行星轮内孔枝晶状花斑研究

翟晶，王曰辉
太原重工股份有限公司齿轮传动分公司　山西太原　030024

摘要：针对行星轮渗碳淬火、内孔磨削后，酸蚀检查时发现内孔表面局部存在枝晶状花斑的情况，对行星轮进行解剖，分别从材料、硬度和金相组织等多个方面进行研究分析，评估枝晶状花斑对零件质量的影响。结果表明：枝晶花斑痕迹与锻件原材料成分偏析引起组织不均匀有直接关系，产生原因与热处理工艺过程无关，深色区和浅色区的马氏体组织级别、显微硬度存在较大的差异，因此建议超过国家标准要求的材料不得使用。

关键词：风电行星轮；枝晶状花斑；硬度；金相组织

Research on dendritic flower spots in the inner holes of planet gears

ZHAI Jing, WANG Yuehui
Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Gear Transmission Sub Company, Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract: In response to the discovery of dendritic flower spots on the surface of the inner hole during acid corrosion inspection after carburizing and quenching of the planetary gear and inner hole grinding, the planetary gear was dissected and analyzed from multiple aspects such as material, hardness, and metallographic structure to evaluate the impact of dendritic flower spots on the quality of the parts. The results showed that the traces of dendritic flower spots were directly related to the uneven structure caused by the segregation of the raw material composition of the forging, and the cause was not related to the quality of the heat treatment. There were significant differences in the martensitic structure level and microhardness between the dark and light areas, and it was not recommended to use those that exceeded the national standard requirements.

Keywords: wind planet gears; dendritic flower spots; hardness; metallographic structure

1　序言

风电齿轮箱是风电机组的核心部件，属于重载齿轮传动装置，因为风机一般安装在山岭、戈壁、山脊及海上等风资源较好或人烟稀少的地区，这些区域交通不便，安装及维护极其不便，所以对风电齿轮箱的可靠性和稳定性提出了更高的要求。国内相关科研工作者对18CrNiMo7-6钢的组织、冲击性能、钢锭凝固组织优化以及心部硬度影响因素等进行了研究[1-6]，王飞[7]对18CrNiMo7-6钢锻件机械加工面“花纹”进行了研究。行星轮是风电齿轮箱的核心零部件，其质量直接影响齿轮箱寿命，随着轻量化设计的不断推进，行星轮的安全裕度越来

第一作者：翟晶，高级工程师，主要从事风电齿轮箱工艺研究工作，E-mail：15203518652@163.com。

越小，对材料、热处理和加工质量提出了更高要求。本文主要对行星轮内孔局部出现的枝晶状花斑进行解剖分析研究。

2　行星轮内孔枝晶状花斑情况

行星轮设计寿命20年，计算应力1100MPa，许用应力1500MPa，材料选用18CrNiMo7-6低碳合金钢，需满足GB/T 3480.5—2021《直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第5部分：材料的强度和质量》中的ME级要求，行星轮内孔为轴承辊道面，采用淬硬设计，内孔及齿面硬度为59～62HRC。

行星轮工艺流程一般为：铸锭→毛坯锻造＋正火→UT检测→半精车加工→滚齿→倒角→渗碳淬火→精车加工→UT检测→立磨→酸蚀检查→磨齿→酸蚀检查→MT检测。在立磨后进行酸蚀检查时发现内孔存在枝晶状花斑，其产生位置如图1所示，形貌如图2所示，正常状态如图3所示。

