

轴类锻件失效分析及其对策

邓云

江苏省特种设备安全监督检验研究院江阴分院 江苏江阴 214400

摘要: 轴类锻件广泛应用于特种设备行业和机械行业中,轴类锻件需要自身的刚性,也需要承受在传递过程中产生的扭矩,再加上生产过程经过热成形,锻件内部的缺陷存在敏感性,极易发生失效。首先,详细介绍了两大容易失效的轴类锻件:离心风机轴和曲轴。其次,通过发现的失效模式进行定位解剖、试验分析,发现钢锭中存在球状氧化物与硫化物,夹杂物在锻压时因破坏钢的连续性而产生裂纹,锻件由于心部白点而报废,是由锻后热处理工艺不当所致。最后,通过分析对原材料控制、锻后热处理工艺、使用中的加固保护三方面来控制此失效模式。

关键词: 轴类;锻件;安全性能;时效;失效

Failure analysis and countermeasures of shaft forgings

DENG Yun

Jiangsu Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute Jiangyin Branch, Jiangyin 214400, Jiangsu, China

Abstract: Shaft forgings are widely used in special equipment industry and machinery industry, shaft forgings need their own rigidity, but also need to withstand the torque generated in the transfer process, coupled with the production process through hot forming, forging internal defects to the force gap sensitivity, easy to produce aging. Firstly, two kinds of shaft forgings which are easy to fail are introduced in detail: centrifugal fan shaft and crankshaft. Secondly, it is found that spherical oxides and sulfides exist in the ingot, inclusions destroy the continuity of steel and produce cracks during forging, and the forgings are caused by the white spot scrap at the heart and improper formulation of post-forging heat treatment process. Finally, the failure mode is controlled by the control of raw materials, the post-forging heat treatment process and the reinforcement protection in use.

Keywords: shaft; forging; safety performance; aging; failure

1 序言

特种设备安全直接关系到人民群众生命财产安全,关系经济社会高质量发展,压力容器和压力管道元件就属于特种设备,法兰属于压力管道元件的一种,一般是由锻件机加工而来的,锻件广泛应用于各种机械设备中,其重要性不言而喻,从设计到制造、安装、使用都具有一系列相对比较严格的要

求。锻件是指在高压条件下,将金属材料加热至塑性状态,然后施加压力使其得到塑性变形,从而改变其外形尺寸和组织结构的金属制品^[1]。由于锻件具有密度、强度高,以及耐磨性、耐蚀性好等特点,因此在特种设备和机械装备上大量采用。在制造过程中,需要制定严格的无损检测方法及时机,以保证交付的轴类锻件能满足机械设备的使用规

范和要求。本文主要研究两种容易失效的轴类锻件——离心风机轴和曲轴。

2 离心风机轴和曲轴锻件

2.1 离心风机轴

离心风机是依靠输入的机械能来提高气体压力并排送气体的机械,广泛应用于工厂、矿井、隧道、冷却塔、车辆、船舶、锅炉和工业炉窑等的通风和引风。主轴作为组成离心风机的重要部件之一,其连接着风机叶轮与电动机轴承,一旦出现磨损或弯曲,均会影响到离心风机的运转精度,因此通常会采用耐磨性高且硬度足够的材料^[2]。

离心风机主轴的作用是支撑叶轮旋转和传递动力装置的机械能,主轴必须要有足够的强度和刚度来传递机械能,并支撑叶轮旋转时不发生振动。本文研究的风机轴参数如下:材质为S355J2+N,热处理状态为N+T,规格尺寸如图1所示。各段尺寸分别为 $\phi 250\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、 $\phi 380\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 、 $\phi 795\text{mm} \times 120\text{mm}$ 、 $\phi 380\text{mm} \times 1500\text{mm}$ 、 $\phi 280\text{mm} \times 450\text{mm}$,锻造温度为 $850 \sim 1230^\circ\text{C}$,锻造比为5.8。

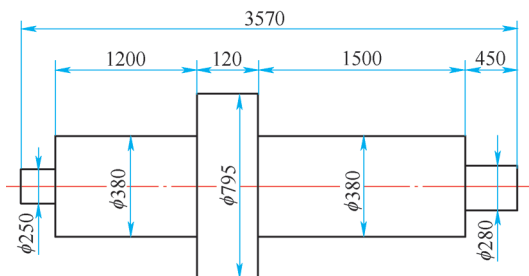


图1 离心风机主轴规格尺寸

2.2 曲轴

曲轴是发动机中非常重要的部件之一,其作用是将活塞的往复直线运动转化为曲轴的圆周旋转运动,将活塞的力传递到输出轴,驱动发动机的其他部件工作,同时还需要承受发动机的扭矩和惯性力,以保证发动机正常运转。

