不同回火工艺对H13钢疲劳性能的影响

王昊[1]，侯新平[1]，马鸣蔚[1]，刘馨忆[2]，荆思文[3]，李晋[1]，李天祥[1]，王旭[1]

1.辽宁石油化工大学机械工程学院　辽宁抚顺　113001
2.清华大学材料学院　北京　100084
3.山东兖矿智能制造有限公司　山东济宁　273500

摘要：采用单轴拉伸压缩液压试验机、扫描电镜等设备研究了不同回火条件对碟簧用H13钢疲劳性能的影响。结果表明：通过疲劳*S-N*曲线可看出，在不同的外界应力条件下，二次回火工艺均能显著提高H13钢的疲劳性能。疲劳断口分析显示，二次回火试样的瞬断区面积占比较小，表明其在高应力条件下具有更好的抗疲劳性能。此外，二次回火后试样的夹杂物尺寸减小，有助于减少疲劳裂纹的产生。根据改进的Tanaka-Akiniwa模型计算的应力场强度因子幅，二次回火条件下的值在不同应力幅下均较小，进一步证实了二次回火工艺能有效降低疲劳失效的风险。因此，H13钢在经过1000℃保温20min，油淬，经过560℃回火120min，空冷至室温后，再进行一次相同参数的回火，是一种较合理的热处理工艺，能显著提高H13钢的疲劳性能。

关键词：H13钢；回火条件；疲劳性能；疲劳寿命

Influence of different tempering processes on fatigue properties of H13 steel

WANG Hao[1], HOU Xinping[1], MA Mingwei[1], LIU Xinyi[2], JING Siwen[3], LI Jin[1], LI Tianxiang[1], WANG Xu[1]

1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, Liaoning, China
2. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. Shandong Yankuang Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Jining 273000, Shandong, China

Abstract: The influence of different tempering conditions on fatigue properties of H13 steel for disc spring was studied by means of uniaxial tensile compression hydraulic test machine and scanning electron microscope. It can be seen from the fatigue *S-N* curve that the fatigue properties of H13 steel can be significantly improved by the secondary tempering process under different external stress conditions. Fatigue fracture analysis shows that the proportion of the instantaneous fault area of the secondary tempered sample is relatively small, which indicates that it has better anti-fatigue performance under high stress conditions. In addition, the inclusion size of the sample is reduced after secondary tempering, which is helpful to reduce the initiation of fatigue cracks. According to the amplitude of stress field intensity factor calculated by the improved Tanaka-Akiniwa model, the value of secondary tempering is smaller under different stress amplitude, which further proves that the secondary tempering process can effectively reduce the risk of fatigue failure. Therefore, after holding H13 steel at 1000℃ for 20min, quenching oil, tempering at 560℃ for 120min, air cooling to room temperature, and then carrying out the tempering process with the same heat treatment parameters is a more reasonable heat treatment process, which can significantly improve the fatigue properties of H13 steel.

Keywords: H13 steel; tempering conditions; fatigue performance; fatigue life

基金项目：大学生创新创业训练计划项目——退火温度对Co40Cr20Ni30Al4.5Ti5Mo0.5高熵合金腐蚀行为研究（S202410148045）。

1 序言

机械零件常受周期性载荷和应力的影响，导致在远低于临界拉伸应力和屈服应力的情况下发生疲劳失效，这种失效现象是影响机械零件寿命的关键因素之一[1]。碟簧是石油化工装备行业不可或缺的机械部件，随着碟簧广泛应用到复杂载荷和变形环境，改进其制造工艺以提高机械效率和稳定性变得越来越重要。碟簧通常承受高循环机械负载，并在腐蚀性环境中运行，因此常会产生疲劳失效[2]。H13钢作为热作模具钢，具有优秀的硬度、耐磨性和耐蚀性，并且易于加工和热处理，国内牌号为4Cr5MoSiV1，适合用于制造高强度、高耐磨和耐腐蚀的零部件[3]。为了延长碟簧的工作寿命、提高加工效率以及降低成本，常见的选择是使用H13钢碟簧[4, 5]。

