

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.006

扭紧力矩对 SWRM10K 螺栓疲劳性能影响的研究

张艳斌^{1a}, 沈诚^{1a}, 孙东洋², 张继旺^{1b}

(1. 西南交通大学 a. 机械工程学院; b. 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要:对扭紧力矩分别为 0、12.5、22.0、29.5 和 35.0 Nm 的 SWRM10K 钢螺栓进行轴向加载疲劳实验, 获取螺栓的疲劳 S-N 数据。对比不同扭紧力矩下螺栓疲劳 S-N 特性, 分析扭紧力矩对螺栓疲劳性能的影响。采用 SEM 观察螺栓试样的断口形貌, 结合 EDS 分析裂纹萌生区元素分布, 揭示螺栓疲劳断裂的规律。研究表明: 增加扭紧力矩能有效提升该螺栓疲劳极限, 但增加到一定程度提升效果明显下降, 扭紧力矩值接近 29.5 Nm 较为合理。在该扭紧力矩下, 螺栓疲劳极限为 141 MPa, 与未施加扭紧力矩相比提升了 62.1%。螺栓疲劳断口分为 3 个区域: 裂纹萌生区、扩展区和瞬间断裂区。在高应力幅下, 裂纹萌生于试样表面, 由晶体滑移引起; 在低应力幅下, 裂纹同样萌生于试样表面, 但由晶体滑移或夹杂物引起。

关键词:扭紧力矩; 螺栓; 疲劳; S-N 特性; 断口形

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 1671-5276(2024)05-0027-06

Study on Effect of Tightening Torque on Fatigue Properties of SWRM10K Steel Bolts

ZHANG Yanbin^{1a}, SHEN Cheng^{1a}, SUN Dongyang², ZHANG Jiwang^{1b}

(1. a. School of Mechanical Engineering; b. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong

University, Chengdu 610031, China; 2. Western Superconducting Materials Technology Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Axial loading fatigue tests were carried out on SWRM10K steel bolts with tightening torque of 0, 12.5, 22.0, 29.5 and 35.0 Nm respectively, and the fatigue S-N data of the bolts were obtained. By comparing the S-N characteristics under different tightening torque, the fatigue performance of bolts was analyzed. The fracture morphology of the bolt sample was observed by SEM, and the element distribution in the crack initiation zone was analyzed by EDS, revealing the rule of fatigue fracture of the bolt. The research results show that increasing the tightening torque can effectively improve the fatigue limit of the bolt, but as the increase goes to a certain extent, the lifting effect obviously diminishes, and the tightening torque value close to 29.5 Nm is more reasonable. Under this tightening torque, the fatigue limit of the bolt is 141 MPa, which is 62.1% higher than that without tightening torque. Fatigue fracture surfaces of the bolts are divided into three regions: crack initiation region, crack propagation region and instant fracture region. Under high stress amplitude, crack initiation occurs on the specimen surface caused by crystal slip, while under low stress amplitude, crack initiation occurs on the surface caused by crystal slip or inclusions.

Keywords: tightening torque; bolts; fatigue; S-N characteristics; fracture morphology

0 引言

螺栓作为最主要的紧固件之一, 被广泛应用于交通运输、桥梁、建筑和机器人等领域^[1-4]。结构用紧固螺栓在服役阶段会受到振动、变幅和冲击等载荷作用, 若施加的预紧力不合适, 螺栓可能发生松脱或疲劳断裂, 导致灾难性后果。2010 年 9 月, 深圳东部华侨城景区“太空迷航”游乐项目的座舱导柱螺栓施加预紧力不当产生松动进而发生疲劳断裂, 导致游客 6 死 10 伤。2014 年 10 月, 某风电厂风电机组风机叶片连接螺栓断裂 6 根,

造成巨大经济损失^[5]。某挖掘机在使用 1 128 h 后出现疲劳断裂故障, 造成用户停工损失, 同时也给主机厂造成了经济损失^[6]。螺栓疲劳断裂引起的事故较多, 其主要原因是在结构设计和维护时未重视螺栓的疲劳断裂问题。因此, 对螺栓的疲劳断裂行为进行研究至关重要。

