DOI：10.11973/jxgccl202308006

防屈曲装置与试样间摩擦力对薄板拉压疲劳寿命的影响

郑 程
（上海材料研究所有限公司，上海市工程材料应用与评价重点实验室，上海 200437）

摘 要：采用TC4钛合金薄板防屈曲装置，在不同扭矩（1.5～2.5 N·m）和不同应变水平（0.25%～1.0%）下对SAPH440钢薄板试样进行拉压疲劳试验，研究了摩擦力对薄板试样疲劳寿命的影响，验证了防屈曲装置的适用性。结果表明：在以弹性应变为主导的低应变水平（0.25%）下，试样的疲劳寿命随摩擦力的增大而略微降低；在以塑性应变为主导的中高应变水平（0.5%～1.0%）下，试样的疲劳寿命随摩擦力的增大而增大；应变水平为0.25%，0.5%时试样裂纹扩展区中段疲劳辉纹间距均值分别为0.45，0.86 μm，随着应变水平继续增大，疲劳辉纹变得不明显，出现了较为明显的二次裂纹。

关键词：防屈曲装置；应变疲劳；摩擦力；薄板疲劳试样
中图分类号：TG115.5；TG142.41 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-3738(2023)08-0034-05

Influence of Friction Force Between Anti-buckling Device and Specimen on Tensile and Compression Fatigue Life of Sheet

ZHENG Cheng
(Shanghai Key Laboratory for Engineering Materials Application and Evaluation, Shanghai Research Institute of Materials Co., Ltd., Shanghai 200437, China)

Abstract: Tensile and compressive fatigue tests were carried out on SAPH440 steel sheet specimen with TC4 titanium alloy sheet anti-buckling device under different torques (1.5−2.5 N·m) and different strain levels (0.25%−1.0%). The effect of friction force on the fatigue life of the sheet specimen was studied, and the applicability of the anti-buckling device was verified. The results show that under the low strain level (0.25%) dominated by elastic strain, the fatigue life of the specimen decreased slightly with the increase of friction force. Under the medium and high strain levels (0.5%−1.0%) dominated by plastic strain, the fatigue life of the specimen increased with the increase of friction force. When the strain levels were 0.25% and 0.5%, the average distance between fatigue striations in the middle section of the crack propagation zone of the specimen was 0.45 μm and 0.86 μm, respectively. As the strain level continued to increase, the fatigue striations became less obvious, and more obvious secondary cracks appeared.

Key words: anti-buckling device; strain-controlled fatigue; friction force; sheet fatigue specimen

0 引 言

金属薄板在汽车、飞机、船舶等行业中应用非常广泛，用其加工的结构件在工作中经常受到拉压循环载荷的作用，因此需要获取其拉压疲劳性能数据。但通常薄板的厚度很小，刚度小，在承受压应力时易发生侧向失稳，即产生屈曲现象。如何防止金属薄板在拉压疲劳试验中产生屈曲，从而获得可靠的疲劳性能数据受到业内学者的普遍关注[1-4]。朱亦钢[5]研制了一种侧向防屈曲装置并应用于存在压应力的疲劳试验中，发现安装防屈曲装置可以基本消除由压缩失稳产生的弯曲应力。陈云霞等[6]发明了一种车身薄板疲劳试验装置，该装置考虑了试样和夹具间的对中性和摩擦力，包括对中装置和防屈曲装置，防屈曲装置通过平面凸台与试样接触，在安装前可涂润滑油以减小装置与试样间的摩擦力。CAO等[7]研发了一种用于常规拉压试验机的测试

收稿日期：2022-04-21；**修订日期：**2023-05-12
作者简介：郑程(1988—)，男，江苏盐城人，高级工程师，学士

夹具，可实现薄板拉压试验的顺利进行：试样的两侧各放一对可以相互滑动的楔形板，也可以抵靠在试验机上下夹具上；在装置的两侧安装受拉弹簧，确保试样同一侧的两块楔形板牢固接触；用3个长螺栓固定每一对楔形板的相对位置，增加滑动键槽来满足拉压时产生的应变，且楔形板的顶部和底部能始终和试验机夹具保持对齐。还有研究表明，为了实现薄板的拉压疲劳试验、确保试验结果的准确性，需要采用防屈曲装置[8-12]。

