

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2019013

S135 钻杆接头缺口疲劳行为研究

李 皓¹, 曾德智¹, 高定祥², 刘 飞³, 田 刚⁴, 施太和¹

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830011; 3. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 4. 中国石油新疆油田分公司工程技术研究院, 新疆克拉玛依 834000)

摘 要: 钻杆接头疲劳失效是钻杆失效的主要形式, 因此, 为提高钻杆的使用寿命, 对 S135 钻杆接头的疲劳行为进行了研究。根据钻杆接头的受力特征设计了疲劳试样, 采用 PQ-6 型旋转弯曲疲劳试验机和扫描电镜研究了应力集中对 S135 钻杆疲劳性能的影响。结果表明: S135 钻杆疲劳性能对 V 形缺口具有一定的敏感性; 缺口根部半径越小, 应力集中系数越大, 对疲劳性能的影响越严重, 应力集中系数和疲劳强度符合幂函数关系; 疲劳裂纹从缺口根部开始萌生, 存在许多裂纹源(呈环形排列); 应力相同时, 随着应力集中系数增大, 缺口根部的撕裂现象减弱, 断口变得光滑、平整, 疲劳条纹变得细而密。研究结果表明: 对钻杆接头螺纹的牙型进行优化设计, 可以降低或减缓齿根的应力集中, 降低 S135 钻杆疲劳对缺口的敏感性, 提高 S135 钻杆的使用寿命。

关键词: S135 钻杆; 钻杆接头; 缺口疲劳; 应力集中; 断口形貌

中图分类号: TE28

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2019)04-0064-06

A Study of the Notch Fatigue Behavior of S135 Drill Pipe Joint

LI Hao¹, ZENG Dezhi¹, GAO Dingxiang², LIU Fei³, TIAN Gang⁴, SHI Taihe¹

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploration(Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Northwest Oil Field Company, Urumqi, Xinjiang, 830011; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 4. Research Institute of Engineering Technology, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xijiang, 834000, China)

Abstract: Drill pipe joint fatigue is the main form of drill pipe failure. In order to improve the safety fatigue life of drill pipe, the notch fatigue behavior of S135 drill pipe joint has been studied. The fatigue specimens were designed according to the force characteristics of drill pipe joint, and the influence of stress concentration on the fatigue performance of S135 drill pipe was studied by PQ-6 rotary bending fatigue tester and scanning electron microscope. The results showed that the fatigue of S135 drill pipe exhibited certain sensitivity to the V-notch. The smaller the notch root radius, the larger the stress concentration factor, and the more serious impact on the fatigue performance. The stress concentration factor and the fatigue strength are in accordance with the power function relationship. The process is as follows: the fatigue crack starts from the root of notch, and many sources of cracks existed (in annular arrangement). When the stress is the same, the tearing phenomenon at the root of notch weakens with the increase of stress concentration factor, the fracture becomes smooth and flat, and the fatigue fringes become fine and dense. The research results showed that the optimal design of the drill pipe thread joint could reduce or alleviate the stress concentration of the root, reduce the fatigue sensitivity of S135 drill pipe to the notch, and improve the safety by better mapping the fatigue life of S135 drill pipe.

Key words: S135 drill pipe; drill pipe joint; notch fatigue; stress concentration; fracture morphology

在石油钻井中, 疲劳失效是钻杆失效的重要形式。统计表明: 钻杆疲劳失效大多为接头失效; 钻杆接头存在严重的应力集中, 对钻杆疲劳失效有很大的影响。因此, 评价钻杆在应力集中条件下的疲劳性能、对缺口的敏感性, 以及研究应力集中、加载程度对疲劳性能的影响, 对评估缺口对钻杆使用寿命的影响程度具有重要的意义。

Huang Bensheng 等人^[1]研究了 H₂S 预腐蚀对

收稿日期: 2018-05-30; 改回日期: 2018-12-13。

作者简介: 李皓(1988—), 男, 甘肃陇南人, 2011年毕业于兰州城市学院石油工程专业, 2018年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位, 主要从事油气设施腐蚀与防护工作。E-mail: lihao1477024473@163.com。

