quenched and tempered steel; heating times; mechanical properties

1 序言

连杆作为发动机曲柄连杆机构中最重要的组成部分, 将曲轴的旋转运动转化为活塞的往复直线运动, 工作中受到周期性高温气体的作用力和惯性力。为了保证发动机的正常运转, 连杆的强度、刚

度和质量等综合力学性能至关重要。此外, 随着发动机轻量化要求的提高, 对连杆的力学性能提出了更高的要求。为了提高胀断连杆的抗拉强度, 学者们进行了大量研究, 从连杆原材料^[1]、锻造工艺^[2]、强化工艺^[3]三方面不断优化。

(1) 原材料 目前, 发动机中普遍使用的是具有优良裂解性能的非调质钢, 材质为C70S6, 其抗拉强度为850~1150MPa^[4, 5]。

(2) 锻造工艺 采用控锻控冷方式, 控制其开锻温度、终锻温度、变形量及冷却速率, 最终得到珠光体+铁素体+合金碳化物的微观组织^[6]。

(3) 强化工艺 包括喷丸强化、滚压强化和激光冲击强化, 原理均为在连杆表层形成一定的压应力, 从而提高其疲劳强度, 增加可靠性。

锻造时, 坯料需要提前加热至奥氏体化温度以上, 达到提高塑性变形能力和形成过饱和固溶体的目的, 为后续的变形和碳化物析出提供条件。实际批量生产时, 由于生产节拍问题, 常出现坯料被反复加热的情况, 即加热后无法及时锻造, 导致坯料冷却至室温, 之后该坯料又被重新加热锻造。一般来说, 坯料反复被加热, 会增加材料氧化脱碳和变形开裂的倾向, 而对材料及连杆的组织及力学性能的影响尚不清楚。为了探究锻前加热次数对非调质钢连杆组织与性能的影响, 为生产提供参考, 笔者以C70S6非调质钢为研究对象, 设计了不同的锻前加热次数, 利用光学显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度计和万能拉伸试验机对锻造后连杆的组织与性能进行检测分析。

2 试样制备与试验方法

试验用C70S6坯料由某钢厂提供, 坯料尺寸为 $\phi 60\text{mm} \times 6000\text{mm}$, 化学成分见表1; 金相组织为珠光体+断续的铁素体, 抗拉强度为935MPa, 屈服极限为505MPa, 伸长率为10%。将坯料切割成长度为180mm的棒料, 采用BTH2411-600/2中频感应加热机床对其进行锻前加热, 加热温度为1220℃, 加热时间为30min, 加热结束后棒料进行堆放冷却。待棒料冷却至室温后, 将该批棒料再次进行加热, 如此反复进行4次, 最后分别得到加热1次、2次、3次和4次的棒料。采用DRF2500热模锻压力机将棒料锻压成形, 始锻温度为1180℃, 终锻温度为

表1 C70S6坯料化学成分 (质量分数) (%)

C	Mn	S	P	V
0.72	0.58	0.04	0.003	0.0535

1100℃。锻造完成后, 利用控温冷却炉对连杆毛坯进行控温冷却, 入炉温度为980℃, 冷却速度为3℃/s, 连杆毛坯冷却至500℃后出炉空冷至室温。

分别在棒料心部和连杆大头处沿锻压方向切取尺寸为10mm×10mm×8mm的试块, 将其截面进行砂纸打磨和抛光后, 用体积分数为4%的硝酸酒精溶液进行腐蚀, 腐蚀时间为6s。利用ZEISS AXIO Image M2m型光学显微镜和GeminiSEM 360型扫描电子显微镜观察其显微组织形貌。在连杆毛坯杆身处切取拉伸试样, 其规格尺寸如图1所示。利用MTS CRITERION C41型万能拉伸试验机进行室温拉伸试验, 拉伸速度为2mm/min。每一个工艺分别进行3次拉伸试验, 最终性能取3次数据的平均值。利用扫描电子显微镜观察其断裂后的断口形貌。