工作时曲轴受气体压力,受力大且复杂,并承受交变载荷的冲击作用,同时又是高速旋转件。曲轴的旋转是发动机的动力源,也是整个机械系统的源动力,因此要求曲轴具有足够的强度和刚度、较高的承载能力,以及良好的耐磨性、润滑性和平衡性^[2]。本文研究的曲轴参数如下:材质为

35CrMoA钢,热处理状态为N+T,最大截面尺寸为 $1070\text{mm} \times 700\text{mm}$,锻造温度为 $850 \sim 1220^\circ\text{C}$,锻造比为4.5。

3 失效模式及解剖分析

3.1 离心风机轴失效模式及解剖分析

(1) 失效模式 内容说明:毛坯超声波检测时,发现工件大法兰中心有密集性条状缺陷,当量在 $\phi 3\text{mm}$ 左右,如图2所示。

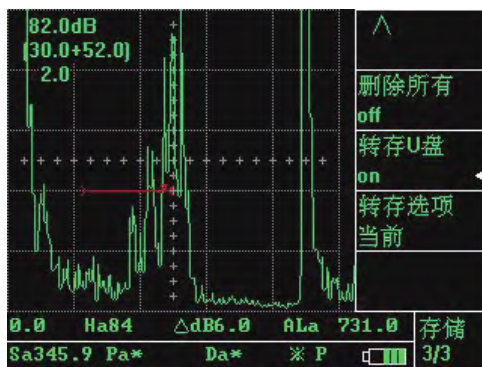


图2 离心风机轴超声波检测缺陷

(2) 定位解剖 过程说明:①将大法兰锯下。②划定缺陷范围,确定缺陷位置(见图3),然后将缺陷面锯下。③纵向、横向分别制样。



图3 缺陷位置

(3) 试验

1) 低倍试验。将缺陷面制成纵向试块和横向试块,试验标准按GB 226—1991《钢的低倍组织及缺陷腐蚀检验法》执行,评级标准按GB/T 1979—2001《结构钢低倍组织缺陷评级图》执行,低倍纵

向缺陷和横向缺陷宏观形貌分别如图4、图5所示。由图4、图5可见，试块有明显的裂纹缺陷，无其他明显缺陷。

2) 高倍试验。试样来源于图4、图5中红色区



图4 低倍纵向缺陷宏观形貌



图5 低倍横向缺陷宏观形貌

域试块。试验方法和评级标准按GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》执行。试验结果：横向球状氧化物1.5级，硫化物有聚集，如图6、图7所示；纵向球状氧化物1.0级，如图8、图9所示。

