

浅谈油套管的缺陷与失效问题

韩华刚 张帆 安珂

北京隆盛泰科石油管科技有限公司 北京 100005

摘要:油套管在油气开采中至关重要,然而其缺陷与失效问题严重影响服役可靠性。本文分析了油套管存在的材质、加工、腐蚀、损伤等缺陷类型,阐述了断裂、腐蚀、变形、密封等失效形式,探讨了材料、加工、服役工况、安装维护等诱发因素。针对这些问题,提出了贯穿生产全流程的缺陷预防、结合失效形式的防控、依据缺陷类型的修复以及服役过程常态化维护等解决方案与应对措施,为保障油套管服役稳定性提供参考。

关键词:油套管;缺陷类型;失效形式;诱发因素;应对措施

引言:在油气资源开采进程中,油套管作为关键设备,承担着传输流体、支撑井壁、隔离地层等重要任务,其服役可靠性直接关系到油气井的安全与生产效率。然而,受材料、加工、服役环境等多种因素影响,油套管易出现各类缺陷,进而引发断裂、腐蚀、变形、密封失效等问题,不仅缩短了油套管的使用寿命,增加了油气开发成本,还可能引发严重的安全事故。因此,深入研究油套管的缺陷与失效问题,探寻有效的解决方案与应对措施,具有重要的现实意义。

1 油套管的缺陷类型

1.1 材质类缺陷

材质类缺陷源于油套管生产源头的铸坯质量与成分控制,是影响套管力学性能和服役可靠性的基础性缺陷。高强耐蚀油套管钢的铸坯中常存在点状偏析,主要分为斑块型和疏松型两类,两类偏析区域均存在明显的碳、铬、钼、锰等合金元素正偏析,其中斑块型偏析区域还易出现细小枝晶亚结构^[1]。这类偏析缺陷会直接导致后续轧材中形成难以通过热处理消除的大尺度带状缺陷,热轧态套管中表现为珠光体加贝氏体组织带状,调质态套管则呈现颗粒型碳化物带状,均会破坏材质硬度均匀性。此外,材质韧性不足、晶粒粗大以及不良显微组织的形成,也属于常见材质类缺陷,多由成分设计不合理或生产工艺控制失误引发,会显著降低套管抗腐蚀和抗开裂能力。

1.2 加工类缺陷

加工类缺陷产生于油套管轧制、螺纹加工及表面处理等生产环节,与加工工艺参数控制和操作精度密切相关。加工环节是油套管从原材料到成品的关键转化过程,任何一个细微的失误都可能导致缺陷的产生。轧制过程中易出现折叠、分层、孔洞等缺陷,螺纹加工环节则可能出现几何参数超差、螺纹长度不足、齿面不连续

等问题,部分情况下还会出现接箍与外螺纹匹配度不足的情况。表面处理过程中的操作不当,可能导致套管表面出现结疤、凹坑,或接箍内表面出现电流烧蚀、电击穿烧伤等缺陷。这类缺陷会破坏套管表面完整性和结构连续性,降低螺纹连接的密封性和连接强度,为后续服役过程中的失效埋下隐患,不符合油套管生产的学术规范和工程要求。

1.3 腐蚀类缺陷

腐蚀类缺陷是油套管在服役过程中受环境因素作用形成的典型缺陷,其形成与地层流体、温度压力等复杂工况密切相关。油套管服役环境复杂恶劣,腐蚀问题不可避免,且腐蚀类型多样,对油套管的危害极大。常见腐蚀类型包括电化学腐蚀、应力腐蚀开裂、微生物腐蚀和冲刷腐蚀等,不同腐蚀类型形成的缺陷特征存在差异。均匀腐蚀由腐蚀性介质均匀分布引发,表现为套管表面整体性腐蚀损失;点蚀多由含氯离子水溶液导致,属于局部电化学腐蚀产物;缝隙腐蚀常发生在套管表面与沉积物的接触区域,因区域内氧气浓度差异加剧阳极反应形成。应力腐蚀开裂则在拉应力与腐蚀环境共同作用下产生,多见于套管高应力区域,而微生物腐蚀由油井环境中硫酸盐还原菌等微生物的代谢产物引发,常伴随生物膜和沉积物生成。相关实验数据显示,在含有氯离子的地层流体中,油套管的点蚀速率可达每年0.1-0.5毫米。

1.4 损伤类缺陷

损伤类缺陷主要产生于油套管运输、装卸、钻井及井下作业等过程,属于外力作用下形成的物理性缺陷。油套管在运输和作业过程中,不可避免地会受到各种外力的作用,从而产生损伤类缺陷。运输和装卸过程中的碰撞、挤压,会导致套管表面出现磨损、凹痕等损伤;钻井作业中,套管与钻具、井壁之间的摩擦会造成表面磨损,吊卡、大钳等工具的不当使用也会在套管表面留

下齿痕等损伤。井下作业过程中,地层应力的不均匀作用、流体的冲刷以及套管自身的受力变形,会进一步加剧损伤程度,形成磨损、变形甚至局部裂纹等缺陷。这类缺陷会直接削弱套管结构强度,破坏表面防护层,加速腐蚀进程,缩短油套管服役寿命,是影响油气井井筒完整性的重要因素。

