

曲轴热锻中表层局部微米级裂纹产生机理^{*}

周杰 张光华 权国政

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

【摘要】 基于实验与数值模拟,从坯料体内部自由缺陷在坯料变形过程中发生移动的角度来分析某曲轴连杆轴颈分模面内侧及过渡圆角处的微米级裂纹产生机理。提出将连续的坯料体分为表层优质层和中心次优质层的包覆结构假设,建立了相应的数值模型,通过 Deform 3D 模拟出曲轴成形过程中这两层金属的流动与分布状态,获得了内部自由缺陷在锻件中的堆积趋势及原工艺下的成形速度场对优质层和次优质层流动的影响规律。结果表明:连杆轴颈分模面附近及过渡圆角处有中心次优质层金属分布并裸露在锻件表面,是自由缺陷富集的危险区;终锻成形过程中连杆轴颈横截面上金属的单方向流动加大了自由缺陷在危险区的聚集趋势。实验证明,出现的微米级裂纹是由从里层转移到表层的、化合物成分为 MnS 和 MoS 的夹杂物在锻件表层沿变形方向延伸而形成的一种发状纹。

关键词: 曲轴 锻造 微米级裂纹 机理

中图分类号: TG316.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0230-05

Mechanism of Micron Dimension Crack Appeared on Surface Layer of Crankshaft during Forging

Zhou Jie Zhang Guanghua Quan Guozheng

(School of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract

Based on the experimental and numerical simulation, the mechanism of micron dimension crack of crankshaft appeared in the area of inner parting plan of rod journal and transition fillet was analyzed in the view of the billet inner freedom defects' transition during the forging. The billet was divided into two layers, named the outer higher quality layer and inner lower quality layer, and the corresponding finite element model of billet was built. The flow and distribution of two layers metal's during forging were simulated by Deform 3D and the trend of accumulate of inner defects was achieved as well as the influence law of forging velocity on two layers' flowing. The results showed that the inner low quality metal was distributed in the area of inner parting plan of rod journal and transition fillet and exposed on forging surface, which was the dangerous area. The metal on the cross section of rod journal flowing only at a direction intensified the trend of defect accumulating in the dangerous area. According to the experiment results, the micron dimension crack was a kind of hairline crack. The inclusion which contained MnS and MoS and transited into the surface of forging from inside of billet was extended along with the forming direction.

Key words Crankshaft, Forging, Micron dimension crack, Mechanism

引言

曲轴是内燃机关键传动部件,也是内燃机 5 大

件(机体、缸盖、曲轴、连杆、凸轮轴)中最难以保证加工质量的零件^[1]。曲轴工况条件十分恶劣,既在交变载荷下作高速运转,又传递大扭矩。曲轴产品

的性能对内燃机的工作性能具有重要影响^[1]。由于锻造改性的优势明显,锻钢曲轴的机械性能和寿命较铸钢曲轴优越,所以当前曲轴铸改锻工艺比较普遍^[2-6]。对于曲轴热锻成形工艺,材料自由缺陷、锻造工艺不恰当、工人实际操作偏差等均会造成许多产品缺陷,在锻件表面形成的深度1 mm以下的微米级裂纹是锻造缺陷的一种,这种裂纹的出现与原材料本身所固有的缺陷是分不开的^[3]。随着对曲轴锻件品质要求的提高,对于裂纹探伤也从原来的毫米级逐渐提高到微米级^[7-8],这必然要求原有技术规范的不不断提升。

本文通过探伤及金相辅助观察锁定微米级裂纹形态及分布区域,进一步解析裂纹形成机理。根据大量圆棒截面的组织观察结果,对曲轴锻造工艺的初始棒坯提出层状包覆结构假设,表层为韧塑性能优良且自由缺陷较少的优质层,中心层为内部自由缺陷较多的次优质层,基于数值模拟技术跟踪变形过程中这两层金属的流动,得到从成形初始到成形结束过程这两层金属在各区域的分布状态,获得自由缺陷随优质层和次优质层的堆积与分布趋势,并分析原工艺状态下速度场对优质层和次优质层流动的影响,以此进一步解析曲轴表层的微米级裂纹机理。基于实验与数值模拟综合阐释曲轴表层微米级裂纹产生机理,为正确制定锻造工艺、防止出现同类缺陷提供依据。