通信作者: 曾德智, zengdezhi1980@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“静载、振动与腐蚀耦合作用下 H₂S/CO₂ 气井完井管柱螺纹密封面的力化学损伤机制研究”(编号: 51774249)、中国石化科技重大专项“顺北一区采输关键技术与应用”子课题“顺北一区高效采油技术研究”(编号: ZDPI7004)联合资助。

S135 钻杆旋转弯曲疲劳性能的影响, 以及 S135 钻杆被 H_2S 损伤后的疲劳破坏机制。Zeng Dezhi 等人^[2]研究了 H_2S 预腐蚀对 S135 钻杆疲劳性能和疲劳裂纹萌生的影响。C. Ojanomare 等人^[3]通过多参数的权函数研究了钻井过程中钻杆疲劳裂纹增长的过程。Liu Yonggang 等人^[4]基于服务条件、材料质量、应力和腐蚀等因素, 进行了硫化物应力腐蚀开裂试验, 研究了钻杆的轴向开裂, 并提出了预防钻杆轴向开裂的措施。S. M. Zamani 等人^[5]研究认为钻井过程中钻杆疲劳失效主要由复合载荷、综合应力、振动和钻井液腐蚀等造成, 并提出了预防钻杆失效的有效措施。Lin Yuanhua 等人^[6-9]采用多次重复冲击疲劳试验测试了 G105 和 S135 钻杆的冲击疲劳性能, 并采用数值模拟和试验的方法研究了双台肩钻杆接头应力场的分布。Han Yan 等人^[10]统计分析了新疆油田 S135 钻杆失效情况, 结果表明, 钻杆失效原因为硫化物应力腐蚀开裂。根据上述研究可知: 国内外学者对钻杆失效的研究成果大多集中于腐蚀/预腐蚀、腐蚀疲劳和应力腐蚀开裂等方面, 对于钻杆接头缺口疲劳性能和对缺口敏感性的研究却鲜见报道。

因此, 笔者以 S135 钻杆材料为研究对象, 在钻杆接头上沿轴向取样, 根据接头螺纹牙型和应力集中系数设计了光滑和缺口 2 种试样, 使用 PQ-6 型旋转弯曲疲劳试验机进行了疲劳试验, 并采用扫描电镜 (SEM) 观察 S135 钻杆断口的形貌, 分析了 S135 钻杆接头缺口的疲劳行为。

1 S135 钻杆接头疲劳试验

1.1 试验材料

以 S135 钻杆为研究对象, 在钻杆接头上沿轴向取样, 作为试验试样。S135 钻杆接头中 C, Si, Mn, P, S, Cr, Mo 和 Ni 等元素的含量分别为 0.370%、0.240%、0.960%、0.011%、0.007%、1.140%、0.320% 和 0.080%, 符合 API 标准对 S135 钻杆使用规范的要求。S135 钻杆材料的屈服强度为 1 034 MPa, 抗拉强度为 1 137 MPa, 延伸率为 17.29%, 冲击功为 103 J, 洛氏硬度为 331。

1.2 试验方案

钻杆接头螺纹断裂和刺漏是钻杆失效的主要形式之一^[11-12]。钻杆接头存在严重的应力集中, 可使钻杆在循环载荷下迅速断裂^[6]。当前使用的钻杆大多存在螺纹应力集中过大产生的缺口疲劳问题 (见图 1)。

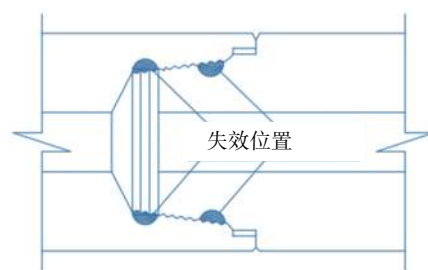


图 1 钻杆接头疲劳失效位置

Fig. 1 Fatigue failure position of drill pipe joint

为研究螺纹应力集中对钻杆接头疲劳性能的影响, 设计了光滑试样和缺口试样。光滑试样如图 2 所示。基于钻杆接头螺纹牙形, 设计了 V 形缺口试样。缺口几何参数定义 (缺口深度 H 、缺口张角 α 、缺口根部半径 R) 如图 3 所示, 缺口试样如图 4 所示。