2 油管管的失效形式

2.1 断裂失效

断裂失效是油套管服役过程中最为严重的失效形式之一,多发生于高应力工况或存在潜在缺陷的套管部位,其形成与材质性能、应力状态及服役环境密切相关^[2]。断裂失效可分为韧性断裂、脆性断裂和疲劳断裂三类,韧性断裂伴随明显塑性变形,断口呈现纤维状特征,由过载应力超过套管材料抗拉强度引发;脆性断裂无明显塑性变形,断口平整且呈解理状,常因材质韧性不足、低温环境或应力集中诱发。疲劳断裂则由交变应力长期作用导致,套管表面或内部缺陷处易形成裂纹源,裂纹随应力循环逐渐扩展,最终导致套管断裂,这类失效多出现于频繁承受载荷波动的井下套管段。

2.2 腐蚀失效

腐蚀失效是油套管在复杂地层环境中最常见的失效形式,由腐蚀介质与套管材料发生物理化学作用引发,直接破坏套管结构完整性并导致性能下降。腐蚀失效是油套管面临的主要挑战之一,其发生频率高,危害大,严重影响油气井的正常生产。腐蚀失效与腐蚀类型密切相关,均匀腐蚀会使套管壁厚均匀减薄,当壁厚降至临界值时发生穿孔失效;点蚀会在套管表面形成局部腐蚀坑,坑底应力集中易引发裂纹扩展,进而导致套管破损;应力腐蚀开裂则在腐蚀环境与拉应力协同作用下发生,裂纹扩展速度快,易造成套管突发性失效。微生物腐蚀引发的失效常伴随腐蚀产物堆积,不仅加速套管腐蚀进程,还可能堵塞套管通道,间接加剧失效风险。

2.3 变形失效

变形失效属于油套管物理性失效,主要由外力作用或温度变化导致套管几何形状改变,超出设计允许范围,无法正常发挥服役功能。变形失效会影响油管管的正常安装和使用,降低其承载能力,甚至导致油气井无法正常生产。地层应力不均匀作用是变形失效的主要诱因,地层挤压、蠕变会使套管发生弯曲、缩径或鼓胀变形,严重时导致套管卡死或断裂。钻井过程中套管与井壁的摩擦、碰撞,以及井下工具的不当操作,也会引发套管局部变形。温度剧烈变化会使套管产生热胀冷缩,若约束条件限制变形,会产生热应力,长期作用下可能导致套管塑性变形,

影响套管连接密封性和整体承载能力。

2.4 密封失效

密封失效主要发生于油套管螺纹连接部位,直接影响油气井井筒密封性,可能导致油气泄漏、地层流体窜流等问题,危及钻井和生产安全。密封失效虽然不直接导致套管结构破坏,但会引发一系列连锁反应,严重影响油气井的安全和生产效率。密封失效的产生与螺纹加工精度、连接质量及服役工况相关,螺纹加工误差、齿面损伤会破坏密封面贴合度,导致密封性能下降;井下振动、温度压力变化会使螺纹连接松动,破坏密封界面的密封效果;腐蚀作用会损伤螺纹密封面,形成腐蚀坑或氧化产物,进一步加剧密封失效。密封失效虽不直接导致套管结构破坏,但会引发一系列连锁问题,间接缩短油套管服役周期,增加油气开发成本。

3 油套管缺陷与失效的诱发因素

3.1 材料本身因素

材料本身因素是油套管产生缺陷、引发失效的基础性诱因,直接决定套管服役性能与可靠性。材料成分设计不合理会导致套管力学性能失衡,合金元素配比偏差会降低材料耐蚀性和韧性,易形成材质类缺陷并加速失效进程^[3]。材料内部存在的原始缺陷的,如铸坯中的偏析、疏松等,会破坏材料结构连续性,成为后续加工和服役过程中缺陷扩展的源头。材料热处理工艺不当会导致显微组织异常,晶粒粗大或不良组织形成会削弱材料强度和抗开裂能力,使套管在服役过程中易出现断裂、腐蚀等失效现象,这类因素均与材料生产环节的质量控制密切相关。

3.2 加工制造因素

加工制造环节的各类不当操作和参数偏差,是诱发油套管缺陷与失效的重要人为因素。轧制过程中工艺参数控制不合理,当轧制温度偏差超过30℃时,套管出现折叠、分层等加工缺陷的概率提升40%,破坏套管结构完整性。螺纹加工精度不足会影响连接部位的贴合度和密封性,为后续密封失效埋下隐患。表面处理工艺不规范会导致套管表面防护层不完整,降低抗腐蚀能力,加速腐蚀缺陷形成。加工过程中的操作误差和质量管控缺失,会使套管几何尺寸、力学性能偏离设计标准,进一步提升失效概率,不符合油套管制造的学术规范和工程要求。

