

水平井用套管接头评价方法研究^{*}

徐 凯^{1,2}, 唐家睿^{1,2}, 杨晓龙^{1,2}, 魏耀奇^{1,2},
田永强^{1,2}, 董 超^{1,2}

(1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;
2. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 概述了水力压裂技术采用的套管接头性能评价方法的发展史, 重点研究了 API TR 5SF 套管连接性能评估方法。研究表明, API TR 5SF 是根据多段水平压裂井 (MFHW) 中存在的工艺驱动循环载荷指定的套管接头评价协议, 该协议允许根据用户的需求灵活定制检测方案, 推荐试验程序遵循接头上卸扣安装载荷、下套管载荷、压裂载荷、生产载荷的加载顺序。最后, 以大位移水平井用套管接头和一种半直连型套管接头为例, 根据用户需求按照 API TR 5SF 制定了满足要求的评价试验程序。

关键词: 水力压裂; 套管与固井; 套管接头; 连接性评价

中图分类号: TG115.5

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2021.12.009

Study on Evaluation Method of Casing Joint for Horizontal Well

XU Kai^{1,2}, TANG Jiarui^{1,2}, YANG Xiaolong^{1,2}, WEI Yaoqi^{1,2},
TIAN Yongqiang^{1,2}, DONG Chao^{1,2}

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China;
2. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: The development history of casing joint performance evaluation method used in hydraulic fracturing technology is summarized and the evaluation method of API TR 5SF casing connection performance is focused. The research shows that API TR 5SF is a casing joint evaluation protocol based on the process driven cyclic load in MFHW well. The protocol allows the flexible detection scheme according to the needs of users, and the recommended test procedure follows the loading sequence of the connection makeup loads, casing running loads, stimulation loads and production loads. Finally, taking the casing joint for extended reach horizontal well and a semi-direct connection casing joint as an example, the evaluation and test procedures meeting the requirements are formulated according to API TR 5SF according to the needs of users.

Key words: hydraulic fracturing; casing and cementing; casing joint; connectivity evaluation

0 前 言

套管连接性能是影响井筒完整性的一个关键点, 因此生产企业会投入大量的时间和资源。广泛的应用环境及复杂的载荷条件使得套管接

头性能评价很难采用统一的方法, 考虑到套管接头作为保护含水层不受井下流体影响的屏障和进入生产地层管道的重要性, 必须确保套管接头的性能评价能够满足现场施工条件, 并以适当的标准进行。

^{*}基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科技项目“提高页岩气井抗套损能力的新型套管研发”(项目编号 2020B-4020)。

1958 年, API 发布了首个全行业标准, 作为推荐实施规程 (RP) 以及套管和油管接头设计评价的验证试验程序。随着时间的推移, 高压/高温 (HPHT) 井和深井环境的挑战不断增加, 井筒设计结构复杂性也相应增加, 套管接头制造企业认识到需要更严格的性能评价方法。同时, 恶劣环境下接头性能的需求有效推动了行业有限元分析 (FEA)、全尺寸测试技术和程序的发展。

尽管之前有公布的接头试验评价标准, 但 ISO 13679 (第 1 版) 和 API RP 5C5 (第 3 版)《套管和油管接头测试程序》是自公布以来最受认可和广泛使用的接头评价标准 (为清楚起见, 两个版本在本文中均称为 ISO 13679)。接头制造企业已使用 ISO 13679 作为许多油套管接头评价的基础, 并且将根据本标准评价的接头用于油井设计。

ISO 13679 的基本程序是对接头试样进行一系列试验, 这些试验代表了可能的载荷和载荷顺序, 这些载荷和顺序近似于接头在使用中可能受到的载荷。除了载荷类型外, ISO 13679 还确定了测试接头的严苛等级。这些严苛等级被称为接头应用程序级别 (CAL), 其中 CAL IV 最为严苛的。

