

曲轴锻造分模面处磁痕分析

辽宁五一八内燃机配件有限公司 (丹东 118009) 焉永才

模锻曲轴分模面磁痕是一种常见的通过磁粉检测时发现的锻钢成品微小裂纹(见图1)。如果这些磁痕超过一定标准,该曲轴就得报废。由于磁痕经常出现在曲轴锻件分模面处这样的特定部位,呈现一定的规律性,所以一直以来人们以为这种磁痕是由锻造产生的,把解决和控制这种磁痕的目光放在锻造工艺和模具设计上。

笔者从事锻造技术工作十几年来,对此问题进行了深入研究,在实际锻造生产中尝试过各种方法以解决此问题,但始终未能从模锻工艺上发现根本性的有效措施。近年来,通过与科研院所合作,以及对材料、磁粉检测及热处理工艺等涉及曲轴生产技术的了解,发现这种磁痕的出现与钢材质量、锻造成形变化、热处理状态,以及磁粉检测规律均有着密切关系,缺乏对这几方面知识任何一项的了解都会对本文所提到的磁痕问题的认识和理解造成局限性。

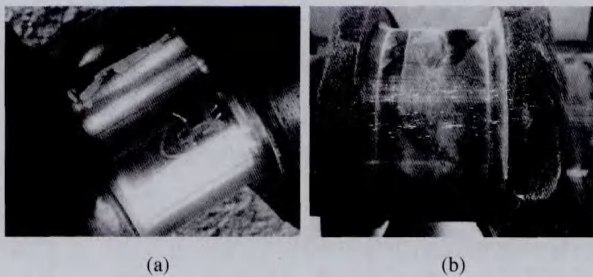


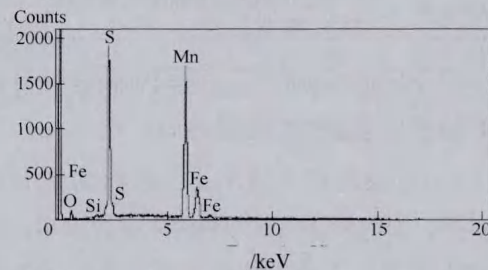
图1 曲轴分模面处磁痕

一、磁痕的成分确定

近年来,通过与科研院所合作,采用先进的检测仪器和分析手段对多种曲轴的分模面磁痕进行了全面系统的检测,其成分检测结果均是以MnS为代表的硫化物等非金属夹杂物,而其中又以硫化物居多(见图2)。



(a)



(b)

图2 磁痕缺陷处的X射线能谱分析

二、材料内部缺陷

我们都知道钢材在冶炼、钢锭铸造过程中,由于多种原因会存在各种缺陷,如疏松、偏析、非金属夹杂物、夹渣等,这些缺陷经过钢锭锻造或轧制后仍会保留下来,对钢制产品的性能造成影响。由于有些缺陷在冶炼过程中无法完全消除,国家(或行业)标准对这些缺陷进行了规定,并对允许存在的非金属夹杂物进行了分类。各企业在采购钢材时需对这些内部缺陷进行明确规定,严格地检验和验收。

MnS是钢中的一种主要硫化物,具有以下特点:①MnS是塑性夹杂物,在高温下塑性很好,能随着基体一起变形。②MnS与钢材基体的结合力弱,稍有变形就与基体分离。③MnS的热膨胀系数比铁大,冷却、淬火后MnS所在处易形成空穴。

三、材料内部缺陷在锻造中的变化

由于大量检测磁痕出现在锻件的分模面部位,

具有规律性，而有限元锻造模拟技术能够提供直观的金属变形状态，所以采用模拟技术可以揭示非金属夹杂物在曲轴锻造过程中的变化。根据非金属夹杂物在钢材中的心部集中情况将模拟成形坯料截面划分为两个区域（见图3），一个是内部缺陷较多区域，另一个是外层金属较致密的区域，通过内部缺陷较多区域在锻造过程变形的情况以了解缺陷的流动和分布规律。