1 裂纹形态

1.1 实际生产

某型号的发动机曲轴在原生产工艺流程下,机加工完毕后利用高精度的探伤设备进行磁粉探伤时,磁粉在其连杆轴颈分模面内侧及与平衡块的过渡圆角处聚集,形成磁痕流线,如图1所示。这说明曲轴在此处含有裂纹。从宏观上看,磁痕呈射线状分布,线条较细,长短不一。抹去磁粉后,表层仍然很光洁,肉眼无法看出缺陷,说明该尺寸下的裂纹属于微米级,该种裂纹的出现会造成曲轴的机械性能下降,并降低其抗疲劳性。

1.2 裂纹微观分布

通过探伤锁定裂纹位置后,制备部分试样进行金相组织分析,进一步观察裂纹形态。从该曲轴连杆轴颈内侧出现磁痕的部位截取一试样并在垂直该试样上的磁痕(代表裂纹的方向)方向上(横向)截取一截面进行微观分析。首先用4%硝酸酒精侵蚀界面,在光学显微镜下放大500倍观察,如图2所示。从图中发现:在磁粉聚集的部位发现了较浅的裂纹,经测量深度在1 mm以下,属于微米级裂纹,

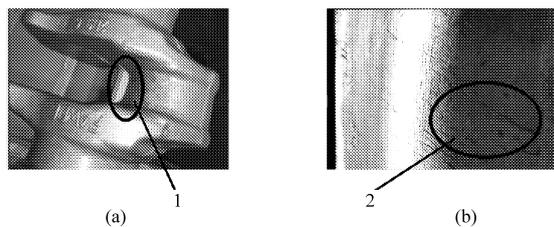


图1 通过磁粉探伤锁定的裂纹处

Fig. 1 Crack found out by magnetic powder inspection

(a) 发动机曲轴 (b) 部分切取试块

1. 磁痕出现处 2. 磁痕

裂纹尾端圆钝,其周围组织无脱碳。在电子显微镜下放大2 000倍观察的裂纹形态如图3所示,发现裂纹较平直,不同于淬火裂纹。另外,在金相显微镜下放大到500倍观察整个界面,发现界面上多处有集中分布的夹杂物,如图4所示。且从图中可以看出在该界面上该夹杂物由表及里都有分布。

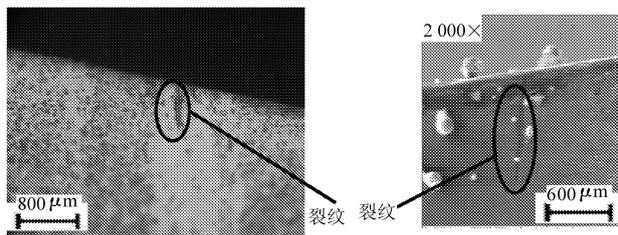


图2 光学显微镜下裂纹形态

图3 电镜下裂纹形态

Fig. 2 Crack shape observed by optical microscope

Fig. 3 Crack shape observed by TEM

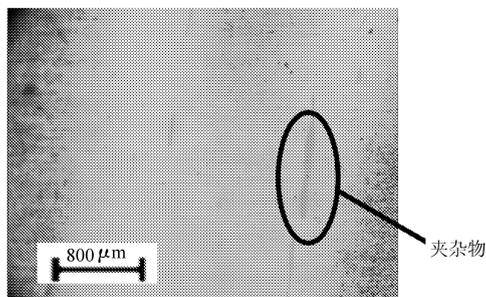


图4 界面上夹杂物的分布

Fig. 4 Inclusion distribution on the surface

2 裂纹产生机理分析

通过金相分析,得出在连杆轴颈内侧出现的磁痕并非锻造裂纹,也不是淬火裂纹。值得注意的是在整个界面发现有多处集中分布的夹杂物。在锻造过程中,坯料体内部的自由缺陷包括夹杂物会在锻件的成形过程中随着坯料的流动而发生移动、转移并堆积在锻件的某些部位。若这些缺陷堆积在锻件某些区域的表层或直接暴露在表面,则容易在这些区域造成内部缺陷的外露,形成微米级裂纹等缺陷,这些区域称为危险区。所以要分析出仅在曲轴连杆轴颈内侧及过渡圆角处出现的微米级裂纹的机理,

