内齿圈毛坯开裂分析

孙炳超，袁菲

摘要：对开裂的内齿圈毛坯进行了金相检验和分析。金相观察表明：在主裂纹内有氧化物存在，在主裂纹旁边的次生裂纹内也有氧化物存在，而且次生裂纹与主裂纹并不贯通（相连），根据次生裂纹内的氧化物推断：主裂纹和次生裂纹内的氧化物是锻造时形成，并被压入了金属基体内，热处理淬火时，零件受到的拉应力过大导致开裂。

关键词：开裂；金相；氧化物

某公司生产的内齿圈是减速机上的重要零件，采用42CrMo材质制造。在我公司调质处理结束后交客户进行下道工序加工时发现开裂，该炉共生产40件，其中开裂2件。虽然只是毛坯，但重达8kg/件，损失还是很大的，作业人员担心由个人来赔偿而产生恐惧心理；客户也要求我们查找原因并提出改进措施。因此，找到开裂原因，对于厘清热处理—非热处理的责任，消除作业人员的恐惧心理有重要意义。

1. 概况

发生开裂的零件，其外形轮廓尺寸为：ϕ250mm×ϕ190mm×50mm，热处理技术要求为：调质处理，硬度255～286HBW。发生裂纹的零件如图1所示。裂纹的走向如图2所示。观察图2和实物发现：上端面有3条裂纹，外圆上有3条裂纹，共6条裂纹首尾相连，形成了一个完整的以工件轴心为圆心的裂纹圆（粗略），而且上端面裂纹与外圆上的裂纹间隔分布。零件使

足客户要求，故在生产模数为1.72mm的太阳轮时为了在满足产品图样要求的同时进一步减小热处理变形，将淬火温度降至780℃后，结果出现了前面所述的问题。

分析认为心部硬度低和铁素体超标主要是因为在双相区淬火有未溶的铁素体和先共析铁素体存在导致。碳化物超标主要是淬火温度低，表面碳势又过高，在缓慢降温过程中饱和的碳在奥氏体晶界析出，导致淬火时碳化物超标。

为此，我们制订了二次淬火工艺（见图6）重新试验，结果有效硬化层超标主要是，因为二次淬火850℃增加了1h的保温时间，超标自在情理之中。但碳化物超标比一次淬火时好了许多，为什么呢？我们认为是因为850℃保温时间短、温度低，一次淬火析出的碳化物来不及完全溶解，导致二次淬火后碳化物仍然残留而超标。另外，还有粗大的碳化物比细小的碳化物要难溶，粒状碳化物比片状碳化物难溶，所以渗碳后过共析的部分加热温度即使高于Acm，组织中也可以存在未溶的碳化物。对于心部铁素体超标，我们认为是因为工件模数太小，淬火温度较低，出炉淬火过程中，中间运行时间过长，在淬火之前降温过多导致心部温度进入双相区所致。

经过此次生产，我们认为小模数渗碳淬火产品，淬火温度的控制应谨慎，不能一味地为满足心部硬度而降低淬火温度，一定要考虑小模数产品出炉过程中由于结构的原因降温过快对心部硬度和组织的影响。

作者简介：张同保，江苏汇九齿轮有限公司热处理部。

MW 20170708

用的热处理工艺如图3所示。经图3所示工艺处理后，开裂零件的最终硬度为281～286HBW，符合要求，但偏上限。*A*处裂纹深度达18mm。*B*处裂纹深度达17mm，宽度达0.2mm。内齿圈的工艺路线为：下料→锻造（镦粗→冲孔→扩孔）→粗加工→调质→精加工→热处理→磨齿。

2. 分析

（1）工艺分析　内齿圈的淬火温度为850℃，符合文献[1]、[2]推荐的淬火温度，无可厚非。对于厚度为30mm的工件来说，120min的保温时间还是可以的。42CrMo钢的w_C约为0.42%，工艺中碳势设置为C_P0.50%，略有渗碳（增碳）的嫌疑，从理论上说，设置成C_P0.42%最好。两者相差太小，也几乎不能渗碳，更不会脱碳，因此碳势的设置也没问题。由于使用的是KR228快速淬火油，*H*=100，又是高速搅拌，应该说冷却效果可以，但一般认为在80℃以下，油温随温度的升高，冷却效果是增大的[3]。主要原因是：随着温度的提高，油的黏度降低了，流动性增加了。因此，如果把油温设置成70℃会更好。从工件的最终硬度上（281～286HBW）看，回火温度提高到630℃或640℃更好，150min的回火时间也是足够的。

