

煤矿定向钻机钻杆疲劳损伤机理研究

周中宁

中煤科工西安研究院(集团)有限公司 陕西 西安 710077

摘要: 煤矿井下定向钻机在钻孔施工中, 钻杆受到交变弯曲、扭转、拉伸和冲击等复杂载荷的作用, 在孔壁摩擦和钻井液腐蚀的影响下, 疲劳断裂是造成钻杆破坏的主要原因。通过对定向钻杆受力特点及其疲劳破坏形式的研究, 阐述了疲劳损伤发生的原因及其实质, 对螺旋钻杆和非螺旋钻杆在不同的弯曲程度下承受的弯曲疲劳、扭转载荷造成的剪切疲劳以及拉压循环产生的轴向疲劳进行了详细论述。结果表明: 钻杆接头处的螺纹根部、螺旋带连接部位以及表面存在的瑕疵是主要疲劳源; 井下腐蚀性液体和交变应力共同作用明显缩短了其使用寿命。根据上述分析提出的改善措施可以在一定程度上提高煤矿井下定向钻杆寿命。

关键词: 煤矿定向钻机; 钻杆; 疲劳损伤; 交变载荷; 裂纹扩展; 腐蚀疲劳

引言

煤矿定向钻进技术被大量用于瓦斯抽采、水害治理以及地质勘查等方面, 而定向钻杆是用于传递扭矩、轴向力并输送钻井液的重要部件, 在井下工作过程中承受着极为恶劣的工作环境。不同于普通回转钻进, 定向钻进要求钻杆在弯道处产生一定的挠度变化, 因此钻杆既要承受旋转扭矩和轴向拉伸或压缩作用, 还要在造斜部位受到较大范围内的弯曲波动载荷的影响。此外随着钻孔深度加深, 钻杆自身重力增加, 造成钻柱动力学问题引起抖动震动, 再加上井下水分、泥浆以及含有腐蚀性的有害气体(如 H_2S) 对钻杆的磨损, 容易造成钻杆早期疲劳破坏。疲劳损伤具有隐蔽性——裂纹发生初期不易发现, 而一旦进入发展期则会很快发生断裂, 造成井下事故或者人员伤亡。因此, 对煤矿定向钻杆在不同工况下疲劳损伤机理进行研究具有重要的现实意义和应用前景。

1 定向钻杆的受载特征与疲劳损伤模式

1.1 钻杆在定向孔内的复杂受力状态

主要有以下几种载荷: (1) 扭转剪切载荷: 来自钻机动力头扭矩经过钻杆传递到孔底钻头, 钻杆截面受到剪切应力作用。由于沿钻柱长度方向扭矩分布不均, 靠近动力头处钻杆承受最大扭矩, 而且定向钻进过程中要不断改变工具面向角, 所以扭矩呈周期性变化。(2) 轴向拉压载荷: 有钻杆自身重力、钻压以及孔壁摩擦阻力形成的轴向力作用。在水平或者上仰孔段, 钻杆受到拉伸; 而在造斜段下方侧壁, 由于屈曲约束可能会产生额外的压力。起下钻过程中产生的冲击载荷叠加其

中。(3) 弯曲交变载荷: 这是定向钻杆不同于普通直孔钻杆的最大特点。为了实现预定轨迹, 必须经过造斜段, 而该段钻杆弯曲曲率半径一般在几十米到上百米之间, 远远小于石油钻井曲率半径。钻杆转动时, 在一个截面上所受弯曲应力随着转角周期性变化, 形成对称循环弯曲疲劳。(4) 振动与冲击载荷: 钻柱系统沿轴线方向振动、扭转振动以及横向涡动造成高频交变应力, 尤其是在钻入坚硬夹层或者孔底有大量沉积物情况下, 冲击载荷最大可以达到静载荷几倍甚至十几倍。(5) 钻井液压力: 高密度钻井液从钻杆内部流动时会产生内压, 在管壁上形成环向拉应力, 与轴向拉应力叠加之后会使危险点应力状态更严重。

