

减速机行星齿轮的断齿分析

王秀萍

常州天山重工机械有限公司 江苏常州 213000

摘要：通过对断齿失效零件的分析，确定了断齿失效的主要原因是轮齿次表面组织与心部组织局部粗大，晶粒度存在混晶。针对混晶产生的原因，提出了相应地改进措施。

关键词：断齿；混晶；组织粗大；失效分析

某减速机行星齿轮在使用中出现断齿事故，该行星齿轮的材质为20MnCr5，热处理工艺为渗碳+淬火+回火。本文运用金相检验等方法综合分析行星齿轮失效断齿的原因，并提出预防改进措施。

1 理化检验

1.1 断口形貌

(1) 宏观形貌 该行星齿轮的失效形式主要为一个轮齿沿着齿根完全断裂，另外在断裂轮齿附近有两轮齿的齿顶出现小块崩裂现象，这可能是断裂轮齿失效后挤压碰撞造成的。失效行星齿轮宏观形貌如图1所示。其余轮齿表面均完好，接触区磨损正常，没有明显的机械加工缺陷。检查齿面、齿根，未发现明显的机械加工缺陷，齿根未见凸台，齿部表面粗糙度符合技术要求。

(2) 断口形貌特征及断裂模式 经观察，失效轮齿沿齿根部脆断，断口宏观上没有裂纹源，断口附近无明显的变形，断面结构较粗，由此可见，该断裂模式为一次性快速断裂，而非疲劳断裂。断口

宏观形貌如图2所示。



图1 行星齿轮宏观形貌

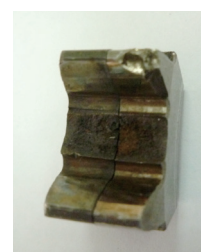


图2 断口宏观形貌

1.2 磁粉检测

对失效行星齿轮进行磁粉检测，在其工作面与非工作面区域均未发现裂纹。

1.3 原材料质量检测

(1) 化学成分 原材料为20MnCr5，检测结果见表1。根据标准DIN EN 10084—2008《渗碳钢技术交货条件》要求及允许偏差， w_{Mn} 比要求低0.233%，其余元素符合要求。

表1 行星齿轮本体化学成分（质量分数）

(%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
要求值	0.17~0.22	≤0.40	1.10~1.40	≤0.025	≤0.035	1.00~1.30	—	—
允许偏差	±0.02	—	±0.05	+0.005	+0.005	±0.05	—	—
实测值	0.231	0.292	0.862	0.0091	0.0138	1.16	0.262	0.0404

(2) 非金属夹杂物 根据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》标准对非金属夹杂物进行检测与评定，结果见表2和图3。

表2 非金属夹杂物检测结果

(级)

A类		B类		C类		D类		DS类
细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	
1.0	0	0	0	0.5	0	0.5	0.5	0

1.4 热处理质量检测

截取断裂轮齿附近3连齿，沿齿宽方向中间切开作为检测面，如图4所示。

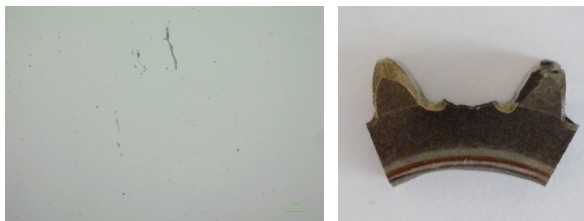
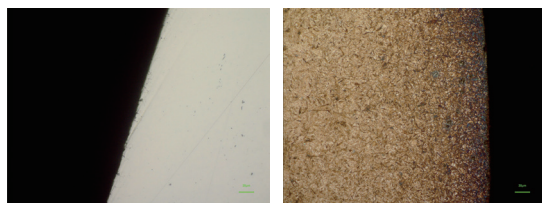


