

应力比对 K55 套管钻井钢疲劳裂纹扩展性能的影响

Influence of Stress Ratio on the Fatigue Crack Propagation Behavior of K55 Casing-drilling Steel

许天旱¹, 王 荣¹, 冯耀荣², 雒设计¹, 王党会¹, 杨 宝¹

(1 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065;

2 中国石油集团 石油管工程技术研究院, 西安 710065)

XU Tian-han¹, WANG Rong¹, FENG Yao-rong², LUO She-ji¹,

WANG Dang-hui¹, YANG Bao¹

(1 College of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou

University, Xi'an 710065, China; 2 Tubular Goods Research

Centre of CNPC, Xi'an 710065, China)

摘要: 利用电液伺服疲劳实验机及 SEM 研究了应力比对 K55 套管钻井钢疲劳裂纹扩展行为的影响。结果表明: 应力比对裂纹失稳区起始点对应的应力强度因子范围 ΔK 值具有显著的影响。随着应力比的增加, 裂纹扩展失稳区起始点对应的裂纹扩展速率具有显著的降低, 疲劳裂纹扩展门槛值也呈现显著的降低趋势。当疲劳裂纹逐渐由 Paris 区过渡到失稳扩展区, 平均载荷逐渐取代应力强度因子幅度 ΔK 作为裂纹扩展的主导驱动力。当裂纹扩展至拉伸过载区, 断口表面则呈现明显的冲击断裂特征。

关键词: K55 套管钻井钢; 应力比 R ; 疲劳裂纹扩展性能; 应力强度因子范围 ΔK ; 断口形貌

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.06.013

中图分类号: TG142.1⁺2; TG115.5⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)06-0079-06

Abstract: The influence of stress ratio on the fatigue crack growth (FCG) behaviour of K55 casing-drilling steel was investigated by means of scanning electron microscopy (SEM) and fatigue tests. The results show that stress ratio possesses a remarkable influence on ΔK responding to starting point of crack unstable zone. The FCG rates responding to starting point of crack unstable zone exhibit a significant decrease with the increase of stress ratios, and the FCG threshold value possesses a significant decrease. The average load, which is gradually instead of ΔK , turns into the dominant drive force of the FCG when the fatigue crack propagates into the unstable zone from Paris region bit by bit. The fatigue fracture surface exhibits obviously impact fracture characterization, when the crack propagates into overload tensile zone.

Key words: K55 casing-drilling steel; stress ratio R ; fatigue crack growth property; stress intensity factor range ΔK ; fracture morphology

套管钻井作为一种新技术, 主要用于解决钻井过程的稳定性及降低钻井成本问题^[1-4]。随着套管钻井技术的发展, 套管所面临的环境越来越苛刻^[5]。由于套管除了固井同时兼有钻井的作用, 导致套管及其接箍被置于一种复杂的动载工况下, 套管疲劳失效等问题变得日益突出。目前, 套管钻井技术方面的研究主要集中于钻井技术和相关的装备方面, 如解决套管的丝扣、密封等方面问题。保证钻井安全采取的措施主要是选用高强度大壁厚套管, 这无疑浪费了材料, 提高

了成本。因为在 API Spec 5CT 套管和油管规范中, 虽然对于套管材料的屈服强度、抗拉强度及伸长率给予了明确规定, 但对套管材料的疲劳裂纹扩展性能并没有给出强制性规定, 这主要是因为套管过去仅仅用于固井, 一般不考虑动态载荷和疲劳裂纹扩展。而现在, 随着套管钻井技术的出现, 套管由(准)静态载荷转变为包括冲击、振动和疲劳载荷等的动态载荷。例如: 在钻进过程中, 由于地貌复杂, 尤其是地质结构为黏性构成的作用下, 钻具不能连续稳速的钻进, 而发生振