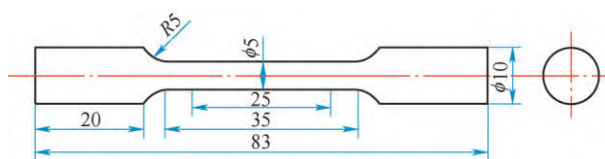


图1 拉伸试样规格尺寸

3 结果与讨论

3.1 加热次数对原材料显微组织的影响

经不同加热次数后坯料的光学显微组织如图2所示。基体组织主要为珠光体+铁素体, 大部分铁素体沿晶界分布, 总体上始终保持着坯料轧制后的带状形貌。随着加热次数的增加, 铁素体带状分布程度减弱, 铁素体晶粒尺寸增大, 沿晶界分布的铁素体含量越多。C70S6坯料的原始组织为珠光体+铁素体, 加热过程中, 随着温度的逐步升高, 铁素体和珠光体逐渐转变为奥氏体; 当奥氏体转变及均匀化完成后, 奥氏体晶粒开始长大。保温结束后, 奥氏体在降温过程中具备一定的过冷度后, 会发生相转变。随着冷却速度由小到大, 过冷奥氏体分别转变为铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体。本文试验中, 加热后的坯料直接在料箱中冷却, 属于堆冷的冷却方式, 冷却速度较小, 不会发生贝氏体和马氏体相变。因此, 冷却过程中, 坯料会发生铁素体和珠光体相变。此外, 坯料经轧制成形, 其组织沿轧制方向延展, 呈现各向异性, 具有较强的组织遗传性, 后续热处理工艺无法彻底改变这种组织结构。

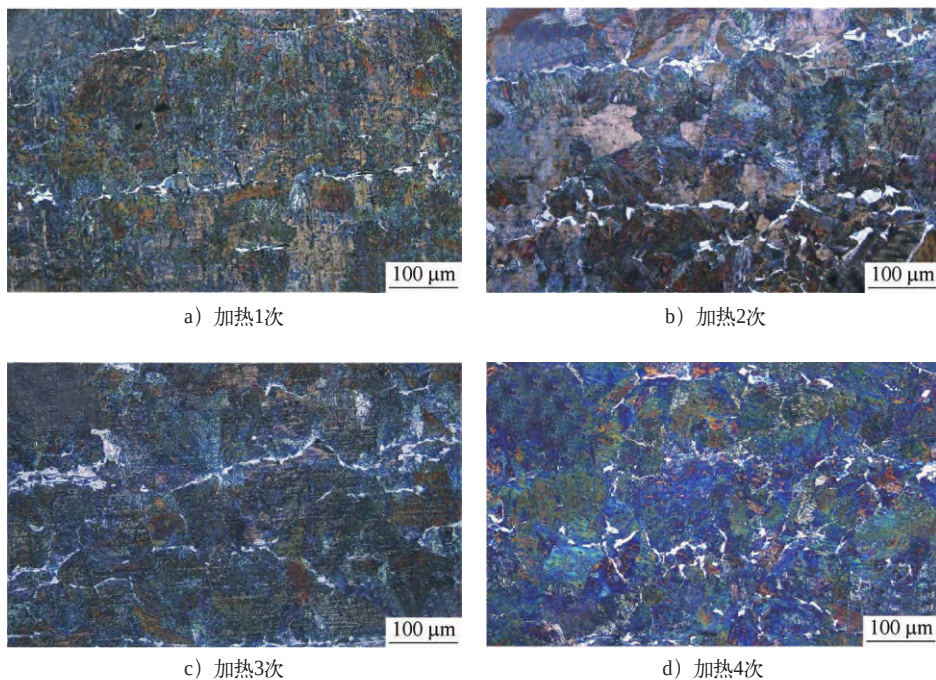


图2 不同加热次数后坯料的光学显微组织

因此,即使坯料被反复加热后,组织中的铁素体仍呈现带状形貌。此外,带状铁素体的存在表明了完全奥氏体化后的组织中仍存在着宏观元素偏析;加热次数增加,铁素体带状分布减弱,表明奥氏体成分逐渐均匀。随着加热次数的增加,由于奥氏体晶粒组织粗化,晶界面积减小,导致相变形核位置减少,因此铁素体和珠光体组织逐渐粗化。