众所周知，疲劳是由H13钢碟簧表面在循环应力作用下形成的浅层微小裂纹[6]。热处理已经广泛应用到了各行各业中，齐明等[7]探究了炉冷、水冷和石棉缓冷等3种不同冷却方式对C61钢热轧态组织和性能的影响。试验结果表明，冷却速度对试验钢的性能影响较大。徐海峰等[8]研究了30MnSiCrMo新型槽钢经900～920℃保温30min后淬火；350～550℃保温2h回火后的组织性能变化。结果表明，350～550℃不同回火过程中，试验钢出现马氏体分解、碳化物转变、聚集长大及α相回复再结晶等转变，室温组织由回火马氏体向回火屈氏体和回火索氏体过渡。李东辉[9]研究了深冷处理对H13热作模具钢组织和性能的影响，H13钢硬度随淬火温度升高而逐渐下降，在1040℃淬火时试验钢组织均匀且具有较高的硬度，H13钢回火硬度随回火温度的升高呈先升高后下降趋势，在560℃出现二次硬化峰。DOBRZAŃSKI等[10]进行了47CrMoWVTiCeZr16-26-8钢和X40CrMoV5-1钢的研究，通过制定的试验方案，确定了对其组织和力学性能最有利的热处理条件：对47CrMoWVTiCeZr16-26-8钢进行淬火，淬火温度为1120℃，回火温度为540℃；X40CrMoV5-1钢的淬火温度为1060℃，回火温度为510℃。PELLIZZARI等[11]研究了等离子渗氮、多层PVD涂层（即CrN、ZrN）和双相处理（等离子渗氮和PVD）对AISIH11热作工具钢抗热疲劳性能的影响，选取了700℃和900℃两种不同的最高温度，分别代表铝压铸和热锻过程中的服役条件。在所采用的所有试验条件下，考虑的表面处理，即等离子渗氮和PVD涂层，都会恶化钢的抗热疲劳性能。SJÖSTRÖM等[12]对一种新型马氏体铬热作工具钢合金（Uddeholm型号DIEVAR）的奥氏体化处理的热疲劳性能进行了评估，用4种不同的奥氏体化温度，将材料淬火并回火至相同的硬度470HV。研究发现，工具钢的热疲劳裂纹扩展很大程度上取决于不同的奥氏体化温度以及最高试验温度。SOUKI等[13]更明确地揭示了奥氏体化和回火处理对抗断裂性能有效，虽然改变奥氏体化温度不会显著影响疲劳性能，但是调整回火条件会明显改变断裂韧度和裂纹扩展。马鸣蔚等[14]发现H13钢在淬火温度为1000℃保温20min，经过560℃回火，保温120min后进行二次回火时，回火马氏体尺寸较小，组织分布更均匀，此条件下的硬度为487HV，抗拉强度可达到1779MPa，伸长率为11.5%。在回火温度为560℃时，马氏体板束的形貌更加清晰，宏观上表现为腐蚀后颜色加深，相界或晶界与基体的凹凸感增强。

结合国内外学者对H13钢疲劳性能的研究，发现H13钢的疲劳性能会因回火工艺的不同而呈现出差异，不同学者在探讨其最佳回火条件时得出的结果也存在一定差异[15, 16]。本文旨在深入分析H13钢在不同回火条件下的疲劳性能表现，同时，也对影响H13钢疲劳性能的关键因素进行了探讨，通过计算在受不同应力幅下应力场强度因子，以期减少疲劳失效现象，为了解决H13钢在生产过程中的缺陷，需要确定其热处理工艺，从而改善材料的性能。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

本文的试验材料是H13钢，其化学成分见表1。真空锭采用VIM-100真空感应电炉冶炼，钢锭大小为

表1 H13钢的化学成分（质量分数） （%）

C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Fe
0.38	0.95	0.38	0.01	5.22	0.05	0.09	1.32	0.99	余量

50kg，坩埚容量为100kg，铸锭后锻造成100mm×100mm的钢板，试样沿着锻造方向进行取样。

2.2 试验方法

（1）热处理工艺方案　通过JMatPro材料性能计算软件进行热力学计算，基于化学成分分析得到了图1所示的温度与各相关系。根据热力学计算结果显示，在淬火温度为950℃时，试样基体内的奥氏体含量为99%。本文为了使试验钢完全奥氏体化，选择1000℃作为初始淬火温度。

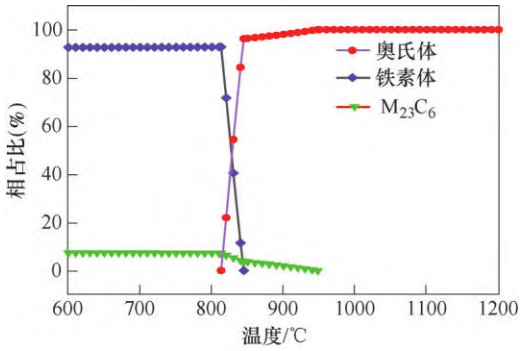


图1　H13钢相图

利用JMatPro软件计算得到H13钢相图，可为试验钢的热处理温度提供参考，制定的热处理工艺流程如图2所示，在1000℃奥氏体化温度下保温20min，随后以油冷方式对试件进行冷却，最后加热至560℃保温120min后空冷至室温，再进行同样温度和保温时间的二次回火，淬火用加热炉为KSL-1000X热处理炉。

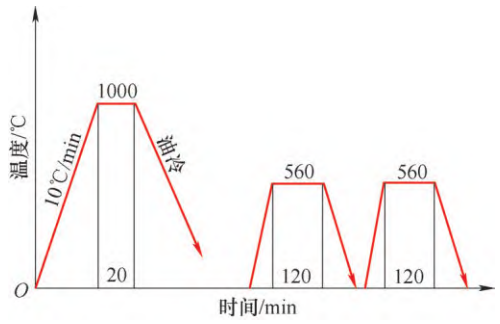


图2　热处理工艺流程

（2）测试方法　疲劳试验使用单轴拉伸压缩INSTRON-8872伺服液压试验机（应力比$R=1$，频率为20Hz），在室温空气中进行（碟簧在石化行业服役温度大多为室温或略高于室温）。加载按一定应力间隔，从500MPa到800MPa，应力幅每级均选取1～2根试样（见图3）进行试验。

