

# 40Cr钢行星架盲孔台阶纵向裂纹形成原因分析

杨光华

宁波津玖科技有限公司 浙江宁波 315480

**摘要：**采用宏观分析、化学成分分析、金相检测及能谱分析等方法，对40Cr钢行星架盲孔台阶纵向裂纹性质及形成原因进行了分析。结果表明：40Cr钢行星架盲孔台阶纵向裂纹属于淬火裂纹，其产生原因是由于行星架的形状而使其淬火时内外马氏体转变的冷却不等时性，以致盲孔台阶处形成组织应力型的淬火残余应力，呈局部切向拉应力，当局部切向拉应力值大于马氏体的断裂强度时，则发生淬火开裂。

**关键词：**行星架；纵向裂纹；淬火裂纹；不等时性

## Reason analysis of longitudinal cracks on the inter wall of 40Cr steel stuff canister

YANG Guanghua

Ningbo Jinjiu Technology Co., Ltd., Ningbo 315480, Zhejiang, China

**Abstract:** The longitudinal cracks on the blind hole step of 40Cr steel planetary carrier was analyzed by means of macroscopic crack analysis, chemical composition analysis, metallographic examination and energy spectrum analysis. The results show that the longitudinal cracks on the blind hole step of 40Cr steel planetary carrier are quenching cracks. The reason is that the shape of the planetary carrier makes the cooling of the inner and outer martensite transformation non-isochronous, it leads more structure stress at the blind hole step of the planetary carrier, and when the local tangential tensile stress is greater than the fracture strength of martensite, resulting in quenching cracks.

**Keywords:** planetary carrier; longitudinal crack; quenching crack; non-isochronous

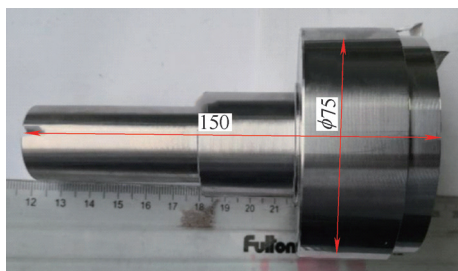
### 1 序言

由于40Cr钢价格便宜、加工性好，具有很高的强度、良好的塑性和韧性，常用于制造汽车传动结构零件，其性能要求工作表面必须具有高的强度和足够的韧性。为了达到这一要求，需将加工成形的行星架进行调质处理，以获得均匀的回火索氏体组织。

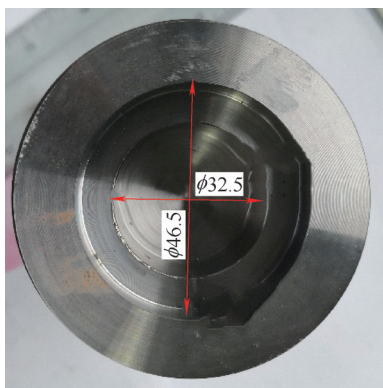
某公司生产的一批行星架经调质处理后，机械加工发现其盲孔 $\phi 46.5\text{mm} \times \phi 32.5\text{mm}$ 台阶处有纵

向裂纹，盲孔深30mm，如图1所示。该行星架的材质为40Cr钢，其加工工序为：下料→锯料→粗加工→热墩→调质→车削，其热处理工艺为盐浴炉淬火温度 $840 \sim 850^\circ\text{C}$ ，保温30min，然后快速放入淬火油中淬火 $3 \sim 4\text{min}$ ，取出后冷炉放入回火台式炉，无保护气氛，回火温度 $500^\circ\text{C}$ ，保温5h出炉。本文从该行星架裂纹形态、材质、组织及热处理工艺等方面分析了裂纹性质及其形成原因，并提出了相应的改进措施。