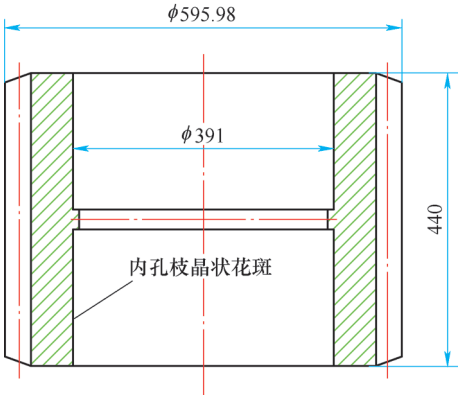

图1　行星轮（模数16）内孔枝晶状花斑产生位置

图2　内孔枝晶状花斑形貌

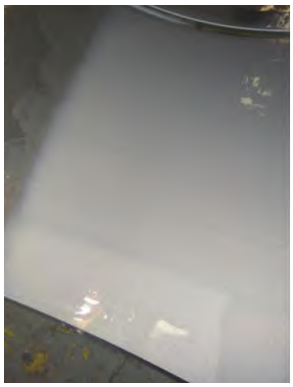

图3　内孔正常

3　内孔枝晶状花斑异常形态产生原因排查

为了排查枝晶状花斑痕迹是否与渗碳淬火有关，随机抽取6件未完成加工的行星轮（零件编号为1#、2#、3#、4#、5#、6#）进行试验，分别在渗碳淬火前和渗碳淬火后，按GB/T 17879—2023《齿轮磨削后表面回火的化学浸蚀检验》对零件内孔表面进行清洗→脱脂→硝酸酸洗→盐酸脱色→碱溶液中和→目视检测（以下简称酸蚀检查）。试验结果表明，随机抽取的6件行星轮内孔在渗碳淬火前后、精加工后均存在枝晶状或花斑状痕迹。

3.1　1#、2#行星轮对比检查

从6件试件中随机抽取零件编号为1#和2#的行星轮内孔在渗碳淬火前、精加工完成后的表面进行酸蚀检查对比。

（1）1#行星轮　在渗碳淬火前、精加工完成后，对1#行星轮表面进行酸蚀检查的情况对比如图4、图5所示。

图4　1#行星轮渗碳淬火前

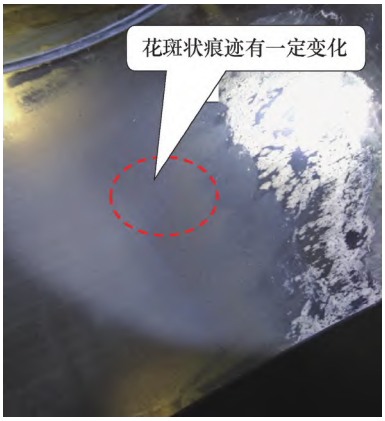

图5　1#行星轮精加工后

（2）2#行星轮　在渗碳淬火前、精加工完成后，对2#行星轮表面进行酸蚀检查的情况对比如图6、图7所示。

3.2　3#、4#行星轮对比检查

在上述6件行星轮中取编号为3#、4#行星轮在渗

图6　2#行星轮渗碳淬火前

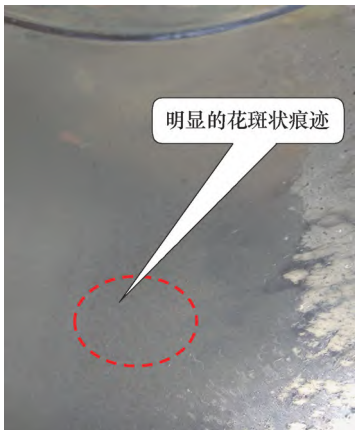

图7　2#行星轮精加工后

碳淬火后分别按内孔不车削加工，仅磨削去除直径上余量0.5mm，与内孔精加工至成品即直径上去除约2mm余量进行酸蚀检查对比。

（1）3#行星轮　在渗碳淬火前、内孔磨削0.5mm、内孔精加工至图样要求后，对3#行星轮逐次进行酸蚀检查，结果如图8～图10所示。从图8～图10可看出，3种状态下内孔均发现较明显的花斑状痕迹，但热处理前后的表面花斑状痕迹变化不大。

