

常见的十种淬火裂纹分析与预防

模具钢热处理中，淬火是常见工序。然而，因种种原因，有时难免会产生淬火裂纹，致使前功尽弃。分析裂纹产生原因，进而采取相应预防措施，具有显著的技术经济效益。常见淬火裂纹有以下 10 种类型。

1、纵向裂纹

裂纹呈轴向，形状细而长。当模具完全淬透即无心淬火时，心部转变为比容最大的淬火马氏体，产生切向拉应力，模具钢的含碳量愈高，产生的切向拉应力愈大，当拉应力大于该钢强度极限时导致纵向裂纹形成。以下因素又加剧了纵向裂纹的产生：

(1) 钢中含有较多 S、P、Sb、Bi、Pb、Sn、As 等低熔点有害杂质，钢锭轧制时沿轧制方向呈纵向严重偏析分布，易产生应力集中形成纵向淬火裂纹或原材料轧制后快冷形成的纵向裂纹未加工掉保留在产品中导致最终淬火裂纹扩大形成纵向裂纹；

(2) 模具尺寸在钢的淬裂敏感尺寸范围内(碳工具钢淬裂危险尺寸为 8-15mm，中低合金钢危险尺寸 25-40mm)或选择的淬火冷却介质大大超过该钢的临界淬火冷却速度时均易形成纵向裂纹。

预防措施：

- (1) 严格原材料入库检查，对有害杂质含量超标钢材不投产；
- (2) 尽量选用真空冶炼、炉外精炼或电渣重熔模具钢材；
- (3) 改进热处理工艺，采用真空加工热、保护气氛加热和充分脱氧盐浴炉加热及分析淬火、等温淬火；
- (4) 变无心淬火为有心淬火即不完全淬透，获得强韧性高的下贝氏体组织等措施，大幅度降低拉应力，能有效避免模具纵向开裂和淬火畸变。

2、横向裂纹

裂纹特征是垂直于轴向。未淬透模具，在淬硬区与未淬硬区过渡部分存在大的拉应力峰值，大型模具快速冷却时易形成大的拉应力峰值，因形成的轴向应力大于切向应力，导致产生横向裂纹。锻造模块中 S、P、Sb、Bi、Pb、Sn、As 等低熔点有害杂质的横向偏析或模块存在横向显微裂纹，淬火后经扩展形成横向裂纹。

预防措施：

- (1) 模块应合理锻造，原材料长度与直径之比即锻造比最好选在 2-3 之间，锻造之间双十字形变向锻造，经五锻五拔多火锻造，使钢中碳化物和杂质呈细、小、

匀分布于钢基体，锻造纤维组织围绕型腔无定向分布，大幅度提高模块横向力学性能，减少和消除应力源；

(2) 选择理想的冷却速度和冷却介质：在钢的 M_s 点以上快冷，大于该钢临界淬火冷却速度，钢中过冷奥氏体产生的应力为热应力，表层为压应力，内层为张应力，相互抵消，有效防止热应力裂纹形成，在钢的 M_s - M_f 之间缓冷，大幅度降低形成淬火马氏体时的组织应力。当钢中热应力与相应应力总和为正(张应力)时，则易淬裂，为负时，则不易淬裂。充分利用热应力，降低相变应力，控制应力总和为负，能有效避免横向淬火裂纹发生。CL-1 有机淬火介质是较理想淬火剂，同时可减少和避免淬火模具畸变，还可控制硬化层合理分布。调正 CL-1 淬火剂不同浓度配比，可得到不同冷却速度，获得所需硬化层分布，满足不同模具钢需求。

3、弧状裂纹

常发生在模具棱角、凸台、刀纹、尖角、直角、缺口、孔穴、凹模接线飞边等形状突变处。这是因为，淬火时棱角处产生的应力是平滑表面平均应力的 10 倍。

(1) 钢中含碳(C)量和合金元素含量愈高，钢 M_s 点愈低， M_s 点降低 2°C ，则淬裂纹倾向增加 1.2 倍， M_s 点降低 8°C ，淬裂倾向则增加 8 倍；

(2) 钢中不同组织转变和相同组织转变不同时性，由于不同组织比容差，造成巨大组织应力，导致组织交界处形成弧状裂纹；

(3) 淬火后未及时回火，或回火不充分，钢中残余奥氏体未充分转变，保留在使用状态中，促使应力重新分布，或模具服役时残余奥氏体发生马氏体相变产生新的内应力，当综合应力大于该钢强度极限时便形成弧状裂纹；