动,速度快慢相间,极易产生疲劳。同时,在套管钻井过程中,管柱把扭矩和动力传递给钻具^[6]。或者因为扭矩不合适,或者因为套管性能的降低,套管经常损伤、断裂^[7],这使得套管疲劳失效等问题变得更加突出。K55 套管钻井钢因其较低的成本和简单的生产工艺,同时具有较高的硬化指数^[8],在套管钻井技术研究中得到广泛的应用。尽管目前国内外对于各种材料的疲劳性能研究较多^[9-12],但因套管钻井技术尚处于探索阶段,对于套管钻井钢疲劳性能的研究报道较少。本工作系统研究了应力比对 K55 套管钻井钢疲劳裂纹扩展性能的影响,对不同裂纹扩展阶段断口形貌进行了观察,并分析了不同应力比对不同裂纹扩展阶段

裂纹扩展速率影响的机理,同时解释了不同特征断裂表面形成的机理,为套管钻井技术的发展和改善提供依据。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

本实验所用材料均以接箍形式由中国石油集团石油管工程技术研究院提供,直径为 244.48mm,厚度为 11.43mm。材料的化学成分和力学性能如表 1 和表 2 所示,满足 API Specification 5CT 要求。试样从接箍上截取,截取和加工保证不影响材料性能。

表 1 K55 钢的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of K55 steel (mass fraction/%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Cu	Fe
K55 steel	0.36	0.32	1.51	0.025	0.0085	0.028	0.025	0.004	0.006	0.004	0.007	Bal
API SPEC 5CT—2005	—	—	—	≤0.030	≤0.030	—	—	—	—	—	—	Bal

表 2 K55 钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of K55 steel

Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Total elongation/%	Elastic modulus/GPa	Fracture strength/MPa	Strain hardening exponent	Impact energy/J	Fracture toughness/(kJ·m ⁻²)
708	403	18.49	206	1126	0.3231	14	25.94

1.2 实验方法

疲劳实验采用 CT 试样,试样厚度为 4.8mm,宽度 W=30mm,满足 ASTM E647 标准,取样位置及示意图如图 1 所示。实验进行之前,首先对 CT 试样进行预裂,预裂长度为 2mm。疲劳裂纹扩展实验是在

PDL-100 型液压伺服疲劳实验机上进行的,实验温度为室温,频率为 10Hz,加载波形为正弦波型,最大载荷为 1.4kN,实验应力比 $R = P_{min}/P_{max}$,分别为:0.1,0.3,0.5,0.7。裂纹长度由微机辅助电位法监测,电位函数由边界元法计算给出^[13]。

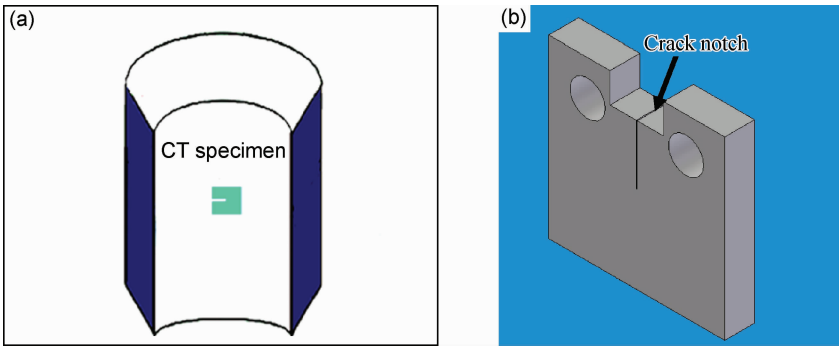


图 1 CT 试样取样位置及示意图 (a)取样位置示意图;(b)试样示意图

Fig. 1 Fatigue CT test sample scheme (a)specimen sectioned from the coupling of casing-drilling steel;(b)the line drawing of the specimen

疲劳裂纹门槛值的确定采用降载法,分级降载百分比保持在 5%,同时保证每级载荷下裂纹扩展量是上一级载荷下塑性区尺寸的 4~6 倍,直到疲劳循环 1×10^6 次裂纹不发生 0.1mm 扩展为止,对应的 ΔK 即

为对应的裂纹扩展门槛值。为了研究和确定不同裂纹扩展区的断裂机制,试样从疲劳断口中心平行于裂纹扩展方向且垂直于断口切开,利用 SEM 研究裂纹扩展路径和微观断裂机制。