还需对内部自由缺陷在原锻造工艺下所发生的转移进行追踪。

2.1 层状包覆结构假设

一般来说坯料体内部的金属组织较为疏松,缺陷多,而外层金属组织致密,缺陷较少^[9-10]。这是因为坯料一般直接来源于铸锭或者经过简单轧制及锻制^[11]。铸锭由于在凝固的过程中与容器表面先接触的钢液先开始凝固,在表层某一厚度内成分偏析,疏松等缺陷少,组织较致密,材质优于心部。另外,铸锭虽然在随后的轧制和锻制过程中经过变形,产生一定的锻比,铸锭表层的变形量大于心部,改性也比心部好^[11-13]。据此可以把材料分为表层优质层和中心次优质层。表层优质层的厚度与内部缺陷含量、原始分布状态和锻造比有关^[14-15]。坯料的分层示意图如图5所示,该图反映的是坯料截面为圆形时材料的分层状态。

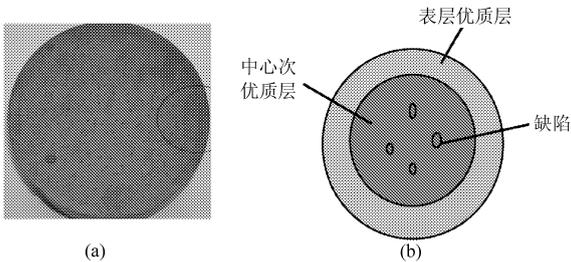


图5 坯料分层示意图

Fig. 5 Two layers of billet

(a) 横截面酸洗图 (b) 层状包覆结构图

2.2 数值分析

2.2.1 数值模型

该曲轴是圆棒料经过辊锻、预锻加终锻而成形,对坯料建立有限元数值模型时,其重点与难点是:再现坯料内部自由缺陷的原始状态及追踪其变化。所以需要在精度允许的范围内简化原始模型,以利于分析。简化思路是:将坯料的原始状态看成是匀质的,但是在坯料内部建立一个分界面,该分界面是从坯料的外表面偏置一距离而生成的,而且该分界面会随着金属的流动而移动。这样建模的好处是将原来复杂的优质层金属和次优质层金属分析对象转移成了这两层金属的分界面,将该分界面定义为中性面,所以只需分析金属在塑性变形过程中中性面的变化状态就可以了解到优质层金属和次优质层金属的大概分布状态,并用以分析裂纹等缺陷。为了更好地表征此建模思路,以棒料挤压为例进行说明。图6为挤压过程中圆柱形坯料内中性面的变化过程。从图中可知,该中性面随着挤压逐渐发生改变,但始终能保持里层和中心层的分隔,可以很好地观察成形过程中表层和中心金属的流动状态。

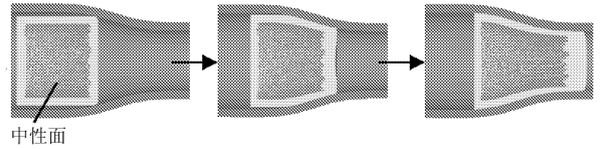


图6 挤压过程中中性面的变化过程

Fig. 6 Change of neutral surface during extrusion

应用有限元分析软件 Deform 3D,通过该软件可以很好对坯料进行分层,并直观地观察到两层金属的流动状态和分布状态,为该方法的实现提供了一个很好的实现工具。通过该软件建立了用于成形曲轴的圆柱形坯料的有限元模型,如图7所示,在坯料内生成了一中性面并对其划分网格。坯料规格为 $\phi 150\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$,初始优质层厚度设为 30 mm 。其他的成形工艺参数的设置均在软件内设置完成,限于篇幅,这里不赘述。