作者简介：杨光华，本科，主要从事金属材料产品生产和质量分析等工作，E-mail: guang670@126.com。



a) 侧面



b) 正面

图1 样品宏观形貌

## 2 理化检测

### 2.1 宏观检测

该行星架盲孔  $\phi 32.5\text{mm} \times \phi 46.5\text{mm}$  台阶处裂

纹细小，经渗透着色检测后，裂纹宏观形貌如图2所示。

由图2可看出，该行星架盲孔台阶表面可见3条毛细裂纹，较均匀分布在圆周上，裂纹沿内孔轴线分布，长2~4mm，裂纹在台阶棱角处开口粗。

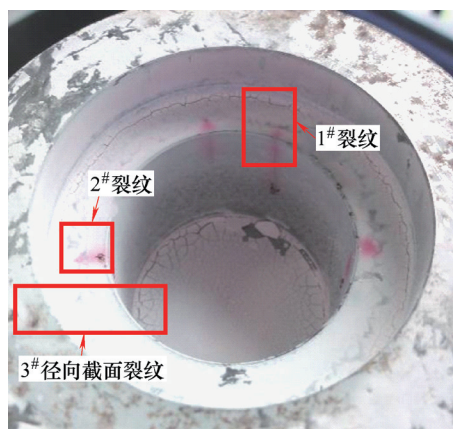


图2 渗透着色后裂纹宏观形貌

### 2.2 化学成分分析

从该开裂的行星架上局部线切割取样进行化学成分分析（见表1），该行星架所用材料的化学成分符合GB/T 3077—2015《合金结构钢》中对40Cr钢的技术要求。

表1 40Cr钢行星架化学成分分析（质量分数） (%)

元素	C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni	Cu	Mo
实测值	0.37	0.004	0.58	0.019	0.22	0.87	0.020	0.040	0.005
标准值	0.37~0.44	$\leq 0.030$	0.50~0.80	$\leq 0.030$	0.17~0.37	0.80~1.10	$\leq 0.30$	$\leq 0.30$	$\leq 0.10$

### 2.3 金相分析

分别从该行星架盲孔台阶上截取1#裂纹、2#裂纹的横截面试样及1#裂纹附近的纵截面试样，以及截取径向3#裂纹试样（见图2）进行金相检测。

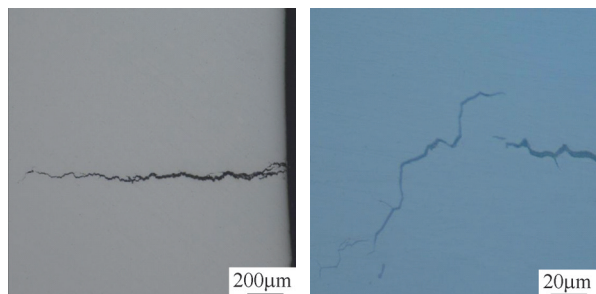
经镶嵌磨抛光后，3#试样截面内存在A类和D类非金属夹杂物，按GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定》评定为A0.5、B0、C0和D1.5，夹杂物较少。

经镶嵌、磨抛后在ZESSIS-AXIO A2M型光学金相显微镜下观察，1#和2#横截面试样中裂纹均基本垂直于盲孔壁，裂纹深度达1.5mm，裂纹较直，呈外宽内尖的楔形裂口，尾端曲折、尖锐，两侧有少

数的微裂纹向基体沿晶扩展，未观察到聚集的夹杂物，裂纹内均伴有灰色的填充物质，如图3、图4所示。

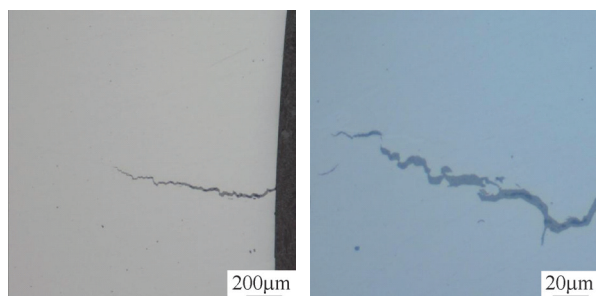
经4%硝酸酒精溶液浸蚀后观察，1#和2#裂纹横截面试样中裂纹开口处至裂纹尖端及盲孔壁表面的显微组织均为回火索氏体，盲孔壁表面及裂纹两侧均无脱碳现象，但裂纹两侧均可见灰色填充物，裂纹尾端有沿晶扩展的特征，如图5、图6所示。1#裂纹附近的纵向截面试样的基体组织无明显带状偏析，如图7所示；3#试样心部显微组织为回火索氏体+少量网状分布的细条状铁素体，如图8所示。