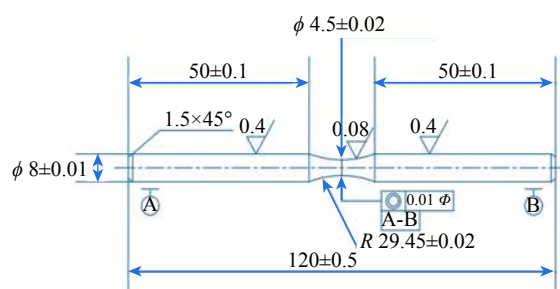


图 2 光滑试样 (单位: mm)

Fig. 2 Smooth specimen (unit: mm)

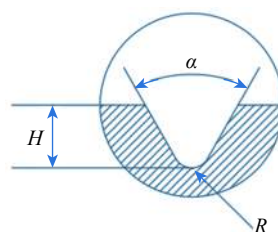


图 3 V 形缺口几何特征和参数定义

Fig. 3 The geometric feature and parameter definition of V-notch

采用 SolidWorks 软件对光滑试样和缺口试样进行有限元分析。当施加弯曲载荷时, 光滑试样漏斗部位的等效应力场如图 5 所示。由图 5 可以看出, 光滑试样试验部位应力场线平行分布, 不存在应力集中现象。当施加弯曲载荷时, 缺口试样缺口部位的等效应力场分布如图 6 所示。由图 6 可以看出, 缺口根部的应力最大, 缺口改变了应力场的分布, 缺口根部存在应力集中现象。

笔者通过试验研究缺口应力集中对 S135 钻杆接头疲劳性能的影响, 具体试验方案见表 1。

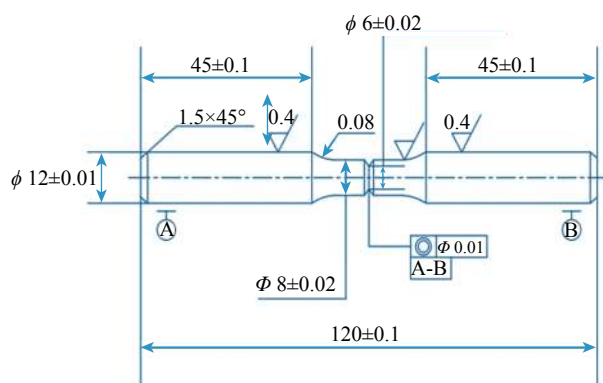


图4 缺口试样 (单位: mm)

Fig. 4 Notch specimen (unit: mm)

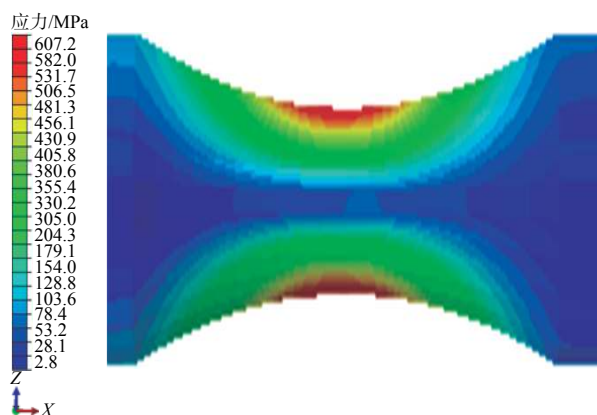


图5 光滑试样的等效应力云图

Fig. 5 Equivalent stress nephogram of a smooth specimen

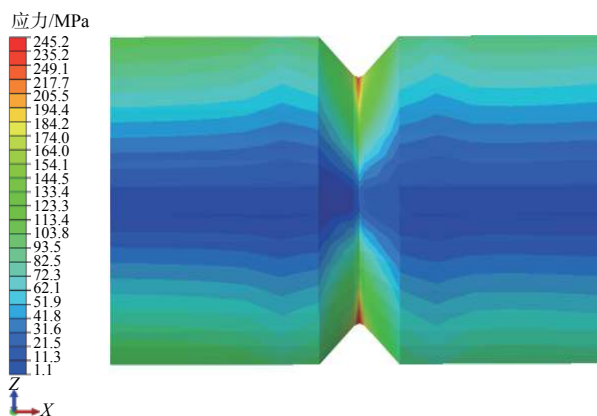


图6 缺口试样的等效应力云图

Fig. 6 Equivalent stress map of notched specimen

1.3 试验方法

参照标准 GB/T 4337—2008《金属材料疲劳试验旋转弯曲方法》，使用 PQ-6 型旋转弯曲疲劳试验机进行 S135 钻杆接头缺口疲劳试验，根据 S135 钻杆的抗拉强度和应力集中系数设计多级应力水平，从低到高逐级进行试验。采用升降配对法计算