典型的 ISO 13679 CAL IV 级试验包括四个阶段: 材料理化性能检测、上卸扣试验、密封性能检测和极限载荷试验。材料理化性能检测是为了评估管材的实际材料性能, 从管体上切下连接试样, 在计算密封性能试验的特定荷载点时, 相关参数将在评估程序中使用。根据连接试样的几何结构进行上卸扣试验, 试验后的接头可用于评估程序中剩余试验。在上卸扣试验之后是三个密封性试验系列: A 系列、B 系列和 C 系列。A 系试验是将接头置于包括轴向载荷在内的组合载荷下 (内压、外压、拉伸和压缩); B 系试验是将接头置于内压下轴向拉伸或压缩的组合载荷下, 并在关键载荷步骤处施加弯曲, 模拟井内建井段的狗腿度; C 系试验在相应的内压和轴向拉伸载荷下对接头进行多次热循环。一旦接头通过一系列的密封性试验, 它们将在各种不同的极限荷载组合 (如拉伸、压缩、内压、外压等) 下进行试验, 达到或超

过其结构承载力。

接头不仅要经过严格的试验检测, 而且符合相关性能标准, 这些标准有助于确定接头是否满足未来的施工要求。相关性能标准有两个: 密封完整性和结构完整性。对于 CAL IV 试验程序, 密封性能试验系列中, 每个载荷点处限制气体渗漏小于 0.06 mL/min 的接头被视为“合格”的接头。

随着油井设计的不断发展, 接头和管材性能的要求在不断变化, 油套管作业者和制造企业都意识到 ISO 13679 标准存在一些限制, 因此行业专家致力于更新 ISO 13679 标准, 以反映目前油井的新设计要求和载荷条件, 例如海上高压井, 接头的失效可能带来非常严重的影响。

由于 ISO 和 API 标准不再是等效的技术文件, 2017 年 API RP 5C5 (RP 5C5) 第 4 版发布, 同时 ISO 13679 也在持续更新。在大多数情况下, API RP 5C5 建立了与 ISO 13679 相同的试验类型, 但是, 在 CAL IV 级试验中, 接头密封性能试验顺序按 B-C-A 系列进行。此外, 单独的密封性能试验 (特别是 A 系列) 规定接头需要承受环境温度和高温下的组合载荷, 这是接头评价试验的新要求。

虽然 API RP 5C5 现在是评价大多数接头设计的标准, 但 API RP 5C5 中的载荷顺序侧重于静态海上高压井条件, 并未涉及到多段水平压裂井 (MFHW) 中的特定载荷。此外, 完成 API RP 5C5 CAL IV 测试项目的成本很高, 如果评价过程不能反映现场应用情况, 相关人员通常不愿意进行大量的研究和开发投资。

1 压裂水平井接头评价的出现

在北美地区, 鉴于压裂水平井 (MFHW) 行业的增长, 运营商和接头制造企业一直在共同努力, 以确定如何评估 MFHW 应用程序中的接头连接性能。针对 MFHW 的接头设计也越来越普遍, 制造企业正在创建定制的测试程序, 以模拟水力压裂井的典型现场条件。

2015 年, 美国石油学会发布了 API RP 100-1《水力压裂-油井完整性和裂缝控制》, 为行业提

供了水力压裂井设计指南和参考。API RP 100-1 第 5.3 节阐述了套管设计，并总结了选择 MFHW 套管接头时需要考虑的关键荷载因素，包括压裂增产荷载、回流荷载、采气荷载、套管下入荷载、连接弯曲强度、抗压和抗拉承载力、气密封能力（如有要求）、疲劳荷载。

许多上述荷载未在 API RP 5C5 中表示出来。这种情况之前也出现过，因为其他非典型井应用都有具体的评价方法，如热采井应用、蒸汽辅助重力排水井（SAGD）和循环蒸汽吞吐井（CSS）。由于该行业认识到在 ISO 13679 标准中没有表述温度驱动的应变荷载（API RP 5C5 标准的最终更新中也没有该内容），故发布了热井套管连接验证标准 ISO/PAS 12835。

2 针对 MFHW 接头评价开发的工业协议

2016 年，根据 API WI 3081 成立了一个行业专家委员会，以解决 MFHW 相关评价协议的分歧。针对 MFHW 井中存在的工艺驱动循环荷载，该委员会制定了一个 MFHW 井所用接头的评价协议。

