

热采工况下钛合金筛管性能计算与实验研究

刘 强¹, 陈 勋², 祝国川¹, 查永进³, 郭淑君⁴, 张忠世⁴, 徐 欣¹,
宋生印¹, 尹成先¹

- (1. 中国石油集团石油管工程技术研究院 石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 陕西 西安 710077)
(2. 中国石油辽河油田公司钻采工艺研究院, 辽宁 盘锦 124010)
(3. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206)
(4. 中世钛业有限公司, 辽宁 丹东 118305)

摘 要: 钛合金材料由于具有高的比强度, 低弹性模量, 优异的机械性能、耐高温性能和耐腐蚀性能, 成为下一代解决稠油热采工况下高套损率的优选材料, 但在热采工况下钛合金割缝筛管的性能还缺乏研究。在模拟辽河油田稠油热采典型工况条件下, 使用有限元计算和实物试验相比对的方法, 对钛合金筛管理化性能、轴向热变形、轴向热载荷、大狗腿度下筛管及割缝形貌变化规律等进行研究。结果表明, 钛合金材质的筛管在热采工况下具有较好的强度和韧性, 350 °C 热采工况下钛合金筛管由于热应力增加的轴向载荷只有钢制金属网布筛管和复合筛管的 19.3% 和 20.4%, 经过 7 轮次的热采温度循环, 在 350 °C 热采温度下钛合金筛管的轴向伸长率仅为钢制筛管的 58.7%~60.4%, 在 20°/30 m 的大弯曲度及 350 °C 高温下, 钛合金筛管抗变形能力优异, 最大椭圆度只有 4.13%, 平行割缝保持完好且防砂能力优于同规格钢制筛管。基于本研究认为, 钛合金材质的筛管及套管可以有效地降低热采管柱在热采工况中的轴向热载荷、伸长量, 并且具有较高的耐高温性能和抗疲劳性能, 在热采工况极端弯曲条件下抗变形能力好, 是解决目前我国稠油热采现场高套损问题的有效方法和发展方向之一, 研究结果为钛合金筛管的设计和使用提供重要的技术参考。

关键词: 稠油热采; 石油管; 钛合金; 高温性能; 有限元分析; 全尺寸实物试验

中图分类号: TG146.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-185X(2022)02-0588-11

我国油气开发不断深入向深井超深井、“三高”井和稠油热采井等非常规油气资源发展, 对石油管材的要求也不断提高^[1,2]。在众多石油管材中, 筛管作为一种重要的完井管材, 不但可以起到在出砂层油藏中防砂采油的作用, 还能有效地防止裸眼井壁坍塌对完井管柱的破坏或堵塞井筒, 其中割缝筛管具有性价比高、管径大、流阻小和重复利用高等优点^[3,4]。广泛应用于我国油气开采的热采井、水平井和分支井完井等工艺中^[5,6]。

我国广泛分布在辽河、吐哈、胜利、新疆及渤海湾等的稠油资源广泛使用蒸气吞吐、蒸气驱、蒸气辅助重力卸油 (SAGD) 以及火驱等技术进行开采^[7], 筛管及套管在井下不仅受到地层应力、管柱载荷以及环境介质的影响, 还会被注入高温蒸气或者被火驱时, 钢制筛管及套管由于受到较高的温度和多周期循环导致过大的压缩及拉伸热应力而出现强度下降及

蠕变疲劳等问题, 同时井下高温环境中伴随着氧腐蚀等腐蚀环境会对筛管及套管造成腐蚀损伤^[8,9], 造成我国热采井开采过程中大范围的套损失效问题, 据不完全统计, 新疆油田的稠油热采井总体套损率高达 20% 以上^[10], 而辽河油田的稠油热采部分区块的套损率更是高达 40% 以上^[11]。

近年来, 随着海绵钛成本的不断下降, 因钛合金材料具有钢制材料无法匹敌的优秀性能如高强低密, 低的弹性模量, 优异的抗疲劳性能、耐腐蚀性和耐高温性能等, 已经成为高端石油管材料的热点研究和应用方向^[12,13]。在国际上, 美国 RMI 早在 20 世纪末就开发出了钛合金油管、套管以及井下热采管等, 在墨西哥湾的莫比尔湾油田 (Mobile Bay Field) 热酸性油气井成功应用, 实验证明钛合金套管及热采管在井下可以承受 260 °C 的高温, 同时考虑 25% 壁厚减薄条件下, 钛合金套管的安全系数是铬钢/镍基管柱的 3.5 倍^[14,15]。日本 JFE 公司和美国

收稿日期: 2021-04-17

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05020)

作者简介: 刘 强, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 中国石油集团石油管工程技术研究院, 陕西 西安 710077, E-mail: liuqiang030@cnpc.com.cn

Chevron 公司均开发有钛合金油套管产品, 在墨西哥湾及美国本土的高温高压井和热采井进行了应用^[16]。我国近 10 年才开始进行钛合金油套管及相关石油工具的研究, 中国石油集团石油管工程技术研究院(简称管研院)最早对钛合金油井管在油气开发工业应用的可行性进行了分析, 证明钛合金材料在石油工业有着良好的应用前景^[17], 针对油气工况下的钛合金材料选材和适用性进行了深入的研究^[13,18], 解决了钛合金油套管应用的一些瓶颈^[19-21], 针对油气工况应用开发了石油管专用钛合金材料^[22,23], 并制定了相关的标准^[24,25]。近年来, 钛合金油套管产品也在国内天然气水合物、高温高压油气开采中投入现场应用^[26,27]。

针对稠油热采工况下高居不下的套损率, 利用钛合金优异的抗疲劳、耐腐蚀和耐高温等性能来制备套管及筛管是否可行, 在热采工况下钛合金割缝筛管的热载荷状态、实物性能以及割缝形貌等相对于钢制割缝筛管孰优孰劣尚未有人进行过研究。因此在模拟辽河油田稠油热采典型工况条件下, 使用有限元计算和实物试验相对比的方法, 对钛合金筛管理化性能、轴

向热变形、热应力产生的轴向载荷、大狗腿度(指单位井段长度井眼轴线在三维空间的角度变化, 及管柱在三维空间里的弯曲程度, 常用“%100 m”表示)下筛管及割缝变化规律等进行系统研究, 以期得出钛合金筛管在热采工况下的热力学性能及变化规律, 为钛合金套管及筛管的设计和应用提供参考。

1 材料、计算及实验方法

1.1 试验用材料

材料选用国内某企业研制的双相钛合金套管, 合金主要化学成分见表 1。套管规格为 $\Phi 177.8 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$, 实测室温下管体屈服强度 $R_{p0.2}$ 为 873 MPa, 抗拉强度 R_m 为 911 MPa, 伸长率为 13.5%, 在套管两端加工 API 偏梯形螺纹。在钛合金套管距离管端螺纹消失处 455 mm 切割平行缝, 缝长 45 mm, 缝宽 0.5 mm, 缝间距为 30 mm, 每个圆周布缝密度为 50 条, 根据实验需求制备不同割缝数量的钛合金筛管。制备好的钛合金套管及筛管如图 1 所示。

表 1 试验用钛合金的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of titanium alloy for test (wt%)

Al	V	Mo	Zr	O	C	H	Ti
5.4	4.37	1.04	2.01	0.08	0.009	0.003	Bal.