1.2 三类典型疲劳损伤模式

根据主导载荷不同, 定向钻杆疲劳损伤可划分为三种类型。(1) 弯曲疲劳: 发生在造斜段以及狗腿度较大的地方。钻杆弯曲外侧受到拉应力, 内侧受到压应力, 每转动一圈就经历一次拉、压过程。随着钻杆不断旋转, 在弯曲中性层两侧不断有材料达到其弹性极限从而产生塑性变形。裂纹一般从受拉外表面开始并沿壁厚向里发展^[1]。(2) 扭转剪切疲劳: 主要在钻杆接头及螺纹连接处。扭矩变化导致螺纹底部出现较大的剪应力集中, 在反复剪切作用下形成沿最大剪应力方向的滑移带, 最终成为微小裂纹。剪切疲劳断裂面一般呈平坦的扭断状。(3) 复合疲劳: 实际工作情况下弯曲、扭转、轴向力均存在, 钻杆承受着多轴非比例疲劳。例如, 当弯曲与扭转同时发生时, 主要应力的方向随着载荷的变化而改变, 使得更多的位错被激活, 加剧疲劳损伤的发展, 复合疲劳寿命远小于单一种类载荷的作用下寿命。

1.3 与常规钻杆疲劳的差异性

煤矿定向钻杆具有以下特点：直径小（一般为73mm、89mm等）、壁薄、大曲率弯管（最小曲率半径可达30m）以及较强的孔内腐蚀性。因此其承受弯曲应力远远大于普通油管，而应力集中对疲劳寿命的影响被放大；另外由于其壁薄，表面微小缺陷易成为裂纹源。而且煤矿井下潮湿环境导致钻杆长时间处于含有电解质的液体中，电化学腐蚀和交变应力叠加不能忽视。

2 钻杆疲劳损伤的力学机制

2.1 应力集中与疲劳源形成

疲劳裂纹总是出现在应力最大地方起始。对定向钻杆而言，主要有以下几个部位是主要应力集中区：（1）螺纹根部：由于钻杆接头螺纹牙底形状突变而引起理论上应力集中系数 K_t 可达到3~5，在拉、弯、扭共同作用下，螺纹根部首先发生局部塑性屈服，产生微米级滑移带，经过多次加载之后，滑移带发展成稳定滑移带（PSB），继而在其上出现挤出、侵入等现象，最后形成疲劳裂纹，这是最常见的一个疲劳源区；（2）螺旋带过渡区：螺旋钻杆的螺旋叶片与圆柱形本体相接处有截面变化，而且该处还有焊接热影响区，使得此处应力集中以及材料削弱并存；（3）表面缺陷或损伤：钻杆表面因加工或者运输等原因形成的划伤、凹陷、压痕或腐蚀坑等，这些地方局部应力集中系数可大于等于2，在弯矩反复作用下，缺陷底部就像一小段裂纹一样立即开始扩展，不需要那么多循环次数就可以使裂纹产生；（4）刻字区域：有些钻杆使用钢印来标注编号，在钢印周围由于冷加工强化以及残余应力分布不均造成疲劳薄弱点。

2.2 裂纹萌生与扩展的微观过程

从微观角度，疲劳裂纹萌生及发展可以分为三个过程。第一个过程是循环滑移以及微裂纹产生。在交变载荷作用下，钻杆钢中晶粒内部位错沿着最易滑移方向移动而形成驻留滑移带，在PSB中由于位错密度大所以在表面出现挤出脊和侵入沟，侵入沟继续发展就形成了长度为几个晶粒大小微裂纹（一般为2~10 μm ）。这个过程约占疲劳总寿命的70%-90%，但在宏观上不可见；第二个过程是短裂纹扩展。微裂纹沿着主要滑移面扩展并且其延伸方向与最大剪切力的方向相同，在钻杆表面受到拉伸区域裂纹增长速度随着裂纹增大而加速^[2]。一旦裂纹贯穿多个晶粒之后其延伸方向就会改变成几乎垂直于最大主应力方向。在这个过程中裂纹长度在10 μm 到几百度之间；第三个过程是长裂纹扩展（即宏观扩展）。当裂纹长度达到毫米量级以后其扩