表1 缺口应力集中对 S135 钻杆疲劳性能影响的试验方案

Table 1 Test Scheme for the Influence of Notch Stress Concentration on Fatigue Behavior of S135 Drill Pipe

组号	试样类型	H/mm	$\alpha/(\circ)$	R/mm	K_t	环境
1	光滑				1.00	空气
2				0.1	4.11	
3				0.2	3.01	
4	缺口	1.0	90	0.4	2.23	空气 (常温)
5				0.6	1.93	

注: K_t 为理论应力集中系数, $K_t = \sigma_{\max}/\sigma$; $\sigma_{\max}$ 为缺口截面上的最大应力, MPa; σ 为缺口截面上的平均应力, MPa^[13]。

S135 钻杆的疲劳极限, 采用成组法测定 S135 钻杆的有限疲劳寿命, 具体试验方法见文献 [14–15]。

1.4 试验数据处理方法

采用三参数幂函数 $S-N$ 模型 (见式 (1)) 拟合 S135 钻杆材料的 $S-N$ 曲线。

三参数幂函数 $S-N$ 模型为:

$$(S - S_0)^m N = C \quad (1)$$

将式 (1) 线性化可得:

$$\ln N = \ln C - m \ln (S - S_0) \quad (2)$$

式中: m 和 C 为与材料性质有关的常数; S 为某一应力水平下最大循环载荷, MPa; S_0 为理论应力疲劳极限, MPa; N 为一定应力水平 S 下所对应的疲劳寿命。

三参数幂函数 $S-N$ 曲线模型有 S_0 , m 和 C 共 3 个参数, 先用线性相关系数优化法求得 S_0 , 然后再用最小二乘法拟合求出 m 和 C ^[16]。

2 试验结果与分析

2.1 疲劳强度对缺口的敏感性

图 7 为 5 种试样的应力水平升降形式及疲劳强度 S_{-1} 。根据图 7 中的测试结果, 绘制应力集中系数 K_t 与 S_{-1} 的关系曲线, 并进行回归, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 随 K_t 增大, S_{-1} 逐渐降低, 对 S_{-1} 的影响逐渐增大, S_{-1} 与 K_t 的关系符合幂函数关系 ($S_{-1} = 634.85 K_t^{-0.907}$)。

将光滑试样的疲劳极限强度 S_{-1}^e 与缺口试样的疲劳极限强度 S_{-1}^N 的比称为疲劳缺口系数^[17], 用 K_f 来表示, 其表达式为:

$$K_f = \frac{S_{-1}^e}{S_{-1}^N} \quad (3)$$

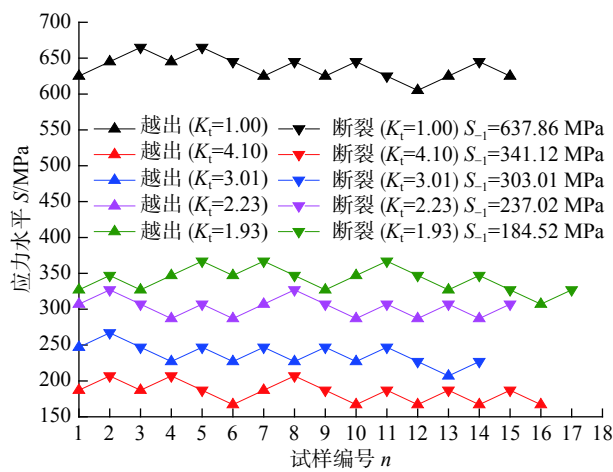


图 7 不同应力集中系数 K_t 下应力升降示意图

Fig. 7 Schematic diagram of stress fluctuation under different K_t

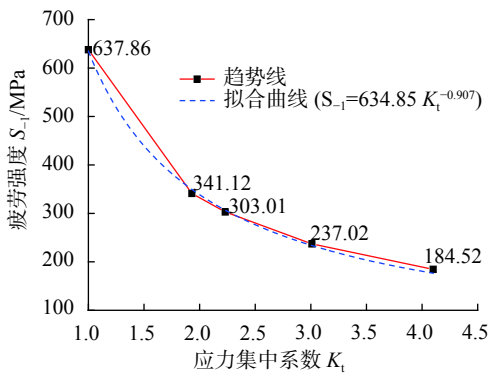


图 8 应力集中系数与疲劳强度的关系

Fig. 8 Relationship between stress concentration factor and fatigue strength

对于 K_t 和 K_f 之间的关系, 常引用缺口敏感系数 q 进行描述, 其表达式为^[18]:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (4)$$

当应力集中对疲劳强度的影响微小时, K_f 接近于 1, 则 q 为 0, 说明试样对应力集中不敏感; 当应力集中对疲劳强度的影响明显时, K_f 接近于 K_t , 则 q 接近于 1, 表示试样对应力集中非常敏感。

K_f 与 q 的计算结果如表 2 所示, 由表 2 可以看出: 缺口根部的半径 R 越小, K_t 越大, K_f 也越大, 缺口对 S135 钻杆疲劳性能的影响越大; 当 R 为 0.1~0.6 mm 时, q 为 0.79~0.94, 应力集中对缺口具有很强的敏感性。缺口根部的半径 R 越小, 缺口越尖锐, q 越低, 这是因为 K_t 和 K_f 都随缺口的尖锐程度增强而增大, 但是 K_t 增大的速度比 K_f 快; 当 R 较大时, 缺口的尖锐程度对 q 的影响明显降低, q 与缺口

形状的关系不大。

表 2 缺口疲劳系数及缺口敏感性计算结果

Table 2 Calculation results of notch fatigue coefficient and notch sensitivity

试样类型	R/mm	K_t	S_{-1}^e/MPa	K_f	q
光滑	∞	1.00	637.85	1.00	0
	0.6	1.93	341.12	1.87	0.94
缺口	0.4	2.23	303.01	2.10	0.90
	0.2	3.01	237.01	2.69	0.84
	0.1	4.11	184.51	3.46	0.79

2.2 应力-寿命曲线的绘制及分析

笔者测试了 5 种试样在 7 级应力水平下的疲劳寿命, 基于 5 种试样在 7 级应力水平线的中值寿命 N_{50} , 利用式 (1) 拟合了 5 种试样的 $S-N$ 曲线及方程, 结果如图 9 所示。

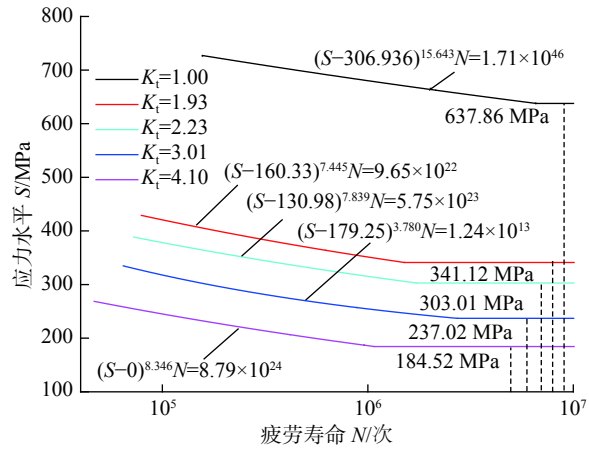


图 9 不同应力集中程度下的 $S-N$ 曲线

Fig. 9 $S-N$ cures at different stress concentration degrees

由图 9 可知: K_t 为 1.00 时的疲劳寿命最长, K_t 为 4.10 时疲劳寿命最短; 随 K_t 增大, $S-N$ 曲线逐渐向左下角移动, K_t 对疲劳寿命的影响逐渐增大。因此, 对钻杆接头螺纹牙型进行优化设计, 可以降低螺纹的应力集中程度, 提高钻杆的疲劳寿命, 从而降低钻杆失效的风险。