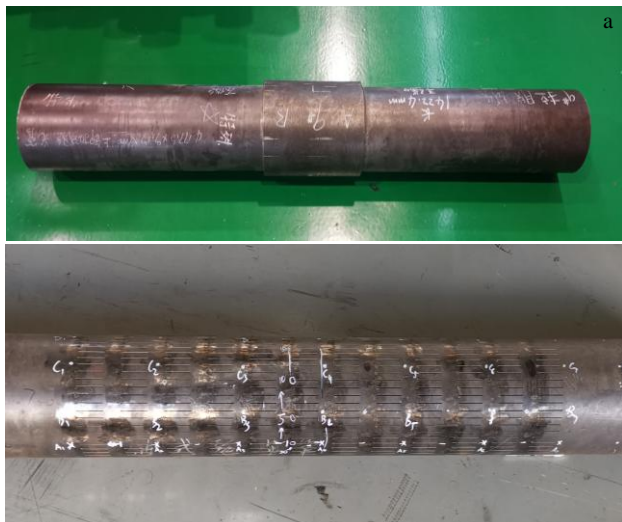


图 1 $\Phi 177.8 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$ 钛合金套管和钛合金筛管

Fig.1 Tested $\Phi 177.8 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$ titanium alloy casing (a) and titanium alloy screen (b)

1.2 筛管有限元计算方法

对 $\Phi 177.8 \text{ mm} \times 9.19 \text{ mm}$ 规格的割缝筛管进行有限元分析, 割缝筛管的有限元模型中, 为了消除端部效应对计算结果的影响, 管体长度取 2000 mm, 割缝的设置与实验用钛合金筛管割缝设置相同, 材料计算模型根据 P110 钢制割缝筛管和实测钛合金套管进行数据输入, 其中钢制割缝筛管的材料性能为: 弹性模量 206 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度 752 MPa, 钛合金材质的性能参数为: 弹性模量 105 GPa, 泊松比为 0.33, 屈服强度 873 MPa, 代入有限元材料模型进行计算, 所建立的筛管几何模型和弯曲试验几何模型如图 2 所示。

对建立的割缝筛管几何模型进行网格划分, 采用全部 SOLID45 六面体单元并控制单元网格的尺寸, 为了防止割缝处的应力集中影响计算精度, 在割缝部位进行网格加密, 以保证计算的准确性。为了节约计算资源, 对划分好的模型进行轴对称处理, 取周向的 1/2 轴对称模型进行计算。在模型边界条件方面, 模拟筛管在井下的实际工况, 对筛管 2 个端面进行约束, 在

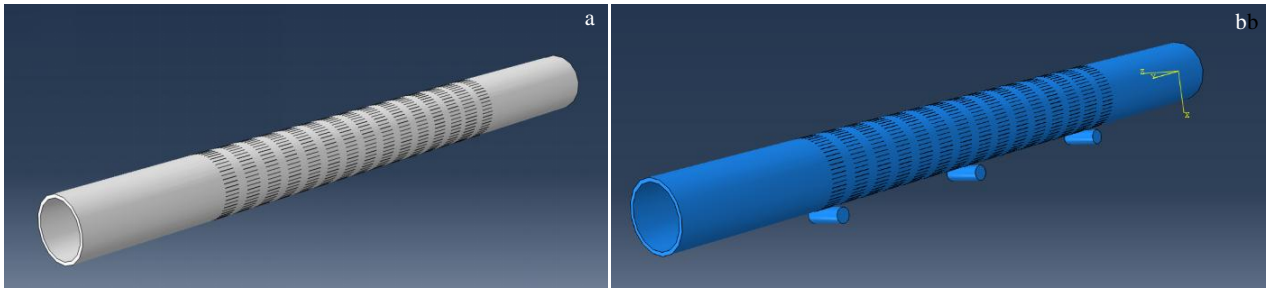


图 2 建立的筛管几何模型和弯曲试验几何模型

Fig.2 Established screen geometry model (a) and bending test geometry model (b)

对筛管进行弯曲模拟计算时，采用和实物试验系统一样的三点式弯曲结构以保持条件一致性，划分后的模型包含有 49 226 个有限元单元，311 468 个节点，如图 3 所示。

1.3 实验方法

金相检验：在钛合金筛管管体上取金相样，使用 OLS 4100 激光共聚焦显微镜对钛合金筛管组织进行分析。

室温及高温力学性能试验：从钛合金筛管管体纵向上取 300 mm 的板状室温拉伸试样及 190 mm 的板状高温拉伸试样，标距段尺寸分别为 12.5 mm×50 mm 和 10 mm×50 mm，在管体纵向上取 7.5 mm×10 mm×55 mm 夏比 V 型缺口冲击试样，依据标准 ASTM A370-19 和 ASTM E21-17，使用 CMT5105 材料试验机分别在室温（23 ℃）及高温（50, 100, 150, 200, 250, 300 和 350 ℃）对钛合金筛管材料的拉伸性能和冲击性能进行评价实验。

全尺寸轴向升温载荷测试：使用管研院的全尺寸油井管温度载荷系统，对总长度为 1.7 m 的钛合金筛管施加轴向压缩载荷 500 kN，模拟筛管在井下受力状态并确保筛管与试验机完全接触，在室温、150、250 和 350 ℃ 条件下加热并保温 20 min，对钛合金筛管在不同温度下轴向热应力增加的载荷进行测试，如图 4 所示。

全尺寸温度循环试验：依据 ISO13679-2002 标准，使用管研院的 2500 t 复合加载系统对 1.7 m 全长的钛合金割缝筛管进行加热及加载。如图 5 所示，对试样两端进行固定，从室温加热到 350 ℃ 保温 15 min 后降温到室温为 1 个温度循环轮次，对钛合金筛管进行 7 个轮次的温度循环，测试钛合金全尺寸筛管的轴向伸长量。

全尺寸弯曲变形测试：使用管研院的全尺寸套管弯曲评价系统，对总长度为 1.7 m 的钛合金筛管两端固定，采用三点弯曲的方式对筛管分别进行狗腿度为

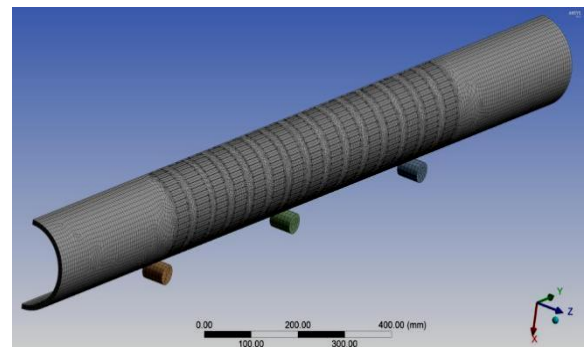


图 3 划分的割缝筛管有限元对称网格

Fig.3 Finite element symmetric mesh of slotted screen

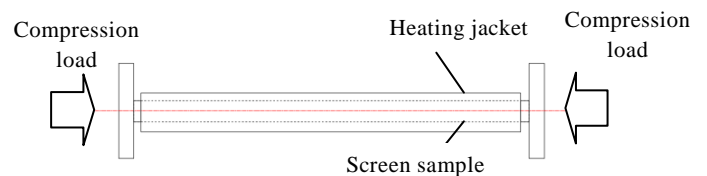


图 4 全尺寸油井管温度载荷实验示意图

Fig.4 Schematic diagram of full-scale temperature load experiment of sample

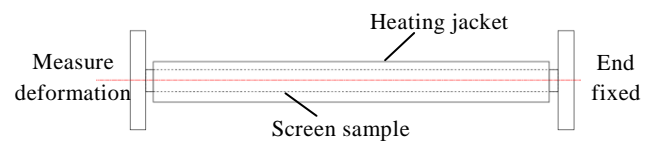


图 5 试验用 2500 t 复合加载系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of 2500 t composite loading system used for the test