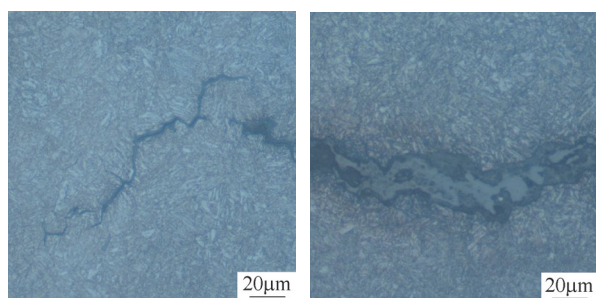
a) 裂纹形貌 b) 裂纹尾部

图3 1#裂纹试样抛光态裂纹微观形貌



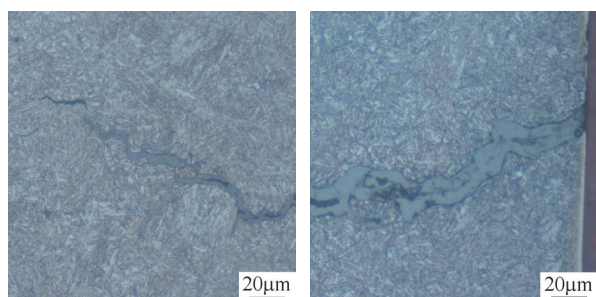
a) 裂纹形貌 b) 裂纹尾部

图4 2#裂纹试样抛光态裂纹微观形貌



a) 裂纹尖端 b) 裂纹开口处表面显微组织

图5 1#裂纹试样浸蚀后裂纹形貌及显微组织



a) 裂纹尖端 b) 裂纹开口处表面显微组织

图6 2#裂纹试样浸蚀后裂纹形貌及显微组织

## 2.4 微观能谱分析

用扫描电子显微镜的能谱分析仪对2#试样中裂纹内灰色填充物进行分析,结果如图9所示。能谱分析结果表明,裂纹开口处和裂纹尖端附近灰色填充物的成分中主要是Fe、O元素。2#试样金相制样过程

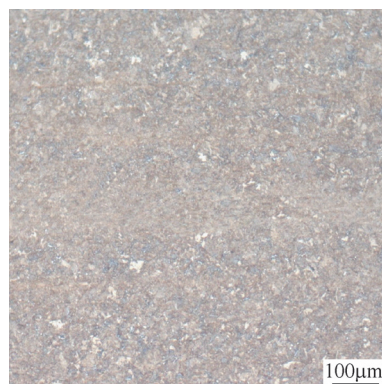


图7 1#裂纹附近的纵向截面显微组织 (100×)

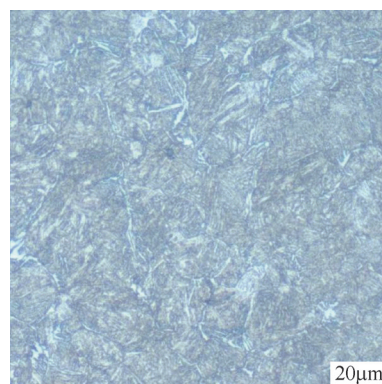
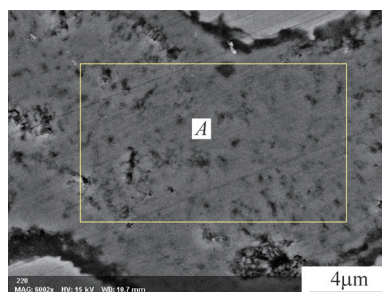
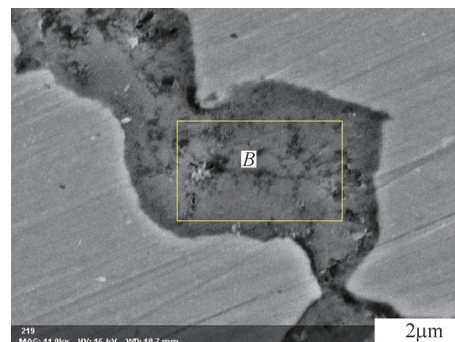


图8 3#试样心部显微组织 (500×)



a) 开口处



b) 裂纹尖端附近

图9 2#试样裂纹内灰色填充物能谱扫描形貌

中粗细砂纸为碳化硅磨粒,其主要成分为Si、C,抛光剂为金刚石喷雾抛光剂,其主要元素是C,这些磨粒为硬质颗粒状;而裂纹中灰色填充物的能谱扫

描结果中，元素Si、C含量低，且裂纹内填充物连续分布、平滑附着在基体上，由此判断裂纹中灰色填充物应不是金相制样过程所带入的砂纸或抛光剂磨

粒。根据灰色填充物中主要元素Fe、O的原子百分比分析结果（见表2、表3），可推测该灰色填充物主要应为铁的氧化物。

表2 裂纹开口处能谱分析结果

元素	原子数	净值	质量分数 (%)	归一化质量分数 (%)	原子分数 (%)	绝对误差 (1sigma, %)	相对误差 (1sigma, %)
C	6	1582	2.68	2.65	7.34	0.56	20.99
O	8	40616	23.62	23.44	48.67	2.86	12.09
Cr	24	392	0.23	0.23	0.15	0.04	17.09
Fe	26	64413	74.25	73.68	43.84	2.22	2.99