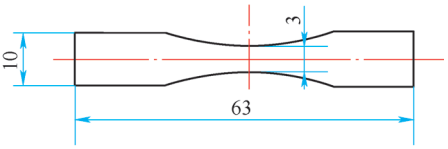


图3　疲劳试样尺寸

3　试验结果及分析

3.1 金相组织分析

如图4所示，一次回火和二次回火在组织上存在差异。通过对比一次回火的组织得出，一次回火处理后，材料的组织结构呈现出较大的颗粒度和未经完全回火的马氏体组织，而二次回火处理则导致组织更加细致均匀，且马氏体晶粒得到更充分的回火和稳定。这一差异影响着材料的硬度、韧性和耐磨性等性能，为研究和优化热作模具钢的热处理工艺提供了重要参考依据。

a）一次回火

b）二次回火

图4　回火后的金相组织

3.2 疲劳试验结果

疲劳试验数据见表2。as cast-500表示铸态下受到加载应力500MPa；PT-500表示一次回火条件下受到加载应力500MPa；DT-600表示二次回火条件下受到加载应力600MPa。疲劳周次在14437～282663之间。应力分布的变化情况如图5所示。从图5可看出，拟合出来的直线约在600MPa时出现分界线，可看出，在外界应力超过600MPa时，二次回火的性能要优于一次回火。

表2　H13钢疲劳试验数据

试样编号	加载应力/MPa	疲劳寿命/周次
1	as cast-500	14437
2	PT-500	282663
3	PT-600	64529
4	DT-600	105477
5	PT-700	31752
6	DT-700	44389
7	PT-800	26000
8	DT-800	30490

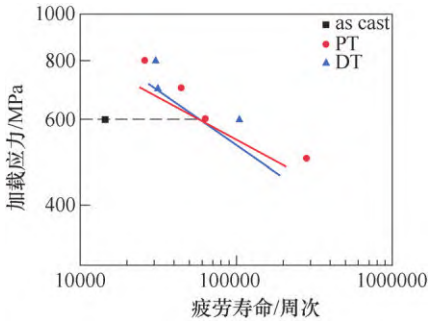


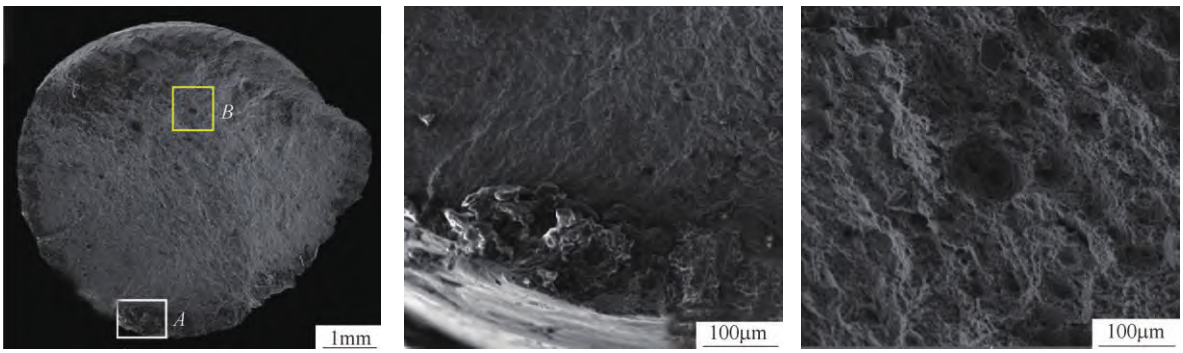
图5　H13钢疲劳试验数据

3.3　H13钢疲劳试样断口分析

图6所示为H13钢铸态试样疲劳断口SEM图。从图6b可明显看到夹杂物，从图6c可发现铸态条件下的韧窝分布不均匀，韧窝尺寸大小不一。

加载应力为500MPa、600MPa、700MPa及800MPa的试样具有类似的断口形貌，分别以一次回火条件下600MPa试样和一次回火条件下700MPa试样为例进行断口分析，在SEM下断口形貌分别如图7、图8所示。断口主要由4部分组成：即瞬断区、扩展区、疲劳源和过渡区。

在进行疲劳试验过程中，试样表面承受的应力最大，而内部应力则相对较小，这导致裂纹首先出现在表面，并且可能存在多处疲劳源（见图7d）引发裂纹，形成放射状扩展痕迹。疲劳台阶的特征在裂纹扩展阶段呈现，扩展方向与这些台阶相互垂直[17]。此时瞬断区所受的应力大幅上涨，发生塑性变形，内部微观缺陷连通，最终导致整体断裂失效，并在断口处形成河流状形貌（见图7c）。



