

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.01.008

大模数淬火齿条表面裂纹扩展 规律及寿命预测研究*

路卫兵¹, 俞 歌¹, 程熊豪^{2,3}, 石端伟^{2,3*}, 张 阳^{2,3}

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038; 2. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;
3. 水力机械过渡过程教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:针对大模数齿条的疲劳寿命难以精确计算问题, 对大模数表面淬火齿条的裂纹扩展规律进行了研究。建立了含共线初始双裂纹的齿条 FRANC3D 模型, 齿条啮合区离散为 15 个区域载荷; 分析了表面感应淬火齿条硬度分布、残余压应力分布对疲劳裂纹扩展寿命的影响, 推导了齿条的断裂韧性 K_{IC} 与应力强度因子门槛值 ΔK_{th} ; 运用 FRANC3D 软件, 对双共线初始裂纹在三种水平间距下的裂纹扩展、联通、继续扩展过程进行了仿真, 得出了应力强度因子幅值 ΔK 随裂纹深度 a 扩展的表达式; 根据裂纹扩展速率 da/dN 与 ΔK 、 K_{IC} 、 ΔK_{th} 的关系, 预测了三峡升船机齿条的寿命 N 。研究表明: 齿条满足疲劳寿命要求, 但表面感应淬火降低了齿条的疲劳寿命; 硬度分布对于裂纹扩展的促进作用大于残余压应力的抑制作用。

关键词:大模数齿条; 表面淬火; FRANC3D; 应力强度因子; 疲劳扩展寿命

中图分类号: TH132.41; TH123+.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)01-0044-05

Surface crack growth and life prediction of large modulus quenched rack

LU Wei-bing¹, YU Ge¹, CHENG Xiong-hao^{2,3}, SHI Duan-wei^{2,3*}, ZHANG Yang^{2,3}

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Key Laboratory of Hydraulic Machinery Transient, Ministry of Education, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the problem of accurate analysis for fatigue life of large modulus rack, the propagation of crack for large modulus quenched rack was studied. A FRANC3D model of the rack with initial collinear double cracks was established, the meshing area of rack was divided into 15 area foods. The influence of surface induction quenching rack hardness distribution and residual compressive stress distribution on fatigue crack propagation life was analyzed, and the fracture toughness K_{IC} and the threshold value of stress intensity factor ΔK_{th} of the rack were derived. With FRANC3D, the process of crack propagation, connection and continuous propagation under three horizontal spacing was simulated, and the expression of stress intensity factor amplitude ΔK with crack depth a was obtained. In accordance with the relationship between crack growth rate da/dN and ΔK , K_{IC} , ΔK_{th} , the residual fatigue life of rack in the Three Gorges ship lift N was predicted. The results indicate that the rack meets the fatigue requirements. However, the fatigue life of the rack is reduced, the effect of hardness distribution on the crack growth is greater than that of the residual compressive stress.

Key words: large modulus crack; surface quenching; FRANC3D; stress intensity factor; fatigue propagation life

收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202)

作者简介: 路卫兵(1971-), 男, 陕西西安人, 教授级高级工程师, 主要从事三峡升船机的建设管理及技术研究方面的研究。E-mail: lu_weibin@ctg.com.cn

通信联系人: 石端伟, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: dwshi@whu.edu.cn

0 引言

三峡升船机采用齿轮齿条爬升式,其驱动齿轮齿条模数达 62.667 mm,齿条为 G35CrNiMo6-6,调质后表面感应淬火。一方面,齿条采用铸造、机加工生产,无法避免制造工艺所带来的夹渣和表面缺陷;另一方面,由于可借鉴的工程案例不多,没有成熟的设计理论与规范,齿条的设计仍采用齿面接触强度和齿根弯曲强度安全系数法校验,用 Miner 疲劳累计损伤理论估算齿条疲劳寿命,这种方法难以保证结果的准确性。所以,对齿轮齿条爬升式升船机大模数齿条疲劳裂纹扩展的研究是十分必要的。