15%30 m 和 20%30 m 的弯曲载荷加载，分别记录不加弯曲以及不同狗腿度下的钛合金筛管外形尺寸及割缝尺寸，实验全尺寸套管弯曲评价系统如图 6 所示。

2 实物结果

2.1 理化性能对比

对室温下及经过温度循环试验的钛合金筛管金相组织进行分析，结果显示经过热采井高温循环后的钛合金材料组织没有发生变化，依然是 $\alpha+\beta$ 的双相组织，组织中非金属夹杂相含量较少，图 7 为经过 7 个轮次全尺寸温度循环实验之后的金相组织。

对室温及高温下钛合金筛管材料的拉伸性能和冲击性能进行分析，结果如图 8 所示。从图中可以看出，随着热采环境温度的升高，钛合金筛管材料的屈服强度和抗拉强度不断降低，其中屈服强度从室温时的 873 MPa 下降到了 350 °C 时的 552 MPa，在高温下仍具有较高的强度。特别值得注意的是，钛合金材料的冲击韧性随着温度的升高而升高，从室温时的 48 J 升高到了 300 °C 时的 116 J，升高率达 241.6%，说明钛合金材料在高温下具有较好的韧性。

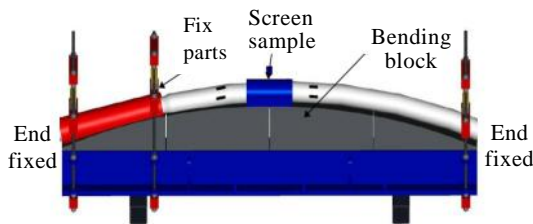


图 6 实验用全尺寸套管弯曲评价系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of experimental full-scale casing bending evaluation system

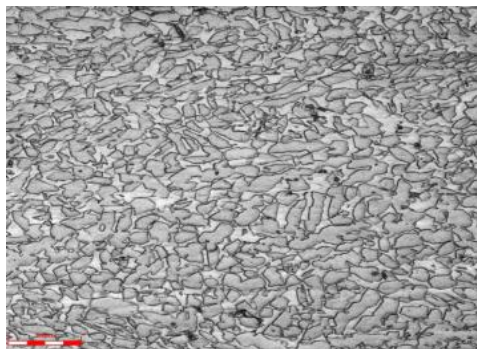


图 7 钛合金筛管金相组织

Fig.7 Metallographic microstructure of titanium alloy screen

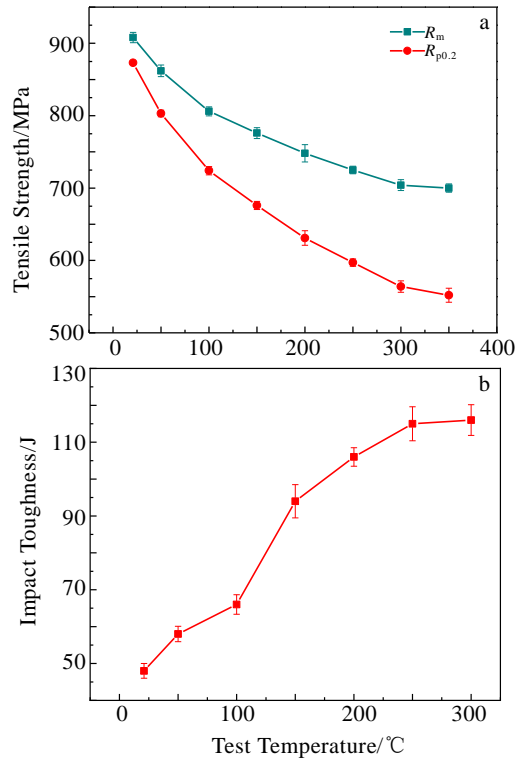


图 8 钛合金筛管拉伸性能及冲击性能随温度变化

Fig.8 Changes of tensile properties (a) and impact performance (b) of titanium alloy screen with temperature

将实验结果与钢制筛管性能进行对比^[28]，如图 9 所示。从图中对比结果可以看出，钛合金筛管的室温拉伸性能和高温拉伸性能全面高于 J55 钢级的钢制筛管，在 350 °C 时的屈服强度是 J55 钢级筛管的 2 倍以上；和 P110 钢级钢制筛管拉伸性能对比可以发现，钛合金筛管的室温和低温性能优于 P110 钢级钢制筛管，但是高温下的屈服强度低于 P110 钢级钢制筛管。

2.2 升温轴向载荷增量对比

对全尺寸筛管进行全尺寸轴向热载荷试验，试验过程中使用加热外套对筛管整管分别加热到 150、250 和 350 °C，如图 10 所示，测试实物钛合金筛管由于温度变化在轴向增加的载荷，如图 11 所示。结果显示当钛合金筛管加热至 150、250 和 350 °C 时分并保温后，轴向升温产生的载荷分别增加 145.3、238.5 和 351.7 kN，对比在同样 350 °C 条件下的钢制金属网布（CMS）筛管和复合筛管^[29]，钛合金割缝筛管升温增加的载荷是钢制金属网布筛管和复合筛管的 19.3% 和 20.4%，说明使用钛合金材质可以显著降低了筛管在热采井中的轴向载荷增量，对于现场中大量由于较高轴向载荷增量而产生的套损问题具有较为明显的优化效果。

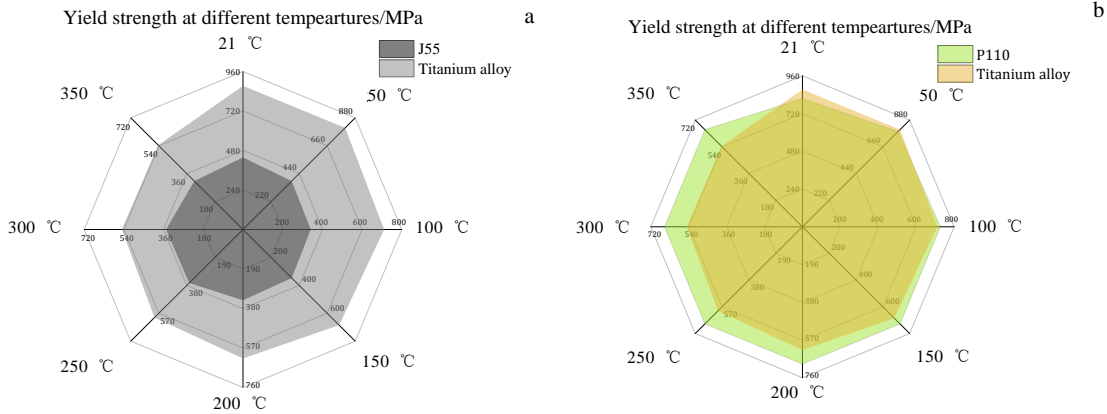


图 9 钛合金与 J55、P110 钢制筛管在不同温度下屈服强度对比

Fig.9 Comparison of yield strength between titanium alloy and J55 (a) and P110 (b) steel screens at different temperatures