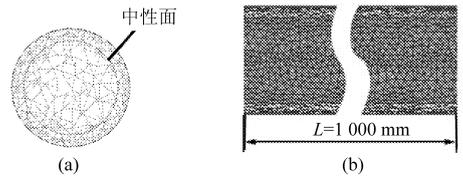


图7 坯料体有限元模型

Fig. 7 FEM model of billet with interface layer

(a) 横视图 (b) 纵视图

2.2.2 中性面变化的数值观察

在曲轴出现磁痕的部位截取一横截面进行分析,如图8所示。观察成形结束后在该截面上优质层金属和次优质层金属的流动状况和分布状况。

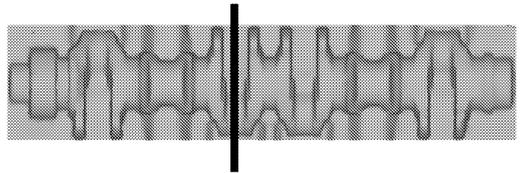


图8 曲轴上截取位置示意图

Fig. 8 Location of the cut from the crankshaft

图9是连杆轴颈横截面上的中性面从初始坯料状态到经历辊锻、预锻和终锻后的变化过程。对于辊锻过程,由于辊锻模具的型腔在该部位的尺寸同未加热状态下的坯料直径尺寸一致,所以变形量仅限于热膨胀量,且受三向压应力,故中性面的变化很小,保持了原来的状态,即保留了均匀的带有一定厚度的表层优质层。进入预锻后,限于原工艺状态下设备载荷的限制,下压量只能达到图中所表现的截面形状。从图9可知,经过预锻后,与模具接触的坯料上、下表面优质层金属的厚度略有减小,但中性面的形状也基本和截面的外形相当,整个表层优质层的厚度较均匀,中心次优质层的金属未外露。但是,经过终锻后,坯料变形很大,中性面的变化很大,原

均匀分布的表层优质层金属受到很大破坏,最终在连杆轴颈分模面外侧区域主要由优质层金属包裹着,且飞边处的网格压得很密实,而在分模面内侧主要靠内部缺陷较多的次优质层金属填充,原来的表层优质层已移动到连皮、平衡块及飞边等部位。经测量,在内侧的次优质层的宽度大约为 68.9 mm,而连杆轴颈直径要求为 $\phi 90$ mm。显然,经过机加工后,中心的次优质层会外露。另外对于连接平衡块的过渡圆角处由于该处的金属变形大(需向平衡块部位流动),表层的优质层会受到很大的拉伸而变薄,很容易将优质层外移到加工层,从而造成内部缺陷暴露在表面。所以在此工艺状态下连杆轴颈的危险区为连杆轴颈分模面内侧及过渡圆角处。这些地方与曲轴实际出现缺陷的位置吻合。

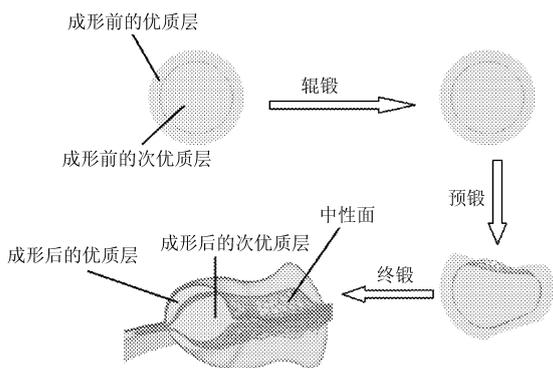


图 9 成形前后中性面在连杆轴颈截面处的变化
Fig. 9 Change of neutral surface in the section of rod journal from start to end

为明确表层优质层和中心次优质层金属形成这种分布状态的原因,需要对成形过程中的速度场进行分析。此曲轴共经过辗锻、预锻和终锻 3 个工步,但经过辗锻和预锻这两道工序后坯料在中性面基本上保持了原来的一种分布状态,而且表层优质层并未发生减薄。所以重点需要关注的是终锻的成形过程。图 10 为终锻初期、中期及后期的速度场分布。