展符合Paris定律，也就是 $da/dN = C(\Delta K)^m$ ，其中 ΔK 是应力强度因子变化值，而 C 和 m 都是与材料有关参数。在钻杆旋转弯曲载荷下裂纹呈扇形扩展，在断口处可以看到典型的疲劳辉纹，最后由于剩余壁厚不能承受静载而导致突然断裂。

2.3 多轴疲劳损伤准则

定向钻杆受到多种复杂多轴非比例载荷作用使得简单单轴疲劳累积损伤模型不再适用。可以利用临界面方法来计算损伤参量。而在弯曲-扭转耦合情况下，临界面一般为最大剪应力幅值所在面，在每一个载荷周次内求取该面上剪应变幅值 γ_a 以及法向应变幅值 ϵ_n ，然后将其结合起来作为损伤参量，如Fatemi-Socie准则：损伤参量 $\propto \gamma_a \left(1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y}\right)$ ，它能够很好地预测定向钻杆在各种载荷条件下寿命情况。而且，因为钻杆旋转时其上所受弯曲应力方向不断改变，因此其损伤累加是非线性的，所以双线性累积法则（即对Miner准则进行改进）要比线性累积法则更加合理，应根据具体情况对不同钢材等级及尺寸进行相应的多轴疲劳测试以确定合适的修正因子。

3 材料与环境的耦合损伤效应

3.1 钻杆钢材的疲劳性能与冶金缺陷

煤矿定向钻杆一般使用42CrMo、4145H中碳合金钢制作，经过调质处理具有较好的综合力学性能，但是由于原材料本身的冶金缺陷决定其疲劳强度较低。非金属夹杂物（包括硫化物、氧化物、硅酸盐）因与基体的弹性模量不同，在受到交变载荷时，夹杂物周围的区域会产生较大的应力集中从而成为疲劳源，据统计约有30%的疲劳源区含有大于50 μm 的较大尺寸夹杂；另外脱碳层、晶粒粗大区以及带状组织也会使疲劳强度下降，通过真空脱气和电磁搅拌工艺制备出纯净钢，使夹杂物尺寸小于20 μm ，可以提高1~2倍的疲劳寿命。

3.2 腐蚀介质对疲劳寿命的劣化机制

煤矿井下积水一般为弱酸性（pH值5~6）并含有Cl⁻、SO₄²⁻等离子。钻杆表面在水中及溶解氧的作用下会发生电化学腐蚀而生成Fe(OH)₂或者Fe₂O₃腐蚀产物，在交变载荷作用下腐蚀与疲劳相互促进即为腐蚀疲劳，其寿命远远小于单纯的机械疲劳^[3]。腐蚀疲劳的产生主要是由于以下几个方面的原因造成的：腐蚀坑引起的应力集中使得疲劳源形成的时间大大缩短；氢致开裂是由于腐蚀过程中产生的原子氢向钢材内部扩散到裂纹尖端造成氢脆；还有就是阳极溶解加速裂纹的扩展，在裂纹尖端区域产生塑性变形破坏了钝化膜使裸露出来的新的金

属更容易被腐蚀液所腐蚀。

3.3 摩擦与微动疲劳效应

钻杆在弯曲孔中转动过程中,接头螺纹连接处、螺旋带与孔壁接触位置会有细微位移(微动幅度一般在数十到数百微米之间)。微动造成表面磨损、材料脱落及微动裂纹形成,微动裂纹受到周期性载荷作用发展成为疲劳裂纹,即微动疲劳,微动疲劳寿命仅为普通疲劳寿命的1/5到1/10。减少微动损伤方法有:提高螺纹加工质量、使用抗微动涂层(例如铜锡合金或者二硫化钼)以及降低钻杆转速从而减少微动次数等。