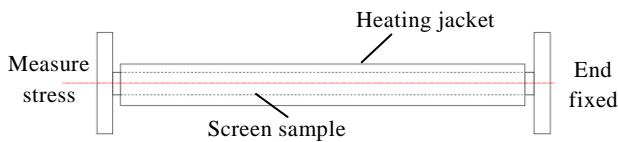


图 10 筛管升温轴向载荷测试示意图

Fig.10 Schematic diagram of the axial load test of the temperature rise of the screen

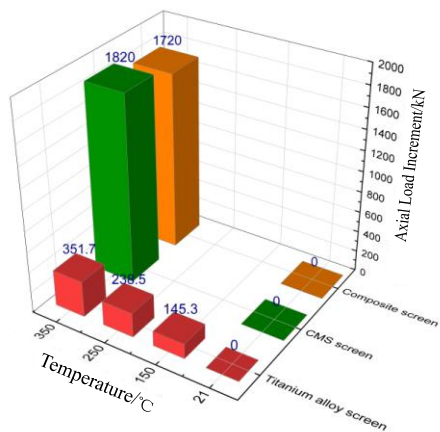


图 11 钛合金与钢制不同类型筛管升温产生的轴向载荷增量对比

Fig.11 Comparison of the axial load increments of different types of screens made of titanium alloy and steel

2.3 全尺寸温度循环试验分析

为了研究筛管在热采多轮次加热和冷却过程中的轴向长度变化规律，对试验所用规格的钛合金筛管从室温连续升温到 60、150、240、300 和 350 °C，并沿着同样的温度路径降温到室温为 1 个轮次的温度循环，连续进行 7 个轮次的温度循环，分别测量每个轮次的温度循环过程中筛管的轴向长度变化，结果见图 12。从图中可见在多次热采热循环过程中，最高温度下（350 °C）钛合金材质的筛管的轴向热伸长率也仅在 0.145% ~ 0.174% 之间，即 200 m 长的钛合金筛管最大伸长量计算可得为 374 mm，并且多次热循环下轴向热伸长率较为稳定，差距不大，同时对比升降温时的轴向变形率数据，可知降温时的筛管轴向伸长率要略高于升温过程中伸长率，即随着高温下时间的延长，钛合金筛管的轴向伸长率略有增加。将试验最后 1 次热循环后的钛合金筛管轴向伸长率数据与钢制的 CMS 筛管和复合筛管^[30]在同样工况下的数据进行对比，结果见图 13。从图中可以明显看出钛合金筛管在热采温度循环下的轴向伸长量显著小于 CMS 筛管和复合筛管，并且随着温度的升高，这种差距更为明显。在最高热采温度（350 °C）下轴向伸长率仅为钢制筛管的 58.7%~60.4%，这就意味着如果是 1000 m 的筛管管柱，使用钛合金筛管比钢制筛管将少发生轴向热变形 1217.3 mm。同时观察一个热采周期内恢复到室温的筛管最终轴向变形量，钢制的 CMS 筛管和复合筛管都会出现由于在升温的过程热蠕变效应而发生轻微的应变累积^[30,31]，这是由于热采井管柱在不断循环的升温过程中，由于轴向约束，热采套管试样承受压缩载荷，并且随温度的升高不断增大；达到 350 °C 后保温，承受的压缩载荷不断减小，表明发生应力松弛；随后降温

过程中, 压缩载荷不断减小, 承受的载荷逐渐由压缩方式转变为拉伸应力。随循环次数增加, 材料压缩载荷的峰值逐渐减小, 拉伸载荷的峰值逐渐增加, 表现出包申格效应, 这种热蠕变的包申格效应及应变累积会随着热采多轮次的进行而逐步增强^[32,33], 最终造成大量钢制套管及筛管在多轮次热采过后管体材料的拉伸峰值载荷达到乃至超材料的屈服强度, 引起套管缩颈变形导致最终发生大范围的套损^[34], 但是对于同样经过 7 轮次的钛合金筛管, 当温度降到室温后整个管柱的轴向热变形为 0, 这与钛合金在 350 °C 下具有较高的热稳定性相关, 因此使用钛合金材料制备热采井套管及筛管, 对于在热采高温和多周期循环改善热采管柱的压缩及拉伸热载荷、以及降低蠕变疲劳等具有重要的意义。

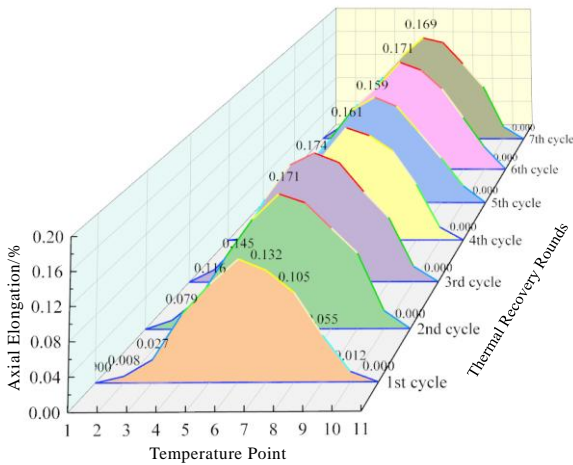


图 12 不同热采温度及轮次下钛合金筛管的轴向伸长率变化
Fig.12 Changes in axial elongation of titanium alloy screens under different thermal recovery temperatures and rounds

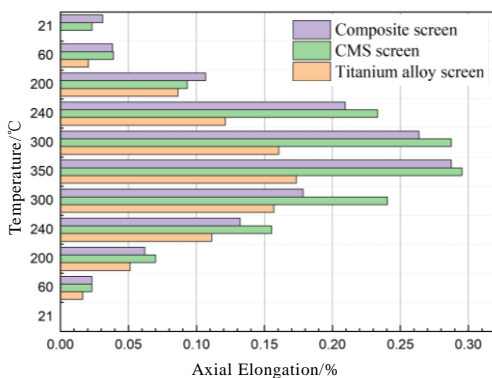


图 13 不同筛管某一轮次温度循环下轴向伸长量对比
Fig.13 Comparison of axial elongation of different screens under a certain temperature cycle

2.4 热采工况下抗变形及防砂能力分析

目前国内大量水平井采用筛管进行完井作业^[35], 在水平井及大位移水平井中, 由于在造斜段需要进行大狗腿度的弯曲, 对于筛管的变形能力有着巨大的挑战。钢制套管以及筛管由于本身材料的特性, 在大弯曲度下钢铁材料会发生塑性变形从而导致套管和筛管的损伤, 而钛合金材料的弹性模量只有钢铁材料的一半, 具有较强的抗大狗腿度能力, 因此需要在热采工况极限弯曲条件下对筛管的实物弯曲变形能力进行评价测试, 对比钛合金筛管和钢制筛管的抗弯曲变形能力, 由于目前缺乏钢制筛管在如此大弯曲条件下的试验报道和参考, 笔者先采用有限元的方法进行模拟分析, 然后使用实物试验加以验证。

