

金属模锻件锻造和热处理过程中 裂纹形成原因分析

侯敬都, 王禹婷

(章丘市宝华锻造有限公司, 山东 济南 250200)

摘要 本文对金属模锻件锻造及热处理裂纹产生的原因、诊断方法及控制策略进行了系统分析。金属模锻件锻造和热处理过程中的裂纹主要源于锻造缺陷(过热、过烧、折叠等)和热处理缺陷(淬裂等),其产生与工艺参数不当、材料敏感性、应力集中密切相关。采用宏观形貌观察、微观组织分析、断口分析相结合的方法,可以有效地识别裂纹的类型及产生原因。最后,从系统性预防、过程监控与检验、纠正改进三方面提出控制策略,旨在提升工艺稳定性与产品质量,为实际生产提供理论参考。

关键词 模锻件; 锻造; 热处理; 裂纹成因

中图分类号: TGI

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.040

0 引言

金属模锻件锻造和热处理是促进金属零件性能提高的关键工艺,但是在工艺中容易出现裂纹缺陷,极大地影响产品的可靠性和使用寿命。裂纹产生的原因比较复杂,它涉及材料特性、工艺参数、外部应力的多重影响。目的是对锻造过程中过热、过烧、折叠、淬裂缺陷产生机理进行系统阐述,同时对裂纹的识别诊断进行介绍。通过对裂纹宏观和微观特征的深入剖析,对其防治策略做进一步探索,以期达到优化工艺,减少缺陷的目的,并对工程实践有一定借鉴意义,有助于制造业质量控制和技术创新。

1 金属模锻件锻造缺陷与热处理缺陷

1.1 过热、过烧

过热和过烧都是锻造加热阶段由于温度控制失当造成的严重组织缺陷,二者无论从程度还是后果都有本质的不同。过热是金属材料锻造加热过程中温度高于其合理锻造温度区间的上限值,且在该温度停留的时间太长,造成奥氏体晶粒异常粗化。粗大奥氏体晶粒可使材料塑性和韧性显著下降,并在随后锻造变形或者冷却时加大开裂倾向,称为“过热脆性”。虽然通过后续的热处理(再正火、再正火几次等)有可能细化因过热而粗化的晶粒,恢复部分性能,但这无疑增加工艺复杂性和成本,且对某些材料效果有限^[1]。而且过烧是更严重,更不可逆转的缺陷。加热温度比过热

温度高得多,在固相线附近或到达固相线后,不但奥氏体晶粒变得异常粗大,而且其关键在于,晶界将被氧化乃至部分熔化。氧化性气氛下,氧沿着粗大晶界渗透,生成低熔点氧化物或者共晶体,极大地减弱晶界结合力;当发生局部熔化时,晶界的连续性会被直接打破。过烧材料晶界强度很低,受到微小锻造变形力或者内应力时就会沿着晶界产生裂纹,断口呈现出粗糙“石块状”或者“冰糖状”等特征,且其力学性能,尤其是塑性和韧性,会发生灾难性下降,材料只能报废^[2]。

1.2 锻造裂纹

锻造裂纹就是锻造变形时或者变形不久后在锻件表面或者内部出现的一种裂纹。它是由变形抗力、材料塑性、温度场、应力场等因素综合作用而成的。根据其成因,主要可分为以下几类:第一,由材料冶金缺陷引发的裂纹,如钢中的非金属夹杂物(尤以铝酸盐、硅酸盐等脆夹的含量最高)、严重的碳化物偏析、残余缩孔或疏松等。锻造变形过程中,上述缺陷处容易出现应力集中现象,是裂纹起裂的根源,有可能沿着变形方向延伸^[3]。第二,由于工艺不当而产生裂纹,如加热不均匀造成锻件各段塑性相差较大、变形不和谐等;过快的变形速度使变形的热效应显著,会引起局部的过热乃至过烧;变形量分布不合理,对低塑性区变形过大,或者临界变形度时造成晶粒粗大;锻造温度过低,物料进入冷脆状态而塑性锐减。第三,终锻温度过低或冷却过快,对于某些空冷淬硬倾向较大