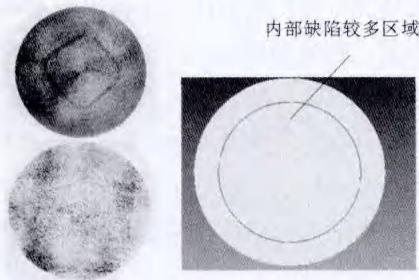


图3 模拟坯料模型分区

从图4模拟变形过程中可看出，材料内部缺陷之所以会在锻件分模面部位出现，是由曲轴产品的形状和模锻工艺的特点决定的，在模锻过程中，多余金属必须经由模具桥部（锻件分模面所在处）流到型腔外形成飞边。因此，分布在材料内的缺陷不可避免地会在基体金属的带动下向飞边流动，这个过程是不可控的。

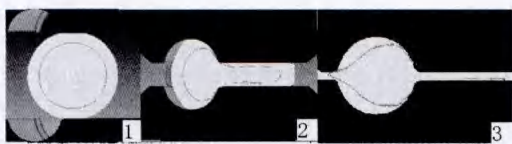


图4 内部缺陷在曲轴连杆轴颈部位变形情况

1—初始变形阶段 2—变形中间阶段 3—变形终止阶段

从图5可以看出模拟结果与实际情况是吻合的。且从变形过程中也可以看出，如果材料是纯金属没有缺陷，就不会出现在分模面部位存在缺陷的情况。从模拟中还可以看出，缺陷在最终产品截面中分布区域大小和状态是受缺陷在原始坯料截面内分布状态决定的。在实际生产中，笔者曾经尝试优化预锻模设计来改善缺陷分布，但未取得效果。这一点也可以从模拟中得到解释，因为无论怎么修改模具，锻件内非金属夹杂物与飞边内夹杂物始终是连续的，也许通过修改模具使某些部位的缺陷分布宽度会变窄些，但是缺陷在锻件分模面部位分布的情况却是无法消除的。

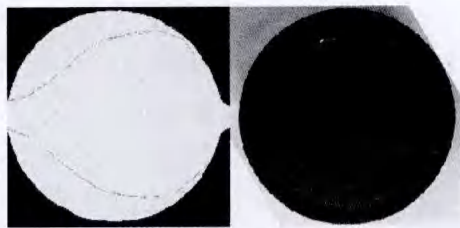


图5 模拟结果与实物对比

四、磁粉检测和分模面磁痕的关系

1. 磁粉检测原理

铁磁性材料工件被磁化后，由于其不连续性使工件表面和近表面的磁感应线发生局部畸变而产生漏磁场，吸附施加在工作表面的磁粉，在合适的光照下形成可见磁痕，从而显示不连续性的位置、大小、形状及严重程度。而漏磁场是铁磁性材料工件被磁化后，在不连续性处或磁路截面变化处，磁感应线离开和进入工件表面而形成的磁场（见图6）。

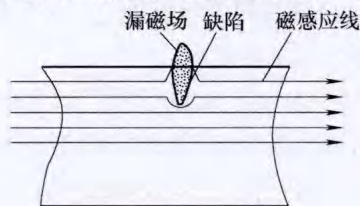


图6 漏磁场示意

2. 影响磁粉检测的因素

(1) 外加磁场强度。

(2) 缺陷位置和形状的影响 ①缺陷埋藏深度的影响。同样的缺陷，位于工件表面时，产生的漏磁场最大；若位于工件近表面，产生的漏磁场显著减小；若位于距工件表面很深的位置，则工件表面几乎没有漏磁场的存在。②缺陷方向的影响。当缺陷垂直于磁场方向时，漏磁场最大，灵敏度最高，随着夹角由 90° 减小，灵敏度下降；当缺陷与磁场方向平行或夹角小于 30° 时，则几乎不产生漏磁场，不能检测出缺陷。③缺陷深宽比的影响。在一定情况下，缺陷的深度与宽度之比大，则相应漏磁场就大，缺陷容易检测出。