目前, 螺栓疲劳断裂问题已经得到国内外研究者的广泛重视, 并开展了相关理论和试验研究。GRIZA 等^[7]研究了气体压缩机用 M24 双头螺栓长度对其疲劳性能的影响。结果表明, 在相同的扭紧力矩下, 随着螺栓长度增加, 螺栓刚度降低,

基金项目:四川省国际科技创新合作项目(2019YFH0045)

第一作者简介:张艳斌(1983—), 男, 四川成都人, 讲师, 博士, 研究方向为材料疲劳与断裂, zyb628@swjtu.edu.cn。

疲劳强度增大。LIU 等^[8]研究了应力比与应力幅对单边螺栓的疲劳性能影响。结果表明:在恒幅应力作用时,在高应力幅下,应力比变化对疲劳寿命影响显著;在低应力幅下,应力比变化对疲劳寿命基本没有影响;相比于恒幅应力加载,变幅应力使得螺栓疲劳寿命降低。BENHADDOU 等^[9]针对预紧螺栓提出了一种基于多轴型临界面判据的疲劳寿命和疲劳裂纹萌生点的计算方法,并用于预测接头的疲劳寿命。BERTO 等^[10]研究了表面镀锌对 5355 钢螺栓疲劳性能的影响。结果表明,表面镀锌对该螺栓疲劳寿命降低非常有限。YU 等^[11]对预紧螺栓分别在 550 ℃ 和 650 ℃ 下进行了低周疲劳试验,提出了一种基于冯米赛斯等效应力/应变准则的低周疲劳模型,对预紧螺栓的高温低周疲劳寿命进行了预测,与实验结果吻合。LI 等^[12]研究了核电厂燃油补充设备用涡轮连接螺栓疲劳断裂行为。结果表明,螺栓断口具有典型疲劳断口形貌,在扩展区能明显观察到疲劳辉纹与二次裂纹,瞬间断裂区存在分布不规则的韧窝。截止目前,针对螺栓疲劳性能的研究相对较多,但主要集中于螺栓形状尺寸、加载条件和温度等变化对其疲劳性能影响,而针对扭紧力矩变化对螺栓疲劳性能影响的实验研究甚少。

本文主要针对 SWRM10K 钢螺栓开展 5 种不同扭紧力矩工况的疲劳实验,分析扭紧力矩对该螺栓疲劳性能的影响。并利用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱仪(EDS)对疲劳试样断口进行观察和分析,揭示其疲劳断裂行为。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

本实验选用 SWRM10K 钢螺栓,其质量分数如表 1 所示,力学性能如表 2 所示,尺寸规格为 M8×50,如图 1 所示。螺栓加工成型后,在含有 NaOH、ZnO 等试剂的碱性锌酸盐电镀液中进行表面镀锌处理,提升螺栓表面抗氧化和抗腐蚀能力。

表 1 SWRM10K 钢的质量分数 单位: %

材料	C	Mn	P	S	Fe
SWRM10K	0.08~0.13	0.30~0.60	≤0.04	≤0.04	其余

表 2 SWRM10K 钢的力学性能参数

材料	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/%	收缩率/%
SWRM10K	507	343	32.5	26.9

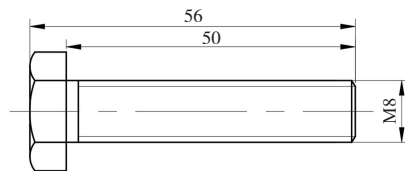


图 1 螺栓形状和尺寸示意图(单位: mm)

1.2 实验方法

采用 EH9504 液压伺服式疲劳试验机对螺栓试样进行轴向加载疲劳实验。疲劳实验在室温空气中进行,加载采用正弦激励,加载频率为 20 Hz,应力比 $R=0.1$ 。