2 实验结果及分析

在 (da/dN) - ΔK 关系曲线中,不同应力比 R 下的裂纹扩展性能具有显著的区别如图 2 所示。当 ΔK 为 $23\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时,对于 $R=0.1$ 和 $R=0.3$, (da/dN) 处于低 Paris 区,对于应力比为 $R=0.5$ 来说, (da/dN) 正好处于 Paris 区中部。而对于 $R=0.7$ 来说, (da/dN) 已经到了快速扩展区。同时类似的现象也出现在其他类型合金的 (da/dN) - ΔK 关系曲线中。这种趋势和其他相似合金研究的结果基本是一致的^[14]。从图 2 中也可以看出应力比对试样进入裂纹快速扩展区的临界 ΔK 影响是十分显著的,对于试样最终撕裂点 ΔK 的影响也十分显著。

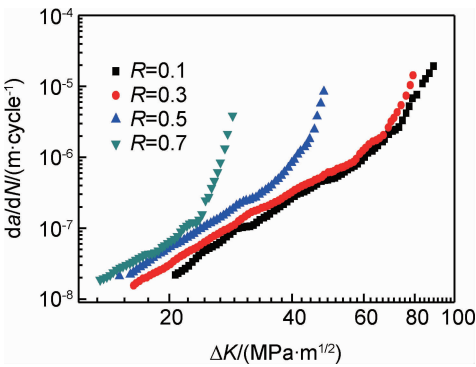


图 2 不同 R 下的 da/dN 与 ΔK 之间的关系曲线
Fig. 2 Relationship between da/dN and ΔK at different R

同时从图 2 中也可以看出,随着应力比的增大,进入裂纹快速扩展区的起始 ΔK 值越来越小,相同 ΔK 处对应的裂纹扩展速率越来越大。而且当应力比从 0.1 增加到 0.3,进入裂纹快速扩展区和进入撕裂区的 ΔK 相差不大,当应力比从 0.3 增加到 0.5,进入裂纹快速扩展区和进入撕裂区的 ΔK 都急剧降低。这主要是因为,随着应力比的增加,裂纹扩展的机制发生了变化。当应力比较低时,在加载时裂纹完全张开,在卸载时裂纹闭合的程度与大应力比相比更明显,闭合效应起到重要的作用。因此当应力比由 0.1 增加到 0.3,各参数变化幅度较小;当应力比超过 0.5,闭合效应减弱,不再起主导作用,因此,随着应力比继续升高,各参数发生急剧变化。

从图 2 中也可看出,不同应力比下裂纹扩展曲线的线性区平行,裂纹扩展曲线线性区的斜率仅仅与材料本身有关,与实验参数无关,通过分析, da/dN 和 ΔK 之间关系满足 Paris 关系式:

$$da/dN = C\Delta K^m \tag{1}$$

式中: da/dN 为疲劳裂纹扩展速率, m/cycle ; m 和 C

为材料常数; ΔK 为应力强度因子幅度, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。裂纹扩展曲线线性区的斜率对应于 Paris 常数的 m , m 和另外一个材料常数 C 如表 3 所示。

表 3 K55 套管钻井钢的材料参数		
Table 3 Materials parameters of K55 casing-drilling steel		
Stress ratio R	Paris parameter m	Paris parameter $C/10^{-13}$
0.1	3.4965	6.3
0.3	3.2879	17.0
0.5	3.3826	21.0
0.7	3.4563	21.7
Average	3.4058	16.5

从实验结果的拟合值看出, m 的平均值为 3.4058,这与相关文献的报道是一致的,典型金属的 Paris 指数 m 在 2~4 之间^[15]。从图中的曲线也能看出,随着应力比 R 的增大, (da/dN) - ΔK 曲线向上移动。这是因为计算 ΔK 和绘制曲线时,没有考虑到裂尖闭合效应的影响,K55 套管钻井钢伸长率达到 18.49%,因此在每一次载荷循环过程中,裂尖都会发生塑性变形,引起闭合效应,因此实际有效应力强度因子幅值更小,因此随着 R 的增加, (da/dN) - ΔK 曲线发生上移。

从图 2 中也可看出,应力比对裂纹扩展失稳区起始点对应的 ΔK 值具有显著的影响。应力比和裂纹失稳区起始点对应的 ΔK 值之间的关系如图 3 所示,发现他们之间呈显著的线性关系,用最小二乘法拟合可获得如下公式:

$$\Delta K_{us} = 88.431(1 - 1.043R) \tag{2}$$

式中: ΔK_{us} 为疲劳裂纹扩展失稳区起始点对应的 ΔK 值, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