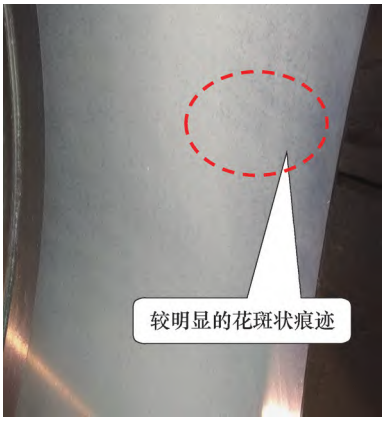

图8　3#行星轮渗碳淬火前

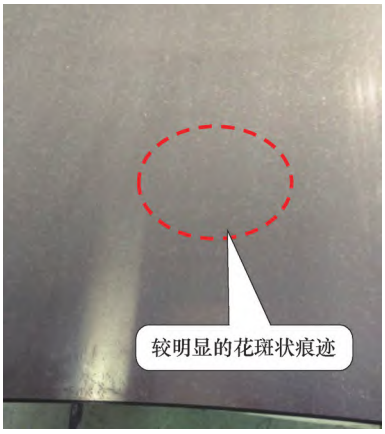

图9　3#行星轮渗碳淬火后磨削0.5mm

图10　3#行星轮精加工至要求

（2）4#行星轮　在渗碳淬火前、内孔磨削0.5mm、内孔精加工至图样要求后，对4#行星轮逐次进行酸蚀检查，结果如图11～图13所示。从图11～图13可看出，3种状态下内孔均发现较明显的花斑状痕迹。

由上述可得，行星轮内孔酸蚀检查时发现的枝晶状花斑痕迹，在热处理前已存在，且渗碳淬火处理后的近表面、精加工后的内孔表面依然存在，这

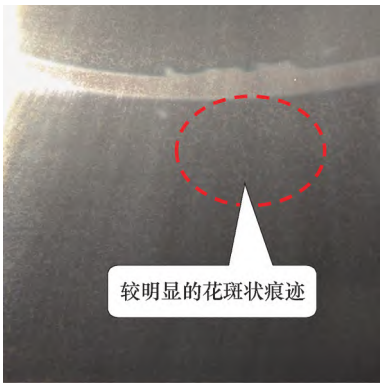

图11　4#行星轮渗碳淬火前

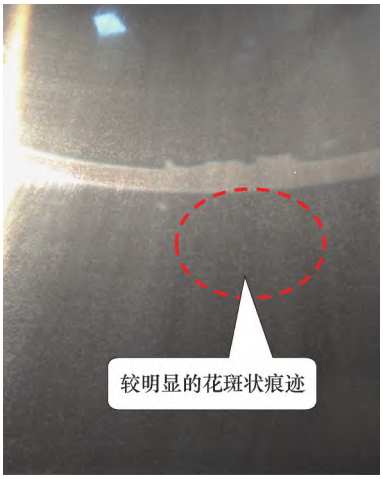

图12　4#行星轮渗碳淬火后磨削0.5mm

图13　4#行星轮精加工至要求

种痕迹是由于锻件本身成分偏析、组织不均匀造成的，与渗碳淬火无关。

4　1#行星轮金相分析

4.1　1#行星轮内孔金相与硬度分析

（1）试块1与试块2对比分析　在内孔枝晶状花斑较明显处取样，命名为试块1，在内孔枝晶状花斑不明显处取样，命名为试块2。

试块1、试块2经4%硝酸酒精腐蚀后的宏观形貌如图14、图15所示。从图14可看出，试块1在渗碳淬火＋精车、立磨后酸蚀检查，发现明显枝晶状痕迹。从图15可看出，酸蚀检查枝晶状痕迹较轻的位置制样（磨抛）后，使用4%硝酸酒精进行腐蚀，在表面可发现明显的枝晶状花斑。

（2）试块1与试块2分别放大50倍、100倍观察　将两个试块在显微镜50倍下进行观察，均发现深色、浅色相间的组织状态，如图16、图17所示。将两试块在显微镜100倍下进行观察，均呈现深色、浅色相间组织状态，如图18、图19所示。