从图 10a 看出,终锻初期,在截面上有一个分流面,分流面左边的金属向轴颈流动,分流面右边的金属向连皮流动,填充平衡块,这样最后用来填充连杆轴颈分模面内侧的金属势必来自内部缺陷较多的心部金属,这也是通常情况下在分模面内侧出现磁痕而在外侧不出现或较少出现磁痕的原因。到了中后期,由于金属向连皮流动的阻力很大,金属从分模面内侧开始整个截面的金属向分模面外侧流动,如图 10b 所示,到了后期这种趋势依旧,如图 10c 所示。这种金属单方向的从分模面内侧流向外侧会造成分模面内侧的优质层金属只能依靠心部次优质层的金属补充,这样不但不能留住优质层,反而加大了次优质层的宽度,而且也很容易造成内部缺陷在此处堆积,金属的这种流动方式也是造成分模面内侧易出现微米级裂纹的重要原因。

综上,通过应用所提出的方法对原工艺的模拟,发现了在分模面内侧附近及过渡圆角处由于主要由心部次优质层金属来填充,带动了内部自由缺陷在此堆积,从而造成在这些区域易产生微米级裂纹。

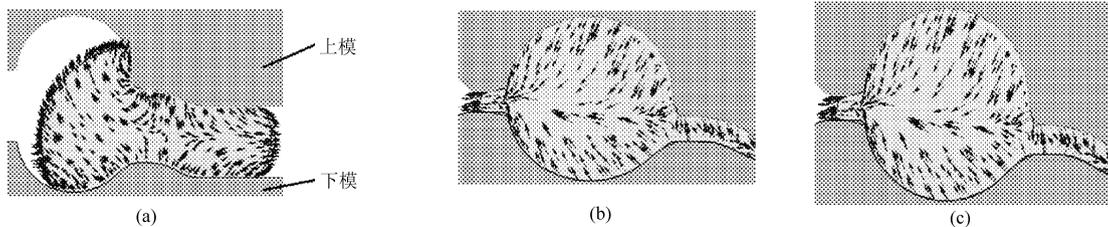


图 10 不同时期的速度场分布
Fig. 10 Velocity field at different phrases
(a) 终锻初期 (b) 终锻中期 (c) 终锻后期

所以需改进工艺,尽量将坯料内部缺陷封闭到锻件心部或隔离到外部,而让表层优质层金属包裹锻件表层,增加优质层的厚度。

2.3 裂纹源附近成分分析

利用电子显微镜对所观察的包含裂纹的界面进行元素面扫描,扫描结果如图 11 所示,图中圆圈处为 S、Mn、Mo 在裂纹及夹杂物聚集,结合在前面所发现的夹杂物(图 4)可以推测夹杂物的化合物是 MnS 和 MoS,并且该夹杂物一部分转移到了锻件的表层,并暴露出来。所以该微米级裂纹为化合物成分为 MnS 和 MoS 的夹杂物聚集在连杆轴颈及过渡圆角