对螺栓试样开展 5 种不同扭紧力矩工况下的轴向加载疲劳试验,扭紧力矩分别为 0、12.5、22.0、29.5 和 35.0 Nm。疲劳实验结束后,记录螺栓 S-N 数据,采用 S570 型 SEM 对疲劳断裂试样断口形貌进行观察,并结合 EDS 进一步分析裂纹萌生区元素种类及分布。

2 理论依据

2.1 轴向应力计算

当螺栓承受扭紧力矩 T 和外载荷 F 时,其轴向受力情况如图 2 所示。图 2(a) 显示了螺栓承受扭紧力矩 T ,而未承受外载荷 F 时,螺栓轴力 F_0 等于预紧力 F' 。图 2(b) 显示了螺栓同时承受扭紧力矩 T 和外载荷 F 时轴向受力情况,此时螺栓轴力 F_0 并非预紧力 F' 与外载荷 F 的叠加,而是剩余预紧力 F'' 与外载荷 F 之和^[13]。螺栓轴力公式如下:

$$F_0 = F'' + F \quad (1)$$

式中: F'' 为剩余预紧力; F 为外载荷。

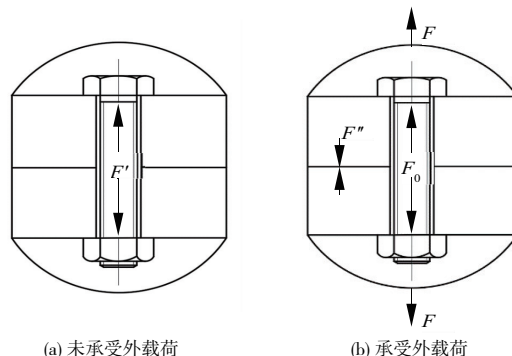


图 2 螺栓受力图

图 3 为螺栓轴向结构力与变形的关系图^[14]。由图 3 可知,剩余预紧力 F'' 与预紧力 F' 之间的关

系式如下:

$$F'' = F' - \frac{k_2}{k_1 + k_2} F \quad (2)$$

式中: F' 为预紧力; k_1 为螺栓刚度; k_2 为被连接件刚度。在实验前分别查阅并计算了螺栓与被连接件的刚度,其中 $k_1 = 149.6 \text{ kN/mm}$, $k_2 = 478.6 \text{ kN/mm}$ 。

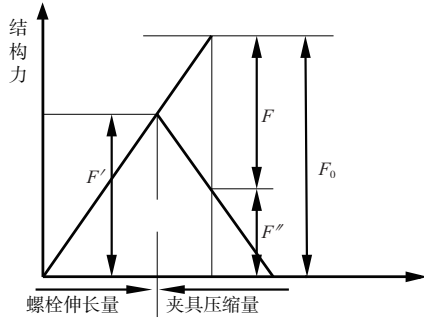


图3 螺栓结构力示意图

将式(2)代入式(1)得

$$F_0 = F' + \frac{k_1}{k_1 + k_2} F \quad (3)$$

本实验外载荷 F 为正弦激励力,其最大外载荷和最小外载荷分别为 $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 。螺栓轴力 F_0 的最大值和最小值分别为 $F_{0\max}$ 与 $F_{0\min}$ 。螺栓轴力幅值 F_{0a} 表示为

$$F_{0a} = \frac{F_{0\max} - F_{0\min}}{2} \quad (4)$$

扭紧力矩引起的螺栓预紧力 F' 为恒值,外载荷 F 为交变载荷,将 $F_{\max}$ 和 $F_{\min}$ 代入式(3)可得:

$$F_{0\max} = F' + \frac{k_1}{k_1 + k_2} F_{\max} \quad (5)$$

$$F_{0\min} = F' + \frac{k_1}{k_1 + k_2} F_{\min} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(4)得

$$F_{0a} = \frac{k_1}{2(k_1 + k_2)} (F_{\max} - F_{\min}) \quad (7)$$

根据材料力学知识,螺栓试样轴向应力幅 σ_a 公式为

$$\sigma_a = \frac{4F_{0a}}{\pi d_c^2} \quad (8)$$

式中 d_c 为螺栓危险截面直径。

将式(7)代入式(8)得

$$\sigma_a = \frac{2(F_{\max} - F_{\min})}{\pi d_c^2} \cdot \frac{k_1}{k_1 + k_2} \quad (9)$$