为了保持和实物试验相同的实验条件, 有限元计算采用三点弯曲的方式来模拟弯曲工况, 最大弯曲度分别选取 15°/30 m 和 20°/30 m, 分别在室温和 350 °C 条件下对钢制筛管和钛合金筛管进行弯曲模拟计算, 室温下计算结果见图 14。从图中可见钢制筛管在 15°/30 m 的弯曲条件下, 在弯曲点部位已发生了明显的塑性变形, 特别是在割缝的两端应力应变较为集中, 应力超过了钢制 P110 筛管的屈服强度, 已经发生了塑性变形或者断裂; 随着弯曲度增大到 20°/30 m 时, 整个钢制筛管的变形更为明显, 除了等效应力的增大外发生塑性变形的程度也增加, 平行缝的上下两端已经发生断裂, 而对比钛合金割缝筛管可以看出, 当弯曲到 15°/30 m 和 20°/30 m 时, 钛合金筛管基本没有发生塑性变形, 这是由于钛合金材料的弹性模量只有钢铁的 55%, 更容易产生较大的弹性变形, 同时钛合金筛管上的平行割缝也基本保持完好, 未发生断裂失效。

当模拟热采 350 °C 下工况温度进行计算时, 可以看出在高温下筛管的等效应力均有所增加, 其中钢制筛管的等效应力要远远大于钛合金筛管的等效应力, 说明在热采工况下钢制筛管所承受的热载荷要更容易超过其本身的屈服强度而发生失效, 对比钛合金筛管可以看出钛合金筛管的热应力增加较小, 只有当承受 20°/30 m 的大弯曲度时在弯曲轴接触部位才产生较大的应力, 如图 15 所示。同时室温下的弯曲试验模拟结果对比可见, 高温下弯曲后管体变形程度比室温下有所好转, 这是由于随着温度的升高, 材料的弹性模量均发生不同程度的下降^[36], 根据文献所知, N80 管材的弹性模量下降率较高可达 30.8%^[37], P110 钢级筛管的弹性模量下降率为 8.4%, 一定程度上优化了钢制筛管的抗变形能力, 但是较钛合金材料的弹性模量仍有较大差距, 因此计算结果显示, 在 350 °C 下大弯曲度下, 钛合金筛管的变形程度要远远小于钢制筛管, 具有更好的热采工况适应性。

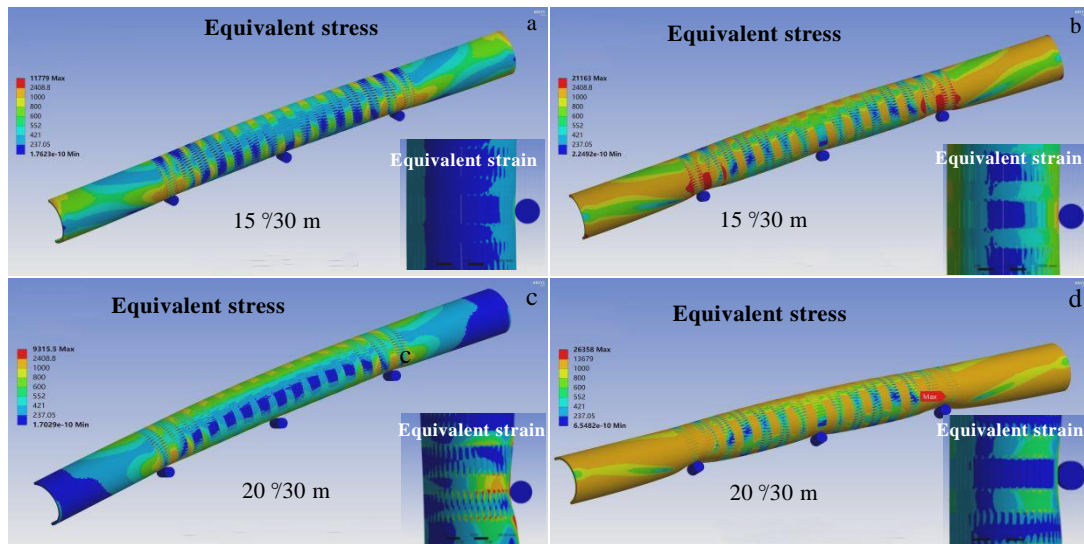


图 14 室温条件下钛合金筛管和钢制筛管在不同弯曲度下等效应力

Fig.14 Equivalent stress of titanium alloy screen (a, c) and steel screen (b, d) at 23 °C under different bending degrees

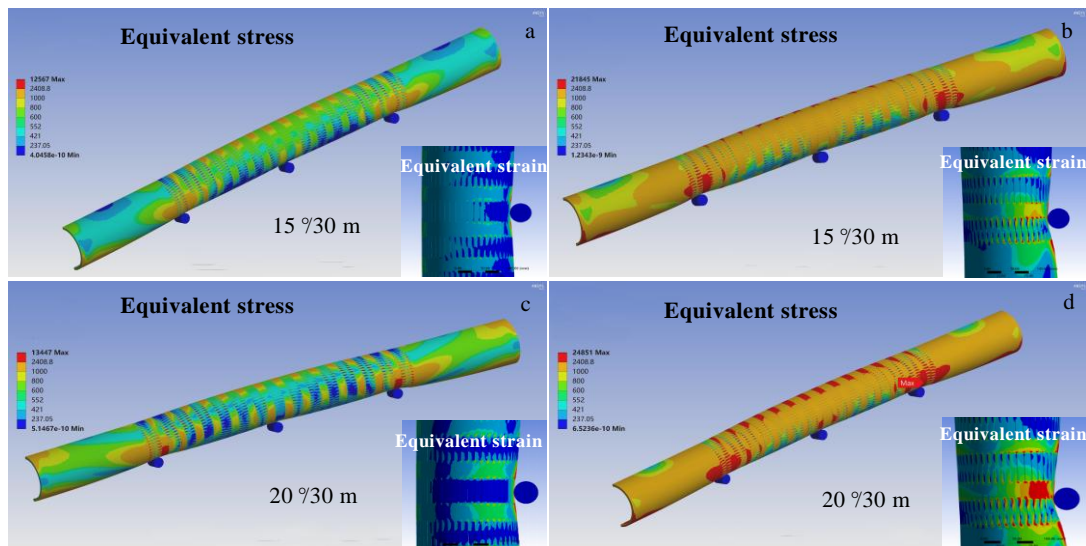


图 15 350 °C 下钛合金筛管和钢制筛管在不同弯曲度下等效应力

Fig.15 Equivalent stress of titanium alloy screen (a, c) and steel screen (b, d) at 350 °C under different bending degrees

由于现有实验条件限制，在室温下对钛合金筛管分别进行 15°/30 m 和 20°/30 m 的全尺寸弯曲试验，实验前及过程中试样的形貌见图 16。通过对实验前后及过程中的钛合金筛管进行外形尺寸测量，结果显示，随着全尺寸弯曲试验弯曲度的增大，钛合金筛管的椭圆度不断增大，但在 20°/30 m 的极限弯曲度下仅有 4.13%（见图 17），对比同规格钢制套管的弯曲性能可知^[38]，钢制套管在此大弯曲度下已发生严重的塑性变形和扁化，抗挤毁强度大幅下降。此外钛合金筛管

随着弯曲载荷的消失，在弯曲后没有塑性变形发生，具有较强的抗弯曲变形性能。

根据弯曲变形有限元计算结果，对同样平行布缝工艺下不同材料筛管在热采工况下的缝形变化进行分析，计算的位置分别选择距最大弯曲点 0°、90°和 180°处，如图 18 所示。分别对弯曲试验后的缝长和缝宽形貌进行计算，结果见图 19。

