叶片精锻模热处理裂纹分析及工艺改进

中航工业南方航空工业集团有限公司工模具分公司 （湖南株洲 412002） 李 平

某型号航空发动机叶片精锻模在我厂进行热处理，淬火出油空冷3～4h（锻模表面70~80℃）后，发现其中一件锻模背部出现严重开裂，随即进炉回火，又发现一件锻模在型面上产生裂纹。锻模在我厂热处理淬火中出现开裂报废的现象是很少见的，为查找真正原因，我们对该锻模裂纹进行了详细的分析，找出了主要原因。

1. 失效分析

叶片精锻模材料为4Cr5W2VSi，尺寸为155mm×244mm×400mm，经改锻成形、退火、粗加工、调质、数控车型面（形状如图1所示）后进行热处理，要求硬度48~52HRC。4Cr5W2VSi叶片精锻模的化学成分检测结果如附表所示。

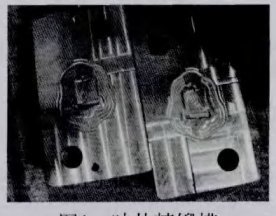
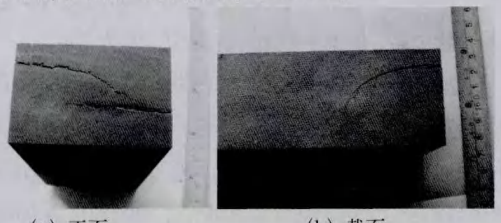


图1 叶片精锻模

4Cr5W2VSi叶片精锻模化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	P	S	Si	Cr	V	W
0.39	0.21	<0.020	<0.01	0.90	5.16	0.64	1.60
0.32 ~ 0.42	≤0.40	≤0.03	≤0.03	0.80 ~ 1.20	4.50 ~ 5.50	0.60 ~ 1.00	1.60 ~ 2.40

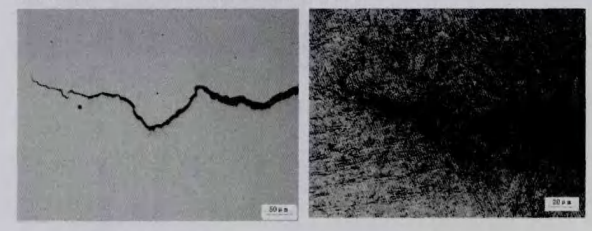
背部裂纹取样宏观形貌如图2所示，裂纹由表面向心部扩展，裂纹深度约60mm。



（a）正面 （b）截面

图2 背部裂纹取样宏观形貌

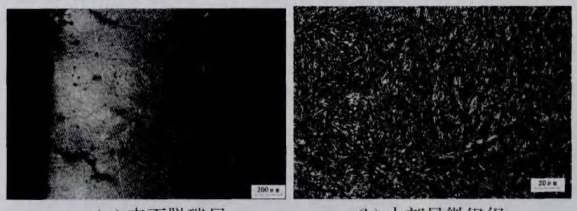
腐蚀后观察，裂纹沿晶界扩展，开口较大，尾端内部充满氧化物，如图3所示。锻模表面存在脱碳现象，总脱碳层深度约1.2mm，脱碳层有细微裂纹，如图4a所示。显微组织为回火索氏体，如图4b所示，无异常，符合该锻模淬火金相组织要求，硬度检测49HRC，满足技术要求。



（a）腐蚀前 200× （b）腐蚀后 500×

图3 精锻模裂纹尾端形貌及裂缝处氧化物

锻模材料化学成分符合GB/T1299－2000 4Cr5W2VSi材料技术要求，但锻模表面存在较严重的氧化脱碳现象，说明热处理过程存在问题，锻模表面脱碳，造成锻模表面产生很大拉应力作用，当浅表层拉应力超过断裂强度时，脱碳层即被拉裂（见图4a）。表层脱碳造成的裂纹较浅，通常在0.01～1.5mm，不符合取样截面（见图2b）的裂纹形貌，说明造成该锻模淬火开裂报废另有原因。



（a）表面脱碳层 （b）内部显微组织

图4 锻模显微组织

2. 裂纹产生原因分析

（1）该锻模采用箱式电阻炉木炭装箱保护的加热方式，保护箱尺寸460mm×360mm×360mm，具体热处理执行工艺为：600～650℃保温2h→800～850℃保温2h→1030～1040℃保温5h→预冷（静置于空气中）到730～750℃入油，200

～300℃出油空冷至室温→590～610℃回火两次。

仔细分析该锻模热处理工艺发现，类似大小的锻模不允许冷到室温，应带温回火，即当锻模表面冷到180℃～200℃时，就应该立即装炉回火，而且在回火温度达到300℃前必须缓慢加热。