刘忠明等^[1]针对三峡升船机驱动齿条,采用相似理论进行了模数为 10 mm 的齿轮齿条台架疲劳试验;针对齿轮/齿条疲劳裂纹扩展特性研究,文献[2-3]采用 FRANC3D 对模数为 5 mm 的齿轮进行了疲劳裂纹扩展,计算了 3 种应力强度因子的变化趋势;LISA E 等^[4]基于线弹性断裂力学理论(LEFM),利用边界元法对美国陆军某直升机的螺旋锥齿轮进行了 3D 疲劳裂纹扩展研究及其寿命预测。多裂纹是工程结构中不可忽视的问题,裂纹之间的相互作用将直接影响疲劳特性,MOUSSA 等^[5]采用了一种子模型网格算法构建了承受拉伸载荷的有限平板上任意相对位置的多裂纹,得到了其应力强度因子。

在齿轮/齿条表面处理对疲劳裂纹扩展特性研究方面,INÉS F P 等^[6]制备了含有初始微小裂纹的喷丸处理的低合金钢试样,试样均含有表面硬化层,弯曲疲劳试验结果表明,材料的疲劳强度与材料表面的硬化层有密切的关系;KIM 等^[7]对球墨铸铁 FCD500 进行了弯曲疲劳试验,探索了高频电磁感应淬火热处理工艺对材料疲劳性能的影响,并分析了裂纹在表面淬硬层中扩展的轨迹;尤蕾蕾等^[8]研究了感应淬火轴承套圈中的裂纹形貌与硬化层宏观形貌,但未分析轴承扩展的寿命与淬火组织特性变化之间的关系;王海涛^[9]研究了金属焊接接头裂纹的延性扩展行为,定量分析了裂纹在不同焊接界面位置时的扩展阻力、扩展路径变化,但焊接组织与淬火材料的力学性能变化的一致性还有待探究,而且只考虑了单一裂纹的形式;李鹏亮等^[10]研究了等离子淬火不同温度回火 1Cr12Ni2W1Mo1V 钢疲劳裂纹萌生和扩展行为,结果表明,由于等离子淬火产生的细化晶粒和表面残余压应力,提高了末级叶片用钢的裂纹萌生抗力。

目前,国内外研究大多以模数小于 13 mm 的齿轮或齿条为研究对象。在计算机 3D 仿真模拟齿轮寿命

方面,主要是模拟齿面单一裂纹、单一轮齿材质(均匀材料,且各向同性);在表面热处理对疲劳裂纹扩展特性研究方面,仅停留在实验结果观测和归纳方面,未对影响特性进行理论性分析。

本文将以三峡升船机驱动齿条为对象,运用 FRANC3D 软件,考虑齿条表面感应淬火后的硬度变化规律,研究表面共线双裂纹的扩展规律,预测齿条寿命。

1 齿条表面共线双裂纹模型

三峡升船机驱动齿条的基本参数如表 1 所示^[11]。

表 1 齿条基本参数

名称	参数	名称	参数
模数 m/mm	62.667	压力角 $\alpha/(\circ)$	20
齿宽 B/mm	800	全齿高 h/mm	141
齿厚 s/mm	98.437 5	齿根过渡圆半径/ mm	25
齿距 p/mm	196.875		

材料的弹性模量 $E = 2.05 \times 10^{11}$ Pa,泊松比 $\nu = 0.3$,满足 DIN EN 10293 标准。齿条表面探伤执行 DIN EN 1369 标准,并根据 DIN1690-2 标准中 2 级质量等级要求进行判定。

实际探伤结果表明:表面裂纹不是单一出现,齿根部位存在共线及偏置状态的裂纹,裂纹尺寸范围为 3 mm ~ 10 mm,其中长度方向的平均值为 5.93 mm,深度方向的平均值为 4.5 mm;齿根部位的共线裂纹无疑是影响齿条疲劳寿命的关键。