MFHW 应用的一个独特方面是井下环境的临界荷载，这是特殊应用，与现有井下环境条件相比，作业者的井筒设计、完井和增产策略以及产量对接头性能的影响可能更大。鉴于此，针对 MFHW 应用的任何行业开发协议都必须是灵活的，并且是针对运营商的实际需要而专门构建的，创建一个“一刀切”的方法不切实际。

在设计 MFHW 协议时，还应当考虑另一个与应用相关的要素，即有些井可能穿过地层表层上方的敏感含水层，有些井可能拥有大狗腿度（DLS）的建井段，进而进入大位移水平生产层段。对于每个接头，每个应用程序可能需要不同的标准。

委员会认识到，提供一致的试验方法和允许准则能够让使用者灵活制定尽可能代表现场条件的试验方案。由于委员会希望得到的协议是一个指南而不是一个要求，因此会选择将其作为技术报告（TR）而不是推荐规程（RP）进行开发，API 将其命名为 API TR 5SF。

3 API TR 5SF 的一般理念

API TR 5SF 将使评价人员能够创建一个定制的检测程序，以满足他们的实际需求。试验程序将由被称为试验程序元素（TPE）的单个组件组成，每个测试程序元素侧重于代表油井作业中特定过程或阶段的特定荷载。与 API RP 5C5 相比，API TR 5SF 接头评价的一个重要区别在于，API TR 5SF 没有规定广泛的性能标准，也未采用 CAL 类型的系统来定义评价程序的严苛程度。没有规定数量的试样必须按照 API TR 5SF 进行试验，具体参数由试验人员确定。与油井设计的许多方面一样，接头性能适用性要求试验人员进行工程判断，不仅要了解试验程序如何能够代表 MFHW 应用，还要了解试验程序在现场全面评估接头性能所有方面的能力如何受到限制。

尽管 API TR 5SF 允许试验人员选择试验程序要素，但其推荐遵循接头上卸安装荷载、压裂荷载、采气荷载的加载顺序。加载顺序很重要，因为 MFHW 应用中的大部分荷载可能会对接头结构（可能还有密封）及性能产生累积影响。因此，在试验过程中应尽可能模拟现场的工况条件，特别是在循环荷载方面，因为它会导致接头连接处局部发生屈服。

委员会制定 API TR 5SF 的另一个目标是通过引用其他 API 文件中的相关信息，进而减少来自 API 文件（如 API RP 5C5）的重复信息。这种方法的另一个好处是确保引用的信息取自最新版本，从而降低文件之间信息不一致的风险。

4 试验程序要素

API TR 5SF 提出的试验程序要素包含四类荷载，以及油井施工、增产和生产各阶段的循环荷载条件。试验程序旨在模拟现场工况条件，因此没有规定轴向荷载、DLS 目标曲率等参数，而是由试验人员确定。

4.1 接头上卸扣试验

试验程序的第一步是接头上卸扣试验，包括试验人员是否希望在标准接头组件之外增添补充试验选项。

如果试验人员想在最终接头上卸扣前进行多次上卸扣, 他们可以对试样进行抗粘扣试验。API TR 5SF 中未规定抗粘扣试验程序, 但参考 API RP 5C5 中的试验程序; 由试验人员确定是否将 API RP 5C5 抗粘扣性能的验收标准引入本试验程序。

如果检验人员要模拟下套管作业中出现的过扭矩情况, 接头试样应当夹持短节进行上扣, 这样可以模拟试样受到上扣后的过扭矩情况。但是在螺纹和接箍连接的情况下, 这种上扣方式会引起接箍的滑动。虽然在典型的抗粘扣试验中 (API RP 5C5) 要避免这种情况, 但它更能代表在下套管过程中过扭矩对接头的影响。