从图 19 中可见，钛合金和钢制筛管的缝形形貌随着弯曲程度的增加均发生了变化。当弯曲度为 15°/30 m

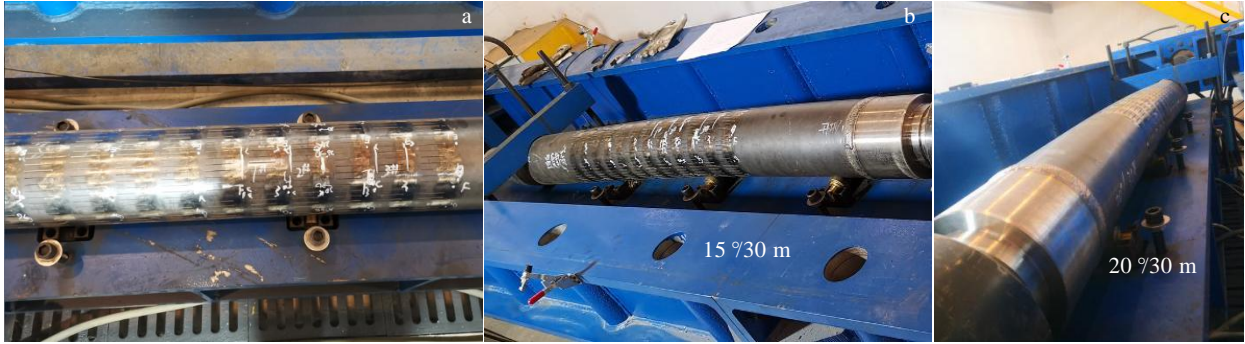


图 16 进行全尺寸弯曲试验的钛合金筛管在实验前与实验中形貌

Fig.16 Morphologies of the titanium alloy screen for full-scale bending test before the experiment (a) and during the experiment (b, c)

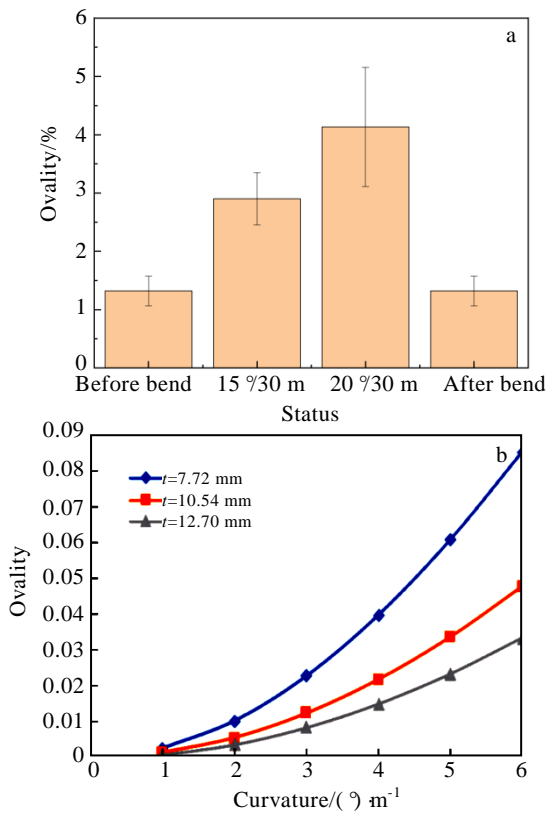


图 17 钛合金筛管在不同弯曲条件下椭圆度与钢制套管的对比比率

Fig.17 Comparison of ovality for titanium alloy screen pipe (a) and steel casing pipe (b) under different bending conditions (*t*-casing wall thickness)^[39]

时，在距最大弯曲点 0°位置，钛合金筛管割缝的缝宽增加约为 0.07 mm，相比钢制筛管割缝的缝宽增加量 0.13 mm 小了将近 50%；在距最大弯曲点 90°位置处，

2 种材质筛管割缝的缝宽变化量基本相同，对比距最大弯曲点 180°位置的缝宽变化可见，所有计算材料的缝宽均有减小，钛合金筛管割缝的缝宽减小量比钢制筛管要高出 150%~200%，缝宽减小量约为 0.15 mm，说明在同样的弯曲条件下，钛合金筛管的割缝缝宽增宽程度要优于钢制筛管，由于防砂效果与割缝缝宽密切相关，也就是说明在弯曲条件下同样规格及工艺的钛合金筛管防砂效果要好于钢制割缝筛管。当弯曲度进一步升高到 20 %30 m 时，3 个计算位置的缝宽均有一定程度的增大，但是钛合金筛管的缝宽增加量还是远远小于钢制筛管。对不同温度下 2 种弯曲度缝宽变化数值进行对比可知，当温度升高到 350 °C 时，在同一位置缝宽变化量不大，说明影响割缝形貌尺寸的主要还是弯曲度。

在缝形长度变化方面，2 种材质筛管割缝长度变化差异没有缝宽那么明显，说明钛合金筛管在弯曲条

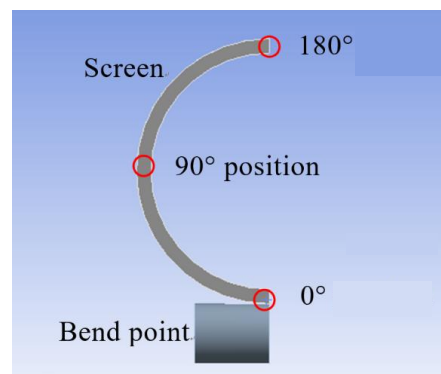


图 18 弯曲条件下缝形分析位置示意图

Fig.18 Schematic diagram of the position of the slit shape analysis under bending conditions