图3 非金属夹杂物 (500×) 图4 本体截取样品形貌

(1) 表面组织 本体截取样品的检测面，经磨制抛光后检测，节圆处因已磨齿而无晶界内氧化，齿根处晶界内氧化为12μm，如图5a所示。用4%硝酸酒精溶液腐蚀后，按照JB/T 6141.3—1992《重载齿轮 渗碳金相检验》检测表面金相组织，结果见表3，金相组织如图5b、图5c所示。

表3 表面组织检测结果

检测处	非马氏体组织深度/μm	碳化物级别/级	马氏体级别/级	残留奥氏体含量 (%)
节圆	—	1	2	<8
齿根	16	1	2	<8



a) 齿根内氧化

b) 节圆表面组织



c) 齿根表面组织

图5 本体金相组织 (500×)

从以上检测结果可以看出，失效行星齿轮的表面热处理质量较好，没有异常。但是次表面马氏体组织比表面粗大，马氏体针局部较长，如图6所示。



a) 节圆

b) 齿根

图6 次表面组织 (500×)

(2) 硬化层深检测 该行星齿轮的法向模数 m_n 为3，按AGMA 2001防止弯曲失效的最小硬化层深度公式 $t_{\min}=0.188m_n^{0.86105}$ (单位: mm) 计算，得出防止该行星齿轮弯曲失效的最小硬化层深度为0.484mm，在断齿相邻工作面节圆处测得硬化层深度为0.84mm，齿根0.83mm，硬化层检测结果见表4。由以上数据可以看出，失效齿轮硬化层深符合使用要求。

表4 硬化层检测结果

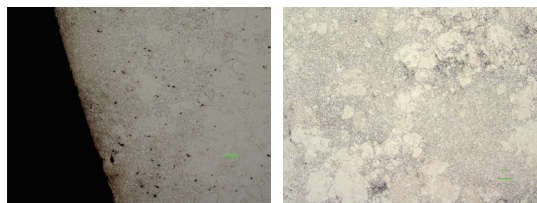
距表面距离/mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
节圆硬化层 HV1	769	756	737	693	662	642	606	562	534	521
齿根硬化层 HV1	759	744	712	679	659	625	594	561	525	512

(3) 心部组织及硬度检测 失效齿轮的心部组织为板条马氏体，板条马氏体束比较粗大，如图7所示。心部硬度为41~43HRC，检测位置为轮齿的中心线与齿根圆相交处，因此可以推断出其心部抗拉强度较高。仅从力学性能分析，该行星齿轮不存在过载断齿的可能。



图7 心部组织 (500×)

(4) 实际晶粒度检测 经过饱和苦味酸水溶液浸蚀后，按照标准GB/T 6394—2002《金属平均晶粒度测定方法》对齿轮实际晶粒度进行检测，表面晶粒度为9.5级，次表面及心部为2.0~9.5级，出现混晶，如图8所示。



a) 表面晶粒度 (200×)

b) 心部晶粒度 (100×)

图8 晶粒度

1.5 残余应力检测

对失效齿轮的齿面及齿根进行残余应力检测，以判定是否因为残余拉应力，与外加工作应力叠加，加大齿根的应力峰值而导致轮齿的早期失效。

表5为残余应力检测结果。

表5 残余应力检测结果 (MPa)

部位	断裂轮齿左齿根	断裂轮齿右齿根	完好轮齿的齿根	断裂轮齿相邻左齿面	断裂轮齿相邻右齿面	完好齿面
残余应力值	-160	-127	-141	-591	-555	-1307

