

套管失效对井筒质量的影响研究

张新果*

(大庆钻探工程公司钻井二公司,黑龙江 大庆 163413)

摘要:套管是油气井的主要组成部分之一,也是重要的井下物理屏障。套管为石油和天然气的开采提供管道和途径。套管在高温高压的井下环境中易发生腐蚀和降解,因局部载荷和地层应力的变化也会发生断裂和破损,从而导致不同套管发生不同程度的失效,最终影响井筒质量和油气采出。重点介绍了套管失效的原因、失效机理及其失效模式,研究了套管情况和井筒质量之间的关系。

关键词:套管失效;固井质量;油气开采

中图分类号:TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5716(2024)10-0077-04

1 概述

大规模水力压裂和水平钻井技术的快速发展使得低渗透页岩地层的油气开采成为可能。美国依靠技术进步实现了页岩油和页岩气的工业化生产,世界各国也相继开展了页岩油气资源的商业化开采。页岩油气井的井筒质量是页岩油气有效开采的基础,但页岩气井往往存在套管持续压力等问题,给后续开采带来了困难和挑战^[1-2]。

世界各大油田的统计数据显示,至少有10%的油气井存在套管失效导致的井筒质量问题,其中85%发生在水力压裂过程中。伊朗Asmari地层的统计数据表明,储层压实、地质效应和井下腐蚀等因素已经导致了2000多口井的套管损坏。

为了更好地了解套管失效的原因和其失效模式,本文对常规和非常规井的套管失效情况进行了调研。通过对套管失效的复杂因素进行研究,为后续采取针对性的措施减少套管失效并提高井筒质量提供参考。

2 不同井型套管失效的原因

由于油气井的地下情况复杂多变,多种因素都可能导致套管损坏,从而造成经济损失和环境破坏^[3-4]。例如:由于页岩气和致密油藏的渗透率较低,需要通过大规模水力压裂来帮助实现商业化的石油和天然气开采,而相应的水力裂缝、天然裂缝、滑移和地层剪切位移等均会导致套管失效。

2.1 高温高压井和地热井

Ma等人将油气井分为常规井和非常规井,其中非

常规井是指那些使用非常规手段开发的油气井。部分非常规井具有高温(超过150℃)、高压(超过70MPa)和高应力的特征。

高温高压井的高压特性有助于商业石油和天然气的采出,但同时也对钻井、完井和井筒质量提出了挑战。其中地热井的井底温度最高可达到400℃。在高温高压井的钻井过程中井下温度和应力的变化都会对井筒的稳定性产生影响,从而对后期的套管和水泥环产生负面影响。此外,受井下高温的影响,水泥浆可能会在数小时内凝固,这会出现水泥石含大量微孔隙、二界面胶结不良和水泥石抗压强度差等固井质量问题。Wilcox等人的研究指出,水泥环的孔隙度对固井质量的影响比偏心率的影响还要大。部分地层在成岩过程中存在同时含有异常低压层和异常高压层的现象,这种交变压力情况对套管和水泥环构成严重的影响。地热井经过长时间开采后,出砂和储层压实的情况也会导致套管失效。这是因为,出砂改变了套管初始平衡状态,而储层压实增加了套管的压缩载荷,这两个载荷的出现对套管施加了额外的应力,导致地热井中套管变形的可能性大幅度提高。同样,高温高压井和地热井所产生的高温会加速套管的腐蚀速率,导致套管快速退化并影响套管完整性。此外,对于低渗透率的地热井,需要通过水力压裂来提高生产率,而注入的水和储层之间的温差会导致套管和水泥环之间出现显著的结构损坏。Shadravan等人的研究表明,地热井中的二氧化碳在遇到水或蒸汽时会形成碳酸,会导致套管金

* 收稿日期:2023-03-19 修回日期:2023-12-29

作者简介:张新果(1981-),女(汉族),河南邓州人,工程师,现从事钻井技术服务工作。

属腐蚀。

2.2 页岩气水平井

页岩气和致密油的油藏渗透率通常比较低,因此需要配套大规模水力压裂等增产措施才能进行具有经济价值的石油和天然气生产。页岩气水平井的另一个重要特点是其水平井段较长,在水力压裂过程中,随着高流量的压裂液通过,套管内部温度会突然下降,致使水泥遇冷收缩,导致套管上的荷载分布不均匀诱发套管变形。