目前有关疲劳试验中防屈曲装置的研究主要考虑的是其摩擦力和表面张力的影响[13-17]，而有关其对薄板拉压双向应变疲劳试验结果影响的研究仍较少。因此，作者采用防屈曲装置对SAPH440钢薄板试样进行了多级扭矩下多级应变疲劳试验，分析了试样与防屈曲装置间摩擦力对疲劳寿命的影响，拟为获得准确、可靠的金属薄板拉压疲劳性能数据提供参考。

1 试样制备与试验方法

试验材料为厚度2 mm的SAPH440钢板，市售，其屈服强度为361 MPa，抗拉强度为461 MPa。根据GB/T 15248—2008，使用XD-40A型数控铣床将钢板加工成如图1所示的疲劳试样，用砂纸逐级将工作段表面沿纵向打磨、抛光，使其表面粗糙度达到0.2 μm。使用19JC型数字万能工具显微镜及CL-1型粗糙度轮廓仪抽检试样尺寸、形位公差等参数，结果均满足要求。

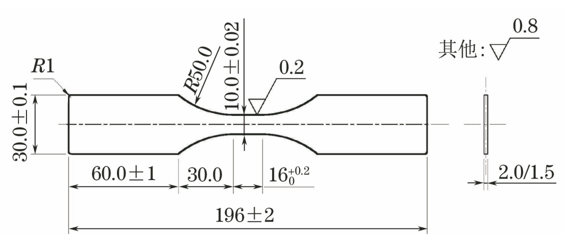


图1 疲劳试样形状和尺寸

Fig. 1 Shape and size of fatigue specimen

采用厚度为12 mm的TC4钛合金板制作如图2所示的防屈曲装置（专利号：ZL 2020 2 0267967.7）。安装时将精度为0.1级的TS-5000N型标准测力仪放在防屈曲装置中间，使用数字式高精度扭矩扳手，对4颗螺栓按对角线逐步施加相同的扭矩。由于试样在拉伸阶段厚度变薄，正压力减小，在压缩阶段厚度增大，正压力增大，故疲劳试验过程中的摩擦力理论上是非对称且循环的，直接测定较为困难，因此引入简化的摩擦力测试模型：将试样在中心处垂直于长轴方向切割成两半，在两半试样两侧安装防屈曲装置，对其施加轴向交变位移，测得防屈曲装置和试样之间的动摩擦力循环曲线。

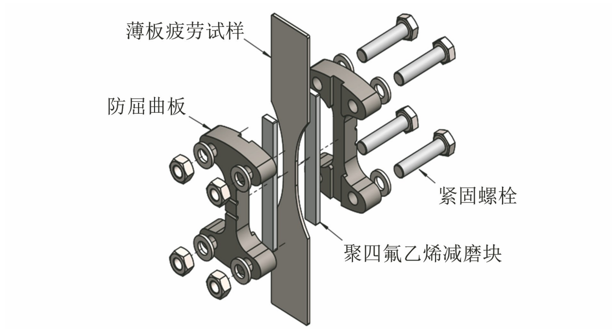


图2 防屈曲装置结构示意

Fig. 2 Schematic of anti-buckling device structure

根据ASTM E606/E606M－2021，使用MTS Landmark 100型液压伺服试验系统及632.13F-20型引伸计（标距10 mm）进行双向应变控制低周疲劳试验，应变速率为0.002 s^{-1}，应变比为－1，三角波，防屈曲装置螺栓的拧紧扭矩分别为1.5，2.0，2.5 N·m，应变水平（最大应变）分别为0.25%，0.5%，0.75%，1.0%，每种条件下各测3个试样。使用Quanta 400FEG型扫描电子显微镜（SEM）观察疲劳断口形貌，测量疲劳辉纹间距。

为验证该防屈曲装置在薄板拉压双向应变疲劳试验中的适用性，使用高速数字图像相关测量系统采集防屈曲板和减磨块在疲劳试验过程中的应变。试验前在防屈曲板的表面和侧面以及减磨块侧面喷涂哑光白漆，人为点涂黑漆，形成人工散斑，散斑中黑白色面积比约为1.3∶1。拉压疲劳试验时应变水平为0.75%，应变速率为0.001 s^{-1}，应变比为－1，三角波，扭矩水平为2.5 N·m。