本实验中应力比为 0.1,则最小外载荷与最大外载荷关系如下所示。

$$\frac{F_{\min}}{F_{\max}} = 0.1 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得

$$\sigma_a = \frac{1.8F_{\max}}{\pi d_c^2} \cdot \frac{k_1}{k_1 + k_2} \quad (11)$$

由式(11)可知,螺栓轴向应力幅值与外载有关,与扭紧力矩无关。

2.2 材料 S-N 曲线拟合方法

本文采用具有疲劳极限的单对数线性回归模型对螺栓疲劳实验 S-N 数据进行拟合,公式如下^[15]。

$$\sigma_a = -A \times \lg N + B \quad (12)$$

式中: σ_a 为应力幅; N 为疲劳寿命; A 和 B 为常值。

3 理论依据

3.1 螺栓实验数据分析

通过螺栓疲劳实验,获取了 5 种不同扭紧力矩下螺栓试样的 S-N 数据,并采用式(12)对各扭紧力矩条件下实验数据进行拟合,得到不同扭紧力矩下螺栓的 S-N 曲线,其倾斜部公式如下。

$T_1 = 0 \text{ Nm}$:

$$\sigma_a = -65.7 \times \lg N + 467.6 \quad (13)$$

$T_2 = 12.5 \text{ Nm}$:

$$\sigma_a = -56.8 \times \lg N + 445.5 \quad (14)$$

$T_3 = 22.0 \text{ Nm}$:

$$\sigma_a = -53.8 \times \lg N + 440.5 \quad (15)$$

$T_4 = 29.5 \text{ Nm}$:

$$\sigma_a = -36.4 \times \lg N + 351.1 \quad (16)$$

$T_5 = 35.0 \text{ Nm}$:

$$\sigma_a = -54.2 \times \lg N + 433.3 \quad (17)$$

螺栓试样 S-N 曲线如图 4 所示。将 10^7 循环周次仍未折断时对应的应力幅作为螺栓试样的疲劳极限。以 $\lg N$ 为横坐标,应力幅 σ_a 为纵坐标,将螺栓疲劳 S-N 曲线绘制在单对数坐标图中,如图 4(a)~图 4(e)所示。图中,○表示未施加扭紧力矩 $T_1 = 0 \text{ Nm}$ 数据点,△表示扭紧力矩 $T_2 = 12.5 \text{ Nm}$ 数据点,□表示扭紧力矩 $T_3 = 22.0 \text{ Nm}$ 数据点,▲表示扭紧力矩 $T_4 = 29.5 \text{ Nm}$ 数据点,●表示扭紧力矩 $T_5 = 35.0 \text{ Nm}$ 数据点,附有箭头的数据点表示在 10^7 周次疲劳寿命下试样未折断。

对不同扭紧力矩下的 S-N 曲线进行对比,如图 4(f)所示。螺栓 S-N 曲线倾斜部分可知:在中高应力水平下 ($\geq 175 \text{ MPa}$),未施加和施加扭紧力矩对螺栓的疲劳寿命影响不明显;在中低应力

水平下 ($<175 \text{ MPa}$), 未施加扭紧力矩试样的疲劳寿命明显低于施加扭紧力矩试样的疲劳寿命, 但是随着扭紧力矩的增加, 试样疲劳寿命未呈现出明显变化规律。由图 4(f) 螺栓 $S-N$ 曲线水平部分可知, 随着螺栓扭紧力矩的增加, 螺栓的疲劳极限逐渐提升。在 T_1-T_5 扭紧力矩工况下, 螺栓的疲劳极限依次为 $\sigma_{w1} = 87 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{w2} = 109 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{w3} = 125 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{w4} = 141 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_{w5} = 147 \text{ MPa}$, 分别是材料屈服极限的 25.4%、31.8%、36.4%、41.1% 和 42.9%。与未施加扭紧力矩 T_1 相比, 施加扭紧力矩 T_2-T_5 时, 螺栓的疲劳极限分别提升 25.3%、43.7%、62.1% 和 69.0%。将螺栓的疲劳极限随着扭紧力矩的变化规律展示如图 5 所示。由图可知, 扭紧力矩在 $0 \sim 29.5 \text{ Nm}$ 区间, 螺栓疲劳极限随着扭紧力矩变化基本呈现线性增长趋势, 增长率为 1.83; 而在 $29.5 \sim 35.0 \text{ Nm}$ 区间, 螺栓疲劳极限增长率为 1.09, 增长趋势明显下降。