(4) 具有第二类回火脆性钢，淬火后高温回火缓冷，导致钢中 P、S 等有害杂质化合物沿晶界析出，大大降低晶界结合力和强韧性，增加脆性，服役时在外力作用下形成弧状裂纹。

预防措施：

(1) 改进设计，尽量使形状对称，减少形状突变，增加工艺孔与加强筋，或采用组合装配；

(2) 圆角代直角及尖角锐边，贯穿孔代盲孔，提高加工精度和表面光洁度，减少应力集中源，对于无法避免直角、尖角锐边、盲孔等处一般硬度要求不高，可用铁丝、石棉绳、耐火泥等进行包扎或填塞，人为造成冷却屏障，使之缓慢冷却淬火，避免应力集中，防止淬火时弧状裂纹形成；

(3) 淬火钢应及时回火，消除部分淬火内应力，防止淬火应力扩展；

(4) 较长时间回火，提高模具抗断裂韧性值；

(5) 充分回火，得到稳定组织性能；

(6) 多次回火使残余奥氏体转变充分和消除新的应力；

(7) 合理回火，提高钢件疲劳抗力和综合机械力学性能；

(8)对于有第二类回火脆性模具钢高温回火后应快冷(水冷或油冷),可消除二类回火脆性,防止和避免淬火时弧状裂纹形状。

4、剥离裂纹

模具服役时在应力作用下,淬火硬化层一块块从钢基体中剥离。因模具表层组织和心部组织比容不同,淬火时表层形成轴向、切向淬火应力,径向产生拉应力,并向内部突变,在应力急剧变化范围较窄处产生剥离裂纹,常发生于经表层化学热处理模具冷却过程中,因表层化学改性与钢基体相变不同时性引起内外层淬火马氏体膨胀不同时进行,产生大的相变应力,导致化学处理渗层从基体组织中剥离。如火焰表面淬硬层、高频表面淬硬层、渗碳层、碳氮共渗层、渗氮层、渗硼层、渗金属层等。化学渗层淬火后不宜快速回火,尤其是300℃以下低温回火快速加热,会促使表层形成拉应力,而钢基体心部及过渡层形成压缩应力,当拉应力大于压缩应力时,导致化学渗层被拉裂剥离。

预防措施:

- (1)应使模具钢化学渗层浓度与硬度由表至内平缓降低,增强渗层与基体结合力,渗后进行扩散处理能使化学渗层与基体过渡均匀;
- (2)模具钢化学处理之前进行扩散退火、球化退火、调质处理,充分细化原始组织,能有效防止和避免剥离裂纹产生,确保产品质量。

5、网状裂纹

裂纹深度较浅,一般深约0.01~1.5mm,呈辐射状,别名龟裂。原因主要有:

- (1)原材料有较深脱碳层,冷却削加工未去除,或成品模具在氧化气氛炉中加热造成氧化脱碳;
- (2)模具脱碳表层金属组织与钢基体马氏体含碳量不同,比容不同,钢脱碳表层淬火时产生大的拉应力,因此,表层金属往往沿晶界被拉裂成网状;金属加工微信内容不错,值得关注。
- (3)原材料是粗晶粒钢,原始组织粗大,存在大块状铁素体,常规淬火无法消除,保留在淬火组织中,或控温不准,仪表失灵,发生组织过热,甚至过烧,晶粒粗化,失去晶界结合力,模具淬火冷却时钢的碳化物沿奥氏体晶界析出,晶界强度大大降低,韧性差,脆性大,在拉应力作用下沿晶界呈网状裂开。

预防措施:

- (1)严格原材料化学成分、金相组织和探伤检查,不合格原材料和粗晶粒钢不宜作模具材料;
- (2)选用细晶粒钢、真空电炉钢,投产前复查原材料脱碳层深度,冷切削加工余量必须大于脱碳层深度;
- (3)制订先进合理热处理工艺,选用微机控温仪表,控制精度达到 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$,定时现场校验仪表;

(4) 模具产品最终处理选用真空电炉、保护气氛炉和经充分脱氧盐浴炉加热模具产品等措施，有效防止和避免网状裂纹形成。

6、冷处理裂纹

模具钢多为中、高碳合金钢，淬火后还有部分过冷奥氏体未转变成马氏体，保留在使用状态中成为残余奥氏体，影响使用性能。若置于零度以下继续冷却，能促使残余奥氏体发生马氏体转变，因此，冷处理的实质是淬火继续。室温下淬火应力和零度下淬火应力叠加，当叠加应力超过该材料强度极限时便形成冷处理裂纹。