作者简介:侯敬都(1996-),男,本科,研究方向:锻件、法兰盘的热处理。

的材料（高碳钢、高合金钢等），若锻后置于地面或空气中快速冷却，可能会出现组织应力和热应力的叠加而造成表面或者内部的开裂，这类开裂有时被认为是淬火开裂，但是根本原因在于锻造工序的影响^[4]。

1.3 折叠

折叠是锻造过程中一种特有的表面缺陷，但其根部往往是应力集中点，极易在后续热处理或服役中发展为裂纹源。折叠的实质就是锻件表面已经氧化的金属经过急剧塑性变形后挤压到锻件本体上，从而产生类似于分层状缺陷。究其原因，主要是模具设计、坯料形状、锻造操作等因素有关。例如：坯料尺寸选择不当（过小），需经过大的镦粗来填充模腔，易在棱角处产生对流而形成折叠；模具的设计不尽合理，如圆角半径太小、拔模斜度不够等，造成金属流动不畅和充填时表面金属向内挤压；操作失误，如单次锤击时给压下量过大或者砧子外形不当造成金属流动不均等。折叠从宏观上看是和表面成一夹角的间隙，内壁往往附着一层氧化皮或者脱碳层而和基体组织不联系。在随后的热处理尤其是淬火过程中，由于尖锐缺口效应，折叠根部将出现较大的应力集中现象，远超材料强度极限而诱发淬火裂纹，或者在服役过程中过早萌生疲劳裂纹^[5]。

1.4 淬裂

淬裂在热处理特别是淬火时是最为典型而又危险的裂纹缺陷。它是工件在奥氏体化温度下迅速冷却（淬火）时产生的，其主要原因是较大的热应力和组织应力的综合影响。热应力来源于工件截面内、外温差，使表面先冷后缩，心部冷却后缩，形成表面拉应力和心部压应力瞬间状态。组织应力则源于奥氏体向马氏体转变时发生的体积膨胀，由于转变非同步（一般情况下，表面是马氏体转变），导致表面膨胀受心部制约而产生压应力，心部则受表面膨胀的拉扯而产生拉应力。冷却过程中一定阶段两种应力将相互叠加。对大多数钢件来说，淬裂一般出现在冷却的后期，工件表面的温度已经很低时塑性很差，内部则是马氏体的转变引起体积膨胀，使得已经变硬的表面受到过大的拉应力作用，当这种拉应力大于材料在此温度范围内的断裂强度，就会发生淬裂。淬裂的敏感性受到很多因素的影响，如材料自身高碳高合金化趋势使淬透性增大，马氏体硬度提高，而韧性下降；工件截面尺寸的突变、尖锐棱角、孔槽的存在以及其他几何因素的影响，导致应力集中；淬火介质选择不当（冷却能力过强）、介质温度控制不均或搅拌不良；奥氏体化温度过高会使晶粒粗大而使断裂强度下降；原材料上有上述锻造折叠，夹杂物和其他缺陷。

2 金属模锻件裂纹的鉴别诊断与分析方法

2.1 宏观形貌观察

宏观形貌观察在裂纹分析中占有首要地位，它是最为直观和迅速地获得信息的方法。主要是靠肉眼、放大镜、体视显微镜从整体上考察裂纹及裂纹附近的范围^[6]。观察的重点内容包括：裂纹的位置与分布（是发生在应力集中部位还是截面突变处，是在表面上还是在内有无规律）；裂纹的宏观走向（它是否沿着晶界呈网状分布，并沿着变形方向扩展，或者与主应力的方向垂直）；裂纹的形态特征（直的、弯的、分叉的、龟裂的、弧线状的）；裂纹的开口情况（宽窄、是否充满氧化物、边缘是否圆钝）；与裂纹相关的其他表面特征（有无折叠、皱纹、压痕、氧化皮脱落、颜色不正常等）。如锻造过烧裂纹常以网状或龟裂的形式存在于锻件的表面，断口晶粒较粗；淬火裂纹一般较笔直，从尖角、孔边开始，向刚健方向发展；当进行锻造折叠时，它呈现为与表面形成尖锐角度的裂缝。通过宏观观察，初步判断裂纹产生的工艺阶段（锻造过程、热处理过程或后续），并为后续的取样和微观分析指明方向。