4.2 下套管载荷

下套管载荷对接头试样产生循环载荷。这些测试元素是为了模拟套管从地面下入至指定位置过程中所经历的载荷。多段压裂水平井设计通常包含穿过产层的长水平套管或衬管, 这可能需要一个或多个造斜段来调整井眼方向。套管单靠重力作用不能通过这种轨迹复杂的井眼, 施工人员会通过旋转套管或上提下放来克服井眼的摩阻。

在加载循环载荷之前, 试验人员需要验证接头试样的抗拉伸性能。这对于半直连接头、直连接头或其他不能达到 100% 管体效率的接头尤为重要。拉伸载荷试验用来模拟卡瓦到造斜点之间的套管对接头的载荷作用。

旋转和弯曲的复合载荷是这个测试单元的基础。这种复合作用模拟了套管在抵达预定位置过程中接头所受的载荷。旋转下套管时, 接头在大狗腿度的多段压裂水平井中会出现显著的局部拉伸-压缩交替载荷。

针对旋转-弯曲复合试验, API TR 5SF 给出了多种选择。例如: 试验人员可以根据设备条件等来选择长周期或短周期的循环试验, 同时在旋转-弯曲试验中选择性地增加内压、轴向载荷和扭矩。

4.3 压裂载荷

与其他油气开发技术比, MFHW 的显著特点是需要重复进行水力压裂。多段压裂水平井的设计发展非常迅速, 为了获得更高的产量, 生产

的管柱越来越长, 压裂段数越来越多。在水力压裂过程中, 接头会受到大量的高强度及高速率的压力循环, 这可能会影响接头的性能。

压力循环载荷是测试单元的基础。压力循环载荷试验需要对试样施加可以代表 MFHW 工艺的多个压力循环。压力循环试验中, 压力的变化速度比常规接头变化速度更快, 但试验设备很难产生与实际水力压裂作业中同样的压力峰值。与旋转-弯曲载荷试验相同, 在压力循环试验中, 试验人员也可以选择性地增加轴向载荷或大狗腿度。

4.4 生产载荷

与套管下入和压裂载荷相比, 多段压裂水平井中的生产载荷相对平稳。API TR 5SF 委员会认为, API RP 5C5 中的试验能够代表生产载荷; 但试验人员必须确定相应的试验程序。API TR 5SF 文件中未给出生产载荷测试单元中的密封性阈值的许可标准, 这就需要试验人员必须在试验期间评估接头性能的适用性。

5 创建定制的 API TR 5SF 试验程序

测试人员可以根据 API TR 5SF 来定制试验程序以满足特定需求。与其它试验文件不同, API TR 5SF 中既没有测试样本最少数量的要求, 也没有测试程序中必须包含的测试单元系列要求。下面两个案例介绍了如何根据不同的试验目的来设计试验程序进而评估接头的性能, 分别是: 大位移井的建设方和新设计的半直连接头制造方。

5.1 大位移井套管接头试验程序设计示例

在此案例中, 建设方有一口大狗腿度 (DLS) 的大位移井。在固井程序中, 套管需要进行旋转和上提下放, 以提高固井质量。该井的水平段有 80 个压裂段, 并且建设方希望采用单一直径井眼设计 (同种接头、同种套管, 套管从井口下到井底不使用悬挂器)。建设方要在生产段注水泥, 他们非常关心水平段的井眼轨迹或尺寸变化引起的水泥空隙。一旦出现空隙, 压裂液将会沿着生产管柱传播, 进而使套管段承受高外压。由于地层温度较高, 套管的材料性能可能也会受到影响。

试验人员制定了一个评价方案，包括一部分测试单元，这个评价方案可以处理井身设计和关键载荷中会影响接头在服役过程中整体性能的多个因素。接头试样的数量应该能够验证井下不同位置接头的性能，或者能够验证试验结果的可重

复性，然而考虑经济性可能会减小试验程序中某些重复性的试验程序单元。在这个案例中，试验人员制定了一个包括 3 组试样的评价方案，每组试样包含一系列的测试单元来检验接头在井下不同位置的性能。每组试样的试验步骤如图 1 所示。