1.6 齿轮啮合状况

对失效齿轮的工作面进行观察，接触痕迹光滑，啮合状况良好，没有点蚀和剥落等异常情况。

2 结果分析与讨论

(1) 磁粉检测 行星齿轮工作面与非工作面区域均未发现裂纹，说明此次断齿事故不是因表面裂纹形成而导致的疲劳断裂。

(2) 原材料质量 化学成分中锰含量低于要求值，会降低材料的淬透性，从而影响热处理层深，但该轮齿热处理后硬化层深满足要求，故轮齿的断裂与此无直接关系。

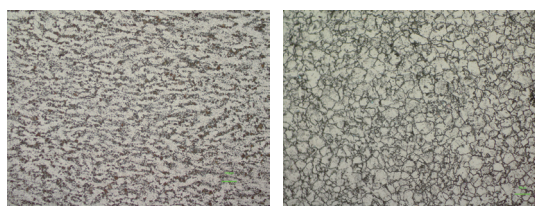
非金属夹杂物A类硫化物相对较多，且局部集中，夹杂物的存在破坏了金属基体的连续性，对强度影响较小，但对钢的韧性危害较大，会使韧性降低。夹杂物的存在易造成应力集中，促进疲劳裂纹的产生，并在一定条件下扩展，从而加速疲劳破坏的过程^[1]。由于该断裂模式为一次性快速断裂，而非疲劳断裂，所以此次断齿与非金属夹杂物无直接关系，但会存在潜在失效风险。

(3) 热处理质量 失效行星齿轮的表面热处理质量较好，没有异常。但是次表面和心部马氏体组织局部较粗大，马氏体针较长，马氏体粗大容易在次生及初生马氏体间形成微裂纹，降低表面冲击韧度。

齿轮次表面及心部实际晶粒度为2.0~9.5级，出现混晶，这与局部马氏体粗大相符。混晶的存在大大降低了齿轮的强韧性，一旦遇到强烈冲击，将出现瞬时断裂，从而使齿轮早期失效^[2]。

为了寻找混晶产生的原因，先将断齿混晶试块进行860℃保温2h后空冷，正火后得到的组织为较均匀的铁素体+珠光体的平衡组织（见图9a）；然后加热到930℃保温5h水淬，用饱和苦味酸水溶液腐蚀后晶粒度8.5级（见图9b），说明钢锭为本质细晶粒钢。由此说明，混晶的产生是因钢锭锻造完成后未进行细化晶粒的正火或正火不充分导致产品热处理后组织遗传而造成的。锻造后正火可细化晶粒，获

得比较均匀的组织 and 性能，不仅可为后续热处理工艺提供适宜的组织状态，还可消除粗大组织等某些热处理缺陷^[3]。因此，为了改善金属材料的切削加工性能、热处理工艺性能，消除某些缺陷，建议进行充分适宜的正火处理。



a) 正火组织 (100×) b) 晶粒度 (500×)

图9 断齿混晶试块金相组织

(4) 应力角度 从应力角度分析，完好轮齿齿面的残余压应力比断裂轮齿相邻齿面高出700MPa，这可能是因断裂轮齿在失效时碰撞相邻轮齿齿面造成的。完好轮齿齿根是压应力，与断裂轮齿左右齿根数据差不多，不存在拉应力与外加工应力叠加而导致断齿的情况。但是，该行星齿轮齿根的残余压应力较小，为断裂事故提供了一个不利条件，使齿轮失效的概率大大提高。