4 抗疲劳设计原则与损伤抑制策略

4.1 结构优化设计

降低应力集中对提高钻杆疲劳寿命至关重要,在螺纹连接处使用大圆弧过渡齿底、双锥螺纹或梯形螺纹可使应力集中系数由原来的3.5降到2.0以下;而在螺旋钻杆中螺旋带和管体之间应采用全熔透坡口焊并打磨焊缝余高以便消除直角突变;在整个钻杆上进行冷滚压强化可在其表面产生约-500~-800MPa残余压应力以抵消一部分工作拉应力;另外增加弯曲部位壁厚或者采用变截面形式也可以增强高曲率孔段抗弯能力^[4]。

4.2 材料改性及表面处理

采用纯净度较高、夹杂物细小的细晶粒钢(晶粒度 ≥ 8 级)进行渗碳或碳氮共渗使钻杆外表面获得一定厚度的硬化层以提高其抵抗疲劳裂纹源产生的能力;表面喷丸可以使基体发生塑性变形并产生一定的残余压应力从而显著改善钻杆的弯曲疲劳性能,在腐蚀环境中还可以起到一定的防腐作用如通过表面镀锌/磷化或者涂覆有机防腐涂层以及使用缓蚀型钻井液都可以有效防止腐蚀孔洞的发展。

4.3 工艺控制与使用维护

制造时严格控制螺纹加工精度以防止出现刀痕和毛

刺现象。螺纹表面粗糙度 $Ra \leq 1.6\mu m$ 。无损检测是用磁粉或者超声波对每根钻杆进行表面以及螺纹根部进行检查有无原始缺陷。在使用过程中合理设定造斜段曲率半径不应小于钻杆允许最小弯曲半径;避免长期空转以及大幅度改变工具面造成强烈振动。做好钻杆使用台账登记每根钻杆下井次数、服役年限以及工作环境等信息并依据以往疲劳损伤情况实行寿命定额强制报废制度。

5 结语

煤矿定向钻杆的疲劳损伤是多种因素相互作用的结果,主要包括多轴交变应力、材料缺陷、腐蚀以及摩擦等。研究显示造斜部分弯曲交变应力为主要载荷,与扭转载荷构成非比例组合加载而加速损伤的发生,需要采用多轴疲劳理论进行评定;螺纹根部由于存在较高应力集中以及表面或冶金缺陷(例如非金属夹杂物),是疲劳裂纹源最易发生的部位;井下腐蚀环境导致腐蚀坑造成的局部应力集中以及氢致开裂都会大大降低其疲劳强度从而使得腐蚀疲劳成为最主要的破坏方式。因此提出了改善结构应力状态、施加表面残余压应力、提高材料纯净程度以及做好防腐工作以防止疲劳损伤的设计思路。下一步工作就是要建立适合于煤矿定向钻杆的腐蚀-疲劳寿命估算方法,研发出能够监测钻杆受力情况并能及时发出警报的智能化传感器以及实时监控系統来保障安全运行。

参考文献

- [1] 王建国,李永强,张宏伟.煤矿井下定向钻杆弯曲疲劳特性试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(6):112-119.
- [2] 刘振东,郭晓峰,赵明.钻杆螺纹连接应力集中系数有限元分析及结构优化[J].矿山机械,2023,51(4):23-30.
- [3] 杨立军,陈波,孙海涛.腐蚀环境下钻杆疲劳寿命预测模型研究[J].材料导报,2024,38(2):210-217.
- [4] 张瑞,刘建平,王志强.多轴非比例载荷下钻杆材料的疲劳损伤行为[J].机械工程材料,2023,47(8):65-71.