2 试验结果与讨论

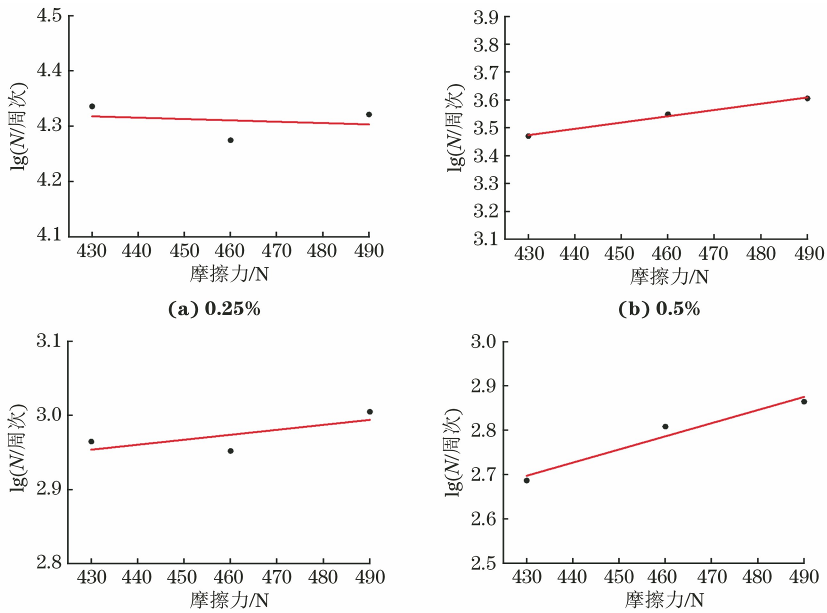
2.1 摩擦力

在摩擦力测量模型中，摩擦力取动摩擦力曲线峰值与谷值之差。测得扭矩为1.5，2.0，2.5 N·m时防屈曲装置与试样间的摩擦力分别为430，460，490 N，正压力分别为2 524，3 614，4 540 N。值得注意的是，摩擦力与试验载荷范围（试验载荷最大值与最小值之差）之比在0.25%低应变水平下为3.4%～4.2%，在0.5%应变水平下为3.1%～3.6%，在0.75%及1%中高应变水平下为2.7%～3.1%，摩擦力与试验载荷范围之比随着应变的增加而减小。

2.2 疲劳性能

当应变水平为0.25%时，试样的塑性应变分量

仅为 0.2%，弹性应变占主导；当应变水平为 0.5% 时，试样的塑性应变分量为 0.7%，占应变范围的 70%；当应变水平为 0.75% 时，试样的塑性应变分量上升至 1.0%，占应变范围的 67%；当应变水平为 1.0% 时，试样的塑性应变分量为 1.6%，占应变范围的 80%。由图 3 可见：在应变水平为 0.25% 条件下，随着摩擦力的增大，疲劳寿命呈略微下降的趋势；当应变水平增大至 0.5%，0.75%，1.0% 时，随着摩擦力增大，疲劳寿命均呈增大趋势，其中应变水平为 1.0% 的增速最大，其次为应变水平 0.5% 条件下，应变水平 0.75% 时增速最小，摩擦力由 430 MPa 增至 490 MPa 时，疲劳寿命增加了 0.6%。



(a) 0.25%　(b) 0.5%　(c) 0.75%　(d) 1.0%

图 3　不同应变水平下薄板试样疲劳寿命与摩擦力的关系曲线

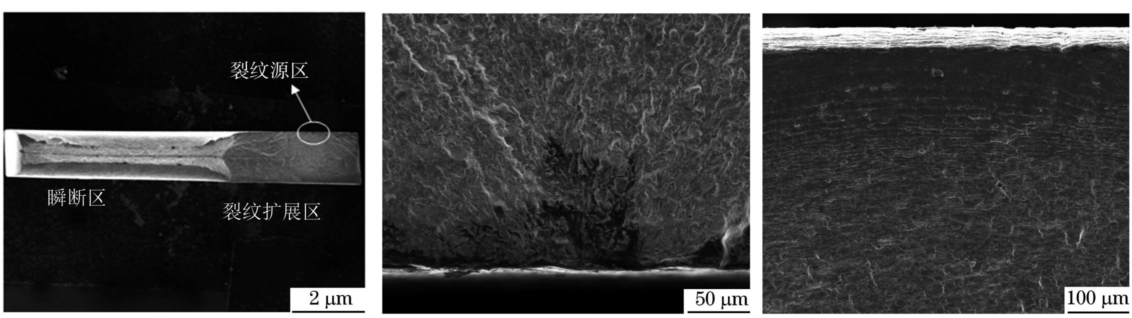
Fig. 3　Curves of fatigue life vs friction force of sheet specimens at different strain levels