(4) 数据分析

1) 从低倍试验结果看，超声波检测指示波为裂纹反射指示，且裂纹在试块上非常密集。

2) 在高倍试验中，非金属夹杂物等级为D类1.5级，在横向发现明显的硫化物聚集现象。但是球状氧化物在整个视场内均可见，在裂纹周围尤其密集。

3) 缺陷形貌在横向试块上相对明显，由于大法兰的主变形面在横向，夹杂物的变形也在横向，所以缺陷特征明显。

4) 夹杂物在高温时，融化于钢锭中，并包围晶格。当锻打温度降低时，夹杂物先于组织结晶，脱离晶格，致使晶格之间产生空隙裂纹。球状氧化物

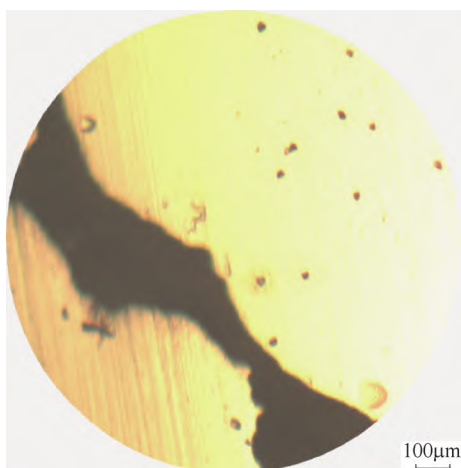


图6 试样1高倍横向缺陷

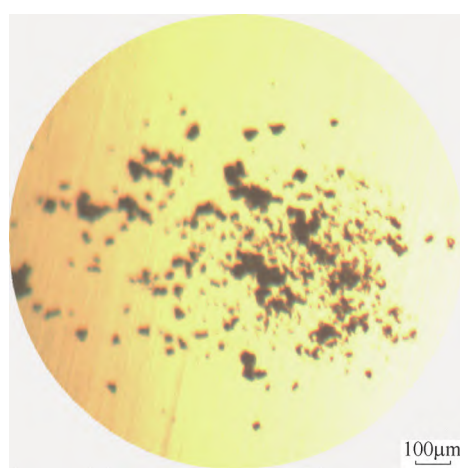


图7 试样2高倍横向缺陷

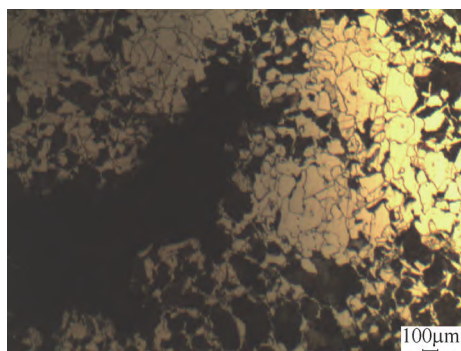


图8 试样3高倍纵向缺陷



图9 试样4高倍纵向缺陷

为脆性氧化物，当采用心部压实法锻打时，心部承受压应力，夹杂物碎裂，四处随机分布。因此在整个视场中均能看见D类缺陷。

(5) 结论 钢锭中存在球状氧化物与硫化物，夹杂物在锻压时因破坏了钢的连续性而产生裂纹，表明本起失效是由于钢锭原因所致。

3.2 曲轴失效模式及解剖分析

(1) 失效模式 内容说明：曲轴机械加工完成后，超声波检测时，发现A、B、C区域位置有密集型缺陷（见图10），当量为 $\phi 2 \sim \phi 3\text{mm}$ ，如图11所示。不符合当量 $\phi 2 \sim \phi 3\text{mm}$ 的缺陷不得超过10个的相关标准规定。

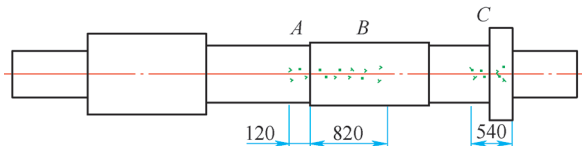


图10 曲轴密集型缺陷示意

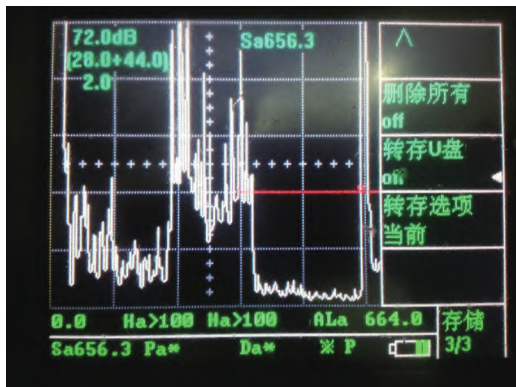


图11 曲轴超声波检测缺陷

(2) 定位解剖 过程说明：①定位缺陷最大当量处。②划定缺陷范围，将缺陷面锯下。③纵向、横向分别制样。缺陷区域和试样制取分别如图12~图15所示。1#试样、2#试样低倍裂纹缺陷形貌分别如图16、图17所示。

(3) 试验

1) 低倍试验。试样来源于图12、图13中的缺陷区域。试验标准按GB 226—1991执行，评级标准按GB/T 1979—2001执行。试验结果：由图16、图17可见，试块存在明显的裂纹缺陷，无其他明显缺陷。