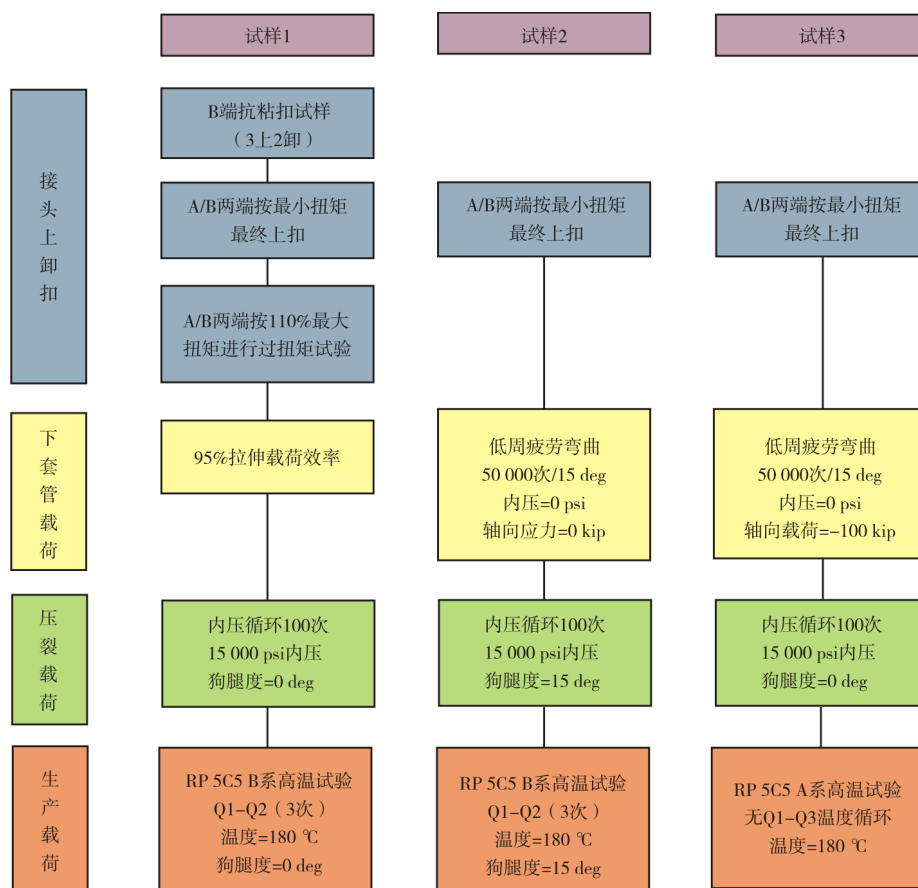


图 1 根据 API TR 5SF 制定的大位移井套管接头试验程序

在本案例中，接头试样 1 代表井口位置，这一部分套管不会经过造斜段，因此不必进行旋转-弯曲试验，但是它要进行压裂载荷试验和生产载荷试验。考虑到接头在井眼中的位置，生产载荷测试单元没有选择大狗腿度；但是为了模拟高温产出流体，生产载荷测试单元选择了高温。

接头试样 2 代表造斜位置，这部分套管要经历大量的旋转-弯曲循环，并且在生产阶段还要保持弯曲状态。接头试样 3 代表产层位置，这部分套管已经穿越了造斜段，回到了伸直状态。虽然接头试样 3 与其他两个试样同样会承受内压，但是试验人员选择性地评价了它的抗外压性能。

5.2 新型半直连型套管接头试验程序设计示例

第二个案例来自一家接头制造企业，他们开发了一种新的半直连型接头，并对它在 MFHW 中的性能进行评价。他们想知道旋转-弯曲复合载荷对接头有什么样的影响，还想知道接头在失效前可以承受多少次旋转-弯曲载荷循环。由于这是对接头性能的初步评估，制造企业不想在初期试验中投入太多的试样，后续的设计可能会根据初期试验结果而改变。API TR 5SF 标准试验程序如图 2 所示。在本案例中，试验人员为试样 1 和试样 2 进行非常相近的试验程序（1 号样增加了抗粘扣试验），以验证试验结果可重复。在按照 API RP 5C5 系列 B 系试