在齿条根部,对称插入等大两共线初始裂纹 FRANC3D 模型,如图 1 所示。

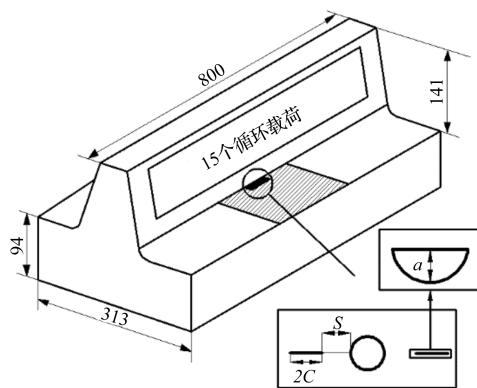


图 1 大模数齿条几何尺寸及 FRANC3D 模型

齿条裂纹扩展模型边界尺寸用模数的倍数表示, $L_1 = 5m \approx 313$ mm, $L_2 = 1.5m \approx 94$ mm;表面裂纹为半椭圆形, $2C$ 为裂纹长度, $a = C$, a 为裂纹深度。裂纹面与正应力垂直,与水平面呈 20° , S 为双裂纹相邻尖端距离。

根据实测表面裂纹尺寸,取初始裂纹深度 $a = 3$ mm, $2C = 6$ mm,分别取 $S = 12$ mm、8 mm、24 mm,分析齿条裂纹扩展寿命。

2 齿条循环载荷

根据齿轮与齿条的啮合原理,齿轮与齿条连续的啮合过程可以被离散成一系列接触啮合区域,即双齿啮合区和单齿啮合区。

为了模拟齿条在啮合过程中的实际受力状况,在一个啮合周期内,本文将齿条从齿根啮合到齿顶的过程,离散成 15 个不同的接触区域,依次分别为 6 个双齿啮合区(1~6),3 个单齿啮合区(7~9),6 个双齿啮合区(10~15);各接触区域所受载荷大小均不相同。

对齿条啮合区域离散化。 F_X 为当误差水深为 10 cm 时,齿轮对齿条的周向载荷齿条上的啮合力, $F_X = 1\ 048\ \text{kN}$ ^[12]。由此,齿条在每个离散的加载区域内所受的周向载荷 F_{Xi} 得以确定,且径向载荷 $F_{Yi} = F_{Xi} \tan 20^\circ$ 。所以,在双齿啮合区, $i = 1 \sim 6, F_{Xi} = [p + qi/6]F_X$;在单齿啮合区, $i = 7 \sim 9, F_{Xi} = F_X$;在双齿啮合区, $i = 10 \sim 15, F_{Xi} = [(p + q) - q \times (i - 10)/6]F_X$ 。

其中, p, q 为载荷分配系数^[13],选用 $p = 0.4, q = 0.2$ 。根据 15 个啮合区域载荷的大小,确定每个齿面的啮合力周期函数,并采取循环载荷的加载方式,对齿条加载时的工作过程进行模拟。

3 齿条裂纹扩展速率

在疲劳载荷作用下,裂纹增长速率 da/dN 是由应力强度因子幅值 ΔK 、断裂韧性 K_{IC} 和应力强度因子门槛值 ΔK_{th} 三者共同决定的。其中, K_{IC} 与 ΔK_{th} 直接决定了材料的性质,与热处理工艺紧密相关。

三峡升船机大模数齿条材料属于高淬硬倾向钢。齿条铸件经过表面高频感应淬火工艺后,进行低温回火处理。一方面较高的硬度减小了材料的韧性,即降低了材料的断裂韧性 K_{IC} ;另一方面产生的残余压应力能阻止受到拉应力的裂纹的扩展,即提高了裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 。

$$S = 12\ \text{mm}, \Delta K_{12}(a) = \begin{cases} 0.190\ 9a^3 - 4.232a^2 + 39.79a + 7.69, & (3 \leq a \leq 9.693\ 9) \\ -0.005\ 6a^3 + 0.405\ 8a^2 - 10.09a + 261.48, & (a \geq 9.693\ 9) \end{cases} \quad (5)$$

$$S = 18\ \text{mm}, \Delta K_{18}(a) = \begin{cases} 0.006\ 2a^3 - 0.600\ 8a^2 + 15.72a + 47.1, & (3 \leq a < 17.362\ 5) \\ -0.135\ 7a^3 + 7.039\ 7a^2 - 123.49a + 910.49, & (a \geq 17.362\ 5) \end{cases} \quad (6)$$

$$S = 24\ \text{mm}, \Delta K_{24}(a) = \begin{cases} 0.007\ 1a^3 - 0.532\ 4a^2 + 13.95a + 52.01, & (3 \leq a < 19.234\ 6) \\ -0.045\ 6a^3 + 2.490\ 5a^2 - 47.544a + 503.07, & (a \geq 19.234\ 6) \end{cases} \quad (7)$$