2.2 微观组织分析

微观组织分析充当宏观形态与材料内部变化之间的连接纽带，主要是通过光学显微镜和扫描电子显微镜，来对含有裂纹的样本进行金相分析和观察。这一阶段的中心工作是揭示裂纹和材料微观组织间的相互关系。分析者需准备含有裂纹尖端及其两侧区的典型金相试样并进行研磨、抛光、腐蚀等处理，然后进行观测。关键分析点包括：裂纹的扩展路径（是沿着晶界延伸、穿晶延伸，还是沿着夹杂物和偏析带等具体组织延伸）；裂纹两侧及尖端的组织状态（有无过热粗晶、过烧熔化晶界、脱碳、氧化、增碳、非马氏体组织及其他异常现象）；裂纹内部是否存在外来物（氧化产物、熔渣、模具材料等）；基体材料的组织是否正常（晶粒度、相组成、第二相的分布情况）。

2.3 断口分析

断口作为裂纹扩展过程中遗留下来的自然记录，携带断裂过程中的重要信息。断口的详细分析，特别是通过扫描电子显微镜进行的微观层面的断口研究，被认为是识别断裂模式和成因的最有效手段。对已经出现裂纹的工件要尽量将裂纹张开，并对新鲜断口进行观测。分析时需注意：先进行低倍观察，了解断口的宏观形貌（纤维区与放射区和剪切唇之比以及放射纹所指），判断断裂源的位置。再分别对断裂源区、扩展区、瞬断区进行高倍观察以确定其微观形貌特征。常见的微观断裂特征包括：解理台阶和河流花样（脆性穿晶断裂）、韧窝（微孔聚合型延性破裂）、沿晶界分离（晶

脆性断裂)、疲劳辉纹(疲劳断裂)等。如淬火裂纹断口常表现为准解理或者沿晶脆性,并可伴随少量撕裂棱;在过烧裂纹沿晶断口处,可能会发现有熔融球状物或者氧化物;如果裂纹是由于服役过程中的疲劳而扩展的,断口中就有可能发现贝纹线或者疲劳辉纹。结合能谱分析还可鉴别断口中夹杂物和腐蚀产物的成分并溯源。断口分析和金相组织分析互为补充,共同建构对裂纹萌生,扩展整个过程的全面理解。

3 金属模锻件锻造和热处理过程中裂纹预防与控制策略

3.1 系统性地预防

系统性预防为金属模锻件裂纹控制奠定了基石,其目的在于从根本上杜绝或者降低裂纹发生的危险。第一,需对材料有深入的认识,根据部件的使用环境和性能标准,进行科学的选择,并对原材料,包括其化学成分,进行严格的质量控制、纯净度(控制夹杂物的层次与形貌)、原始组织及表面状态。第二,根据材料特性及零件形状对其进行精密工艺设计。锻造方面:建立合理加热规范并采取阶梯加热以防止热应力过大,严格控制始锻和终锻的温度区间以避免过热和过烧;对变形工艺和模具进行设计和优化,保证金属流线的合理性,避免折叠和回流缺陷的出现,对复杂件可以通过多次锻造和合理安排中间退火来消除加工硬化现象。热处理方面:根据材料 CCT/TTT 曲线和零件尺寸,设计恰当的奥氏体化温度与时间、淬火介质(油、水、聚合物溶液等)、冷却方式(分级淬火、等温淬火等)以及回火工艺;对于易裂件可以考虑特殊的工艺进行预热、预冷淬火、带温入炉。