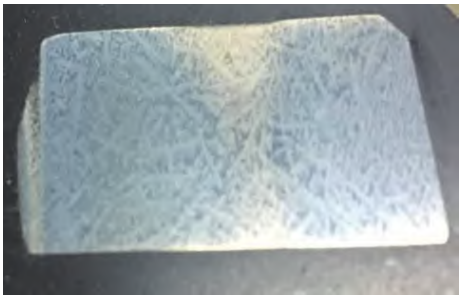

图14　试块1内孔枝晶状花斑较明显处

图15　试块2内孔枝晶状花斑不明显处

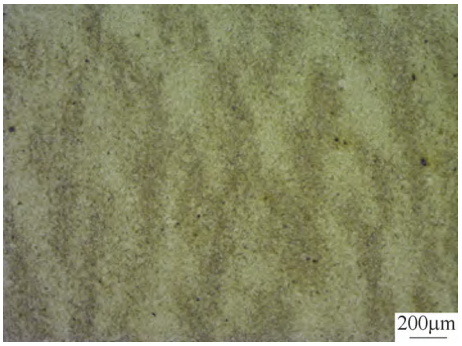

图16　试块1内孔枝晶状花斑较明显处（50×）

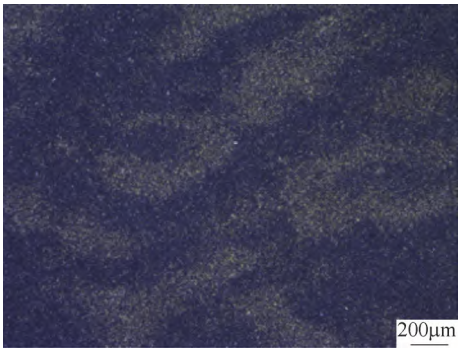

图17　试块2内孔枝晶状花斑不明显处　（50×）

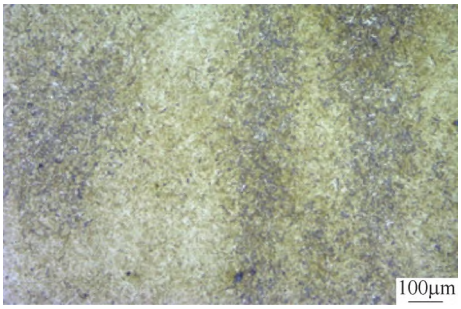

图18　试块1内孔枝晶状花斑较明显处（100×）

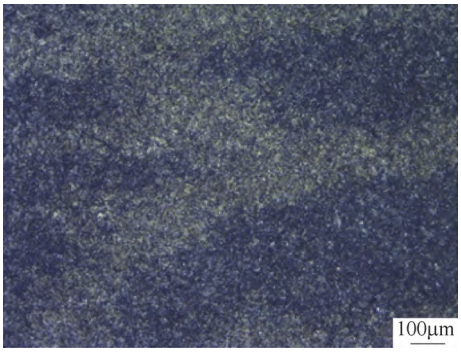

图19　试块2内孔枝晶状花斑不明显处（100×）

（3）试块1酸蚀后金相与硬度　将枝晶状花斑较明显的试块1用4%硝酸酒精进行腐蚀后，在500倍下观察金相组织，结果如图20～图22所示。

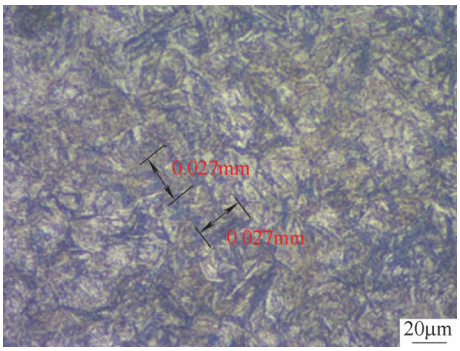

图20　试块1深色区域组织马氏体长度（500×）

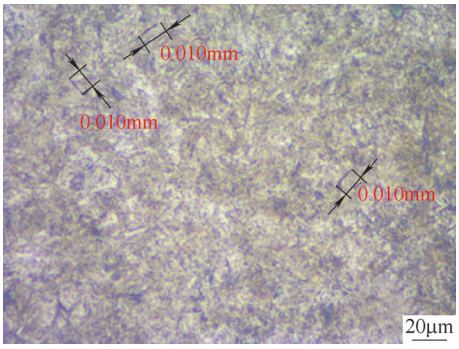

图21　试块1浅色区域组织马氏体长度（500×）

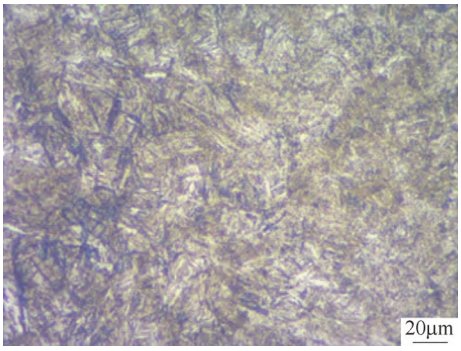

图22　试块1深色与浅色交界处组织（500×）