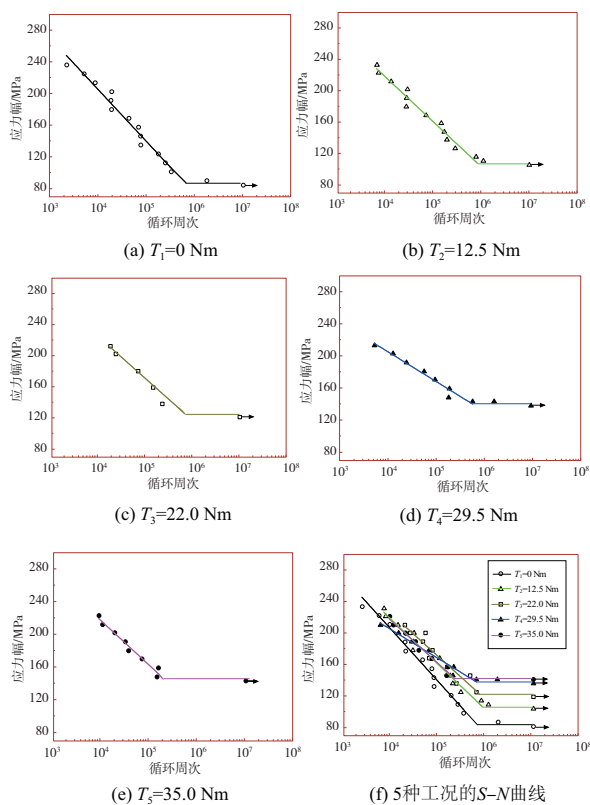
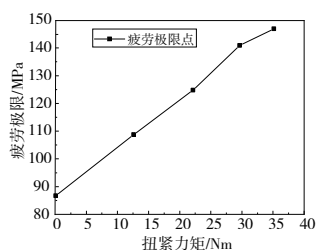
图 4 螺栓试样的 $S-N$ 曲线

图 5 疲劳极限随扭紧力矩变化规律

3.2 螺栓断口分析

1) 螺栓断裂位置

对 SWRM10K 钢螺栓试样断裂位置进行统计发现, 螺栓疲劳断裂均发生在螺栓与螺母啮合部位的第一圈螺纹根部, 位置如图 6 所示。这种断口分布规律与该螺纹根部应力分布最大有关, 在承载时, 螺栓与螺母啮合处产生应力集中且分布不均匀, 第一圈螺纹根部应力最大, 后续的螺纹承受载荷依次降低, 导致螺栓最容易在螺纹第一圈螺纹根部位置发生疲劳断裂。