表3 裂纹尖端附近能谱分析结果

元素	原子数	净值	质量分数 (%)	归一化质量分数 (%)	原子分数 (%)	绝对误差 (1sigma, %)	相对误差 (1sigma, %)
C	6	1844	3.16	3.09	8.52	0.64	20.11
O	8	39480	23.44	22.87	47.38	2.84	12.12
Si	14	504	0.17	0.16	0.19	0.04	21.99
Cl	17	477	0.15	0.14	0.13	0.03	23.44
Cr	24	369	0.22	0.22	0.14	0.04	17.72
Fe	26	64972	75.36	73.52	43.64	2.25	2.99

### 3 分析与讨论

由上述理化检验结果可知，该行星架所用材料的化学成分符合40Cr钢的技术要求，金相分析显示其非金属夹杂物少，无明显带状偏析，由此可排除原材料对该行星架开裂的影响。

#### 3.1 裂纹形状和热处理工艺

从裂纹宏观形态可看出，该行星架盲孔台阶裂纹深而短，且沿工件轴向分布，由盲孔壁表面向外径向扩展，具有纵向裂纹的特征<sup>[1, 2]</sup>。由此可判定，该行星架盲孔台阶裂纹为纵向裂纹。

从裂纹微观形态可看出，裂纹两侧无脱碳现象，但裂纹内有铁氧化物填充。结合加工工序可初步判断，该行星架盲孔台阶纵向裂纹可能产生于其锻造、调质工序中。如果纵向裂纹产生于锻造过程中，则裂纹会暴露在锻件表面，并会在锻后盐浴淬火加热阶段导致大量盐浴物质渗入裂纹内，而能谱分析结果表明，裂纹内灰色填充物主要为Fe的氧化物，个别区域存在极少量的Cl元素，而无其他盐浴物质渗入。由此可认为，该行星架盲孔台阶纵向裂纹不是产生于锻造过程中，而是产生于调质过程中。金相分析结果显示，裂纹均基本垂直于盲孔壁，裂纹较直，呈外宽内尖的楔形裂口，尾端曲折、尖锐，两侧有少数的微裂纹向基体沿晶扩展，

符合淬火冷却阶段的淬火裂纹特征<sup>[3, 4]</sup>。因此，进一步判断该行星架盲孔台阶纵向裂纹属于淬火裂纹。

#### 3.2 工件结构形状

该零件结构形状中一端头外圆 $\phi 75\text{mm}$ ，盲孔 $\phi 46.5\text{mm} \times \phi 32.5\text{mm}$ ，深30mm，此结构将导致行星架各部位的冷却速度不一致，尤其是盲孔 $\phi 46.5\text{mm} \times \phi 32.5\text{mm}$ 的冷却速度比外壁小。同时， $\phi 46.5\text{mm} \times \phi 32.5\text{mm}$ 盲孔台阶处截面尺寸变化，将产生应力集中，为应力薄弱处。

#### 3.3 裂纹形成机制

众所周知，淬火裂纹均是与其形成扩展方向相垂直的拉应力作用的结果，纵向裂纹是零件在热处理过程中产生的很大内应力（组织应力和热应力）作用的结果。该行星架盲孔台阶裂纹既是纵向裂纹，又是淬火裂纹。行星架淬火过程中马氏体转变依然遵循由表及里逐层进行的规律性。由于40Cr钢淬透性强，在淬火时其内应力大。在开始淬入淬火冷却介质时，由于行星架的结构形状，使得外圆周表面及端面的淬火冷却速度快于盲孔内，产生内外马氏体转变的冷却不等时性现象。外圆周表面及端面处先产生马氏体相变， $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔壁也随即产生马氏体相变，伴随体积膨胀， $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔



壁以下区域限制其膨胀,施加给 $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔壁组织切向压应力。而此时 $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔壁以下至外圆周面的心部仍处于较高温度,心部首先从晶界析出铁素体;继续在淬火冷却介质中冷却, $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔壁以下至外圆周面的心部区域开始沿径向逐渐发生马氏体相变,同时伴随心部体积逐渐膨胀,受到 $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔壁先形成马氏体的限制,必然导致心部体积膨胀所施加给 $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔壁,以组织切向张应力,先是抵消内孔壁形成马氏体所施加的组织切向压应力,并不断增大。