通过图20、图21可以明显判断出深色、浅色区域组织，马氏体级别有差异。深色区域组织马氏体级别为5级，而浅色区域组织马氏体级别为3级。（JB/T 6141.3—1992《重载齿轮 渗碳金相检验》中要求：金相组织为隐晶＋细针马氏体＋少于30%的残留奥氏体，1～4级合格）。

对试块1上的深色、浅色区域进行显微硬度检测，结果见表1。

表1　试块1深色、浅色区域显微硬度

浅色区域		深色区域	
HV	换算HRC	HV	换算HRC
635.9	57.1	531.8	51.2
633.6	57.0	525.6	50.8
615.3	56.1	540.0	51.8
616.4	56.2	535.6	51.3
628.6	56.8	530.5	51.1

从表1可知，浅色区域组织的显微硬度比深色区域的高，显微硬度相差约100HV或5～6HRC，不符合内孔表面硬度技术要求59～62HRC（JB/T 6141.2—1992《重载齿轮 渗碳质量检验》中要求：重要零部件硬度偏差≤60HV或≤3HRC）。

（4）试块2酸蚀后金相与硬度　将枝晶状花斑不明显的试块2用4%硝酸酒精进行腐蚀后，在500倍下观察金相组织，结果如图23～图25所示。

通过图23、图24可以明显判断出深色和浅色两种颜色组织，马氏体级别有差异。深色区域组织马氏体级别为6级，而浅色区域组织马氏体级别为4级（JB/T　6141.3—1992要求：金相组织为隐晶＋细针马氏体＋少于30%的残留奥氏体，1～4级合格）。