3.2 过程监控与检验

无论多么完善的工艺设计,都必须有严格的工艺实施作为保障。过程监控和检验是保证过程稳定,发现问题及时解决的重要途径。过程监控包括对关键工艺参数的实时监测与记录,如加热炉的炉温均匀性、工件实际温度(用红外测温、埋热电偶测温)、保温时间、冷却介质温度及搅拌状态,锻造设备打击能量或者压力。利用数字化、智能化监控系统能够自动采集数据、超限报警、趋势分析等功能,增强监控精确性。过程检验又渗透在各过程间。锻造后,应对锻件进行外观检查(目视,磁粉或者渗透探伤等)以发现表面裂纹、折叠;重要零件采用超声波探伤,检验其内部缺陷。热处理前后也应进行外观和尺寸检查,热处理后可利用硬度测试、无损探伤(磁粉、涡流等)进行初步质量评估。对大批量生产来说,首件检验与定期抽检制度的建立是关键。全部监控及检验数据要完整地保存并形成可追溯质量记录,以便为质量分析及工艺优化提供数据支撑。

3.3 纠正与改进

在检查中发现金属模锻件裂纹或者潜在的风险后,就需要开始纠正和改进程序。第一,立即对有缺陷的产品进行隔离,避免进入下一道工序或者出厂。然后,组织跨部门团队(由工艺、质量、生产、材料部门组成)进行根本原因分析。分析应基于前述的裂纹诊断方法(宏观、微观、断口分析),结合过程记录数据,系统地排查材料、工艺、设备、操作、环境和其他一切可能的因素决定引起裂纹的根源。依据分析结果制定和执行有针对性地纠正措施:调整工艺参数,对设备进行检修或校准,改善操作手法和更换物料批次。第二,纠正措施的落实需要小批量试生产来证明。更要把个例分析得出的经验与教训反馈给工艺文件、操作规程、质量控制计划等系统性预防性改进,对 FMEA(失效模式及影响分析等)库进行更新,对工艺窗口进行优化,并对检验标准进行了完善。这种基于“找出问题—分析原因—采取对策—验证效果—固化标准”的闭环管理,是推动工艺能力持续提升、实现裂纹问题根治的核心机制。

4 结束语

金属模锻件锻造及热处理工艺裂纹预防与控制是一个系统性工程,必须从成因分析、诊断与检测、预防与控制等各方面入手。本文论述了裂纹产生的主要原因、鉴别方法以及系统性预防、过程监控和持续改进的策略。未来,要进一步将智能化监测和工艺优化有机结合起来,以提高裂纹控制精准性和效率。只有不断地加深理论研究和实践应用才能够有效地减少产品的缺陷率和保证产品的质量,促进锻造和热处理技术朝着更高效、可靠的方向不断地发展。

参考文献:

- [1] 沈忱,郭凝,夏蓉,等.锻造更强铝合金:探秘中间形变热处理工艺对7050铝合金微观组织和性能的影响[J].金属世界,2025(06):76-82.
- [2] 李磊,裴家伟,孔佳.锻造与热处理工艺对2Cr13组织及性能的影响[J].热加工工艺,2025,54(13):175-182.
- [3] 朱梦颖,程和法.热处理锻造工艺对6016铝合金汽车板力学性能的影响[J].太原学院学报(自然科学版),2025,43(03):53-59.
- [4] 王莹莹,刘海江,赵文斌,等.锻造和热处理工艺对35CrNi3MoV锻件冲击性能的影响[J].锻压技术,2025,50(03):137-143.
- [5] 杨涛,尹奏凯,丁屹墀.双重退火热处理对TC6锻造叶片组织和性能的影响[J].航空动力,2024(05):75-78.
- [6] 徐临超,叶赛男,王文权,等.热处理工艺对锻造430F铁素体不锈钢组织和性能的影响[J].特殊钢,2024,45(06):83-87.