综上所述，零件热处理工艺虽有不足，但都微不足道，不会造成零件开裂。

（2）金相分析　沿图1中*A*、*B*处切割，切割面垂直裂纹走向，试样厚度约10mm，其中*A*处裂纹发生在尖角（台阶）处；*B*处裂纹在上端面而且是整个闭合裂纹的最宽处。*A*处的裂纹可能存在应力集中；而*B*处裂纹则可能受到的拉应力最大。*A*处裂纹的金相组织如图4所示。*B*处裂纹的金相组织如图5、图6所示。

从图4可看出：在主裂纹旁边有很多孔洞，有的孔洞内存在灰色氧化物，有的孔洞没有；且有氧化物的那个孔洞周围没有明显的脱碳层，与主裂纹也未贯通，这说明：裂纹在锻造时已经形成，氧化物是在锻造时被压入基体内的，压入后由于反复锻造导致在压入处裂纹又闭合了，氧化物附近的基体接触不到空气，没有形成脱碳层。实测了氧化物的长度50~60μm。而图5、图6均显示在裂纹内有氧化物，而且在裂纹两侧有轻微的白色脱碳层，这说明：裂纹高温时在空气中的裸露时间较长，不但形成了氧化物而且形成了轻微的脱碳。

通过图4~图6的照片，基本

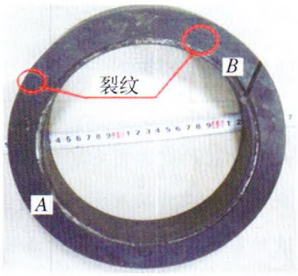

图1　内齿圈宏观裂纹

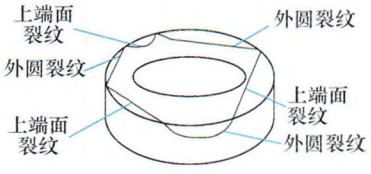

图2　裂纹走向

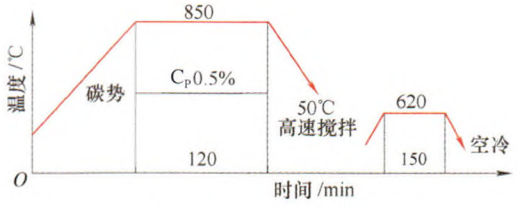

图3　内齿圈的热处理工艺

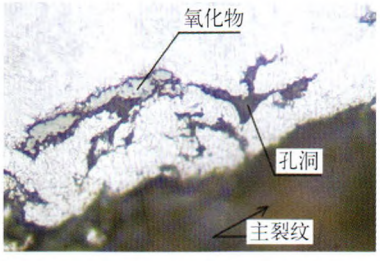

图4　裂纹旁边的孔洞和氧化物

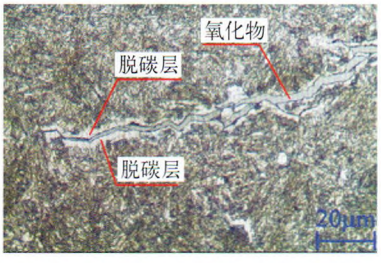

图5　裂纹末端内的氧化物及两侧的脱碳

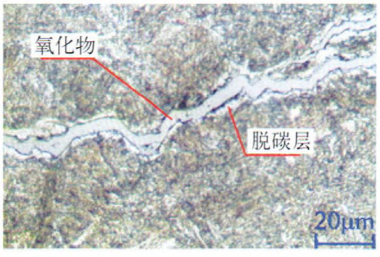

图6　裂纹中段内的氧化物及两侧的脱碳

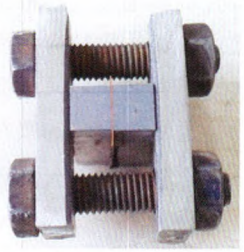
图7　夹持试样

可以认定：裂纹是在锻造时形成的。但是，再次观察图3，发现内齿圈的回火温度为620℃，在这样高的温度下回火，如没有氮气保护也会产生氧化，调查了作业人员，据作业人员反映，当时回火时，确实没有通氮气。这样，如果在淬火时形成裂纹，回火时裂纹内形成氧化物或者裂纹两侧形成脱碳层，也是符合常理的，那样根据图5、图6来认定裂纹是锻造形成的就完全错误，因此，有必要对回火过程中产生的氧化和脱碳（如果有）进行验证。