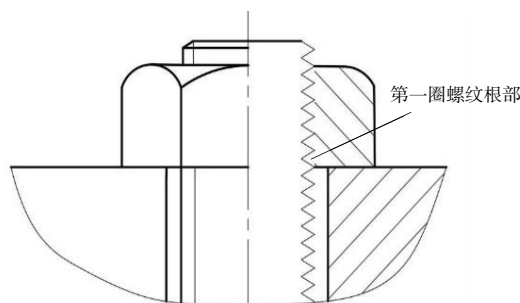


图 6 螺栓疲劳断裂位置

2) SEM 疲劳断口观察

采用 SEM 对全部螺栓疲劳试样断口进行了观察分析, 发现螺栓疲劳断口分为裂纹萌生区、裂纹扩展区和瞬间断裂区。在高应力水平下, 裂纹源有两个或多个, 萌生于试样表面, 由晶体滑移引起; 在低应力水平下, 裂纹源只有一个, 萌生于试样表面, 由晶体滑移或表面夹杂物引起。下面选取典型断口进行分析, 说明螺栓试样的疲劳断裂行为。图 7 所示为扭紧力矩 $T_3 = 22.0 \text{ Nm}$ 、高应力幅 $\sigma_a = 213 \text{ MPa}$ 、疲劳寿命 $N_f = 1.1 \times 10^4$ 周次下螺栓试样断口形貌。图 7(a) 是试样断口放大 10 倍后的宏观图, 断口分为裂纹萌生区、裂纹扩展区和瞬间断裂区。疲劳裂纹源有多个, 分布在试样表面 (圆环状虚线标记)。将顶部疲劳裂纹萌生位置放大, 可见裂纹萌生于试样表面, 由晶粒滑移引起, 如图 7(b) 所示。图 8 所示为扭紧力矩 $T_3 = 22.0 \text{ Nm}$ 、低应力幅 $\sigma_a = 128 \text{ MPa}$ 、疲劳寿命 $N_f = 7.1 \times 10^5$ 周次螺栓试样断口形貌。图 8(a) 是试样断口放大 10 倍宏观图, 断口分为裂纹萌生区、裂纹扩展区和瞬间断裂区。疲劳裂纹源只有一个, 分布在试样表面 (圆环状虚线标记)。将顶部疲劳裂纹萌生位置放大, 可见裂纹萌生于试样表面夹杂物处, 如图 8(b) 所示。为了确定图 8(b) 中

裂纹萌生位置夹杂物的成分,需要对夹杂物成分做进一步分析。

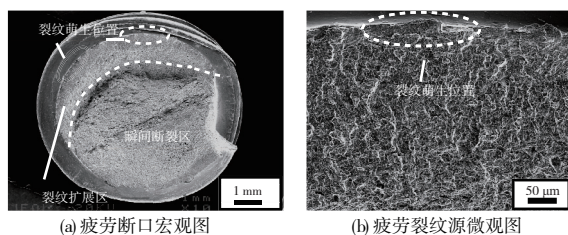


图7 试样疲劳断口形貌 ($\sigma_a = 213 \text{ MPa}$, $N_f = 1.1 \times 10^4$)

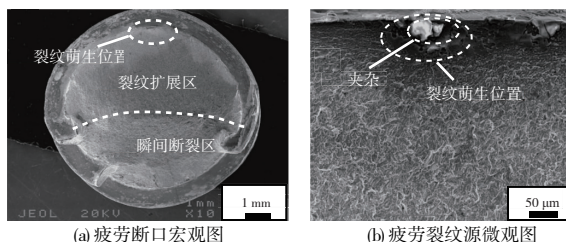


图8 试样的疲劳断口形貌 ($\sigma_a = 128 \text{ MPa}$, $N_f = 7.1 \times 10^5$)

3) EDS 元素分析

表面夹杂物缺陷是导致材料疲劳性能下降的重要因素之一^[16-18],因此有必要通过分析确定其质量分数,进而避免出现夹杂物。对图8(b)螺栓疲劳试样断口裂纹萌生区进行了EDS分析,如图9所示的裂纹萌生区,可以明显观察到夹杂物。图9(b)是试样裂纹萌生区Na元素的分布情况,在裂纹萌生处Na元素含量较高,且分布均匀,其他区域Na元素含量较少;图9(c)是裂纹萌生区Fe元素的分布情况,该图表明裂纹萌生区Fe元素含量极少,其他区域Fe元素含量多,分布均匀;图9(d)是裂纹萌生区Zn元素分布情况,在裂纹萌生处Zn元素含量较高,且分布均匀。SWRM10K钢材料本身不含有Na元素与Zn元素,因此表面裂纹萌生区夹杂物不是材料本身的缺陷,而是后续工艺引起的。为了提升螺栓的抗腐蚀和抗氧化能力,在加工成型后对其进行了表面电镀处理,电镀过程在含有NaOH、ZnO碱性试剂的电镀液中进行,而螺栓试样表面的夹杂物可能是电镀过程中在螺栓表面生成了Na、Zn和O三种元素形成 Na_2ZnO_2 等夹杂物。综上所述,电镀过程在螺栓表面形成 Na_2ZnO_2 夹杂物,引起表面应力集中,最终导致疲劳裂纹萌生于该夹杂物处,降低了螺栓的疲劳性能。