(3) 工件表面覆盖层的影响 工件表面的覆盖层影响磁痕显示，漏磁场不能泄漏到覆盖层之上，不能吸附磁粉，无磁痕显示。

(4) 工件材料和状态的影响 ①晶粒度的影响。晶粒度越大，则漏磁场小；晶粒度小，则漏磁

场大。②含碳量的影响。在热处理相近的情况下，随着含碳量的增加，漏磁场增大。③合金元素的影响。随着合金元素的增加，漏磁场增大。

(5) 热处理的影响 淬火可以使漏磁场增大，淬火后随着回火温度的升高，漏磁场相应降低，退火和正火的漏磁场比淬火的要小。马氏体和铁素体呈磁性，渗碳体呈弱磁性，珠光体作为铁素体和渗碳体的混合物，具有一定磁性；奥氏体不呈现磁性。

(6) 磁粉检测液。

3. 缺陷分布与磁场的关系

缺陷分布与磁场的关系，如图7所示。

(1) 曲轴轴颈磁场为圆周方向上的周向磁场。

(2) 金属内部缺陷在锻造时，沿飞边向型腔外流动的方向与轴颈内的周向磁场呈垂直状态，产生漏磁场。

(3) 轴颈内靠近飞边桥部上下两侧的金属内部缺陷，在锻造时顺着模具型腔周向型腔向外流动，方向与周向磁场平行或夹角与周向磁场方向小于 30° ，而没有漏磁场。

(4) 在模具分模面圆角部位，金属缺陷方向随着圆角的变化，与周向磁场夹角由近似平行逐渐转变为垂直，漏磁场由无到有。当模具桥部厚度尺寸和分模面圆角较大时，在分模面处较宽区域内的缺陷与磁场方向夹角大于 30° ，形成漏磁场，即轴颈上磁痕显示区域变宽。



图7 轴颈内磁场和缺陷分布

五、热处理工艺对磁痕的影响

热处理工艺对磁痕是有影响的，在正常情况下，分模面处检测磁痕在表面淬火之前一般不会出现，而往往在表面淬火后检测时发现，原因可能有以下几点。

(1) 一方面，由于经过锻造的高温高压作用，轴颈组织在淬火之前仍然保持着锻造形成的高致密性，内部缺陷与基体金属结合紧密；另一方面，前期的正火和调质等热处理是在保留一定加工余量情况下进行的，外层金属对内层金属的约束作用也使内部组织保持致密性。

(2) 表面淬火前，曲轴一般经过正火或调质

处理（淬火+高温回火），热处理组织以珠光体或索氏体为主，这些组织的铁磁性较马氏体组织弱。

(3) 表面淬火过程中，淬硬层加热温度要达到 900°C 左右，并且快速冷却进行组织转变，在这个过程中，淬硬层材料承受剧烈的温度应力和组织转变应力，转变组织的密度、体积发生变化，之前的组织致密性发生变化，内部缺陷与基体组织的结合状态发生变化，同时表面淬火+低温回火后形成的回火马氏体组织具有比索氏体组织更强的铁磁性，会产生较强的漏磁场，所以磁痕易于显现。笔者曾经做过磁痕深度的试验，即对发现磁痕的轴颈进行磨削，轴颈单边每次磨去 1mm ，磨削5次后，即把淬硬层磨掉后，磁痕就不见了。而且有一个现象，即每次磨削后，磁痕显示的位置和大小是发生变化的。

(4) 由于MnS具有的热膨胀系数比铁大，冷却、淬火后MnS所在处易形成空穴及其与铁结合力弱的物理特点，所以在表面淬火转变和磨削的机械外力作用后，一些MnS分布的地方就会出现微小的开口磁痕。

与表面淬火曲轴相比，渗氮曲轴由于加热温度较低（ $500\sim 600^\circ\text{C}$ ），无剧烈的组织转变，所以，对于同样的内部材料缺陷，磁痕显示的程度要比表面淬火曲轴轻。