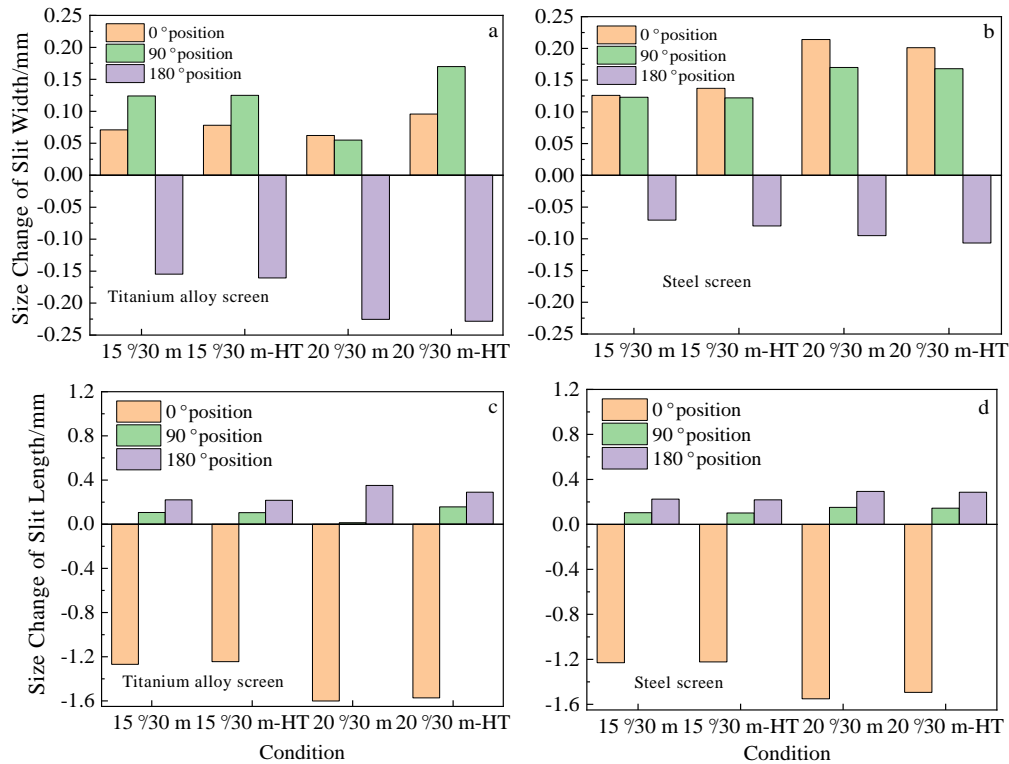


图 19 钛合金筛管与钢制筛管在不同弯曲条件下缝宽变化量与缝长变化量对比

Fig.19 Comparison of the change in slit width (a, b) and slit length (c, d) between titanium alloy screen (a, c) and steel screen (b, d) under different bending conditions

件下的过流面积和钢制筛管区别不大。但是可依然对比看出，随着弯曲度的增加，2 种材质筛管割缝的长度的变化量随之增大，并且随着工况温度的升高，在 350 °C 时筛管割缝长度变化量有所减小，说明温度的升高有益于提高筛管的过流面积。

为了验证有限元计算的准确性，对钛合金筛管经

过 15%30 m 和 20%30 m 的全尺寸弯曲试验后的缝形尺寸变化进行测量，并和有限元计算结果进行对比，结果见图 20，结果显示，距最大弯曲点 0° 位置和 180° 位置的实测缝形尺寸变化值与有限元计算基本吻合，90° 位置略有差异，属于正常实验误差。

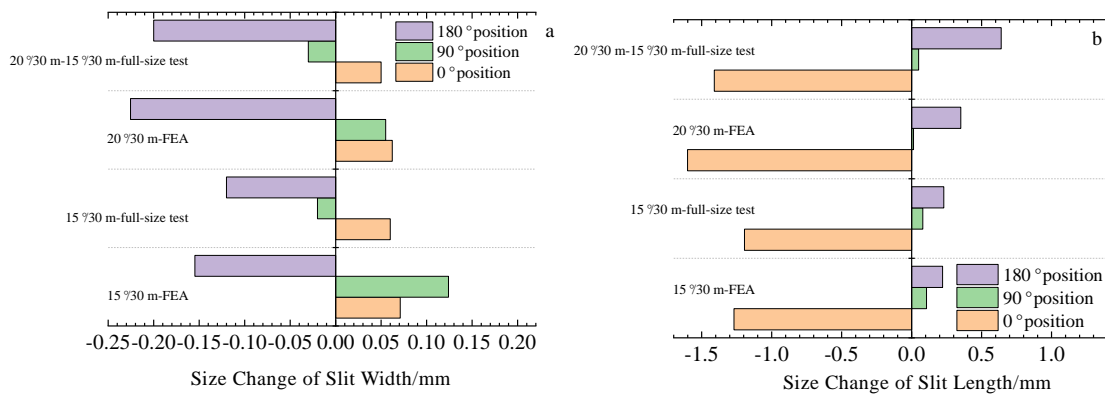


图 20 钛合金筛管在不同弯曲条件下有限元计算和实测缝形宽度及缝形长度变化对比

Fig.20 Comparison of finite element calculation and measured slit width (a) and slit length (b) of titanium alloy screen under different bending conditions

3 结 论

1) 经过热采井高温循环后的钛合金筛管材料组织稳定, 依然是 $\alpha+\beta$ 的双相组织。随着热采环境温度的升高, 钛合金筛管材料的屈服强度和抗拉强度不断降低, 在高温下仍具有较高的强度, 管材韧性随着温度的升高, 升高率达241.6%, 在高温下具有较好的韧性。

2) 在热采工况下钛合金筛管的升温轴向载荷增量是钢制金属网布筛管和复合筛管的19.3%和20.4%, 使用钛合金材质可以显著降低筛管在热采井中的轴向载荷, 对于现场中大量由于较高的轴向载荷增加而产生的套损问题有明显的优化效果。

3) 钛合金筛管在热采温度循环下的轴向伸长量显著小于CMS筛管和复合筛管, 在350 °C热采温度下轴向伸长率仅为钢制筛管的58.7%~60.4%, 可以显著改善在高温和多周期循环热采工况下热采管柱的压缩及拉伸热应力, 并减低蠕变疲劳。

4) 在20°/30 m的大弯曲度下, 钛合金筛管主要发生轻微的弹性变形, 最大椭圆度只有4.13%, 平行割缝也基本保持完好, 未发生断裂失效, 随着弯曲载荷的消失, 钛合金筛管恢复原貌, 具有较强的抗弯曲变形性能, 而同规格钢制套管在此大弯曲度下已发生严重的塑性变形和扁化, 抗挤毁强度大幅下降。

5) 随着筛管的弯曲度从0°增加到15°/30 m和20°/30 m, 钛合金筛管的缝宽增加量远远小于钢制筛管, 意味着防砂效果要好于钢制割缝筛管, 同时割缝长度变化差异不明显, 说明钛合金筛管在弯曲条件下的过流面积和钢制筛管区别不大, 当温度升高到350 °C时, 在同一位置割缝形貌变化不大, 说明影响割缝形貌尺寸的主要还是弯曲度。

6) 钛合金材质的筛管及套管可以有效地降低热采管柱在热采井中的轴向升温载荷、伸长量, 并且具有较高的耐高温性能和抗疲劳性能, 在热采工况极限弯曲条件下抗变形能力好、割缝形貌变化及防砂效果优于钢制割缝筛管, 因此钛合金筛管及套管是解决目前我国稠油热采现场高套损问题的有效方法和发展方向之一。

参考文献 References

[1] Gu Tan(谷 坛), Huo Shaoquan(霍绍全), Li Feng(李 峰). *Chemical Engineering of Oil and Gas*(石油与天然气化工)[J], 2008, 37(S1): 63

[2] Ye Dengsheng(叶登胜), Ren Yong(任 勇), Guan Bin(管彬) et al. *Natural Gas Industry*(天然气工业)[J], 2009, 29(3): 77

[3] Liu Dahong(刘大红), Song Xiuying(宋秀英), Liu Hongyan(刘艳红) et al. *China Petroleum Machinery*(石油机械)[J], 2004, 32(8): 13

[4] Lin Yuanhua(林元华), Huang Wanzhi(黄万志), Shi Taihe(施太和) et al. *China Petroleum Machinery*(石油机械)[J], 2001, 29(8): 7

[5] Li Hang(李 夯), Liu Yonghong(刘永红), Ma Jianmin(马建民) et al. *China Petroleum Machinery*(石油机械)[J], 2010, 38(7): 26

[6] Zhang Qinhu(张清华), Dong Changyin(董长银), Li Xiaobo(李效波) et al. *Oil Field Equipment*(石油矿场机械)[J], 2016, 45(79): 5

[7] Zhang Shoujun(张守军), Luo Enyong(罗恩勇), Yang Shangyu(杨尚谕) et al. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*(石油管材与仪器)[J], 2016, 2(2): 39