（3）回火造成的氧化、脱碳验证　使用金相试样切割剩下的部分作为验证用试样，确保了试样的材质与本文所述材质相同，大小为29mm×21mm×10mm，放在回火炉中回火，回火工艺与图3相同。回火前将试样两端面在砂纸上充分磨平，露出钢的本色为止，这样能够保证如果有氧化皮肯定是回火形成的。回火结束后，将试样沿宽度方向的中间切割，将两块试样背靠背且中间放一铜片并夹紧，做成夹持试样，如图7所示。这样能够确保试样表面的氧化皮在制样过程中不会脱落，从而观察到真实的表面氧化、脱碳情况。试样经回火后表面氧化状况如图8、图9所示。图8的放大倍数较低，能够看出铜片两侧均有薄薄的一层氧化皮，但是没有脱碳层。图9是铜片一侧的高倍放大图，从图9可看出，试样表面的氧化皮均匀一致，厚约12μm。也能够清晰地看出：试样表面只有氧化皮而没有脱碳层。因此图5、图6中的脱碳层肯定不是回火造成的。

（4）综合分析　内齿圈在热处理时，使用的设备为可控气氛渗碳炉，型号为SHQB15，该设备滴注甲醇作为载气，通入丙烷作为富化气。甲醇在高温下裂解为CO和H_2，靠CO和H_2的保护，工件是不会形成氧化和脱碳的，图9照片表明：在620℃回火，不进行保护的情况下只会形成氧化不会形成脱碳。因此，图5、图6照片中的氧化物和脱碳层必是锻造中形成的，前已述及，该齿圈经过镦粗→冲孔→扩孔三个环节，至于是哪一个环节形成，不得而知。但是根据该裂纹首尾相连的特点，笔者认为：缺陷发生在冲孔环节。冲孔时，将氧化物压入基体内，而且分布较均匀，扩孔时氧化物被辗长，仍然分布在圆环上，形成了以工件轴心为圆心的同心圆（粗略），作为锻造缺陷被保留在工件中，为后续的热处理种下了祸根。

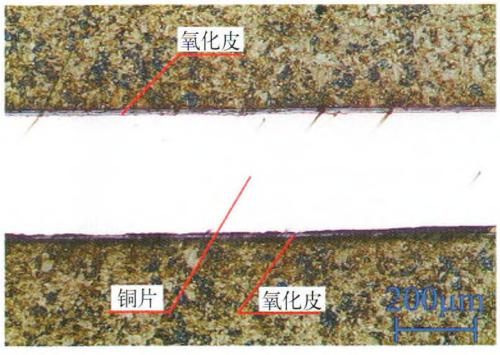

图8　回火试样铜片两侧的表面状况

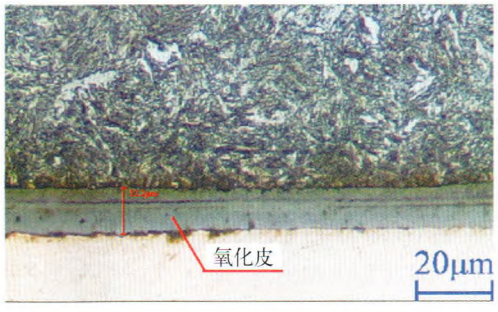

图9　回火试样表面的氧化皮

3. 结语

本文所述内齿圈的开裂是在锻造中将氧化物压入基体内，在扩孔时被拉长，淬火时拉应力过大，在该薄弱环节引发的开裂，与热处理无关。

参考文献

[1] 中国机械工程学会热处理学会.热处理手册[M].4版.北京：机械工业出版社，2008：570.

[2] 樊东黎.热处理技术数据手册[M].北京：机械工业出版社，2000：203.

[3] 安运铮.热处理工艺学[M].北京：机械工业出版社，1982：93.

作者简介：孙炳超、袁菲，苏州贺依特汽车零部件制造有限公司。

MW 20170526