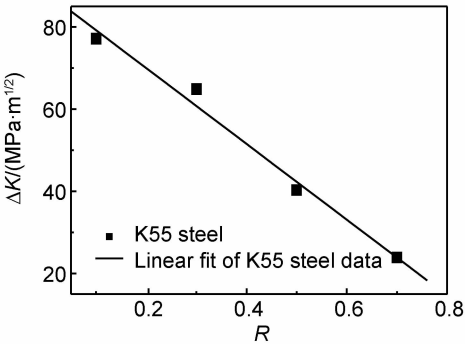


图 3 应力比 R 和裂纹失稳区起始点对应的 ΔK 值之间的关系
Fig. 3 Relationship between stress ratio R and ΔK corresponding starting point of crack unstable zone

从拟合效果来看,疲劳裂纹失稳区起始点对应的

ΔK 值和应力比之间线性相关性很高, 相关系数为 0.9927。式(2)中 $88.431\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 对应于应力比为 0 时的疲劳裂纹失稳区起始点对应的 ΔK 值。式(2)中应力比 R 前的系数 1.043 则取决于材料本身性质。材料不同, 对应的 ΔK 值对 R 的敏感程度不同。随着应力比的增加, 材料疲劳裂纹失稳区起始点对应的 ΔK 值降低。这归因于在裂纹扩展中平均载荷逐渐取代应力强度因子幅度起主导作用, 这个主导因素的转换从疲劳断口由疲劳条带断裂机制逐渐转换为类似拉伸断口, 再转换为类似解理断口得到证明, 如图 4 所示。图 4 显示出了 K55 钢不同裂纹扩展阶段的疲劳

断口形貌, 从图 4(a)中可看出, 在门槛区, 疲劳断口表面相对比较平整, 由图 4(b)和图 4(c)可见, Paris 区疲劳断口具有明显的疲劳条带, 与门槛区断口有着显著区别, 且随着疲劳裂纹扩展条带宽度逐渐增加, 这些条带相比铝合金、钛合金, 条带显著更粗糙, 这是由钢铁材料较差的延性所决定的。由图 4(c)可见, 疲劳条带宽度约为 $1.1\mu\text{m}$, 可估算出对应的疲劳裂纹扩展速率约为 $1.1 \times 10^{-6} \text{m/cycle}$, 这与实验结果也是一致的, 位于 K55 钢 $(da/dN)-\Delta K$ 曲线的上 Paris 区, 为中 Paris 区裂纹扩展速率的两倍多。当裂纹扩展进失稳区, 断口表面的上疲劳条带特征消失, 呈现出显著的韧