[8] Li Hongqian(李洪乾), Zhao Zengzin(赵增新), Cui Kai(崔凯) et al. *Drilling & Production Technology*(钻采工艺)[J], 2011, 345: 90

[9] Huang Yongzhi(黄永智), Zhang Zheping(张哲平), Zhang Chuanyou(张传友) et al. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*(石油管材与仪器)[J], 2020, 6(3): 34

[10] Wang Jianjun(王建军), Yang Shangyu(杨尚谕), Ji Haitao(纪海涛) et al. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*(石油管材与仪器)[J], 2019, 5(1): 42

[11] Li Jing(李 静), Lin Chengyan(林承焰), Yang Shaochun(杨少春) et al. *Oil Field Equipment*(石油矿场机械)[J], 2009, 38(1): 9

[12] Schutz R W, Watkins H B. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 243(1-2): 305

[13] Liu Qiang(刘 强), Hui Songxiao(惠松晓), Song Shengyin(宋生印) et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2019, 33(5): 841

[14] Kane R D, Srinivasan S, Craig B et al. *Proceedings of Corrosion Conference and Expo*[C]. Dallas: PCCX, 2015: 15

[15] Schutz R W, Lingen E V. *Proceedings of Eurocon'97 Congress*[C]. Texas: PCCX, 1997

[16] Love W W. *Sixth World Conference on Titanium Proceedings* [C]. France: Societe Francaise de Meallurgie, 1988

[17] Liu Qiang(刘 强), Song Shengyin(宋生印), Bai Qiang(白强) et al. *Oil Field Equipment*(石油矿场机械)[J], 2014, 43(12): 89

[18] Liu Qiang(刘 强), Hui Songxiao(惠松晓), Song Shengyin(宋生印) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(4): 1427

[19] Liu Qiang(刘 强), Fan Xiaodong(范晓东), Song Shengyin(宋生印) et al. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*(石油管材与仪器)[J], 2017, 3(4): 26

[20] Liu Qiang, Song Shengyin, Wu Gang et al. *La Metallurgia Italiana*[J], 2016, 109(3): 27

[21] Liu Qiang(刘 强), Shen Zhaoxi(申照熙), Li Dongfeng(李东风) et al. *Natural Gas Industry*(天然气工业)[J], 2020, 40(10): 94

- [22] Liu Qiang, Hui Songxiao, Tong Ke *et al.* *J Alloy Compd*[J], 2019, 787: 527
- [23] Liu Qiang(刘 强), Bai Qiang(白 强), Tian Feng(田 峰) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(4): 177
- [24] SY/T 6869.3-2016[S], 2016
- [25] SY/T 6869.4-2019[S], 2019
- [26] Yang Dongmei(杨冬梅). *Iron Steel Vanadium Titanium* (钢铁钒钛)[J], 2015, 36(3): 15
- [27] Liu Qiang(刘 强). *Petroleum Tubular Goods & Instruments*(石油管材与仪器) [J], 2020, 6(2): 68
- [28] Liu Zhengwei(刘正伟), Xie Guangjuan(谢广娟), Zhang Chunjie(张春杰) *et al.* *Oil Field Equipment*(石油矿场机械)[J], 2012, 40(2): 26
- [29] Pan Zhiyong(潘志勇), Han Lihong(韩礼红), Wang Jianjun(王建军) *et al.* *Petroleum Tubular Goods & Instruments*(石油管材与仪器)[J], 2017, 3(5): 40
- [30] Wang Hang(王 航), Wang Jianjun(王建军), Han Lihong(韩礼红) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2014, 35(4): 131
- [31] Kassner M. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*[M]. Butterworth-Heinemann: Imprint of Elsevier, 2004
- [32] He Zhanguo(贺占国), Zhao Yanli(赵延理), Wang Jiachang(王佳昌). *Technology Consulting*(科技咨询)[J], 2017, 49(11): 1672
- [33] Wang Jianjun(王建军). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2015
- [34] Xie Yuyin(谢玉银), Lin Cheng(凌 晨), Li Huimin(李慧敏) *et al.* *Periodical agency of Yangtze University*(长江大学学报)[J], 2017, 14(17): 44
- [35] Yang Gang(杨 刚), Xian Baoan(鲜保安), Bi Yansen(Bi Yansen) *et al.* *Coal Science and Technology*(煤炭科学技术)[J], 2019, 47(3): 175
- [36] Yu Fahao(于法浩), Jiang Zhaopin(蒋召平), Bai Jianhua(白健华) *et al.* *Petroleum Drilling Techniques*(石油钻探技术)[J], 2018, 46(6): 65
- [37] Wu Jianping(吴建平). *Petroleum Drilling Techniques*(石油钻探技术)[J], 2010, 32(1): 46
- [38] Jin Chunyu(金春玉), Qian Feng(钱 锋). *China Petroleum Machinery*(石油机械)[J], 2020, 48(8): 123

Calculation and Full-Size Experimental Research on Performance of Titanium Alloy Screen Pipe Under the Thermal Recovery Condition

Liu Qiang¹, Chen Xun², Zhu Guochuan¹, Zha Yongjin³, Guo Shujun⁴, Zhang Zhongshi⁴,
Xu Xin¹, Song Shengyin¹, Yin Chengxian¹

(1. State Key Laboratory for Performance and Structural Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China)

(2. Drilling & Production Technology Research Institute, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin 124010, China)

(3. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China)

(4. ZS Titanium Co., Ltd, Dandong 118305, China)

Abstract: Stem from high specific strength, low density, low elastic modulus, excellent mechanical properties, high temperature resistance and corrosion resistance, titanium alloy has become a promising candidate material to solve the high casing damage rate under heavy oil thermal recovery conditions. However, the study of titanium alloy slotted screens under thermal recovery conditions is still lacking. In this paper, the physical and chemical properties, axial thermal deformation, axial thermal stress, the change law of screen and slot shape of titanium alloy screen pipe under typical working conditions of heavy oil thermal recovery in Liaohe Oilfield were investigated by finite element assistance (FEA) calculation and full-size test. The results show that titanium alloy screen has good strength and toughness properties under thermal recovery condition, and the thermal stress of titanium alloy screen under 350 °C thermal recovery temperature is only 19.3% and 20.4% of those of CMS screen and composite screen. After seven cycles of thermal recovery temperature, the axial elongation of titanium alloy screen at 350 °C is only 58.7%~60.4% of that of steel screen. Under the large bending degree of 20°/30 m and the high temperature of 350 °C, the titanium alloy screen has excellent deformation resistance, the maximum ovality is only 4.13%, the parallel slit remains intact and the sand control ability is better than that of the steel screen of the same specification. Based on this study, it can be considered that the titanium alloy screen and casing can effectively reduce the axial thermal stress and elongation of the thermal recovery pipe string under the thermal recovery condition, have high temperature resistance and fatigue resistance, and have good deformation resistance under the extreme bending condition of thermal recovery, which is one of the effective methods and development directions to solve the problem of high casing damage rate in heavy oil thermal recovery field in China, this study also provides technical reference for the design, use and management of titanium alloy screen.

Key words: heavy oil thermal recovery; oil country tubular goods (OCTG); titanium alloy; high temperature performance; FEA; full-size test

Corresponding author: Liu Qiang, Ph. D., Senior Engineer, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, P. R. China, E-mail: liuqiang030@cnpc.com.cn