(5) 齿轮啮合状况 齿轮啮合状况良好，说明无偏载、啮合接触面积不足等啮合失效特征。

3 结论及改进措施

1) 该行星齿轮的断齿是因轮齿次表面组织与心部组织粗大，晶粒度存在混晶，轮齿啮合遇到冲击而产生的一次性快速断裂失效。

2) 化学成分与非金属夹杂物存在一些不足，虽非此次断齿事故直接原因，但会成为潜在失效原因。因此，对原材料的成分和非金属夹杂物在冶炼过程需钢厂严格控制。

3) 该行星齿轮齿根的残余压应力较小，这为断裂事故提供了一个不利条件，使齿轮失效的概率大大提高。因此，关键受力产品在热处理后建议用强喷手段增加表面压应力。

4) 混晶是钢材一种较严重的内部缺陷，锻造后需采用适宜的正火工艺来细化晶粒，消除组织遗

高合金钢的预处理方式

郝丰林¹, 刘小丹¹, 孔旭红¹, 蒋勇², 余国增²

1. 江苏双环齿轮有限公司 江苏淮安 223200

2. 苏州工业园区久禾工业炉有限公司 江苏苏州 215021

摘要: 通过对高合金钢等温退火的了解, 设计了网带式等温退火炉, 解决了后桥齿轮毛坯普通正火和等温正火的预处理极限要求。

关键词: 等温退火; 等温温度; 退火炉

1 序言

随着汽车工业的发展, 对汽车齿轮质量的要求越来越高, 齿轮服役条件极其苛刻, 对齿轮材料的性能要求是高的弯曲疲劳强度、接触疲劳强度和耐磨性, 较高的强度和韧性, 以及较好的热处理工艺性能。齿轮渗碳钢主要有CrMn系、CrMo系、CrMnTi系、CrNiMo系和CrNi系钢等, 对于汽车变速器齿轮、后桥齿轮, 根据其性能和失效分析得出, 普通的CrMo系、MnCr系、CrMnTi系钢达不到技术要求, 需采用性能更好的CrNiMo系钢。CrNiMo系钢合金元素含量略多, 如18CrNiMo7-6钢、17CrNiMo6钢、19CrNiMo7-6钢等, 加入了Mo、Ni等晶界强化合金元素, 以提高轮齿强度和韧性, 特别是渗碳层韧性, 从而增强齿轮的疲劳强度和过载能力。

齿轮材料的技术指标主要有: 化学成分、力学性能、淬透性、晶粒度和表面质量等。铬(Cr)是最常用的一种合金元素, 它能提高钢的淬透性并有二次硬化作用; 在渗碳钢中, 铬能形成含铬碳化物, 从而提高齿轮表面耐磨性。镍(Ni)也是一种常用的强化元素, 它在钢中强化铁素体并细化珠光体, 总的效果是提高强度, 对塑性的影响不显著;

传, 达到消除混晶及晶粒粗大的问题。

5) 为了加强锻件质量控制, 需对正火后的组织和晶粒度进行检测。

参考文献:

[1] 廖景娱. 金属构件失效分析[M]. 北京: 化学工业出版社

社, 2003: 18-19.

镍在提高钢的强度的同时, 对钢的韧性、塑性以及工艺性能的损害较其他合金元素影响小。钼(Mo)在渗碳钢中能提高淬透性和热强性, 防止回火脆性, 增加回火抗力, 同时还能在渗碳层中降低碳化物在晶界上形成连续网状的倾向, 减少渗碳层中的残留奥氏体, 相对增加了表面层的耐磨性。

2 19CrNiMo7-6钢常规热处理工艺

对于19CrNiMo7-6钢这类材料, 如采用常规正火, 由于正火后的冷却速度不可控, 金相组织为贝氏体+少量铁素体, 硬度在275HBW左右, 偏高, 再增加一遍高温回火, 硬度在190~230HBW。如采用普通的等温正火后, 易得到先共析铁素体+少量贝氏体组织, 硬度200~230HBW, 偏高, 不过后续的切削加工在这个硬度范围还可以加工。等温正火工艺的不易控制之处在于奥氏体化加热保温后, 要出炉空冷至等温温度附近, 再入等温炉进行等温, 此处空冷温度不易控制, 受季节、气温波动性影响很大。

我公司专业生产齿轮, 主要服务于世界上知名的企业, 不同的企业要求的材料不同, 采用的预处理方式也不尽相同。有两家企业对于后桥齿轮的毛坯组织要求很有代表性, 这两家的材料都是类似于19CrNiMo7-6钢。为了便于表达, 这两家企业分别

[2] 沈文耀. 浅析断齿失效与混晶的产生原因[J]. 电加工工, 2003, 217(4): 11-12.

[3] 夏立芳. 金属热处理工艺学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 25-32.