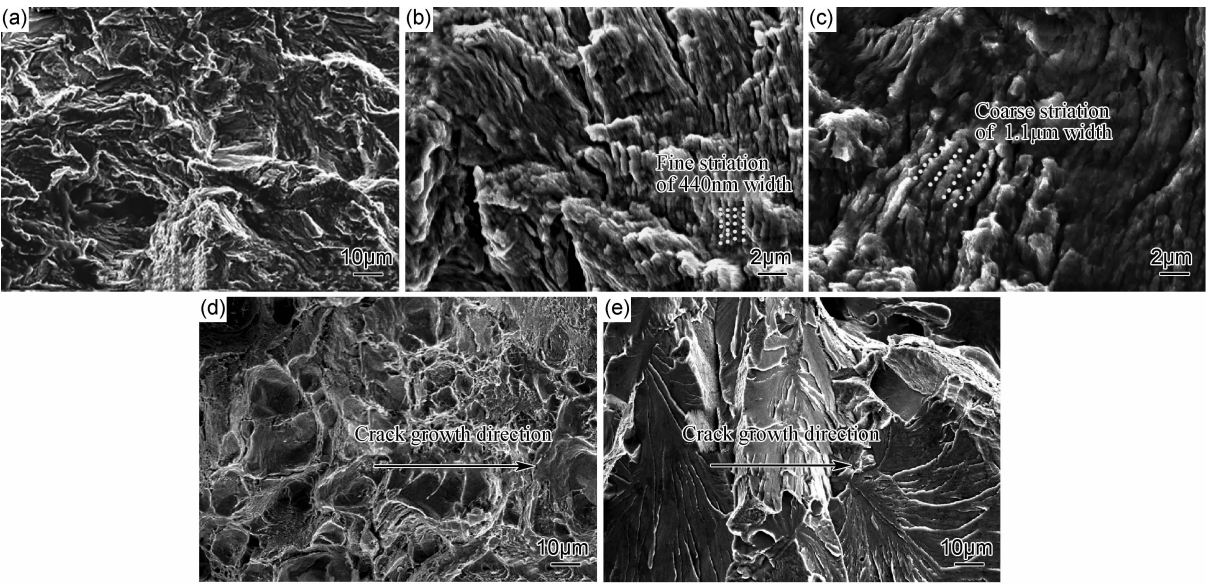


图 4 K55 钢疲劳断口 (a)门槛区;(b)Paris 区;(c)上 Paris 区;(d)失稳区;(e)拉伸过载区
Fig. 4 Fatigue fracture surface of K55 steel (a)threshold region;(b)Paris region;(c)upper Paris region;
(d)unstable zone;(e)overload tensile zone

窝特征, 类似于拉伸断口的特征, 区别在于疲劳断口上的韧窝具有显著的方向性, 如图 4(d)所示, 这说明疲劳裂纹扩展机制发生转变, 由应力强度因子幅度主导的双滑移机制转变为平均载荷主导的拉伸断裂机制, 在疲劳裂纹扩展过程中, 试样上所施加的平均载荷可按如下公式计算:

$$P_{\text{mean}} = (P_{\text{max}} + P_{\text{min}})/2 = (P_{\text{max}} + RP_{\text{max}})/2 = P_{\text{max}}(1 + R)/2 \quad (3)$$

式中: P_{mean} 为平均载荷, kN; P_{max} 为最大载荷, kN; P_{min} 为最小载荷, kN。

由公式(3)可知, 试样上所施加的平均载荷取决于应力比的大小, 应力比越大, 试样上所施加的平均载荷越大。显而易见, 更大的平均载荷导致试样更早的由应力强度因子幅度主导的双滑移机制转变为平均载荷主导的拉伸断裂机制。从而使得应力比越大, 疲劳裂

纹失稳区起始点对应的 ΔK 值越小, 见图 3。

从图 4(e)中可看出, 试样的最终断裂表面呈现为类解理表面, 由类似拉伸断口的韧窝形貌转变为类似冲击的解理表面。这归因于, 随着平均载荷在裂纹扩展中起主要驱动作用, 试样韧带部分越来越小, 应力越来越大, 裂纹扩展速度愈来愈快, 在某一临界 ΔK 附近, 在拉伸载荷下迅速拉断, 速度远大于拉伸实验加载速率。它和冲击断裂表面的区别之处在于疲劳裂纹快速断裂区形成的断裂表面解理面具有显著的方向性, 解理面沿裂纹扩展方向尺寸更小, 且解理台阶显著更高。这是因为在疲劳速断区, 尽管拉伸载荷与冲击载荷加载速度都比较快, 但受力性质具有明显的不同, 疲劳载荷属于张开型载荷, 而冲击载荷属于剪开型载荷。

疲劳裂纹扩展门槛值随应力比 R 的变化趋势如图 5 所示。从图 5 可以看出, 与疲劳裂纹失稳区起始

点对应的 ΔK 值随应力比的变化趋势相似。随着应力比的增加,裂纹扩展门槛值也呈减小趋势,门槛值和应力比之间具有显著的线性关系,相关系数为 0.9969,利用最小二乘法拟合所得公式如下:

$$\Delta K_{th} = 9.924(1 - 0.938R) \quad (4)$$

式中: ΔK_{th} 为疲劳裂纹扩展门槛值, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

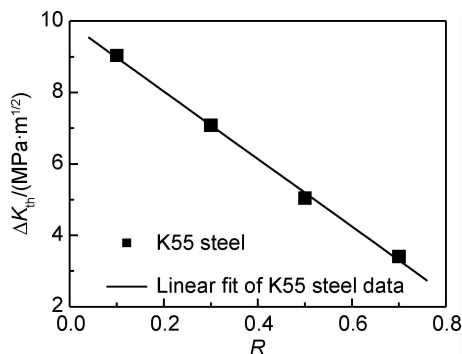


图 5 应力比 R 与裂纹扩展门槛值之间关系

Fig. 5 Relationship between stress ratio R and fatigue crack growth threshold value