2) 高倍试验。试样来源于图16、图17中裂纹区域试块（见图15）。试验方法和评级标准按GB/T

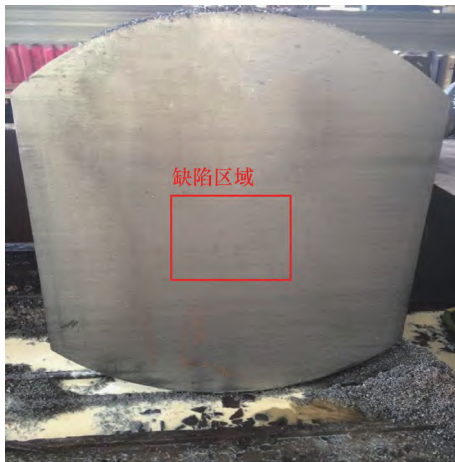


图12 纵向缺陷区域



图13 横向缺陷区域



图14 断口试验试样取样位置



图15 缺陷区域制取高倍检验试样

10561—2005执行。

试验结果：无夹杂物，裂纹系穿晶裂纹，如图

18、图19所示。

3) 断口试验。试样来源于图14中的3[#]试块。试验方法和评级标准按GB/T 1814—1979《钢材断口检验法》执行。

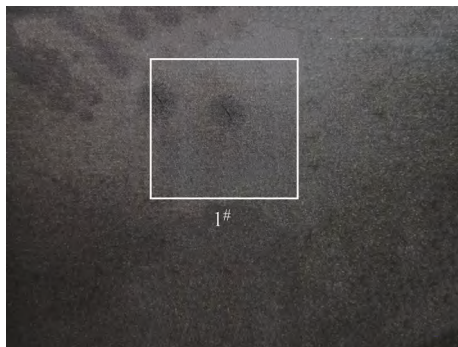


图16 1[#]试样低倍裂纹缺陷

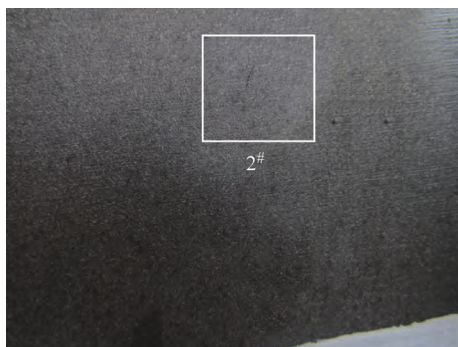


图17 2[#]试样低倍裂纹缺陷

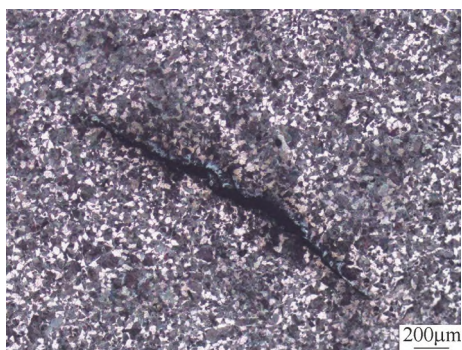


图18 1[#]试样高倍穿晶裂纹

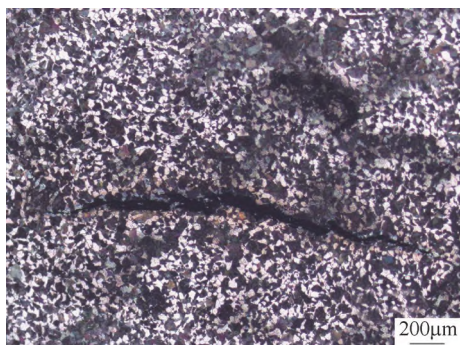


图19 2[#]试样高倍穿晶裂纹

试验结果：在断口处有明显圆形白点，如图20、图21所示。



图20 3[#]-1断口试样白点



图21 3[#]-2断口试样白点

(4) 缺陷特征及成因分析

1) 从低倍试验结果看，超声波检测指示波为裂纹反射显示，且裂纹在横向呈发纹状，在纵向无明显显示。根据断口分析，裂纹在纵向呈点状。心部试样低倍宏观形貌无疏松及偏析^[3]。

2) 高倍试验中，组织致密，无夹杂物。裂纹长度约2mm，形状呈中间宽、两头细，且两头带有向外延伸性。裂纹特征为穿晶，系应力裂纹^[3]。

3) 断口试验中，在拉棒断口处有明显的圆形白色斑点。

4) 上述3个特征，符合白点的基本特性。所谓白点，是钢中的一种不允许存在的缺陷。在锻钢的纵向断口上，呈圆形或椭圆形银白色斑点，在垂直白点的低倍试样上表现为微裂纹，微裂纹有直线的也有锯齿状的。白点的成因有多种假说，目前多数人认可的是“氢-应力”双重作用的结果^[4]。钢锭中的氢是由于熔炼使用的脱氧剂吸收空气中的水分，或石灰烧结质量不佳，含有结晶水较多，因此引起钢中含有过量的氢。当锻后扩氢不够时，氢在晶粒边界及内部显微空隙处富集，形成高压的氢分子，当达到饱和时，会影响金属原子排列，降低铁原子间的结合力，使基体脆化。氢富集处的压力与金属热变形过程中的内应力相互叠加，当内压力超过钢的断裂强度极限时，就会产生微裂纹。微裂纹扩展就产生宏观上的白点脆性断裂^[5]。