摩擦力的增大会导致应变疲劳试验过程中试验力的增大，从而导致试样提前断裂，疲劳寿命缩短。但当应变水平为 0.5%，0.75%，1.0% 时，随着扭矩的增加，摩擦力逐步增大，疲劳寿命却呈现略微增大的趋势。在 1.0% 应变水平下，当扭矩水平由 1.5 N·m 增加至 2.5 N·m 时，摩擦力增大了 14%，正压力增大了 80%，同时对数疲劳寿命也增大了 7%。这可能是由于防屈曲装置对薄板试样施加的正压力产生了类似残余压应力的效果，正压力增大引起的疲劳寿命提升效应大于摩擦力增大引起的疲劳寿命降低效应。

2.3　疲劳断口形貌

由图 4 可见，当应变水平为 0.25% 时，薄板试样的疲劳断口包括裂纹源区、裂纹扩展区和瞬断区。裂纹源区存在放射条纹，裂纹扩展区存在二次裂纹及擦伤，以及明显的台阶特征和疲劳辉纹。试样未发生明显屈曲。

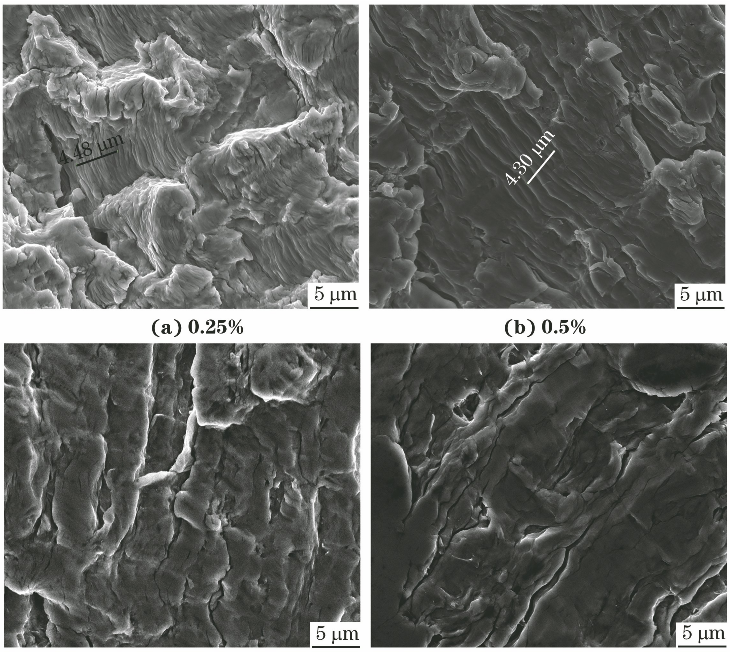
由图 5 可见：当应变水平为 0.25%，0.5% 时，裂纹扩展区中段疲劳辉纹间距均值分别为 0.45，0.86 μm；



(a) 宏观断口　(b) 裂纹源区　(c) 裂纹扩展区

图 4　在应变水平 0.25% 下薄板试样的疲劳断口形貌（扭矩 1.5 N·m）

Fig. 4　Fatigue fracture morphology of sheet specimen at strain level of 0.25% (torque of 1.5 N·m): (a) macroscopic fracture; (b) crack source and (c) crack propagation zone



(a) 0.25%　(b) 0.5%　(c) 0.75%　(d) 1.0%

图 5　不同应变水平下薄板试样疲劳断口上裂纹扩展区的 SEM 形貌(扭矩 2.0 N·m)

Fig.5　SEM morphology of crack propagation zone on fatigne fracture of sheet specimens at different strain levels (torque of 2.0 N·m)