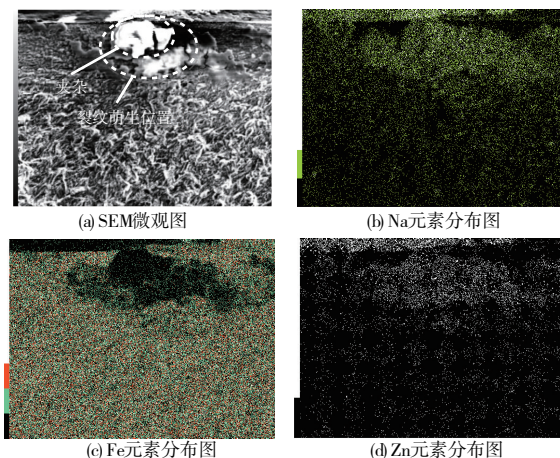


图9 试样断面元素分析结果 ($\sigma_a = 128 \text{ MPa}$, $N_f = 7.1 \times 10^5$)

4 结语

1) 提升扭紧力矩有利于SWRM10K钢螺栓疲劳极限的提升,但在 $T > 29.5 \text{ Nm}$ 时,疲劳极限增长趋势明显下降。因此,SWRM10K钢螺栓扭紧力矩值选择接近 29.5 Nm 较合理。

2) 扭紧力矩工况 $T = 29.5 \text{ Nm}$ 时,螺栓试样疲劳极限为 141 MPa ,与未施加扭紧力矩试样相比疲劳极限提升了 62.1% 。

3) SWRM10K钢螺栓裂纹萌生有两种模式:表面晶体滑移和表面夹杂物。在高应力幅下,裂纹萌生于表面,由晶体滑移引起;在低应力幅下,裂纹萌生于表面晶体滑移或夹杂物,该夹杂物由螺栓表面电镀过程中引入。

参考文献:

- [1] 房奇,陈涛,王伟. 高强螺栓疲劳性能研究现状[J]. 结构工程师,2020,36(4):218-225.
- [2] 卫星,汪蓉蓉,温宗意,等. 高铁声屏障连接螺栓松弛对疲劳寿命的影响[J]. 西南交通大学学报,2023,58(2):373-380.
- [3] KORIN I, IPINA J P. Experimental evaluation of fatigue life and fatigue crack growth in a tension bolt-nut threaded connection [J]. International Journal of Fatigue,2011,33(2):166-175.
- [4] CHAKHERLOU T N, RAZAVI M J, ABAZADEH B. Finite element investigations of bolt clamping force and friction coefficient effect on the fatigue behavior of aluminum alloy 2024-T3 in double shear lap joint[J]. Engineering Failure Analysis,2013,29:62-74.
- [5] 姚兵印,张志博,马剑民,等. 风力发电机组叶片连接高强螺栓的断裂原因分析[J]. 理化检验-物理分册,2016,52(5):339-344.
- [6] 包锡桂. 某挖掘机高强螺栓断裂原因分析[J]. 理化