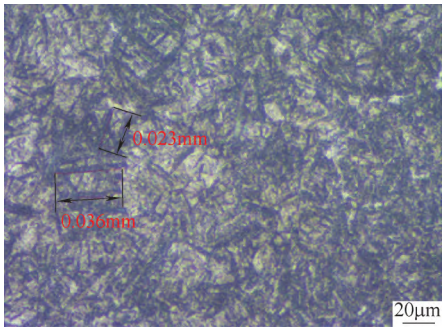

图23　试块2深色区域组织马氏体长度（500×）

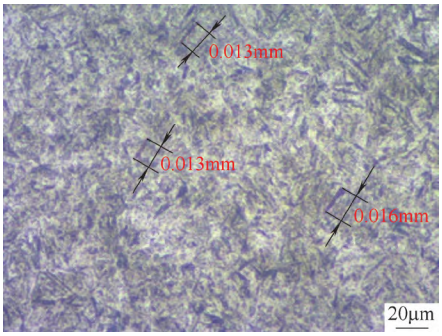

图24　试块2浅色区域组织马氏体长度（500×）

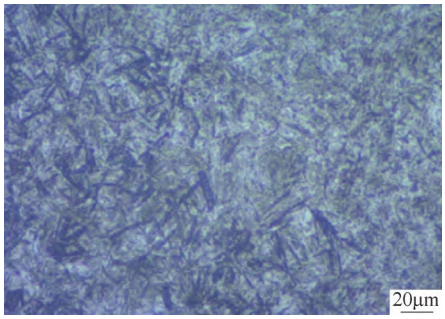

图25　试块2深色与浅色交界处组织（500×）

对试块2上的深色、浅色区域进行显微硬度检测，结果见表2。

表2　试块2显微硬度

浅色区域		深色区域	
HV	换算HRC	HV	换算HRC
601.48	55.36	505	49.47
599.52	55.25	497.53	48.97
591.79	54.82	534.95	51.43
595.64	55.04	487.36	48.24
601.48	55.36	508.03	49.67

从表2可知，浅色区域组织的显微硬度比深色区域的高，显微硬度也相差约100HV或5～6HRC，不符合内孔表面硬度技术要求59～62HRC（JB/T 6141.2—1992中要求：重要零部件硬度偏差≤60HV或≤3HRC）。

综上所述，试块1、试块2经过金相观察均能发现深色、浅色交错的组织形态，且深色、浅色两种区域内的马氏体组织级别、显微硬度存在较大的差异。

4.2　1#行星轮内孔去除5mm处金相和硬度分析

内孔表面与内孔去除5mm，经过4%硝酸酒精腐蚀后，均存在枝晶状痕迹，如图26、图27所示。通过显微镜下100倍放大观察，可见明显的深色、浅色相间条纹状，如图28、图29所示。