Chen等人的研究认为,地层裂缝是水力压裂过程中导致套管变形的主要内部因素。Yan等人的研究指出,套管的剪切变形是由于页岩气储层剪切裂缝的滑移造成,滑移导致套管横向位移和应力集中。Furui等人的研究也证实酸化和压裂会导致套管损坏和井筒完整性问题。Yang等人对长宁威远区块页岩气井的套管失效案例进行分析发现,34口水力压裂井中100%存在套管变形问题。综上所述,水力压裂引起的结构应力是导致井筒质量变差的主要原因。此外,水力压裂过程中的裂缝滑移会导致套管剪切破坏:裂缝滑过井筒,在地层剪切滑移的作用下,对套管产生剪切荷载,造成套管损伤。

Xi等人研究了压裂压力、地层各向异性、地层岩性、温度和水泥等可以增加套管应力的关键因素,并分析了地层孔隙、地层倾角、温度变化、压力变化和地应力对套管损伤的影响。研究结果表明:由于压裂液流量较高,导致套管内部温度突然降低,致使水泥中的孔隙发生收缩,使水泥环中的孔隙压力在短时间内迅速下降,从而对套管外壁施加不同的负载导致套管屈曲失效。

2.3 深水井

按照美国石油工程师协会的定义,深水井为水深大于1000ft的井,超深水井为深度大于5000ft的井。近年来在勘探过程中发现了大量的深水石油天然气储量,但这些油气通常存储在盐膏层下方,而盐膏层本身具有易蠕变、易变形的特点,容易造成套管破损。因此,在盐膏层位的套管设计是石油勘探和开采过程中的主要挑战之一。

在墨西哥湾的深水井中由于盐膏层处套管所受的荷载不均匀而导致的套管失效问题非常普遍,并造成了重大的经济损失:①盐膏层容易因吸水溶解而影响井筒的稳定性;②除了钻井导致的变形外,盐膏层自身也会在地层中缓慢移动,致使周围地层变形,从而产生

各种形式的载荷,最终导致套管失效。

Wang等人的研究认为盐膏层中的蠕变和套管偏心效应是井筒失效的潜在因素。但使用扶正器可以改善因盐膏层蠕变导致的套管损坏问题。Furui等的研究成果指出套管变形与盐膏层蠕变速率和套管所处的地层温度有关,底部高温地层盐膏层的蠕变速率比上部低温地层快10倍以上。随井下温度的升高,水泥环的切向应力降低,导致套管上的正向应力增加,致使套管屈曲概率增加。

2.4 注水井

当储层自身压力下降时,通常需要相应的注采技术来提高储层压力,从而提高油气采收率(EOR),目前主要的方法有水驱和聚驱。Yin等人研究了油田水驱过程中套管的受损情况。通过测井数据解释和统计分析得知地层滑移是套管失效的主要原因,这种失效形式降低了油井的使用寿命和油田的开采效益。根据数据统计,Casabe油田72%的生产井和63%的注入井出现了套管损坏情况。套管失效主要发生在注入地层和覆盖层处。此外,在注入量较大的年份,套管故障率也较高,这进一步证明了注水会引起套管附近的地层变形。

2.5 热驱井

委内瑞拉和加拿大等国家拥有丰富的重油和焦油砂资源。这类资源的高效开采是通过注入过热蒸汽等方式进行的。注入的蒸汽降低了井下原油粘度使其可以顺利被采出地面,但过热蒸汽的使用同时给套管造成了一定的热应力,套管—水泥脱附是这种井型最常见的失效形式。在热驱过程中,由于高温、对流传热和收缩导致套管和水泥环发生巨大的体积变化,从而导致井筒质量出现问题。Kaldal等人的研究指出,在生产期间,高温条件下井筒温度快速的变化会在生产套管中产生较大的热应力,从而导致套管故障。套管屈曲和剪切在地热井中表现更为突出。Medeiros de Souza等人研究了蒸汽注入过程对水泥环完整性的影响。结果表明,在注汽作用下水泥环问题主要局限于地层附近区域,并与井的加热阶段有关。使用膨胀水泥浆可以改善蒸汽注入过程中水泥环的完整性。

3 套管失效的主要模式

地层的垂直应力是地层深度和岩石密度的函数,是由岩石成分、孔隙度和岩石内裂缝体积而确定的;地层水平应力受地形、构造活动和断层程度影响。当进行油气井钻探时,随着上覆岩石不断被钻取并移出会