当应变水平增大至 0.75%,1.0%时,疲劳辉纹不明显,存在较为明显的二次裂纹。

2.4　防屈曲装置适用性验证

在应变水平 0.25%下拉压疲劳过程中,采用数字图像相关法测得防屈曲板正面产生的应变在 −0.000 13～0.000 04,侧面产生的横向应变在 0.000 29～0.002 53,侧面产生的轴向应变在 −0.000 17～0.000 31;聚四氟乙烯减磨块侧面产生的横向应变在 0.000 66～0.002 43,侧面产生的轴向应变在 −0.000 09～−0.000 02。由以上数据可知,防屈曲装置在薄板的拉压应变疲劳试验中,整体的变形量都较小,在防屈曲板侧面的横向变形量最大,约为 0.25%。因此,可认为在该应变水平下,防屈曲装置均只发生弹性变形,塑性变形可忽略不计,该防屈曲装置在薄板拉压双向应变疲劳试验中有较好的适用性。

3　结　论

(1) 在以弹性应变为主导的低应变水平(0.25%)下,试样的疲劳寿命随摩擦力的增大而略微降低;在以塑性应变占主导的中高应变水平(0.5%～1.0%)下,试样的疲劳寿命随摩擦力的增大而增大。

(2) 应变水平为 0.25%,0.5%时试样裂纹扩展区中段疲劳辉纹间距均值分别为 0.45,0.86 μm,随着应变水平继续增大,疲劳辉纹变得不明显,出现了较为明显的二次裂纹。

(3) 防屈曲装置在薄板拉压双向应变疲劳试验中整体的变形量都较小,其侧面的横向变形量最大,但也仅约为 0.25%,说明该防屈曲装置在薄板拉压疲劳试验中具有较好的适用性。

参考文献:

[1] 孙孝央,王泽华,周泽华,等. 金属材料疲劳寿命评估的研究现状[J]. 机械工程材料,2017,41(2):1-7.
SUN X Y,WANG Z H,ZHOU Z H,et al. Research status of fatigue life assessment of metal materials[J]. Materials for Mechanical Engineering,2017,41(2):1-7.

[2] 孙晓冉,宋月,谷秀锐,等. 汽车用 SPHC 热轧薄钢板的低周疲劳特性[J]. 机械工程材料,2021,45(4):57-60.
SUN X R, SONG Y, GU X R, et al. Low cycle fatigue characteristics of SPHC hot-rolled steel sheet for automobile [J]. Materials for Mechanical Engineering,2021,45(4):57-60.

[3] 兰天,杨凤鹏,李博林. SAPH440 汽车薄板高低周疲劳特性试验研究[J]. 力学季刊,2016,37(3):559-564.
LAN T,YANG F P,LI B L. Experimental study on high and low fatigue properties of automobile sheet SAPH440[J]. Chinese Quarterly of Mechanics,2016,37(3):559-564.

[4] 闻邦椿. 现代机械设计实用手册[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
WEN B C. Modern mechanical design practical guide[M]. Beijing:China Machine Press,2015.

[5] 朱亦钢. 一种用于金属薄板轴向拉压疲劳试验的防弯夹具[J].