式(4)中的 $9.924 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 对应于 $R=0$ 时的疲劳裂纹扩展门槛值,而式(4)中应力比 R 前面的系数 0.938 则决定于材料本身性质。这与文献[16]所呈现公式是一致的,如下式所示:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}(1 - bR) \quad (5)$$

式中: ΔK_{th0} 为应力比为 0 对应的门槛值, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; b 为材料常数。

随着应力比增加,材料裂纹扩展门槛值降低,这是由裂纹闭合效应引起的,应力比对裂纹闭合效应的影响较大,文献[17]给出不同材料裂纹闭合效应受应力比影响的相关公式,但大部分都是对于铝合金的研究,对钢的研究则较少。

尽管如此,但本实验结果是很容易理解的,在循环载荷中,只要最小应力 S_{min} 小于张开应力 S_{op} 时,即 $S_{min} < S_{op}$,裂纹闭合现象就会发生。当裂纹达到 S_{min} 时,裂纹会完全闭合或部分闭合。在加载期间,当应力 $S=S_{op}$,裂纹就已经完全张开,一直达到最大应力 S_{max} ,裂纹都是持续张开的。在卸载期间,裂纹一直张开到裂尖发生闭合效应为止。因此可以认为, S_{max} 不变的情况下, R 越小,闭合效应产生作用越大。

图 6 为应力比 R 和裂纹失稳区起始点对应的 da/dN 之间的关系,相关性也较高,为 0.9951。利用最小二乘法拟合的公式如下:

$$da/dN = -2 \times 10^{-6} \ln(R) - 4 \times 10^{-7} \quad (6)$$

从图 6 中发现,随着应力比增加,裂纹扩展失稳起始点对应的裂纹扩展速度呈下降趋势,这是因为,应力

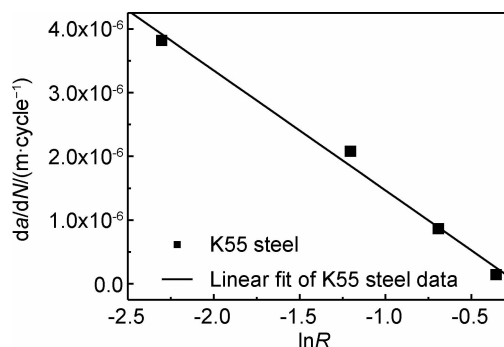


图 6 应力比 R 和裂纹失稳区起始点对应的裂纹扩展速率之间的关系

Fig. 6 Relationship between stress ratio R and fatigue crack growth rate corresponding to start point of crack unstable zone

比越大,平均载荷越大,更大的平均载荷更易导致材料在拉伸模式下发生断裂,裂纹扩展失稳起始点对应的裂纹扩展速率没有机会增加到更高程度。

3 结论

(1)应力比对裂纹失稳区起始点对应的 ΔK 值具有显著的影响,随着应力比的增加,裂纹扩展失稳起始点所对应的裂纹扩展速率具有显著的降低。

(2)随着应力比增加,疲劳裂纹扩展门槛值呈现显著的降低趋势,主要归因于裂纹闭合效应。

(3)当疲劳裂纹逐渐由 Paris 区过渡到失稳扩展区,平均载荷逐渐取代应力强度因子幅度作为裂纹扩展的主导驱动力。

(4)裂纹扩展至拉伸过载区,断口表面呈现明显冲击断裂特征,断裂面具有显著的解理台阶,且解理面具有显著的方向性。

参考文献

- [1] KOTOW K J, PRITCHARD D M. Riserless drilling with casing: Deepwater casing seat optimization [A]. SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings[C]. New Orleans: The Society of Petroleum Engineers, 2010. 116—129.
- [2] ROBINSON S D, BEALESIO T M, SHAFER R S. Casing drilling in the san juan basin to eliminate lost returns in a depleted coal formation [A]. SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings[C]. Orlando: The Society of Petroleum Engineers, 2008. 406—415.
- [3] BUNTORO A. Casing drilling technology as the alternative of drilling efficiency [A]. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference 2008[C]. Jakarta: The Society of Petroleum Engineers, 2008. 580—589.
- [4] KENGA Y, ATEBE J, FEASEY G. Successful implementation of 95/8-in casing drilling in nigeria case history of AKAMBA-2 [A]. The 33rd Annual SPE International Technical Conference