导致地层垂直应力和水平应力发生变化。

井下地层应力情况与套管的损坏情况密切相关。地层应力一方面取决于成岩情况、储层特征和地应力分布,另一方面取决于钻井和完井过程中的井身设计和油井增产过程造成的额外应力,其中地应力和地质构造是油井套管失效的主要因素。受钻井过程的影响,同一地层的应力在钻井前后会发生变化,其中径向和切向应力情况直接影响井筒的稳定性。此外,水平井的切向应力变化还会导致套管的塑性变形。

Chen等人将水平井套管的失稳形式分为正弦和螺旋两种。轴向压缩载荷产生正弦失稳,失稳的程度取决于套管刚度、重量和井眼尺寸。Njuguna等人指出,失稳和振颤是套管柱结构不稳定的两种主要类型,套管柱的失稳是指套管在压缩载荷的作用下从一个平衡状态到另一个平衡状态的变化过程。但位于水平段的油井套管始终处于压缩载荷下,所以页岩气水平井的套管变形问题是石油和天然气行业关注的重点。Dusseault等人指出,地层的局部应力和剪切是套管变形的主要原因之一,这些局部应力主要是由地应力引起的切向、轴向和径向应力,如果考虑岩石固结的程度和地层特征,井筒稳定性问题会更加复杂。Daneshy等人指出,拉伸、压缩、剪切应力和地层变形的影响是导致套管失效的主要原因。Yin等人通过有限元分析得出,压裂过程中的裂缝滑移会导致页岩气井套管侧向屈曲。此外,当滑移达到临界值时,会使岩体自然断裂,从而导致套管侧向变形。此外,Zhaowei等人的研究指出,在临界压力下天然裂缝被激活后会诱发套管失效。Yu等人的研究表明,套管破坏是由地层交替、地应力变化和不规则压裂引起的,随着地应力增加,套管径向变形加剧。Zeng等人将套管变形归因于大规模压裂导致的地应力变化。Guo等人的研究认为,套管变形是由于地层岩石的滑移和压裂过程中不均匀载荷造成的。Yan等人的研究认为水泥环中的孔隙导致的套管压力偏差是套管变形的主要影响因素。Xing等人研究发现,页岩气水平井在压裂过程中因为井下复杂的应力状态而更容易发生套管变形事故。Yu等人通过三维有限元模型,模拟了直井多层压裂过程中的套管变形和破坏情况。

在下套管过程中也可能会因为拉伸和压缩导致套管失效。因为套管是隔离储层并为石油和天然气生产提供途径的主要结构屏障。当套管的机械性能发生了变化后,随着时间的推移,腐蚀、静态和动态载荷应力

变化均会使套管的结构完整性恶化。

在下套管过程中,套管随着转盘旋转并通过已钻成的井眼中时会产生一定的弯曲载荷。套管上部主要承受的是压力载荷,而底部主要承受的是拉力载荷。套管的旋转受阻时还有可能发生扭转失效。Quigley等人的研究指出,设计套管结构时需要详细了解井眼轨迹和地层情况,并预留一定的安全系数,从而覆盖未知载荷的影响,但这种设计方式会导致套管成本增加。但如果不考虑局部过载荷的影响,则可能会导致套管在拉伸或压缩过程中发生失效。

4 套管居中度对井筒质量的影响

由套管居中度差引起的水泥环失效会影响页岩气井的固井质量,从而会对后续的天然气开采产生严重影响。而目前水平井已广泛用于页岩气的生产,该类井的固井质量和套管居中度问题度已成为急需解决的问题之一。通过分析套管偏心情况对水泥环完整性的影响,可以更好地了解偏心水泥环的应力分布。在固井过程中如果固井水泥胶结良好并与地层岩石有效粘结,套管偏心率对水泥环中的应力分布影响较小。相反,如果固井工序处理不当,套管偏心可能会对应力分布产生严重影响。分析认为:套管—水泥—地层界面的脱粘会显著增加水泥环中的圆周应力;在水泥环较薄的一侧,承受的圆周应力比较厚处高2.5倍;套管偏移量对水泥环径向应力影响不大,但能显著增加剪切应力。使套管柱更集中或增加套管厚度,可以降低水泥失效的风险。