经检测，内孔有效硬化层深度为2.4～3.4mm，内孔去除5mm，组织未受到渗碳时炉内碳势的影响，显微镜500倍下观察结果如图30、图31所示。

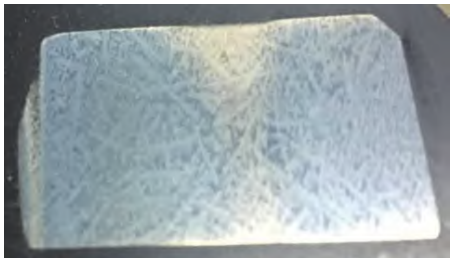

图26　内孔表层腐蚀后照片

图27　内孔去除5mm腐蚀后照片

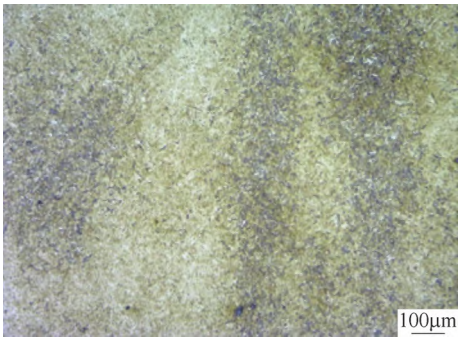

图28　内孔表层组织形态（100×）

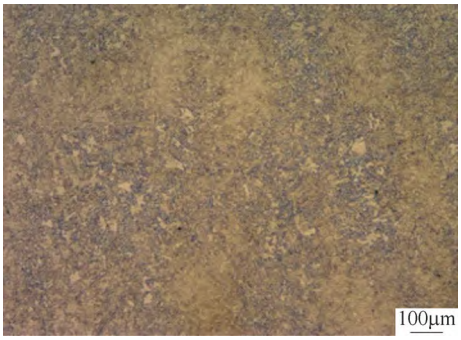

图29　内孔去除5mm组织形态（100×）

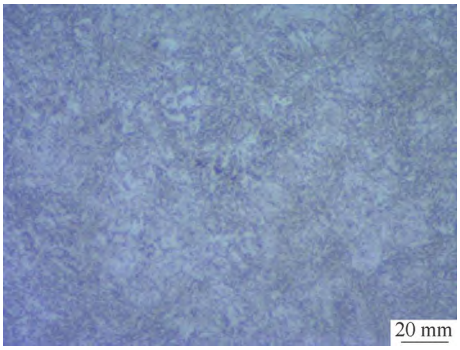

图30　内孔去除5mm处浅色组织（500×）

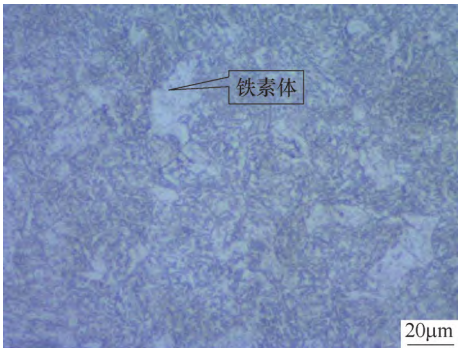

图31　内孔去除5mm处深色组织（500×）

通过显微镜500倍下继续观察，浅色组织为较均匀的低碳马氏体组织，而深色组织中包括了低碳马氏体和游离铁素体。下面对内孔去除5mm处深色和浅色区域进行显微硬度检测，结果见表3。

从表3可看出，深色、浅色区域组织显微硬度相差约70HV或7～8HRC。显微硬度的差别也验证了心部深色、浅色区域组织的差异。

综上所述，行星轮内孔（渗碳淬火面）、内孔去除5mm处（近心部组织）经过酸蚀检查均能看到明显的枝晶状痕迹，显微镜高倍观察可以明显看到深色、浅色相间组织，且深色、浅色组织存在较大差异，显微硬度偏差也较大。离表面5mm处组织未受到渗碳时炉内碳势的影响，只是经过了淬火、回火，仍然存在的组织差异应该是由原锻件材料的组织遗传导致的。

表3　内孔去除5mm处显微硬度

浅色区域		深色区域	
HV	换算HRC	HV	换算HRC
418.7	42.6	339.1	34.3
408.0	41.5	333.8	33.8
417.6	42.5	334.5	33.8
412.7	42.1	343.6	34.8
403.3	41.1	351.6	35.7

5　常规行星轮渗碳淬火随炉仿形试样检测

为了验证没有发现枝晶状花斑零件的状态，选取了随炉仿形试样（见图32）进行相关检测，随炉仿形试样与零件采用相同熔炼炉次毛坯锻造，技术要求与零件完全相同，可以代表零件母体性能。

图32　随炉仿形试样

常规随炉试样在金相显微镜100倍、500倍下均未发现深色、浅色区域相间的组织差异，组织形态均匀。表面马氏体组织和距表面1.6mm处马氏体组织均被评级为3级，如图33～图36所示。由此可知，