a）SEM图　　b）夹杂物（*A*位置）　　c）韧窝（*B*位置）

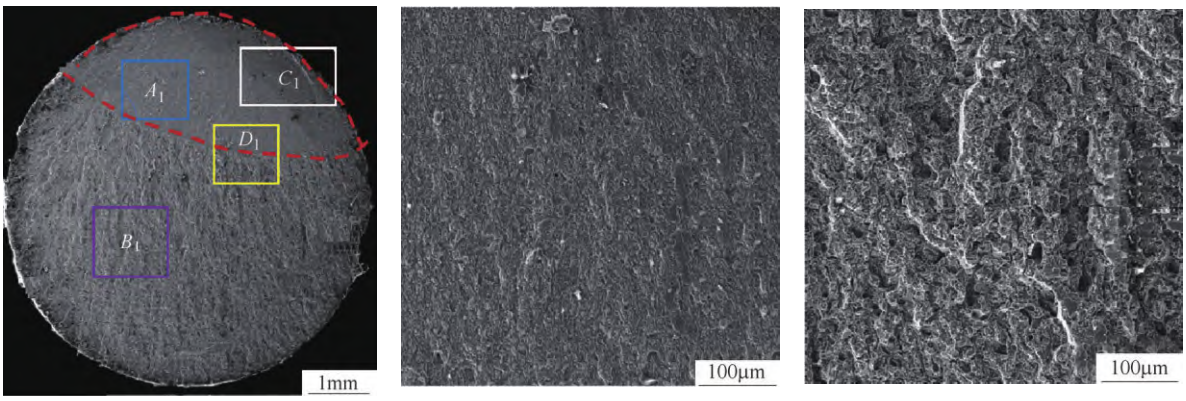
图6　铸态试样断口SEM图

瞬断区裂纹在主滑移方向上以剪切方式缓慢扩展，最终形成以裂纹源为圆心的近似圆形区域。在此过程中，裂纹扩展的速度和趋势会发生改变。裂纹经过瞬断区后，疲劳断口上通常可以看到疲劳带——呈相互平行状条纹。其局部裂纹扩展方向与疲劳区法线方向一致，组成整个扩展区[18]。

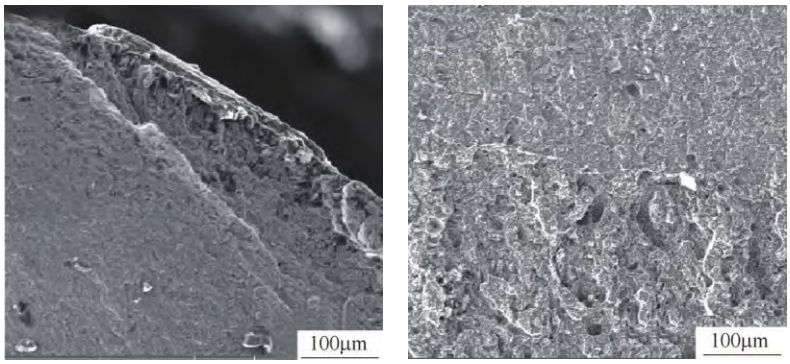
3.4　内部夹杂物对疲劳性能的影响

在进行疲劳试验后，通过扫描电镜对断口进行观察。根据试样的不同疲劳源，将其主要分为表面缺陷和内部夹杂物两种类型，通过Image-Pro Plus软件对疲劳试样的疲劳源进行测量，结果见表3。对于铸态试样，其疲劳源为表面缺陷；而对于一次回火和二次回火的试样，疲劳源主要为内部夹杂物，占了所有缺陷种类的65%～85%，表面缺陷的比例相对较小。在本试验中，将位于表面的缺陷称为表面缺陷，将距表面0.1mm以下的夹杂物称为内部夹杂物。夹杂物的尺寸对疲劳性能有着重要影响。在疲劳过程中，夹杂物附近的裂纹扩展速度较慢且存在摩擦行为，导致夹杂物附近的疲劳表面非常平整。对于进行二次回火的试样，其所受应力为600MPa，寿命为105447周次，断口呈现出“鱼眼”形貌。通过分析夹杂物的尺寸，可以更好地了解其对疲劳性能的影响。