- and Exhibition[C]. Abuja: The Society of Petroleum Engineers, 2009, 1—9.
- [5] BAILEY G, STRICKLER R D, HANNAHS D, et al. Evaluation of a casing drilling connection subjected to fatigue and combined load testing [A]. The 2006 Offshore Technology Conference[C]. Houston: Sponsor Society Committees of the Offshore Technology Conference, 2006, 1—7.
- [6] ZHAO Z X, GAO D L. Casing strength degradation due to torsion residual stress in casing drilling[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2009, 1(4—5): 154—157.
- [7] GOKHALE S, ELLIS S. API specification 5CT N-80 grade casing may burst or part unexpectedly if supplementary metallurgical requirements are not specified [A]. SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings[C]. Amsterdam: The Society of Petroleum Engineers, 2005, 523—528.
- [8] XU T H, FENG Y R, JIN Z H, et al. Determination of the maximum strain-hardening exponent[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 550: 80—86.
- [9] 锥设计, 赵康, 王荣. S135 钻杆钢的拉扭复合加载疲劳行为[J]. 材料工程, 2013, (1): 40—44.
LUO She-ji, ZHAO Kang, WANG Rong. Biaxial fatigue behavior under combined axial and torsional loading for S135 drill pipe steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, (1): 40—44.
- [10] 沙桂英, 韩玉, 刘腾, 等. 应力幅对退火态 Mg-3Al-2Sc 合金疲劳行为的影响[J]. 材料工程, 2012, (12): 24—28.
SHA Gui-ying, HAN Yu, LIU Teng, et al. Influences of stress amplitude on fatigue behavior of as-annealed Mg-3Al-2Sc alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (12): 24—28.
- [11] 杨健, 董建新, 张麦仓, 等. 新型镍基粉末高温合金 FGH98 的高温疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 金属学报, 2013, 49(1): 71—78.
YANG Jian, DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, et al. High temperature fatigue crack growth behavior of a novel powder metallurgy superalloy FGH98 [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(1): 71—78.
- [12] 李松梅, 吴凌飞, 刘建华, 等. 应力比和腐蚀环境对超高强度钢 AerMet100 疲劳裂纹扩展的影响[J]. 航空材料学报, 2014, 34(3): 74—80.
LI Song-mei, WU Ling-fei, LIU Jian-hua, et al. Effect of load ratio and corrosion on fatigue behavior of aermet100 ultrahigh strength steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(3): 74—80.
- [13] LU M X, ZHENG X L. A new microcomputer-aided system for measuring fatigue crack propagation threshold and selecting testing parameters[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1993, 45(6): 889—896.
- [14] BOYCE B L, ORITCHIE R. Effect of load ratio and maximum stress intensity on the fatigue threshold in Ti-6Al-4V[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68: 129—147.
- [15] SURESH S. Fatigue of Materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, 202—221.
- [16] VOSIKOVSKY O. The effect of stress ratio on fatigue crack growth rates in steels [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1979, 11(1): 595—603.
- [17] KUMAR R, SINGH K. Influence of stress ratio on fatigue crack growth in mild steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 50(3): 377—384.

基金项目: 青年科技创新基金项目(Z12180); 陕西省重点学科专项资金资助项目(YS32030203); 陕西省教育厅自然科学基金(Z12201)

收稿日期: 2014-01-24; 修订日期: 2014-11-15

通讯作者: 许天早(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料力学性能与表征的研究, 联系地址: 陕西省西安市电子二路18号西安石油大学材料科学与工程学院(710065), E-mail: xutianhan@xsyu.edu.cn