3.2 加热次数对连杆显微组织的影响

不同加热次数的坯料锻压成连杆后,其显微组织如图3所示。由图3可见,显微组织仍为珠光体+铁素体。随着坯料加热次数的增加,连杆显微组织中的晶粒尺寸逐渐增大,铁素体逐渐由主要沿晶界分布转变为晶内分布,铁素体尺寸呈现先减小后增大的趋势,珠光体片层厚度间距呈增大趋势。如上所述,加热次数增加,原材料组织逐渐粗化。组织粗化对连杆显微组织的影响可分为以下两个方面。

1) 组织粗化会导致铁素体和珠光体转变临界冷却速度降低,从而使两者开始转变温度提高,高温下停留时间更长,两者本身属于扩散型相变,因此铁素体和珠光体有更充足的形核与生长时间。

2) 组织粗化会造成晶界面积和比例的降低,减少了相变过程中新相的形核位置。

此外,铁素体相变温度要高于珠光体相变温度,锻后冷却过程中铁素体优先在晶界或缺陷处形核,在铁素体生长过程中,大量碳原子被排出,聚集在铁素体周围区域,形成富碳区,越靠近铁素体的区域,碳含量越高;随着温度的下降,铁素体周围的富碳区域优先满足珠光体形核条件,珠光体优先在铁素体周围形核,并沿碳含量下降方向生长。

3.3 加热次数对连杆拉伸性能的影响

不同加热次数的坯料锻压成连杆后,其拉伸性能变化如图4所示。随着加热次数的增加,抗拉强度和屈服强度逐渐减小。坯料经4次加热后,连杆的抗拉强度仍能保持在900MPa级以及屈服强度在500MPa级,且相差不大;此外,伸长率和断面收缩率也整体呈现下降趋势。

图5所示为不同加热次数下连杆拉伸试样断口纤维区的微观形貌。由图5可见,4种加热次数下的连杆断口纤维区形貌均呈现混合断裂的特征,即断口形貌中具有韧窝和撕裂棱。随着加热次数的增加,断口中的韧窝比例逐渐减小,韧窝深度减小,韧窝直径增大。其中,加热次数为3次和4次时的断口中撕裂棱较为明显。