2.3 疲劳断口分析

图 10 为通过扫描电镜 (SEM) 观察到的光滑试样的断口形貌, 其中 (a) 为高应力下断口的整体形貌, (b) 为高应力下疲劳源区的形貌, (c) 为低应力下断口的整体形貌, (d) 为低应力下疲劳源区的形貌。由图 10 可以看出: 高低应力条件下疲劳裂纹都

从试样边缘局部开始萌生,随着循环应力的作用向内部扩展,超过亚稳定临界状态后快速失稳断裂;断口存在光滑的裂纹源区A、稳定的裂纹扩展区B和粗糙的瞬间断裂区C;高应力下,B区的面积较小,C区的面积较大,裂纹粗而稀;低应力下,B区的面积较大,C区的面积较小,裂纹细而密。

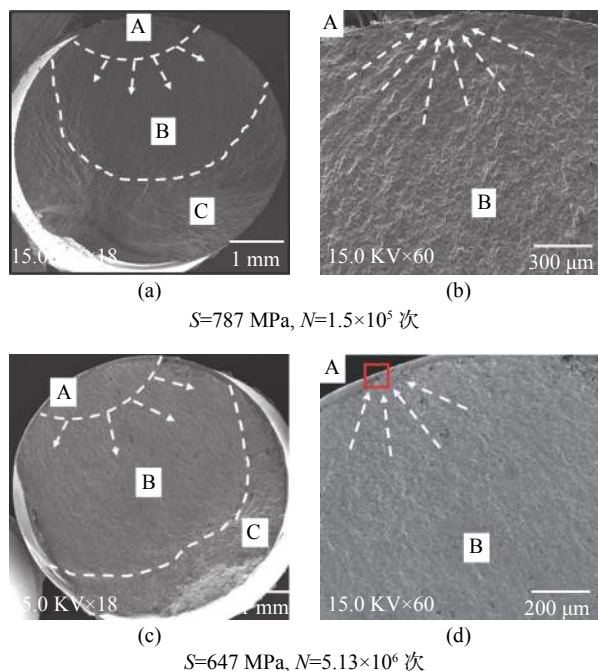


图 10 光滑试样在空气中的疲劳断口

Fig. 10 Fatigue fracture of a smooth specimen in air

图 11 和图 12 分别为通过扫描电镜(SEM)观察到的 K_t 为 2.23 和 4.11 时缺口试样的断口形貌,其中(a)为高应力下断口的整体形貌,(b)为高应力下疲劳源区的形貌,(c)为低应力下断口的整体形貌,(d)为低应力下疲劳源区的形貌。由图 11 和图 12 可知:疲劳裂纹从缺口根部开始萌生(存在多个裂纹源 A1、A2、A3,...),呈环形向内部扩展,C 区位于试样中心;高应力下裂纹萌生区存在明显的撕裂痕迹(见图 12(b)),断口比较粗糙,疲劳裂纹在表面质点处萌生(见图 11(b)),疲劳条带较粗、较明显(见图 11(b)、图 12(b));低应力下断口比较光滑、平整(见图 11(d)和图 12(d))。

图 13 为通过扫描电镜(SEM)观察到的 K_t 为 3.01 时低应力(267 MPa)作用下缺口试样断口的形貌,其中(a)为断口的整体形貌,(b)为疲劳源区的形貌。通过比较图 11、图 12 和图 13 中 K_t 分别为 2.23、3.01 和 4.11 时,低应力(267 MPa)作用下断口的形貌可知:裂纹从缺口根部表面开始萌生(见图 11(d)、图 12(d)和图 13(b)),在相同应力下,随 K_t 增大缺口根部的撕裂程度逐渐减弱,断口表面的 B 区逐渐变