3.3 表面淬火齿条应力强度因子门槛值

齿条经过表面感应淬火后,随着深度的增加,残余压应力逐渐减小。控制裂纹疲劳扩展速率的是 ΔK 与

$\Delta K, K_{IC}$ 与 ΔK_{th} 三者对裂纹扩展速率的影响为^[14]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C[\Delta K(a) - \Delta K_{th}(a)]^m}{K_{IC}(a) - \Delta K(a)} \quad (1)$$

式中: C, m —为材料常数,取决于材料特性、环境、载荷频率、温度和应力比等因素。

在疲劳载荷作用下,在大模数表面淬火齿条的疲劳寿命分析中,其值分别取为 $C = 2.24 \times 10^{-8}\ \text{mm} \cdot (\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}})^{m-1}/\text{cycle}$, $m = 2.85$ 。

3.1 表面淬火齿条断裂韧性

大模数齿条经过表面高频感应淬火热处理工艺后,形成了 6 mm 厚度的淬硬层。经检测,齿条表面硬度 $H_{表} = \text{HV}610$,齿条芯部硬度为 $\text{HB}250$ 。进行硬度换算, $H_{芯} = \text{HV}252$ ^[15]。根据文献[16],淬硬层深度为从齿条表面到具有 80% 表面硬度处的距离,齿条表面至芯部的硬度,沿齿面法向接近线性规律均匀减小。计算得出齿面硬度梯度为 $\text{HV}20.3/\text{mm}$,齿条表面至芯部硬度差值为 $\text{HV}358$,因此,齿条硬度变化厚度。

$h_1 = 17.6\ \text{mm}$ 齿条齿面至芯部的硬度为:

$$H = 610 - 20.3a, (a \leq 17.6) \quad (2)$$

为了将齿条材料硬度变化特性反映到 da/dN 中,本文对 K_{IC} 值的连续变化进行定义^[17-18]:

$$K_{IC}(a) = K_{IC0} e^{\beta \cdot (h_1 - a)}, (3 \leq a \leq 17.6) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{h_1} \ln(H_{芯}/H_{表}) \quad (4)$$

式中: β —材料硬度不均匀系数; K_{IC0} —大模数齿条铸件芯部(母材)的断裂韧性, $K_{IC0} = 2\ 620\ \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}$ ^[19]。

3.2 双裂纹扩展的应力强度因子

本文将所建立的齿条有限元模型导入 FRANC3D 中,在 3 种水平间距下,分别仿真了双共线初始裂纹的扩展、联通、继续扩展的过程;并运用 Matlab 对计算结果进行三次多项式曲线拟合,得到了应力强度因子幅值 ΔK 随裂纹深度 a 扩展的变化函数 $\Delta K(a)$,即:

使裂纹张开发生扩展的应力强度因子门槛值 ΔK_{th} 的差值 ΔK_{eff} ,即 $\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{th}$ ^[20]。

为了定量描述残余压应力对裂纹扩展的阻碍作用,本文引入材料的维氏硬度来表征应力强度因子门

槛值 ΔK_{th} ;同时,考虑裂纹面积、应力比等参数,提出了应力强度因子门槛值 ΔK_{th} 计算表达式,即:

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (H + 120) (\sqrt{A})^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1-R}{2} \right)^{0.23} \quad (8)$$

式中: A —裂纹面的面积; R —应力比。

如前文所述, $R = 0$ 。将式(2)代入式(8)中,并假设 $A \approx a^2$,可得:

$$\Delta K_{th}(a) = 2.81 \times 10^{-3} (730 - 20.3a) a^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

其中, $3 \leq a \leq 17.6$ 。

4 齿条寿命预测

三峡升船机整个结构设计的运行时间为70年。在其运行过程中,平均每年工作335天,平均每天工作次数为18次(每次包含一个升和降的过程)。因此,三峡升船机齿条载荷设计的总循环次数 N_0 为:

$$N_0 = 70 \times 335 \times 18 \times 2 = 844\,200 \quad (10)$$

4.1 不淬火齿条

根据 Paris 裂纹扩展速率表达式 $da/dN = C(\Delta K)^m$ (不考虑应力强度因子门槛值 ΔK_{th} 与断裂韧度 K_{IC}),计算裂纹扩展寿命,得到双共线裂纹深度与扩展所经过的循环次数函数曲线,如图2所示。