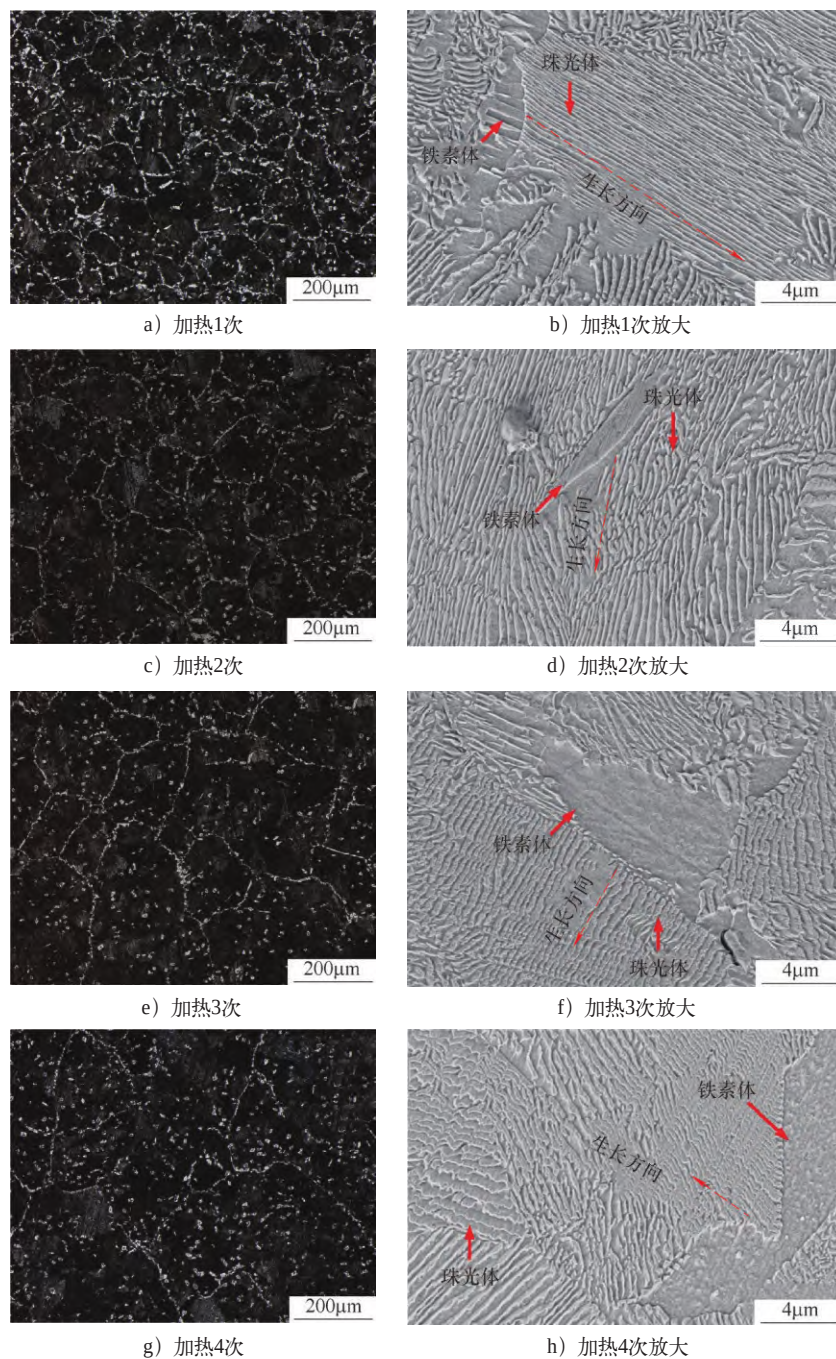


图3 不同加热次数下连杆的显微组织

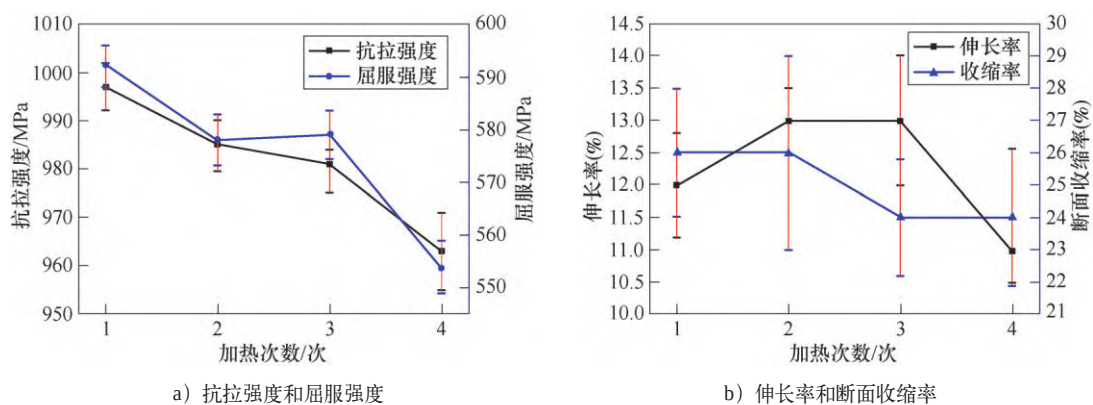


图4 拉伸力学性能随加热次数的变化趋势

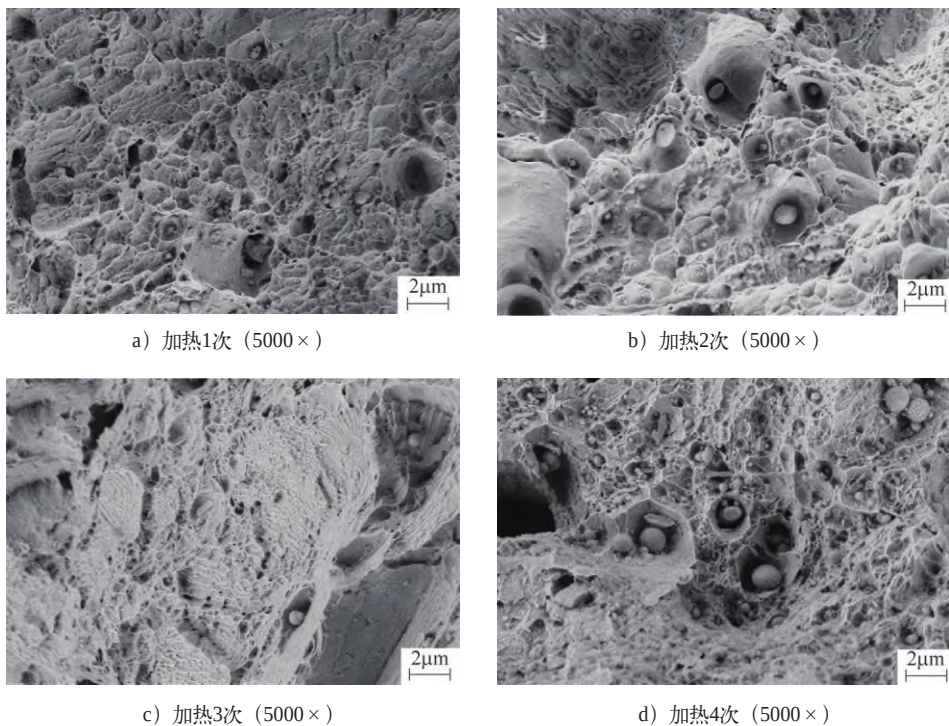


图5 不同加热次数下连杆拉伸试样断口纤维区形貌

4 结束语

1) 加热次数小于4次的坯料仍然可以继续使用, 不影响最终连杆的力学性能。

2) 锻前反复加热会使C70S6钢的组织粗化, 带状铁素体逐渐粗化, 铁素体带状分布程度减弱, 铁素体晶粒尺寸增大, 沿晶界分布的铁素体含量增大。

3) 加热次数小于4次时, 连杆的力学性能差异不大, 抗拉强度始终 $>950\text{MPa}$, 屈服强度始终 $>550\text{MPa}$ 。随着加热次数的增加, C70S6钢连杆毛坯中铁素体尺寸增大, 珠光体片层间距也逐渐增大, 抗拉强度和屈服强度逐渐减小。

参考文献:

- [1] 张朝磊, 胡佳丽, 李骥, 等. 胀断连杆用非调质钢C70S6的材料特性及组织性能控制[J]. 材料导报, 2020, 34: 444-447.
- [2] BARIANI P F, BRUSCHI S. Modelling the forging and post-forging cooling of C70S6 conrods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167: 529-535.

- [3] 张晓云, 刘建朋. 连杆的喷丸强化工艺试验[J]. 金属加工 (热加工), 2012 (13): 52.
- [4] 张贤忠, 蔡启舟, 陈庆丰, 等. 汽车裂解连杆用高强度非调质钢组织和性能的研究[J]. 钢铁研究, 2011, 39 (1): 15-17.
- [5] 陈子宏, 陈庆丰, 熊玉彰, 等. 裂解连杆用高碳微合金钢的开发[J]. 汽车工艺与材料, 2011 (5): 58-63.
- [6] LUCJAN W, PAWE Z. Stress and failure analysis of the connecting rod of diesel engine[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 374-382.

MW 20240728