水泥环的力学响应分析表明,水泥环的完整性受水泥石力学性能、几何参数和地层岩石力学性能的影响。水泥石的收缩会导致圆周断裂,从而使储层中的高压气体串层。目前,有限元分析(FEA)已广泛用于模拟井筒轴向和圆周方向裂缝的出现和扩展情况。Chu等人分析了直井中水泥石因地层流体和温度变化引起的微环裂缝的形成过程,由于井下高压引起的套管膨胀也会导致水泥环出现径向裂纹或脱粘。在页岩气井水力压裂过程中,水泥环不完整或固井质量不良均会导致固井水泥剪切破坏。由于套管柱在水平井中通常是处于偏心状态的,Andrade等人研究了在套管偏心的情况下,地层温度变化对水泥环的隔离能力的影响。该课题组使用了有限元分析来评估不同水泥浆配方对水泥环的应力和完整性的影响。Wilcox等人的研究表明,套管偏心率会导致套管所受的载荷分布不均匀,从而阻碍流体流动并导致固井质量差和井完整性

问题。Teodoriu 等人的研究表明,套管偏心率会增加井筒的局部应力分布,使水泥环失效并导致后续套管失效。

5 结论

(1)套管在高温高压的井下环境中易发生腐蚀和降解,因局部载荷和地层应力的变化也会发生断裂和破损,从而导致不同套管发生不同程度的失效,最终影响井筒质量和油气采出

(2)本文重点介绍了高温高压井、页岩气水平井、深水井、注水井和热驱井等不同井型套管失效的原因和对井筒质量的影响。

(3)由套管居中度差引起的水泥环失效会影响页

岩气井的固井质量,从而会对后续的天然气开采产生严重影响。

参考文献:

- [1] 田中兰,石林,乔磊.页岩气水平井井筒完整性问题及对策[J].天然气工业,2015,35(9):70-76.
- [2] 代清,林颢屿,陈春宇,等.页岩气井水力压裂对水平井套管变形影响分析[J].机械设计与研究,2022,38(3):118-121,126.
- [3] 范宇,黄锐,曾波,等.四川页岩气水力压裂诱发断层滑动和套管变形风险评估[J].石油科学通报,2020,5(3):366-375.
- [4] 冯耀荣,付安庆,王建东,等.复杂工况油套管柱失效控制与完整性技术研究进展及展望[J].天然气工业,2020,40(2):106-114.

(上接第76页)

电测后通过电测曲线检测该井地层压力系数为1.518,该井位于浅层套损侵水高压区为防止上部地层缩径,因此钻井液密度设计为1.75~1.80g/cm³。

综上所述,地层压力预测系统能在开钻前为钻井液密度的设计提供较为准确的数据支持,通过电测曲线分析更好地认证了地层压力预测系统计算数据的准确性,同时也为待钻井钻关方案的制定提供了有利的帮助。

3 结论

(1)利用注采关系确定压力系数方法,可以准确地预测待钻井地层压力数值,并且结合 Surfer 软件制作出来的压力等值线图更加直观、便捷;

(2)利用注采关系确定压力系数方法,优化前期钻井液密度的设计流程,提高了钻井液密度设计符合率。

参考文献:

- [1] 左星,肖润德,梁伟,等.精细控压钻井技术在高石19井实践与认识[J].钻采工艺,2014,37(6):9-10.
- [2] 杨玻,左星,韩烈祥,等.控压钻井技术在NP23-P2016井的应用[J].钻采工艺,2014,37(1):11-13.
- [3] 孙海芳,冯京海,朱宽亮,等.川庆精细控压钻井技术在NP23-P2009井的应用研究[J].钻采工艺,2012,35(3):1-4.
- [4] 张希文,李爽,张洁,等.钻井液堵漏材料及防漏堵漏技术研究进展[J].钻井液与完井液,2009,26(6):75-79.
- [5] 张斌,黄进军,李家学,等.随钻防漏堵漏技术研究的与应用[J].重庆科技学院学报,2010,12(5):70-75.
- [6] 张思民,高金龙,王栋,等.防漏堵漏钻井液技术发展趋势研究[J].中国石油和化工标准与质量,2013(18):75-79.
- [7] 程智,仇盛南,曹靖瑜,等.长裸眼随钻防漏封堵技术在跃满3-3井的应用[J].石油钻采工艺,2016,38(5):612-616.