目前，研究者普遍认为在H13钢的凝固过程中，Cr、Mo、V、C和Ti等合金元素在固液界面前沿的积聚是导致夹杂物析出的直接原因[19, 20]。WEN

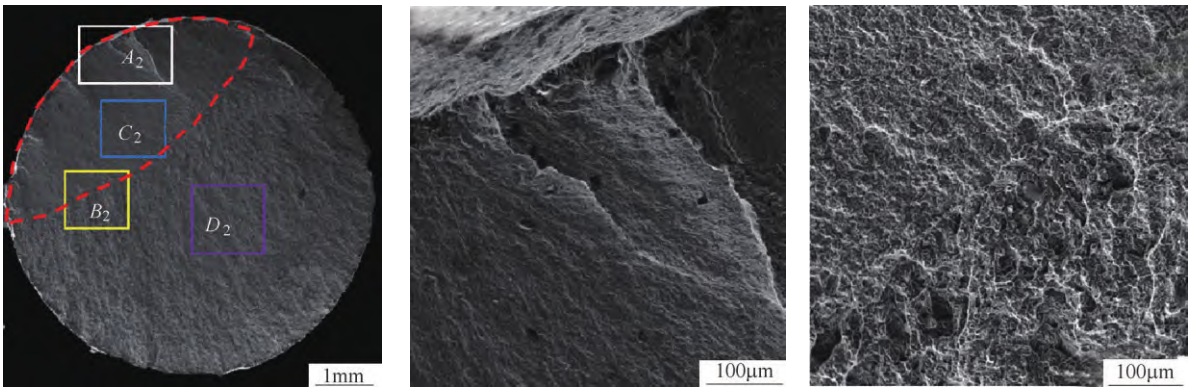


a）SEM图　　b）瞬断区（A_1位置）　　c）扩展区（B_1位置）

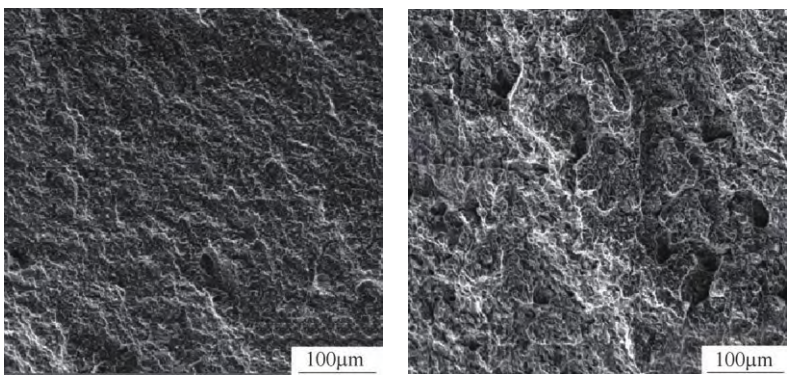


d）疲劳源（C_1位置）　　e）过渡区（D_1位置）

图7　一次回火条件下600MPa试样断口SEM图



a）SEM图　　b）瞬断区（A_2位置）　　c）扩展区（B_2位置）



d）疲劳源（C_2位置）　　e）过渡区（D_2位置）

图8　一次回火条件下700MPa试样断口SEM图

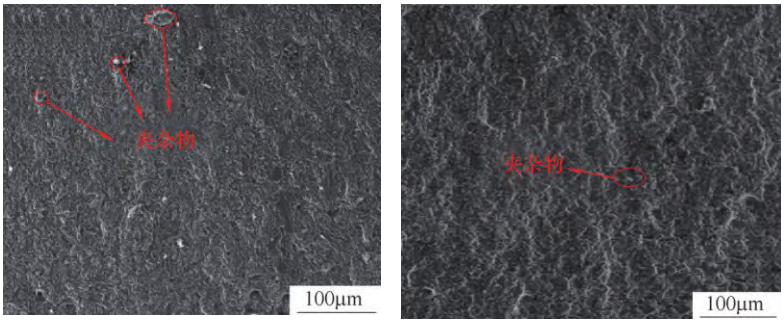
表3　试样疲劳源汇总

不同处理条件	试样个数/个	表面缺陷	内部夹杂物
铸态	1	5	0
一次回火	4	2	8
二次回火	3	1	7

等[21]发现，随着回火对胞状组织的溶解，原本富集在胞状组织周围的Cr、Mo元素与C结合形成夹杂物，并证实了该夹杂物为富Cr的$M_{23}C_6$碳化物。另有相关研究[22]表明，不同的夹杂物形态与基体会产生不同的共格应力，有的粗大、不规则的夹杂物甚至为非共格关系，往往这些夹杂物在热疲劳循环中会作为应力集中点，易于萌生裂纹。

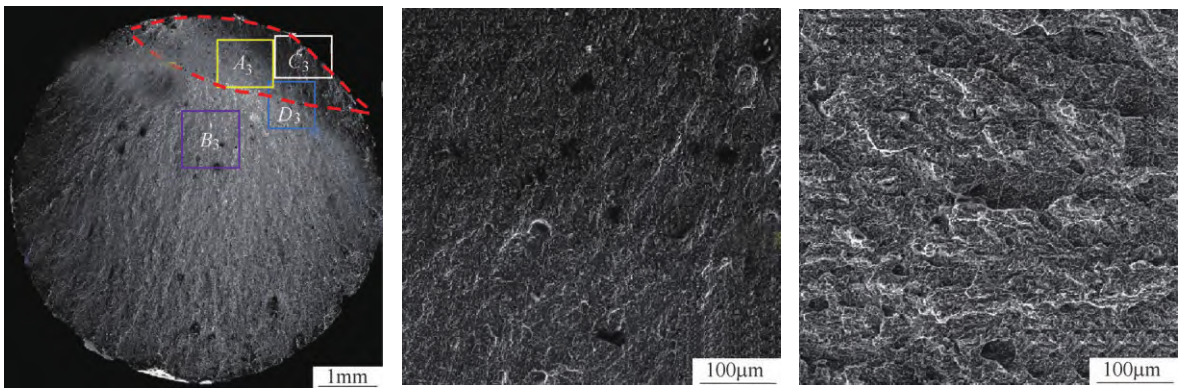
图9所示为夹杂物的位置分布情况。通过测量结果可发现，在一次回火的试样中，夹杂物的平均直径为15～21μm；二次回火后试样的夹杂物平均直径为10～17μm。这个现象表明了进行二次回火能够减小夹杂物尺寸，从而减少引发的疲劳裂纹。

图10所示为一次回火条件下800MPa试样断口SEM图；图11所示为二次回火条件下600MPa试样断口SEM图；图12所示为二次回火条件下700MPa试样断口SEM图；图13所示为二次回火条件下800MPa试样断口SEM图。