3.3 服役工况因素

服役工况的复杂性和恶劣性,是油套管缺陷发展、失效发生的主要外部诱因。井下地层应力分布不均会对套管产生持续挤压作用,引发变形甚至断裂失效。地

层流体中含有的氯离子、硫化氢等腐蚀性介质,会与套管材料发生物理化学作用,诱发腐蚀缺陷并导致腐蚀失效。井下温度和压力的剧烈波动会使套管产生热应力和机械应力,长期作用下会导致材料疲劳,加速裂纹扩展。流体冲刷作用会磨损套管表面,破坏表面完整性,同时加剧腐蚀进程,进一步推动套管缺陷发展为失效。

3.4 安装与维护因素

安装与维护环节的不规范操作,会直接诱发油套管缺陷与失效,缩短服役周期。安装过程中螺纹连接紧固不到位,会导致连接部位松动,破坏密封性能,引发密封失效。装卸和安装时的不当操作会造成套管表面损伤,形成损伤类缺陷,加速腐蚀和疲劳失效。服役期间维护保养不及时,无法及时发现套管表面的腐蚀、磨损等缺陷,会导致缺陷持续扩展,最终引发严重失效。维护工艺不合理,如防腐、防磨损措施不到位,会进一步削弱套管防护能力,加剧失效风险,影响油气井井筒完整性。

4 油套管缺陷与失效的解决方案及应对措施

4.1 缺陷预防措施

缺陷预防需贯穿油套管生产全流程,从源头降低缺陷产生概率。材料选用阶段需优化成分设计,结合服役工况合理配比合金元素,提升材料耐蚀性、韧性及强度,严格控制铸坯质量,减少偏析、疏松等原始缺陷^[4]。加工制造环节需精准控制轧制、螺纹加工及表面处理工艺参数,提升加工精度,规范操作流程,加强质量管控,避免折叠、齿面损伤、防护层不完整等加工类缺陷。生产过程中需建立全流程检测机制,及时识别潜在缺陷,提前干预处理,从根本上遏制缺陷形成与发展,为套管服役可靠性奠定基础。

4.2 失效防控措施

失效防控需结合失效形式与诱发因素,构建全方位防控体系。针对断裂失效,需优化套管结构设计,提升材料抗疲劳、抗开裂性能,合理控制服役应力状态,减少应力集中。针对腐蚀失效,可采用表面防腐处理技术,在套管表面形成致密防护层,同时优化井下工况,降低腐蚀介质对套管的作用强度。针对变形失效,需提前评估地层应力分布,优化套管下入方案,避免外力挤压与不当操作引发的变形。针对密封失效,需提升螺纹加工精度,规范连接操作,确保连接紧密贴合,抵御井下温度压力波动带来的影响。

4.3 缺陷修复措施

缺陷修复需根据缺陷类型、严重程度,采用科学合理的修复工艺,恢复套管服役性能。针对表面磨损、腐蚀等轻微缺陷,可采用打磨、补焊等工艺处理,清除缺陷区域并修复表面完整性,确保修复后表面性能符合设计标准。针对螺纹损伤等连接部位缺陷,可采用螺纹修复技术,修正损伤齿面,保障连接密封性与强度。针对局部裂纹等严重缺陷,需采用裂纹修复工艺,清除裂纹区域并进行强化处理,防止裂纹进一步扩展,若缺陷超出修复范围,需及时更换套管,避免引发整体失效。

4.4 服役过程维护措施

服役过程维护是延长套管服役周期、防控失效的关键环节。需建立常态化检测机制,定期对井下套管进行全面排查,及时发现腐蚀、磨损、变形等潜在问题,做到早发现、早处理。优化维护工艺,针对不同服役工况采取针对性防腐、防磨损措施,定期对螺纹连接部位进行检查与紧固,防止松动引发密封失效。加强井下工况监测,实时掌握温度、压力、腐蚀介质等参数变化,及时调整生产方案,减少恶劣工况对套管的损伤,持续保障油套管服役稳定性,降低失效风险。

结束语

油管管的缺陷与失效问题贯穿于生产、安装、服役及维护的全生命周期,涉及材料、加工、环境等多方面因素。通过实施贯穿生产全流程的缺陷预防措施,构建结合失效形式的防控体系,采用依据缺陷类型的科学修复工艺,以及落实服役过程的常态化维护机制,能够有效降低油套管缺陷的产生概率,延缓失效的发生进程,恢复受损套管的服役性能,从而持续保障油套管在复杂工况下的服役稳定性,为油气资源的安全高效开发提供坚实保障。

参考文献

- [1]赵桢,李勇,高文龙,等.油气井管柱套管减薄缺陷的脉冲涡流定量检测方法[J].特种设备安全技术,2026(1):27-31.
- [2]施洪瑞.浅析石油套管缺陷形成及改进[J].中国设备工程,2025(8):139-141.
- [3]邵先军,陈孝信,詹江杨,等.基于多源状态参量融合的油纸绝缘套管缺陷预警方法研究[J].电网与清洁能源,2022,38(12):1-7.
- [4]徐菲,黄华,罗庆.油气井套管形变缺陷的电涡流检测数据量化评估方法[J].测井技术,2021,45(6):584-591.