由于 $\phi 46.5\text{mm} \times \phi 32.5\text{mm}$ 盲孔台阶处截面温差较小,冷却速度慢,因而所产生的热应力值小, $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔壁以下至外圆周面的心部体积收缩施加给盲孔壁的切向压应力小,不能抵消心部体积膨胀所施加的组织切向拉应力,这必然使得 $\phi 32.5\text{mm}$ 盲孔壁已形成的组织切向拉应力能极少地消耗而被保留下来,形成组织应力型的淬火残余应力,呈局部切向拉应力;当局部切向拉应力值大于马氏体的断裂强度时,则在应力薄弱的 $\phi 46.5\text{mm} \times \phi 32.5\text{mm}$ 盲孔台阶发生淬火开裂,形成由表及里的纵向裂纹<sup>[5, 6]</sup>。从调质处理实际显微组织可看出,该行星架 $\phi 46.5\text{mm} \times \phi 32.5\text{mm}$ 盲孔台阶处和外圆周表层组织均为保持马氏体位向的回火索氏体,而心部组织为回火索氏体+少量铁素体,进一步证实了该行星架盲孔台阶处的冷却速度快于盲孔内。

一般认为,钢的氧化过程首先是在表面形成离子性氧化物,而氧化膜的生长则是通过膜中氧和铁离子的扩散来进行的<sup>[7, 8]</sup>。该行星架在淬火冷却过程中产生淬火裂纹,其在 $M_s$ 点以下短时间内不会发生氧化现象;而随后伴有淬火裂纹的行星架冷炉放入回火台式炉进行 $500^\circ\text{C} \times 5\text{h}$ 回火,且在回火过程中无保护气氛,热空气中的氧分子渗入裂纹内,与裂纹金属表面开始作用生成极薄的氧化膜;再后,随着长时间持续渗入裂纹内的氧分子被吸附表面后,获得电子而裂解氧离子,并向钢铁表面扩散,而铁离子和电子从钢表面释放并向表面扩散,一旦氧离子和铁离子相遇便生成新的氧化物,氧化膜生长增厚,乃至填充裂纹缝隙。

### 3.4 解决方案及效果

针对行星架在淬火冷却阶段开裂原因,提出了

水-油双液淬火的改进方法,力求高温冷却区内热应力大,低温冷却区内以缓和马氏体转变区域冷却速度,尽量使零件内外同时发生组织转变,使组织应力达到最小值,以避免淬火裂纹的发生。同时加强搅拌,促进盲孔内淬火冷却介质的流动,提高盲孔内冷却速度。结果表明,行星架淬火后再没有开裂,由此可见,造成该行星架盲孔台阶裂纹的主要原因是其淬火时内外马氏体转变的冷却不等时性。

## 4 结束语

1) 根据裂纹的宏观及微观特征形貌,该行星架盲孔台阶裂纹属于纵向裂纹,是在淬火冷却过程中产生的,因此又属于淬火裂纹。

2) 由于行星架的形状,使其淬火时内外马氏体转变的冷却不等时性,以致盲孔台阶处形成组织应力型的淬火残余应力,呈局部切向拉应力,当局部切向拉应力值大于马氏体的断裂强度时,则发生淬火开裂。

3) 行星架在淬火过程中形成裂纹的原因与行星架盲孔等因素有关。建议针对内孔台阶类工件,在热处理淬火方法上应采取相应保护措施防止淬裂。

### 参考文献:

- [1] 刘宗昌. 钢件的淬火开裂及防止方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [2] 王广生. 金属热处理缺陷分析及案例[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 祝国华, 战祥丽. 零件热处理裂纹的分析与对策(一)[J]. 机械工人(热加工), 2004(8): 75-76.
- [4] 樊东黎, 潘建生, 徐跃明, 等. 中国材料工程大典(第15卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 孙盛玉. 普通钢中纵裂形成原因和预防方法[J]. 理化检验(物理分册), 1992(3): 59-64.
- [6] 孙盛玉. 热处理裂纹若干问题的初步探讨[J]. 金属热处理, 2009, 34(10): 109-114.
- [7] 欧阳德刚, 蒋扬虎, 罗安智. 钢氧化特性的研究动态[J]. 工业加热, 2007, 36(6): 8-11.
- [8] 白力静, 梁戈, 李虹燕, 等. 常用中碳钢氧化特性研究[J]. 西安工业学院学报, 2005, 25(5): 460-464.

MW 20240126