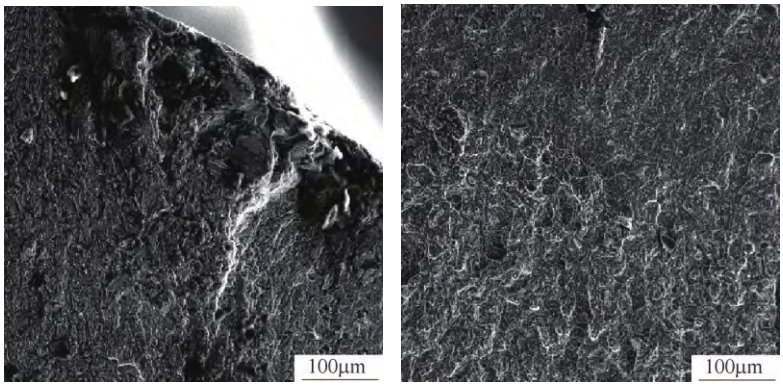


a）一次回火　　b）二次回火

图9　一次回火和二次回火条件下夹杂物位置分布

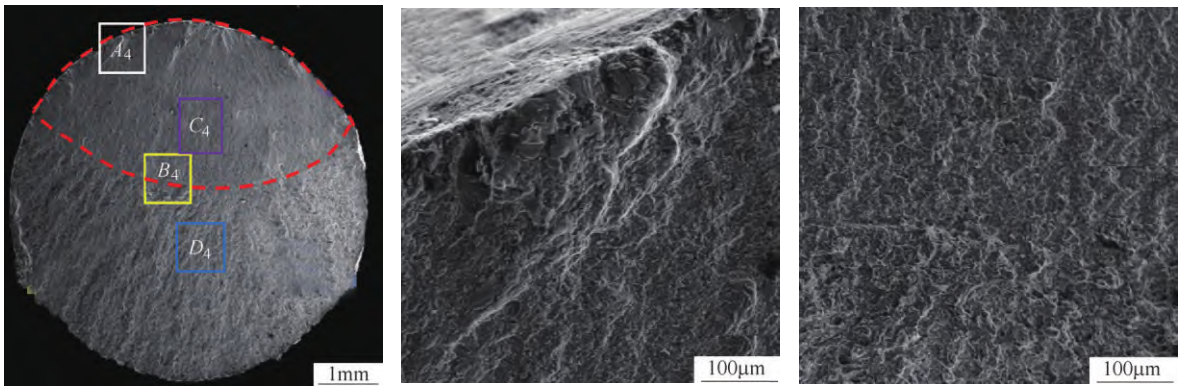


a）SEM图　　b）瞬断区（A_3位置）　　c）扩展区（B_3位置）



d）疲劳源（C_3位置）　　e）过渡区（D_3位置）

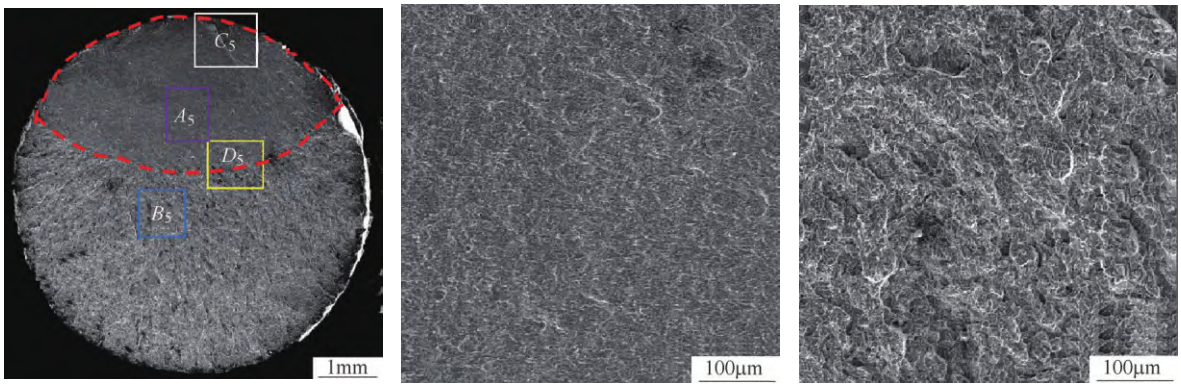
图10　一次回火条件下800MPa试样断口SEM图



a）SEM图　b）瞬断区（A_4位置）　c）扩展区（B_4位置）

d）疲劳源（C_4位置）　e）过渡区（D_4位置）

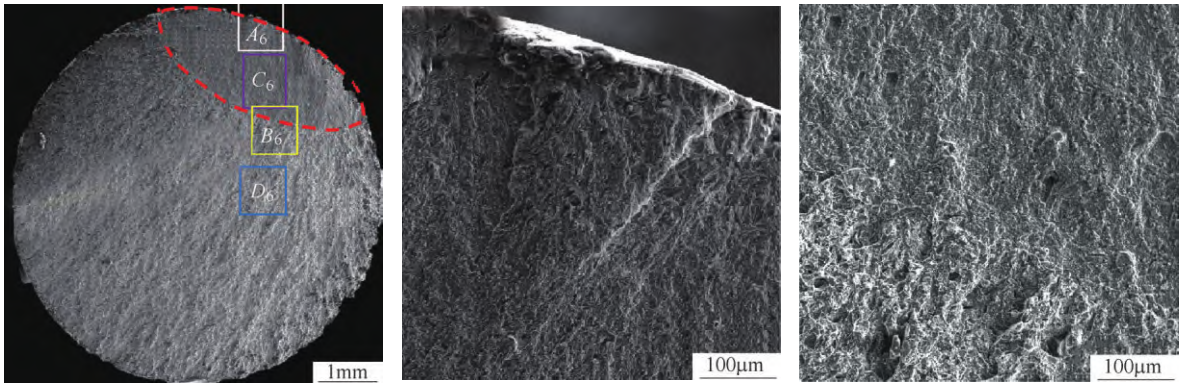
图11　二次回火条件下600MPa试样断口SEM图



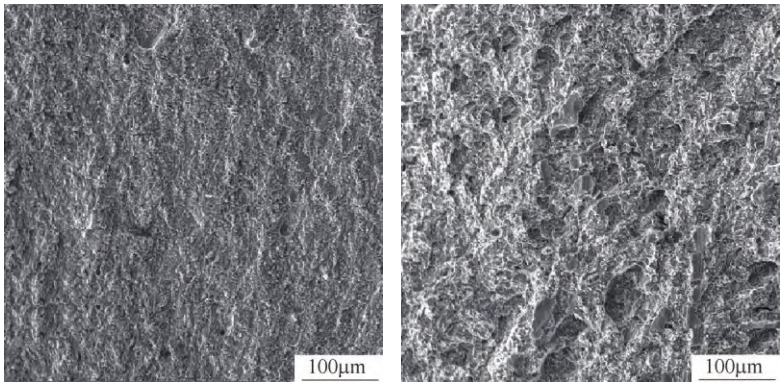
a）SEM图　b）疲劳源（A_5位置）　c）过渡区（B_5位置）

d）瞬断区（C_5位置）　e）扩展区（D_5 位置）

图12　二次回火条件下700MPa试样断口SEM图



a）SEM图　　b）疲劳源（A_6位置）　　c）过渡区（B_6位置）



d）瞬断区（C_6位置）　　e）扩展区（D_6位置）

图13　二次回火条件下800MPa试样断口SEM图

4　讨论与分析

分析图7、图8、图10～图13得出，通过加载应力的增大，可明显看出试样瞬断区的面积在不断减小。二次回火瞬断区面积普遍比一次回火条件下的大，其中在DT-600条件下时，瞬断区面积达到最大，占比为46.35%，在DT-800条件下，瞬断区面积占比最小，为25.1%（见表4）。瞬断区的大小受多种因素影响，一般来说，所受载荷越大，瞬断区就越小；相反，所受载荷越小，瞬断区则越大。材料本身性质和环境介质也影响其面积大小。循环负载导致表面缺陷处应力汇集，并逐步形成微小裂缝。受到拉伸应力的影响，这些微小裂缝逐渐扩展，并在压应力的驱使下，反复摩擦运动会导致裂纹周期性地张开和闭合。这种机械作用引发了匹配断口表面的摩擦，使之显得相对平整光滑[23, 24]。

从表4还可看出，在不同的加载应力下，不同工艺下H13钢瞬断区面积不一样，裂纹源条数不一样，断口粗糙呈结晶状，河流花样和疲劳台阶组成了扩展区的形貌特征。当裂纹扩展至一定规模时，试样无法继续承受施加在其上的负载，从而骤然发生断裂。在热处理之后，试样内部仍保留一定韧性。试件在经过二次回火后，疲劳寿命发生下降趋势。回火过程可能会引入表面缺陷或改变表面粗糙度，对试样的疲劳性能产生影响。

表4　在不同受力条件下瞬断区面积占比　（%）