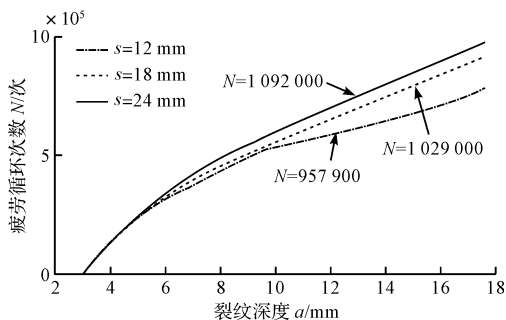


图2 不淬火齿条的疲劳循环次数与裂纹深度的关系

图2中,当双裂纹相邻尖端距离 S 分别为12 mm、18 mm、24 mm时,裂纹由初始深度(3.0 mm)扩展至17.6 mm深,所经历的循环次数分别为957 900、1 029 000、1 092 000,均大于三峡升船机齿条载荷设计的总循环次数。

4.2 表面感应淬火齿条

分别将式(5~7)与式(4,9)代入式(1)中,对深度 a 进行积分,可得到循环周期次数(扩展寿命)。

本文采用 Matlab 描绘寿命积分函数,得到了表面淬火齿条循环次数与裂纹深度的关系曲线,如图3所示。

图3中,当双裂纹相邻尖端距离 S 分别为12 mm、

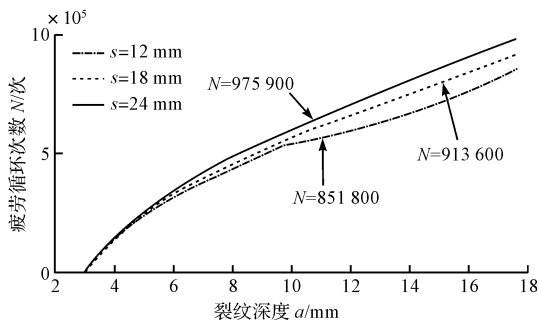


图3 表面淬火齿条疲劳循环次数与裂纹深度的关系

18 mm、24 mm时,裂纹由初始深度(3.0 mm)扩展至芯部(裂纹深17.6 mm),所经历的循环次数 N 分别为851 800、913 600、975 900,均大于三峡升船机齿条载荷设计的总循环次数 N_0 。

由于齿条经表面高频淬火,钢组织内部的断裂韧度会下降^[21],大于残余压应力对裂纹扩展的抑制作用。

由图3可以看出,尽管淬火后齿条的疲劳循环次数略小于不淬火齿条的疲劳循环次数,但仍然满足疲劳寿命设计要求。

5 结束语

针对大模数齿条的疲劳寿命难以精准计算问题,本文对大模数表面淬火后齿条的裂纹扩展规律进行了研究,结论如下:

(1) 根据表面感应淬火后齿条材料硬度与残余压应力分布规律,确定了三峡升船机表面感应淬火齿条硬度变化深度为17.6 mm;

(2) 对于表面感应淬火后齿条,当双裂纹相邻尖端距离 S 分别为12 mm、18 mm、24 mm时,初始裂纹扩展至17.6 mm深度所需的疲劳循环次数分别为851 800、913 600、975 900,均大于三峡升船机的设计寿命。因此,三峡升船机齿条满足疲劳要求,在服役期间是安全的;

(3) 表面感应淬火后,齿条表面裂纹由初始深度扩展至芯部所经历的循环次数减小,表明表面感应淬火降低了齿条的疲劳寿命,硬度分布对于裂纹扩展的促进作用大于残余压应力的抑制作用。

参考文献(References):

- [1] 刘忠明,袁玉鹏,肖伟中,等. 大模数齿条齿根应力计算方法研究及测试[J]. 机械工程学报,2016, 52(23): 152-159.
- [2] SHAO Ren-ping, JIA Pu-rong, DONG Fei-fei. Dynamic characteristics of cracked gear and three-dimensional crack