预防措施：

(1) 淬火后冷处理之前将模具置于沸水中煮 30-60 分钟，可消除 15%-25% 淬火内应力并使残余奥氏体稳定化，再进行 -60℃ 常规冷处理，或进行 -120℃ 深冷处理，温度愈低，残余奥氏体转变成马氏体量愈多，但不可能全部转变完，实验表明，约有 2%-5% 残余奥氏体保留下来，按需要保留少量残余奥氏体可松弛应力，起缓冲作用，因残余奥氏体又软又韧，能部分吸收马氏体化急剧膨胀能量，缓和相变应力；

(2) 冷处理完毕后取出模具投入热水中升温，可消除 40%-60% 冷处理应力，升温至室温后应及时回火，冷处理应力进一步消除，避免冷处理裂纹形成，获得稳定性组织性能，确保模具产品存放和使用中不发生畸变。

7、磨削裂纹

常发生在模具成品淬火、回火后磨削冷加工过程中，多数形成的微细裂纹与磨削方向垂直，深约 0.05-1.0mm。

(1) 原材料预处理不当，未能充分消除原材料块状、网状、带状碳化物和发生严重脱碳；

(2) 最终淬火加热温度过高，发生过热，晶粒粗大，生成较多残余奥氏体；

(3) 在磨削时发生应力诱发相变，使残余奥氏体转变为马氏体，组织应力大，加上因回火不充分，留有较多残余拉应力，与磨削组织应力叠加，或因磨削速度、进刀量大及冷却不当，导致金属表层磨削热急剧升温至淬火加热温度，随之磨削液冷却，造成磨削表层二次淬火，多种应力综合，超过该材料强度极限，便引起表层金属磨削裂纹。

预防措施：

(1) 对原材料进行改锻，多次双十字形变向锻拔锻造，经四锻四拔，使锻造纤维组织围绕型腔或轴线呈波浪形对称分布，并利用最后一火高温余热进行淬火，接着高温回火，能充分消除块状、网状、带状和链状碳化物，使碳化物细化至 2-3 级；

(2) 制订先进的热处理工艺，控制最终淬火残余奥氏体含量不超标；

- (3) 淬火后及时进行回火，消除淬火应力；
- (4) 适当降低磨削速度、磨削量、磨削冷却速度，能有效防止和避免磨削裂纹形成。

8、线切割裂纹

该裂纹出现在经过淬火、回火的模块在线切割加工过程中，此过程改变了金属表层、中间层和心部应力场分布状态，淬火残余内应力失去平衡变形，某一区域出现大的拉应力，此拉应力大于该模具材料强度极限时导致炸裂，裂纹是弧尾状刚劲变质层裂纹。实验表明，线切割过程是局部高温放电和迅速冷却过程，使金属表层形成树枝铸态组织凝固层，产生 600-900MPa 拉应力和厚约 0.03mm 的高应力二次淬火白亮层。

裂纹产生原因：

- (1) 原材料存在严重的碳化物偏析；
- (2) 仪表失灵，淬火加热温度过高，晶粒粗大，降低材料强韧性，增加脆性；
- (3) 淬火工件未及时回火和回火不充分，存在过大的残余内应力和线切割过程中形成的新内应力叠加导致线切割裂纹。

预防措施：

- (1) 严格原材料入库前检查，确保原材料组织成分合格，对不合格原材料必须改进锻，击碎碳化物，使化学成分、金相组织等达到技术条件后方可投产、模块热处理前加工成品需留足一定磨量后淬火、回火、线切割；
- (2) 入炉前校验仪表，选用微机控温，控温精度 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ，真空炉、保护气氛炉加热，严防过热和氧化脱碳；
- (3) 采用分级淬火、等温淬火和淬火后及时回火，多次回火，充分消除内应力，为线切割创造条件；
- (4) 制订科学合理线切割工艺。