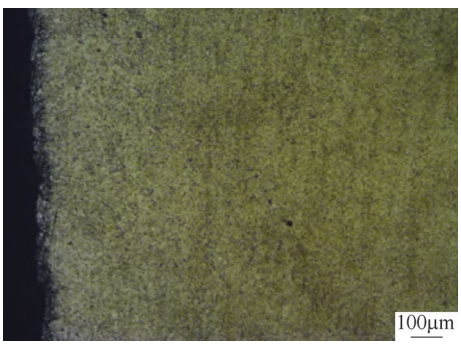

图33　表面处组织（100×）

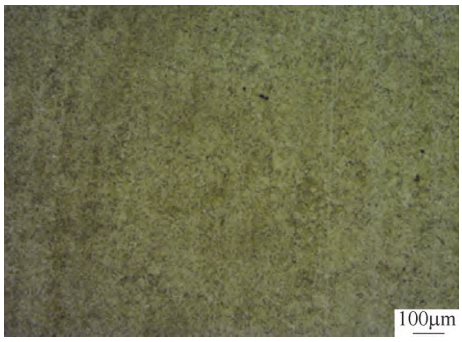

图34　距表面1.6mm处组织（100×）

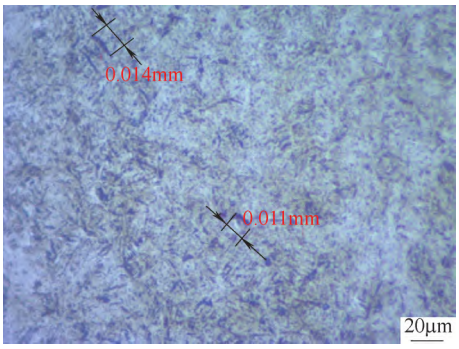

图35　表面处组织（500×）

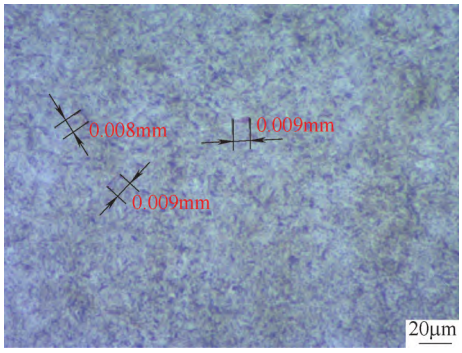

图36　距表面1.6mm处组织（500×）

若原始组织差异不大，则渗碳淬火后金相组织的差异也就不大。

6　分析与讨论

1）行星轮内孔渗碳淬火前后均检测出枝晶花斑痕迹，是由于锻件原材料成分偏析、组织不均匀造成的。

2）行星轮解剖分析，试块1、试块2以及离表面5mm位置，存在马氏体组织级别，显微硬度有较大差异，而这种差异与锻件原材料深色、浅色的组织不均匀及合金成分的差异有关，因此渗碳淬火后局部马氏体级别超差与锻件原材料成分偏析引起组织不均匀有直接的关系，与热处理工艺过程无关。

3）试块1、试块2中深色区和浅色区的表面显微硬度偏差达到100HV或5～6HRC，超出标准JB/T 6141.2—1991中要求的重要零部件硬度偏差≤60HV或3HRC的要求，故不建议使用。

7　结束语

本文针对行星轮渗碳淬火后，在进行内孔磨削、酸蚀检查时发现存在枝晶状花斑的情况，分别从材料、硬度、金相组织等多个方面进行研究分析，认为枝状花斑痕迹与锻件原材料成分偏析引起组织不均匀有直接关系，产生原因与热处理工艺过程无关，深色区和浅色区的马氏体组织级别、显微硬度存在较大的差异，超过国家标准要求的不建议使用，但如果马氏体组织级别、硬度差在标准范围内的，则还需通过力学性能、尤其是低温冲击性能、宏观硬度等相关指标进行综合评判，并进一步讨论研究。

参考文献：

[1] 顾晓明，吕蓝冰. 风电增速箱18CrNiMo7-6滚道行星轮冲击性能可靠性分析[J]. 金属加工（热加工），2023（10）：92-96.

[2] 张宁，高星，王芝林，等. 18CrNiMo7-6钢齿轮组织性能异常分析[J]. 金属热处理，2022，46（4）：268-274.

[3] 王辉，金呈，赵雷，等. 18CrNiMo7-6中低合金钢连铸圆坯的原位统计分布分析[J]. 光谱学与光谱分析，2020，40（12）：3906-3911.

[4] 叶明在，徐瑞军，赵鹏. 某钢厂风电齿轮钢18CrNiMo7-6产品研发[J]. 中国金属通报，2020（11）：122-123，126.

[5] 赵永杰. 18CrNiMo7-6钢锭凝固组织优化技术研究[D]. 大连：大连理工大学，2020.

[6] 黄海霞，殷建，朱百智. 18CrNiMo7-6中小模数齿轮的心部硬度影响因素研究[J]. 金属加工（热加工），2016（S2）：80-82.

[7] 王飞. 18CrNiMo7-6锻件机加工面“花纹”研究[J]. 大型铸锻件，2024（5）：88-92.

（收稿日期：20241212）