5) 结合缺陷部位，锻件共有两处缺陷位置，一处在锻件中部，另一处在大法兰处，这两处位置由于尺寸效应，扩氢速度最慢，导致缺陷在该两处出现。

(5) 结论 锻件因心部白点而报废，主要是由锻后热处理工艺制定不当所致。

4 轴类锻件失效对策

4.1 提高原材料质量

大部分钢锭缺陷,锻造时都可能造成开裂,因此对原材料来讲,一是要提高熔炼钢液纯净度,如限制钢中加铝量,去除钢中氮气或用加钛法抑制AlN析出量;二是钢锭浇注后,应保持钢液缓慢冷却,减少热应力,使缩孔集中在冒口内,以获得致密且高质量的钢锭;三是锻前进行充分的均匀化退火,使晶界析出相充分扩散,从而提高原材料质量。

4.2 改善锻后热处理工艺

改善锻后热处理工艺的关键点是要防止白点报废。白点是氢和附加应力联合作用产生的,使钢产生所谓氢脆,发生脆性断裂。因此,降低钢中的氢含量,减少锻件中的内应力,以及提高钢的纯洁度等,是防止白点产生的最根本措施。改善锻后热处理工艺,如采用重结晶热处理,可以在锻造后进一步处理锻件,以消除或减少白点的产生。

4.3 对轴类锻件进行加固保护

在轴类锻件的使用过程中,由于使用者没有对其进行恰当的保护,或保护措施不当,就容易引起轴类锻件的断裂失效,因此在日常使用过程中,应注意对轴类锻件进行加固保护,在轴类锻件的外围进行必要的防护处理。除此之外,在加工、运输轴

类锻件时,还需注意包装的稳定性,避免轴类锻件在加工运输过程中发生断裂失效。

5 结束语

轴类锻件在保证机械设备的正常运行中发挥了重要作用,正是由于设备日复一日的运行,因此轴类锻件也容易产生失效问题,这对机械设备的安全产生了极大的影响。本文对典型轴类锻件失效问题进行了研究与分析,并针对这些失效问题给出了相应的解决措施,希望能够对轴类锻件在各领域的生产应用与技术发展起到积极的促进作用。

参考文献:

- [1] 陈宇宏. 锻造失效分析及修复[J]. 科技创新与应用, 2016 (26) : 144.
- [2] 陈勇, 周媚. 浅析轴类零件失效问题及其对策[J]. 机械工程, 2015 (8) : 126-127.
- [3] 曹丽红, 程丽杰, 谷强, 等. 钢中非金属夹杂物检验标准ASTME 45—2018a与ISO 4967—2013异同点解析[J]. 模具制造, 2023, 23 (2) : 76-81.
- [4] 李吉东, 任永秀. 铁素体钢中白点缺陷的检验分析[J]. 钢铁, 2017, 52 (12) : 86-90.
- [5] 杨广林, 高东升, 康喜英, 等. 20钢环锻件拉伸试棒脆断原因分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (8) : 257-259.

MW 20240801

(上接第126页)

5 结束语

设计了一种铸铁件消失模铸造液态金属流动性的测试方法,选用宽度20mm、厚度8mm的螺旋形流动性测试条,既可以代表实际生产常见铸件的充填情况,又能够灵敏反映工艺参数变化对流动长度的影响。利用该方法,可以根据企业各自工艺参数条件,测试各种因素对充型能力的影响,从而作为基础数据指导工艺设计及优化。

参考文献:

- [1] LI F J, ZHAO H, REN F Z, et al. Volinsky Simulations and experiments of mould filling in lost foam casting[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2020, 33 (4-5) : 194-200.

- [2] LI F J, HAN J P, YI L W, et al. Empirical calculation on the mold filling speed of lost foam[J]. Transactions of the American Foundry Society, 2013, 121 : 565-568.
- [3] 魏尊杰, 安阁英, 李天晓, 等. 干砂消失模铸造Al-7%Si合金液充型能力的数值计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27 (5) : 123-127.
- [4] 淡瑶. 铝合金变速器壳体消失模铸造浇注系统优化设计[J]. 金属加工 (热加工), 2019 (3) : 79-80.
- [5] 李锋军, 林青松, 张殿德, 等. 铸铁件消失模充型速度的测试及计算[J]. 现代铸铁, 2002 (1) : 21-24.

MW 20241028