六、钢材的制造工艺对磁痕的影响

近年来，由于具有工艺简化、生产效率高及成本较低的优点，钢材的连铸连轧制造工艺被采用的越来越多，但笔者在工作中发现，与传统的铸造钢锭经过锻造或轧制的钢材相比，采用连铸连轧钢材生产的曲轴磁痕显示数量多，且较严重，出现磁痕部位也多，如采用传统工艺制造的钢材锻造出的曲轴，磁痕主要出现在连杆颈的曲拐内侧，而曲拐外侧和主轴颈出现的较少或较轻。采用连铸连轧钢材锻造出的曲轴会在连杆颈的曲拐外侧和主轴颈出现磁痕，严重者会在表面热处理前即能发现（见图8）。笔者分析，这种情况可能是由



图 8

锻压机械安全风险管理的探讨

海安县产品质量监督检验所 (江苏南通 226600) 卢益清 王维高

众所周知, 锻压机械是装备制造业中安全风险较高的一类产品。那么, 如何使产品在使用过程中规避安全风险, 避免在危险状态下可能造成的人身危害或设备损伤, 增强控制风险的能力, 确保锻压机械安全乃是本文所探讨的内容。

锻压机械生产企业应建立产品安全风险防范、预警机制, 推行从产品设计、工艺制造到客户使用全过程的安全风险管理。安全风险管理应包括安全风险评估和安全风险评价。

1. 安全风险的评估

安全风险的评估是指对锻压机械的结构、性能及零部件等在规定条件下和规定时间内(一般指产品的寿命期内), 完成规定功能的概率, 即可靠度。可由下式表述:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt$$

式中 $R(t)$ ——可靠度。系统在 t 时间无故障的概率。用以时间 t 为随机变量的故障分布函数 $R(t)$ 来表示, 或称为累积

故障密度函数;

f ——故障密度分布函数;

F ——随后 t 时间内发生故障的条件概率密度函数, 称为故障率或失效率、危险率。

对锻压机械安全风险的评估, 可靠度是极其重要的评估指标。为此, 企业首先应着力贯彻于产品设计阶段。GB17120《锻压机械 安全技术条件》规定了锻压机械设计、制造及使用方面的强制性安全要求。该标准提出了机器及零部件的设计必须符合GB5083《生产设备 安全卫生设计总则》, GB/T15706.1《机械安全、基本概念与设计通则 第1部分 基本术语、方法学》, 以及GB/T15706.2《机械安全、基本概念与设计通则 第2部分 技术原则与规范》等标准规定的要求。也就是说, 锻压机械产品在初期设计时, 其产品结构、零部件的安全风险评估必须进行可靠度分析, 应用理论力学、材料力学等科学理论作为基础, 运用计算机模拟技术, 对其结构刚度, 零部件的机械强度等安全风险点, 进行各项不能完成规定功能或性能指标、超过规定界限

艺的不同, 材料内部缺陷在钢材内分布范围较大, 又由于制造过程中总体变形程度较小, 缺陷在截面上尺寸相对较大。

七、结语

通过对材料的内部缺陷、检测原理、内部缺陷在锻造过程中流动规律、钢材制造方法, 以及热处理等方面知识的了解和分析, 可以知道成品曲轴表面磁痕是由于材料内部缺陷在锻造过程中随着基体金属一起流动, 分布在特定部位, 并在随后的表面

热处理后清晰地显现出来, 而磁痕显示的轻重和缺陷的元素成分、物理性能、分布范围及尺寸形状有关, 所以要想从根本上对曲轴磁痕问题进行控制, 必须对钢材质量进行控制, 提高钢材的纯净度。

由于材料内部缺陷的种类多样, 分布位置变化, 缺陷尺寸不一, 事实上, 在实际生产中除了在特定部位出现磁痕外, 其他任何部位也都有可能出现, 只不过是在多数情况下, 钢材内部缺陷要多些。钢材加工方式的不同, 对曲轴磁痕也有很大影响。MW (20120724)