（2）从材料性能来分析，4Cr5W2VSi钢在1030～1040℃奥氏体化时，钢中Cr、W、V元素形成了（Cr、Fe）$_7C_3$、（W、Fe）$_6C_3$、VC等特殊碳化物，增大了过冷奥氏体的稳定性，使C曲线右移，Cr、W、V元素将强烈推迟珠光体转变，但是并不推迟贝氏体转变，以致珠光体和贝氏体转变的曲线造成分离，形成了两个“鼻子”，使该钢奥氏体等温转变曲线在高温及中温两个区域之间出现一个过冷奥氏体不易转变的亚稳定区域，如图5所示。

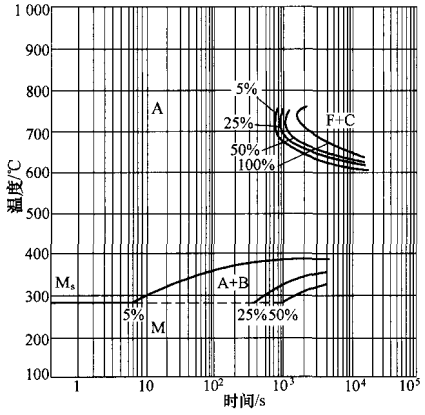


图5 4Cr5W2VSi钢等温转变曲线（奥氏体化1030℃）

从4Cr5W2VSi钢等温转变曲线中可知，该钢淬火临界冷却速度小，淬火时容易得到马氏体组织，并易于淬透，是一种空冷即能硬化的热作模具钢。其*Ms*点为275℃，*Mf*点为90℃。因此，在实际生产中，该钢有效厚度100mm以下的模具采用空冷，而有效厚度超过100mm模具则要采用预冷后淬火油冷，并在油冷到逼近马氏体转变开始点（*Ms*为275℃）时出油在空气中进行缓慢冷却的断续淬火法，来满足淬火冷却的规律——只在临界区快速冷却，在危险区缓慢冷却。

试验表明，大件工具钢淬火到230℃左右取出进行缓冷，是适宜的断续淬火操作，其淬火裂纹的发生率降为零。又由于其马氏体转变结束点（*Mf*为90℃）高于室温，相变应力极大，若不及时回火，在常温下放置时，因其淬火组织（马氏体+残留奥氏体）不稳定，将不断向其他组织转变，而且大部分要发生膨胀相变，即残留奥氏体的马氏体化引起开裂，该锻模淬火工艺要求出油空冷到室温后进炉回火，一直空冷3~4h，因此导致一件锻模背部出现了肉眼能观察到的严重开裂。

（3）该锻模淬火出油在空气中空冷3～4h后（锻模表面70~80℃），才进炉回火，此时锻模组织转变基本结束，90%转变为淬火马氏体组织。由于组织转变时锻模表面处于膨胀状态，当把这种组织快速加热到590～610℃进行回火时，表面层易产生收缩，而内部依然处于膨胀状态，以致表层受到拉应力叠加，当表层拉应力超过断裂强度时发生回火裂纹，又由于锻模表面有脱碳层存在，回火裂纹出现就更为明显。

为了防止淬火件回火时产生快速加热裂纹，以缓慢加热到300℃为宜，在300℃以上即使快速加热也不发生裂纹，理由是淬火马氏体回火时，先在100℃左右收缩，继而在约300℃发生第二次收缩，以后在加热中不再收缩。

3. 工艺改进方案及效果

分析可知，生产中执行的原热处理工艺存在问题，直接导致了锻模开裂报废。如果该锻模油冷后不是直接空冷到室温，而是在模具表面180～200℃进炉回火，并在280～300℃等温停留1.5~2h，情况会有根本变化。首先，及时回火，避免了残留奥氏体的马氏体化不利因素，减小组织应力，从而降低零件表面的拉应力，达到减少表面淬裂危险的目的；其次，在280～300℃等温停留时，在该温度区间转变的组织为下贝氏体组织，强度高，韧性好，300℃左右过冷奥氏体稳定性差，转变速度快，1.5~2h的停留时间绝大部分（90%以上）可转变完成，此后用适当的温度回火即可完成热处理工序。

重新修订该锻模热处理工艺，锻模加热过程不变，淬火预冷（静置于空气中）到730～750℃入油，200～300℃出油空冷至180～200℃进炉回火，并在280～300℃等温停留1.5~2h，促使组织转变，减少淬火应力，并规范了装箱木炭的加入量。

2012年3～5月按改进后的热处理工艺对12件叶片精锻模进行了热处理，结果令人满意，避免了裂纹的产生，硬度48～52HRC，满足锻模图样设计要求。 现已将修改后的工艺编制成标准工艺施工单，进行了工艺标准化，以杜绝此类裂纹再出现。

MW（20121026）