不同受力条件	瞬断区面积占比
PT-600	36.79
PT-700	33.82
PT-800	24.30
DT-600	46.35
DT-700	41.37
DT-800	25.1

在前述结果中，我们发现夹杂物的尺寸对材料的疲劳性能有着显著影响。此外，许多研究者已经通过夹杂物的特征参数来预测材料的疲劳极限，其中一个著名的模型是Tanaka-Akiniwa模型[25]，通常用于预测疲劳极限。Tanaka-Akiniwa模型是基于Paris方程发展而来的。

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N}=[C(\Delta k)]^m \quad (1)$$

式中 a——夹杂物等效尺寸（μm）；

N——疲劳周次（次）；

$\mathrm{d}a/\mathrm{d}N$——裂纹扩展速率（μm/cycle）；

C——材料扩展性能参数；

m——材料扩展性能参数。

任意形状内部夹杂物的应力场强度因子幅可通过式（2）计算得到，即

$$\Delta k=C_1\sigma_a\sqrt{\pi\sqrt{A}} \quad (2)$$

式中 C_1——夹杂物位置参数（μm），夹杂物位于表面时取0.65，夹杂物位于内部时取0.5；

σ_a——有效加载应力幅（MPa）；

A——夹杂物的等效面积（μm²）。

通过计算得出，在不同应力幅、不同条件下的应力场强度因子值见表5。从表5可看出，一次回火条件下的值均高于二次回火，值越大，表明此处造成的应力集中较大，易出现疲劳失效。H13钢中疲劳裂纹常起源于形状各异、较大尺寸的夹杂物[26]，而进行过二次回火后可使组织更加均匀，夹杂物分布更为均匀、细小，形态饱满，从而更有利于提高H13钢的疲劳性能。

表5 不同回火条件下的应力场强度因子值

不同应力幅/ MPa	一次回火	二次回火
600	2.0	1.7
700	2.7	2.3
800	2.9	2.8

5 结束语

1）通过疲劳*S-N*曲线可以看出，当外界应力在600MPa或超过600MPa时，二次回火条件下的H13钢性能均优于一次回火。

2）随着加载应力的增大，瞬断区面积逐渐减小。其中，在DT-800条件下，瞬断区面积占比最小，为25.1%。

3）一次回火的试样中，夹杂物的平均直径为15～21μm，二次回火后试样的夹杂物平均直径为10～17μm。应力场强度因子幅Δ*k*在一次回火条件下受到应力幅800MPa下最大，为2.9，说明此条件下更容易出现疲劳失效。

参考文献：

[1] 耿鑫明. 模具业与模具钢生产现状及压铸模钢材的选用[J]. 金属加工（热加工），2009（9）：20-24.