处并沿变形方向延伸而形成的,而这种化合物的来源是原来包覆在中心次优质层金属所含的内部缺陷,和模拟结果相吻合。

3 结论

(1) 根据材料内部自由缺陷(偏析、夹杂等)的分布特点提出将连续的坯料分成表层优质层和中心次优质层的包覆分布结构假设。

(2) 应用有限元软件 Deform 3D 建立了包含中性面的成形曲轴的坯料及成形有限元模型,模拟出变形过程中该中性面的变化状态,发现中心次优质

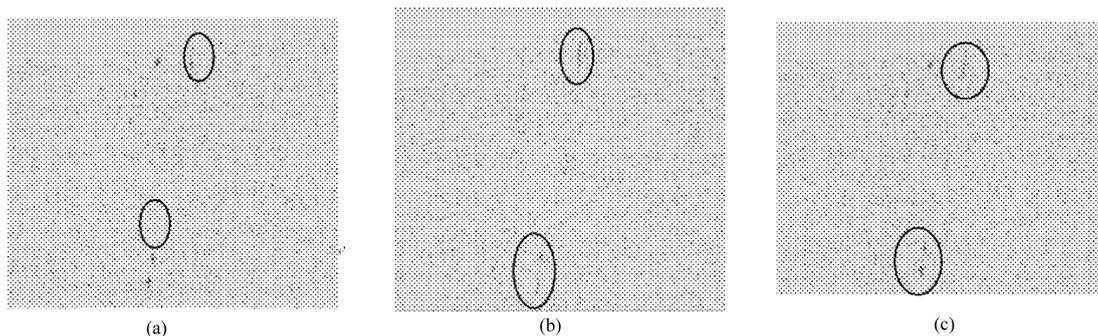


图 11 面扫描结果

Fig. 11 Results of surface scanning

(a) Mn 元素 (b) Mo 元素 (c) S 元素

层金属在杆轴颈分模面附近及过渡圆角处分布并裸露在表面,是易出现缺陷的危险区,且终锻成形过程中连杆轴颈横截面上金属的单方向流动加大内部缺陷在危险区的聚集趋势。

(3)出现的微米级裂纹是由从里层转移到表层的、化合物成分为 MnS 和 MoS 的夹杂物在锻件表层沿变形方向延伸而形成的一种发状纹。

参 考 文 献

- 1 齐卫东. 锻造工艺与模具设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007.
- 2 尹长城,孙玮琪. 含裂纹曲轴的有限元模态析[J]. 现代制造工程,2009,24(1):12~14.
Yin Changcheng, Sun Weiqi. Finite element modal analysis for the crack of crankshaft [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2009,24(1):12~14. (in Chinese)
- 3 董湘怀. 材料加工理论与数值模拟[M]. 北京:高等教育出版社,2005:89~99.
- 4 Druschitz A P, Fitzgerald D C, Hoegfeldt I. Light weight crankshafts[C]. SAE Paper 2006-01-0016, 2006.
- 5 Choi K S, Pan J, Ho S. Effects of roller geometry on contact pressure and residual stress in crankshaft fillet rolling[C]. SAE Paper 2005-01-1908. 2005.
- 6 徐戊娇,王凯庆,周杰,等. 大型全纤维曲轴 TR 锻锻装置失效分析[J]. 重庆大学学报,2009,32(4):396~401.
Xu Wujiao, Wang Kaiqing, Zhou Jie, et al. Failure analysis of upset-bending equipment for a heavy crankshaft with continuous grain flow[J]. Journal of Chongqing University,2009,32(4):396~401. (in Chinese)
- 7 Chun H L, Wang A C, Chen Y S, et al. The coupled thermo-mechanical analysis in the upsetting process by the dynamic FEM[J]. Journal of Material Processing Technology, 2008, 20(1): 37~42.
- 8 刘建生,王仲仁,卢志永. 曲轴 RR 法锻锻成形的数值模拟与缺陷预测[J]. 中国机械工程, 2001, 12(4):429~432.
Liu Jiansheng, Wang Zhongren, Lu Zhiyong. Numerical simulation and defect prediction of RR upsetting process of crankshaft [J]. China Mechanical Engineering, 2001,12(4):429~432. (in Chinese)
- 9 Ghasem D, Sayed M M V, Mostfaf L, et al. Computational and experimental failure analysis of continuous-annealing furnace radiant tubes exposed to excessive temperature[J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15: 445~457.
- 10 韩松涛,郝志勇. 6102B 型柴油机曲轴三维有限元模态分析与试验研究[J]. 农业机械学报,2001,32(4):74~77.
Han Songtao, Hao Zhiyong. Mode analysis of three-dimensional finite element and experimental study on a 6102B diesel engine crank-shaft[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2001,32(4):74~77. (in Chinese)
- 11 尹玲,佟莹. 曲轴锻造过程中的温度场仿真预测[J]. 加工工艺,2009,38(11):99~102.
Yin Ling, Tong Ying. Simulation of temperature field during crankshaft forging process[J]. Hot Working Technology,2009, 38(11):99~102. (in Chinese)
- 12 Maluf, Milan M T, Spinelli D. Effects of surface rolling on fatigue behavior of a pearlitic ductile castiron [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2004,13(2):195~199.
- 13 Chien W Y, Pan J, Close D, et al. Fatigue analysis of crankshaft sections under bending with consideration of residual stresses[J]. International Journal of Fatigue, 2005,27(1):1~19.
- 14 Lee Y L, Morrissey W. Uncertainties of experimental crankshaft fatigue strength assessment[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2001,16(4~5):379~392.
- 15 Lee Y L, Pan J, Hathaway R, et al. Fatigue testing and analysis: theory and practice[M]. USA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.