模具服役时在交变应力反复作用下形成的显微疲劳裂纹缓慢扩展，导致突然疲劳断裂。

- (1) 原材料存在发纹、白点、孔隙、疏松、非金属夹杂、碳化物严重(下接 2、3 版中缝)重偏析、带状组织、块状游离铁素体冶金组织缺陷，破坏了基体组织连续性，形成不均匀应力集中。钢锭中 H₂ 未排除，导致轧制时形成白点。钢中存在 Sb、Bi、Pb、Sn、As 和 S、P 等有害杂质，钢中的 P 易引起冷脆，而 S 易引起热脆，S、P 有害杂质超标均易形成疲劳源；
- (2) 化学渗层过厚、浓度过大、渗层过徒、硬化层过浅、过渡区硬度低等都可导致材料疲劳强度急剧降低；
- (3) 当模面加工粗糙、精度低、光洁度差，以及刀纹、刻字、划痕、碰伤、腐蚀麻面等也易引起应力集中导致疲劳断裂。

预防措施：

- (1)严格选材，确保材质，控制 Pb、As、Sn 等低熔点杂质与 S、P 非金属杂质含量不超标；
- (2)投产前进行材质检查，不合格原材料不投产；
- (3)选用具有纯洁度高、杂质少、化学成分均匀、晶粒细、碳化物小、等向性能好，疲劳强度高特点的电渣重熔精炼钢，对模具型面表面喷丸强化和表面化学渗层改性强化处理，使金属表层为预压应力，抵消模具服役时产生的拉应力，提高模具型面疲劳强度；
- (4)提高模具型面加工精度和光洁度；
- (5)改善化学渗层和硬化层组织性能；
- (6)采用微机控制化学渗层厚度、浓度和硬化层厚度。

9、疲劳裂纹

模具服役时在交变应力反复作用下形成的显微疲劳裂纹缓慢扩展，导致突然疲劳断裂。

- (1)原材料存在发纹、自点、孔隙、疏松、非金属夹杂、碳化物严重偏析、带状组织、块状游离铁素体冶金组织缺陷，破坏了基体组织连续性，形成不均匀应力集中。钢锭中 112 未排除，导致轧制时形成白点。钢中存在 Bi、Pb、Sn、As 和 S、P 等有害杂质，钢中的 P 易引起冷脆，而 s 易引起热脆，S、P 有害杂质超标均易形成疲劳源；
- (2)化学渗层过厚、浓度过大、渗层过度、硬化层过浅、过渡区硬度低等都可导致材料疲劳强度急剧降低；
- (3)当模面加工粗糙、精度低、光洁度差，以及刀纹，刻字、划痕、碰伤、腐蚀麻面等也易引起应力集中导致疲劳断裂。

预防措施：

- (1)严格选材，确保材质，控制 Pb、As、Sn 等低熔点杂质与 S、P 非金属杂质含量不超标；
- (2)投产前进行材质检查，不合格原材料不投产；
- (3)选用具有纯洁度高、杂质少、化学成分均匀、晶粒细，碳化物小、等向性能好，疲劳强度高特点的电渣重熔精炼钢，对模具型面表面喷丸强化和表面化学渗层改性强化处理，使金属表层为预压应力，抵消模具服役时产生的拉应力，提高模具型面疲劳强度；
- (4)提高模具型面加工精度和光洁度；
- (5)改善化学渗层和硬化层组织性能；采用微机控制化学渗层厚度、浓度和硬化层厚度。

10、应力腐蚀裂纹

该裂纹常发生在使用过程中。金属模具因化学反应或电化学反应过程，引起

从表至内组织结构损坏腐蚀作用而产生开裂，这就是应力腐蚀裂纹。模具钢因热处理后组织不同，抗蚀性能也不同。最耐蚀组织为奥氏体(A)，最易腐蚀组织为屈氏体(T)，依次为铁素体(F)马氏体(M)珠光体(P)索氏体(S)。因此，模具钢热处理不宜得到T组织。淬火钢虽经回火，但因回火不充分，淬火内应力或多或少依然存在，模具服役时在外力作用下也会产生新的应力，凡有应力存在于金属模具中就会有应力腐蚀裂纹发生。

预防措施：

- (1)模具钢淬火后应及时回火，充分回火，多次回火，以消除淬火内应力；
- (2)模具钢淬火后一般不宜在 350-400℃回火，因 T 组织常在此温度出现，发生有 T 组织模具应重新处理，模具应进行防锈处理，提高抗蚀性能；
- (3)热作模具服役前进行低温预热，冷作模具服役一个阶段后进行一次低温回火消除应力，不仅能防止和避免应力腐蚀裂纹发生，还可大幅度提高模具使用寿命，一举两得，有显著技术经济效益。

来源：热处理生态圈