[2] 马野，刘宝石，牟风，等. 两种热作模具H13钢组织和性能研究[J]. 模具制造，2021，21（1）：72-75.

[3] 孙振亚. 热处理与锻造工艺对H13热作模具钢组织与性能的影响[D]. 济南：山东大学，2019.

[4] 汪凡. H13热作模具钢断裂原因分析及热处理工艺改进[J]. 模具制造，2024，24（3）：63-66.

[5] 门志刚. 提高热作模具钢H13退火组织均匀性的措施[J]. 河北冶金，2023（9）：63-66.

[6] ZHANG L L，LEI L P，ZENG P. Investigation of the influence of deep rolling on the thermal fatigue cracking for AISI H13 steel[J]. Frontiers of Mechanical Engineering and Materials Engineering II，PTS 1 and 2，2014. 457-458，127-130.

[7] 齐明，梁晓东，韩大虹，等. 冷却速率对新型C61齿轮钢力学性能和微观组织的影响[J]. 特殊钢，2023，44（2）：80-83.

[8] 徐海峰，李海，李凤敏，等. 淬火及回火处理对新型槽帮钢30MnSiCrMo组织性能的影响[J]. 特殊钢，2023，44（1）：105-110.

[9] 李东辉. 深冷处理对H13热作模具钢组织和性能的影响[D]. 昆明：昆明理工大学，2020.

[10] DOBRZAŃSKI L A，MAZURKIEWICZ J，HAJDUCZEK E，et al. Comparison of the thermal fatigue resistance and structure of the 47CrMoWVTiCeZr16-26-8 hot-work tool steel with X40CrMoV5-1 type one[J]. Journal of Materials Processing Technology，2001，113（1）：527-538.

[11] PELLIZZARI M，MOLINARI A，STRAFFELINI G，Thermal fatigue resistance of plasma duplex-treated tool steel[J]. Surface and Coating

Technology，2001，142-144：1109-1115.
[12] SJÖSTRÖM J，BERGSTRÖM J. Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments[J]. Journal of Materials Processing Technology，2004，153：1089-1096.
[13] SOUKI I，DELAGNES D，LOURS P，2011. Influence of heat treatment on the fracture toughness and crack propagation in 5% Cr martensitic steel[J]. Procedia Engineering，2011（10）：631-637.
[14] 马鸣蔚，唐亮，刘馨忆，等. H13热作模具钢热处理工艺研究[J]. 有色金属工程，2024，14（6）：9-16，25.
[15] 陈建文，袁伍丰，邹伟，等. 20Cr2Ni4A钢齿圈压力淬火过程的温度场模拟[J]. 金属热处理，2023，48（5）：145-150.
[16] 赵宇，张大伟，董爽，等. 关于演变模拟齿轮钢端淬过程中的组织变化研究[J]. 中国设备工程，2023（S2）：182-184.
[17] 张棒. 18CrNiMo7-6齿轮钢渗碳工艺和疲劳性能的研究[D]. 郑州：郑州大学，2021.
[18] 马天宇. 高速动车组车轴表面强化层的疲劳性能研究[D]. 北京：北京交通大学，2018.
[19] MAO M，WANG F，SUN X，et al. In situ research of partial melt in as-cast H13 steel at elevated temperature[J]. Ironmaking & Steelmaking，2020，47（2）：159-167.
[20] R.W. K.霍尼库姆. 钢的显微组织和性能[M]. 傅俊岩，等译. 北京：冶金工业出版社，1985：160-168.
[21] WEN T，YANG F，WANG J，et al. Ultrastrong and ductile synergy of additively manufactured H13 steel by tuning cellular structure and nano-carbides through tempering treatment[J]. Journal of Materials Research and Technology，2022. DOI:10.1016/j.jmrt.2022.11.105.
[22] BERGSTROM Y A，JENS W U，CHUN X，et al. Oxidation and thermal fatigue behaviors of two type hot work steels during thermal cycling[J]. Journal of Iron & Steel Research International，2013，20（11）：90-97.
[23] RICCARDO G，RIVOLTA B，GORLA C，et al. Cyclic behavior and fatigue resistance of AISI H11 and AISI H13 tool steels[J]. Engineering Failure Analysis，2021，121：105096.
[24] 穆晓彪，张永奇，高明艳，等. 谐波减速器服役过程中柔轮断裂失效原因分析与工艺改进[J]. 特殊钢，2024，45（1）：98-102.
[25] TANAKA K，AKINIWA Y. Fatigue crack propagation behaviour derived from *S–N* data in very high cycle regime[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures，2002，25（8-9）：775-784.
[26] 汪凡. H13热作模具钢断裂原因分析及热处理工艺改进[J]. 模具制造，2024，24（3）：63-66.

MW 20240903

《金属加工（热加工）》2025 年第 2 期广告目次

单位名称	查询编号	位置
易孚迪感应设备（上海）有限公司	1492	封面
盐城高周波热炼有限公司	5326	封二
伊达新技术电源（昆山）有限公司	5378	封三
北京金威焊材有限公司	1161	封底
恒进感应科技（十堰）股份有限公司	1468	前彩 1
第 23 届北京国际热处理展览会	8149	前彩 2
慕尼黑展览（上海）有限公司	8039	V