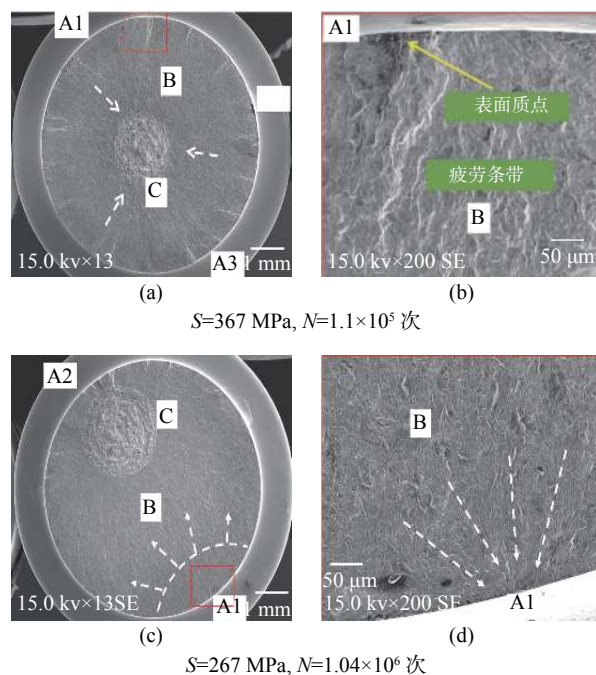


图 11 缺口试样在空气中的疲劳断口 ($K_t=2.23$)

Fig. 11 Fatigue fracture of notch specimen in air ($K_t=2.23$)

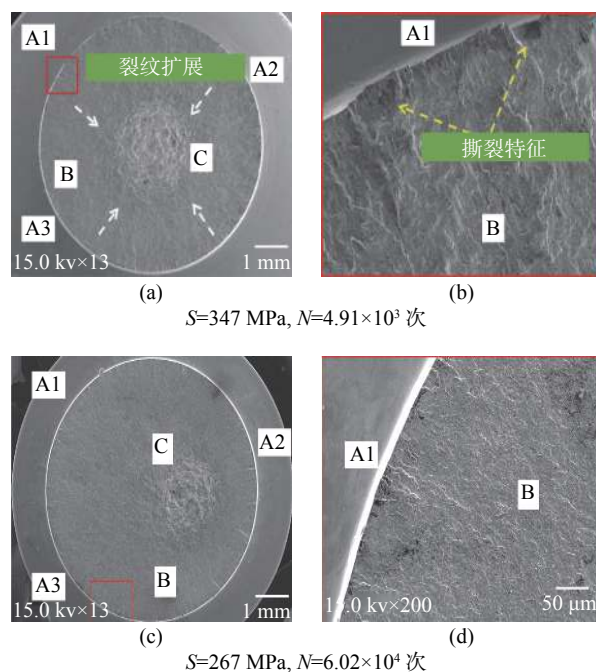


图 12 缺口试样在空气中的疲劳断口 ($K_t=4.11$)

Fig. 12 Fatigue fracture of notch specimen in air ($K_t=4.11$)

得平整、光滑,C 区的粗糙程度降低、面积减小(见图 11(c)、图 12(c)和图 13(a))。

3 结 论

1) S135 钻杆接头的疲劳行为具有选择性。光

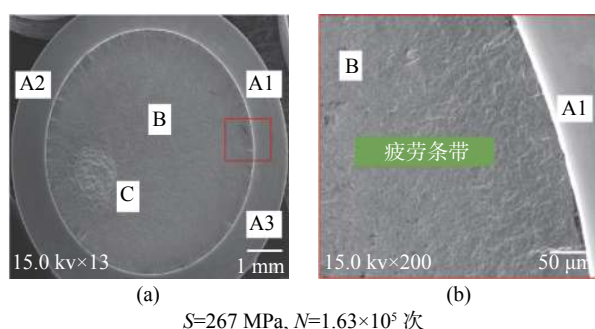


图 13 $K_t=3.01$ 缺口试样在空气中的疲劳断口

Fig. 13 Fatigue fracture of notch sample in air ($K_t=3.01$)

滑试样 ($K_t=1$) 的疲劳裂纹通常从表面或亚表面最敏感、最脆弱的部位开始萌生 (呈单源开裂), 裂纹呈扇形向内扩展, 瞬断区位于断口边缘、呈月牙状; 缺口试样 ($K_t>1$) 的裂纹从缺口根部开始萌生, 存在多源性 (呈环形排列), 裂纹呈环形向内部扩展, 瞬断区位于断口中心区域附近、呈圆饼状。因此, 缺口决定了疲劳裂纹萌生的部位和裂纹扩展的方式。