- propagation analysis [J]. **Mechanical Engineering Science**, 2013, 227(6): 1341-1361.
- [3] MA Jie, SHAO Ren-ping, DONG Fei-fei. Three-dimensional extended analysis and life prediction of gear crack [J]. **Mechanics and Materials Vols**, 2012, 121(1): 4863-4869.
- [4] SPIEVAK L E, WAWRZYNEK P A, INGRAFFEA A R, et al. Simulating fatigue crack growth in spiral bevel gears [J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2001, 68(1): 53-76.
- [5] MOUSSA W A. Investigating the interaction behavior between two arbitrarily o-riented surface cracks using multilevel sub-structuring [J]. **Journal of Pressure Vessel Technology**, 2002, 124(4): 440-445.
- [6] INÉS F P, MARIO G. About the role of residual stresses and surface work hardening on fatigue of a nitrided and shot peened low-alloy steel [J]. **Surface & Coatings Technology**, 2008, 202(13): 3072-3080.
- [7] KIM Jeong-du, JI Jueng-keun. Effect of super-rapid induction quenching on fatigue fracture behavior of spherical graphite cast iron FCD500 [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2006, 176(1): 19-23.
- [8] 尤蕾蕾, 端木培兰, 孙小东. 感应淬火轴承套圈的裂纹分析 [J]. **金属热处理**, 2012, 37(11): 128-129.
- [9] 王海涛. 核电安全端异种金属焊接接头的局部力学性能及断裂行为 [D]. 上海: 华东理工大学机械与动力工程学院, 2013.
- [10] 李鹏亮, 周敬恩, 席生岐. 钢等离子淬火后的疲劳行为 [J]. **金属热处理**, 2006, 11(31): 60-63.
- [11] 赵铁柱. 大模数齿条双裂纹疲劳扩展影响间距阈值及裂纹连通准则分析 [D]. 武汉: 武汉大学动力与机械学院, 2015.
- [12] 钮新强, 覃利明, 于庆奎. 三峡工程齿轮齿条爬升式升船机设计 [J]. **中国工程科学**, 2011, 13(7): 96-103.
- [13] 鲍洪, 安琦. 渐开线直齿齿轮齿载荷及应力计算方法 [J]. **华东理工大学学报**, 2012, 38(1): 116-122.
- [14] 衣振华. 疲劳裂纹扩展研究及在装载机横梁寿命估算中的应用 [D]. 济南: 山东大学材料科学与工程学院, 2011.
- [15] GB/T1172-1999. 黑色金属硬度及强度换算值 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [16] DIN3990-5. The bearing capacity calculation of the cylindrical gear [S]. Berlin: Deutsches Institut Fur Normung, 1987.
- [17] 杜春, 石广玉. 基于 Schwartz-Newman 交替法的压力容器内接管表面裂纹的断裂力学分析 [J]. **压力容器**, 2017, 34(4): 48-54, 57.
- [18] 陈英儒. 用层状材料边界元法研究功能梯度材料中的断裂力学问题 [D]. 青岛: 山东科技大学土木工程与建筑学院, 2004.
- [19] 李相清, 丁振宇, 包士毅, 等. 不同温度下金属材料断裂韧性数据处理方法研究 [J]. **压力容器**, 2018, 35(9): 1-7, 12.
- [20] 曾凡慧. 热处理对低合金钢断裂韧性的影响 [J]. **现代机械**, 1993, 6(2): 45-48.
- [21] PODRUG S, JELASKA D, GLODE Z S. Influence of different load models on gear crack path shapes and fatigue lives [J]. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, 2008, 31(5): 327-339.
- [22] 王少强, 陈少华. 高等断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [23] 王冬晨, 李晓源, 时捷, 等. 淬火温度对高碳钢组织和断裂韧度的影响 [J]. **钢铁研究学报**, 2018, 30(3): 229-235.

[编辑: 程浩]

本文引用格式:

路卫兵, 俞歌, 程熊豪, 等. 大模数淬火齿条表面裂纹扩展规律及寿命预测研究 [J]. **机电工程**, 2020, 37(1): 44-48.LU Wei-bing, YU Ge, CHENG Xiong-hao, et al. Surface crack growth and life prediction of large modulus quenched rack [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020, 37(1): 44-48.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>