验程序进行试验之前,两个接头试样都承载了相同的套管下入和压裂载荷试验。试样 3 是试验人员为了向接头制造企业提供关于接头结构的性能范围信息。因此,试样 3 与其他两个试样一样,

在进行了低周旋转-弯曲试验(40 000 次循环)后,将其安装至高周旋转-弯曲试验系统中,对试样 3 进行超过 500 000 次的高周循环或直至试样失效。

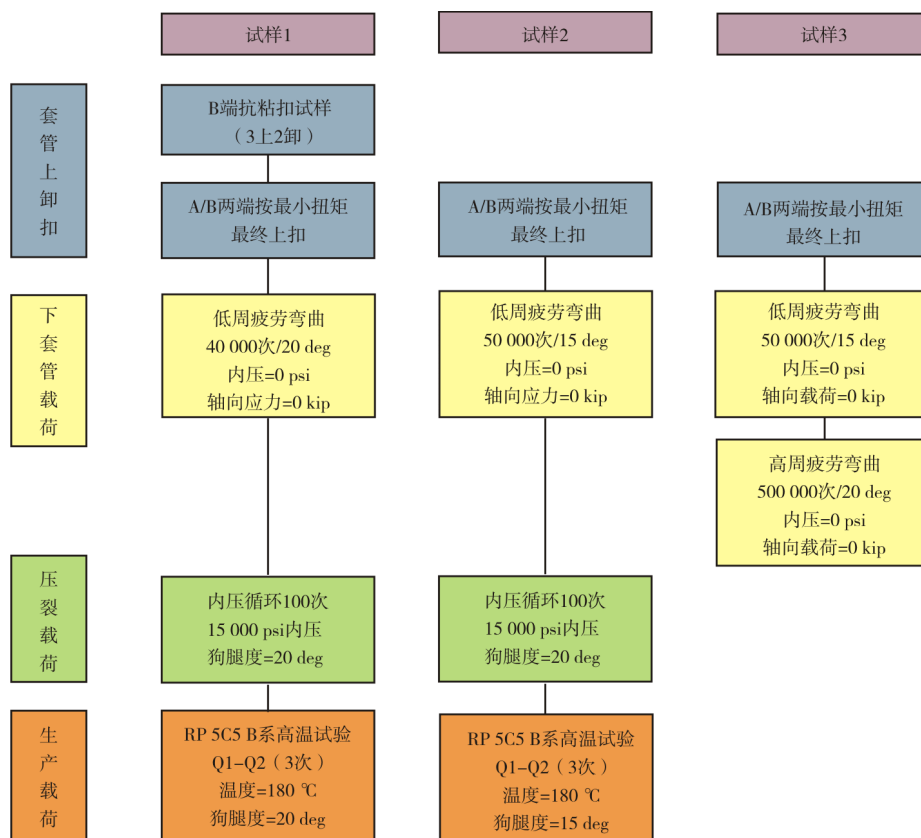


图 2 根据 API TR 5SF 制定的半直连型套管接头试验程序

6 结束语

API TR 5SF 目标是为接头在多段压裂水平井中的适用性评估提供一个框架。多年来,试验人员和制造商都有制定满足不同目的的试验方案,但是没有一个统一的框架作为试验方案的基础,不同接头在不同领域中的性能对比非常困难。由于 API TR 5SF 还在开发中,因此它的一些内容在最终出版前还会发生变化,但是委员会已经明确了一点,须制定有代表性的试验方案。对于任何接头的评价方案,试验人员和用户都要根据工程评价意见来确定给定的接头是否适用特定的多段压裂水平井。如果 API TR 5SF 的

目标可以实现,那么它的出版会增加接头评价的一致性。

致谢: 对原文作者以及 C-FER 技术公司和阿纳达科石油公司的研究表示感谢。

译自: HA MILTON K, PATTILLO P D. Developing an evaluation method for casing connections used in hydraulically fractured wells [C] // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. 2019.

译者简介: 徐 凯 (1987—), 硕士, 工程师, 主要从事油气管道力学性能研究。

收稿日期: 2021-08-11

编辑: 董 超