- 检验:物理分册,2017,53(3):204-207.
- [7] GRIZA S, DA SILVA M E G, DOS SANTOS S V, et al. The effect of bolt length in the fatigue strength of M24×3 bolt studs[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34: 397-406.
- [8] LIU Y Z, CHEN J, ZHANG X, et al. Fatigue behaviour of blind bolts under tensile cyclic loads[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 148: 16-27.
- [9] BENHADDOU T, CHIROL C, DAIDIE A, et al. Pre-tensioning effect on fatigue life of bolted shear joints[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 36: 36-43.
- [10] BERTO F, MUTIGNANI F, GUIDO E. Effect of hot dip galvanization on the fatigue behaviour of steel bolted connections[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 93: 168-172.
- [11] YU Q M, ZHOU H L, YU X D, et al. High-temperature low cycle fatigue life prediction and experimental research of pre-tightened bolts[J]. Metals, 2018, 8(10): 828.
- [12] LI L, WANG R. Failure analysis on fracture of worm gear connecting bolts[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36: 439-446.
- [13] KECECIOGLU D, ZHANG Y C. Reliability prediction and optimum design of bolts under static and fatigue loads[C]//39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Long Beach, CA, USA. Reston, Virginia: AIAA, 1998: 2895-2995.
- [14] 杨可桢,程光蕴,李仲生. 机械设计基础[M]. 5版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [15] 许巍,陈新,李旭东,等. 发动机材料高周疲劳 P-S-N 曲线优化处理方法[J]. 航空材料学报, 2020, 40(5): 96-103.
- [16] 鲁连涛,李伟,张继旺,等. GCr15 钢旋转弯曲超长寿命疲劳性能分析[J]. 金属学报, 2009, 45(1): 73-78.
- [17] WANG Q Y, BATHIAS C, KAWAGOISHI N, et al. Effect of inclusion on subsurface crack initiation and gigacycle fatigue strength[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(12): 1269-1274.
- [18] ZHANG J W, LU L T, WU P B, et al. Inclusion size evaluation and fatigue strength analysis of 35CrMo alloy railway axle steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 562: 211-217.

收稿日期:2023-02-15

(上接第16页)

4 结语

本文以 Strub 型齿轨铁路为对象,在 ANSYS/Ls-dyna 中建立齿轨列车轮对-轨道瞬态接触模型,并利用此模型研究在车辆轨道坡度 0~480‰、运行速度 10~30 km/h 以及牵引系数 0.25~0.50 下齿轨列车轮对接触力的变化。结果表明:

1) 0 坡度下轮轨黏着驱动工况结果与理论经验相符,且各工况下垂向接触力均值在施加的重力和附近波动,证明结果合理;

2) 轨道坡度重力作用对齿轨列车轮对-轨道系统啮合振动具有抑制作用,同时坡度增加,轮轨黏着作用逐渐减弱,因此齿轮齿条承载增加,轮轨承载减小;

3) 随牵引系数增加,齿轮承载增加,齿条接触力随牵引转矩增长而增大,而轮轨垂向接触力受其影响并不明显;

4) 随运行速度增长,齿轮与车轮周向速度差增加,使得齿轮齿条间啮合振动加剧,即轮轨与齿条接触力波动范围增加,建议齿轨列车大坡度路段运行时速度控制在 10~15 km/h。

参考文献:

- [1] HANSEN B. Gearing up: the mount Washington cog railway[J]. Civil Engineering Magazine, 2009, 79(4): 36-39.
- [2] 冯帅. 对齿轨铁路在旅游观光铁路上的适用性分析[J]. 交通企业管理, 2015, 30(1): 66-68.
- [3] 鄢红英,徐银光,李艳. 齿轨在山地旅游轨道交通中的应用及工程化发展方向[J]. 工程建设与设计, 2018(21): 136-138.
- [4] 张乾,蔡小培,蔡向辉,等. 齿轨铁路轨道-简支梁桥相互作用及轨缝合理位置研究[J]. 工程力学, 2021, 38(3): 248-256.
- [5] 张军,陆仲绩,汪崇建. 采煤机牵引行走机构的接触应力分析[J]. 煤矿机电, 2006(2): 39-40, 43.
- [6] NAGY A, LAKATOS I. Examining the movement differences in the behavior of normal and rack railway vehicle[J]. International Journal of Engineering and Management Sciences, 2019, 4(1): 96-103.
- [7] 黄双超,赵鑫,张笃超,等. 高阶多边形车轮的瞬态磨损行为分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(2): 648-658.

收稿日期:2023-03-17