2) S135 钻杆接头的疲劳行为对缺口具有一定的敏感性。在相同应力下, 随缺口根部半径 R 减小 (K_t 增加), 缺口根部的撕裂现象减弱, 断口变得光滑、平整, 疲劳裂纹变得细而密。因此, 建议减小钻杆接头螺纹牙根部半径, 以降低接头螺牙齿根的应力集中程度, 增强钻杆接头抵抗裂纹萌生和扩展的能力, 提高钻杆疲劳寿命。

参 考 文 献

References

- [1] HUANG Bensheng, YANG Jiang, ZHANG Hui, et al. Influence of H_2S corrosion on rotating bending fatigue properties of S135 drill pipe steel[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, 71(1): 1–9.
- [2] ZENG Dezhi, TIAN Gang, HU Junying, et al. Effect of immersion time on the mechanical properties of S135 drill pipe immersed in H_2S solution[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(11): 4072–4081.
- [3] OJANOMARE C, CORNETTI P, ROMAGNOLI R A. Fatigue crack growth analysis of drill pipes during rotary drilling operations by the multiple reference state weight function approach[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 74: 11–34.
- [4] LIU Yonggang, LIAN Zhanghua, LIN Tiejun, et al. A study on axial cracking failure of drill pipe body[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 59: 434–443.
- [5] ZAMANI S M, HASSANZADEH-TABRIZI S A, SHARIFI H. Failure analysis of drill pipe: a review[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 59: 605–623.
- [6] LIN Yuanhua, ZHU Dajiang, ZENG Dezhi, et al. Numerical and experimental distribution of stress fields for double shoulder tool joint[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(6): 1584–1594.
- [7] LIN Yuanhua, LI Qiang, SUN Yongxing, et al. A repeated impact method and instrument to evaluate the impact fatigue property of drill pipe[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2013, 22(4): 1064–1071.
- [8] LIN Yuanhua, QI Xing, ZHU Dajiang, et al. Failure analysis and appropriate design of drill pipe upset transition area[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 31(31): 255–267.
- [9] 林元华, 潘杰, 刘婉颖, 等. 硫化氢环境下 G-105 和 S-135 钻杆的低载多冲疲劳性能测试 [J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(1): 59–63.
LIN Yuanhua, PAN Jie, LIU Wanying, et al. Low-load repeated impact testing of G-105 and S-135 drill pipes in H_2S environment[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(1): 59–63.
- [10] HAN Yan, ZHAO Xuehu, BAI Zhenquan, et al. Failure analysis on fracture of a S135 drill pipe[J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 3: 447–453.
- [11] LU Shuanlu, FENG Yaorong, LUO Faqian, et al. Failure analysis of IEU drill pipe wash out[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(10/11/12): 1360–1365.
- [12] SHATSHATSKY I P, LYSKANYCH O M, KORNUA V A. Combined deformation conditions for fatigue damage indicator and well-drilling tool joint[J]. *Strength of Materials*, 2016, 48(3): 469–472.
- [13] N'DIAYE A, HARIRI S, PLUVINAGE G, et al. Stress concentration factor analysis for notched welded tubular T-joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(8): 1554–1570.
- [14] ZUCUNI C P, GUILARDI L F, FRAGA S, et al. CAD/CAM machining vs pre-sintering in-lab fabrication techniques of Y-TZP ceramic specimens: effects on their mechanical fatigue behavior[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 71: 201–208.
- [15] FRAGA S, PEREIRA G K R, FREITAS M A, et al. Loading frequencies up to 20 Hz as an alternative to accelerate fatigue strength tests in a Y-TZP ceramic[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2016, 61: 79–86.
- [16] WAN Aoshuang, XIONG Junjiang, LYU Zhiyang, et al. High-cycle fatigue behavior of Co-based superalloy 9CrCo at elevated temperatures[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(5): 1405–1413.
- [17] EWEST D, ALMROTH P, SJODIN B, et al. A modified compliance method for fatigue crack propagation applied on a single edge notch specimen[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 92(1): 61–70.
- [18] 束德林. 工程材料力学性能 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
SHU Delin. Mechanical properties of engineering materials[M]. 3rd ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017.

[编辑 刘文臣]