实验力学，2005，20(2)：241-247.
ZHU Y G. A research for thin metal sheet fatigue test under tension-compression loading [J]. Journal of Experimental Mechanics，2005，20(2)：241-247.
[6] 陈云霞，杨旋，李创. 车身薄板疲劳试验装置及测试方法：102735557A[P]. 2012-10-17.
CHEN Y，YANG X，LI C. Fatigue test device for vehicle body thin plate，and test method thereof：102735557A[P]. 2012-10-17.
[7] CAO J A，LEE W，CHENG H S，et al. Experimental and numerical investigation of combined isotropic-kinematic hardening behavior of sheet metals[J]. International Journal of Plasticity，2009，25(5)：942-972.
[8] TONG C，WU J，HUA K，et al. Low-cycle fatigue life evaluation of buckling-restrained braces based on cumulative plastic deformation curves [J]. Advances in Structural Engineering，2022，25(2)：336-354.
[9] 苏少普，常文魁，陈先民. 飞机典型壁板结构剪切屈曲疲劳试验与分析方法[J]. 航空学报，2022，43(5)：225219.
SU S P，CHANG W K，CHEN X M. Fatigue buckling test and analytical approach of aircraft typical panel structures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2022，43(5)：225219.
[10] 苏洪英，刘仁东，芦延鹏，等. 汽车薄板拉-压高周疲劳试样的形状和尺寸选取[J]. 理化检验(物理分册)，2021，57(10)：27-31.
SU H Y，LIU R D，LU Y P，et al. Shape and size selection of tension-compression high cycle fatigue specimens for automobile sheet[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A：Physical Testing)，2021，57(10)：27-31.
[11] HU Y N，WU S C，WITHERS P J，et al. The effect of manufacturing defects on the fatigue life of selective laser melted Ti-6Al-4V structures[J]. Materials & Design，2020，192：108708.
[12] PRASHANTH NAIK R，SAMATHAM M，PATANGAY V K，et al. Experimental study on the effect of annealing on fatigue life of SS 304 steels [J]. International Journal of Scientific Research in Science，Engineering and Technology，2020：164-169.
[13] 机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会. 力学性能试验[M]. 北京：中国计量出版社，2008.
Technical Training and Qualification Appraisal Committee for Physical and Chemical Inspection Personnel in Mechanical Industry. Mechanical property test [M]. China Metrology Press，2008.
[14] 陶美娟. 材料质量检测与分析技术[M]. 北京：中国质检出版社，2018.
TAO M J. Material quality detection and analysis technology [M]. Beijing：China Quality Inspection Press，2018.
[15] 刘冬，薛欢，杜丽影，等. 冷轧薄板低周疲劳试验抗屈曲装置：205749099U[P]. 2016-11-30.
LIU D，XUE H，DU L Y，et al. Flat cold rolled sheet hangs down anti bucking device of all fatigue test：205749099U[P]. 2016-11-30.
[16] DIETRICH L，SOCHA G，KOWALEWSKI Z L. Anti-buckling fixture for large deformation tension-compression cyclic loading of thin metal sheets [J]. Strain，2014，50(2)：174-183.
[17] KOWALEWSKI Z L，DIETRICH L，SOCHA G. Experimental investigation of thin brass sheets under tension-compression cyclic loading [J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2015(3)：757-757.

(上接第 28 页)

[15] SHIH C C，YEH D H，HO N J，et al. The study of crack-propagation behaviors and dislocation structures in cyclically deformed polycrystalline IF steel [J]. Materials Science and Engineering：A，2011，528(21)：6381-6386.
[16] KUMAGAI M，YOKOYAMA R. Characterization of microstructures by X-ray diffraction line profile analysis[J]. Journal of the Society of Materials Science，Japan，2020，69 (3)：277-283.
[17] TAKEBAYASHI S，KUNIEDA T，YOSHINAGA N，et al. Comparison of the dislocation density in martensitic steels evaluated by some X-ray diffraction methods [J]. ISIJ International，2010，50(6)：875-882.
[18] MASUMURA T，URANAKA S，MATSUDA K，et al. Analysis of dislocation density by direct-fitting/modified Williamson-Hall (DF/mWH) method in tempered low-carbon martensitic steel [J]. Tetsu-to-Hagane，2020，106 (11)：826-834.
[19] SHINTANI T，MURATA Y. Evaluation of the dislocation density and dislocation character in cold rolled Type 304 steel determined by profile analysis of X-ray diffraction [J]. Acta Materialia，2011，59(11)：4314-4322.
[20] POLÁK J，DEGALLAIX S，DEGALLAIX G. The role of cyclic slip localization in fatigue damage of materials[J]. Le Journal De Physique IV，1993，3：679-684.
[21] JOHNSTON T L，FELTNER C E. Grain size effects in the strain hardening of polycrystals [J]. Metallurgical and Materials Transactions B，1970，1(5)：1161-1167.
[22] GREULICH F，MURR L E. Effect of grain size，dislocation cell size and deformation twin spacing on the residual strengthening of shock-loaded nickel [J]. Materials Science and Engineering，1979，39(1)：81-93.
[23] CUDDY J，NABIL BASSIM M. Study of dislocation cell structures from uniaxial deformation of AISI 4340 steel[J]. Materials Science and Engineering：A，1989，113：421-429.
[24] DODARAN M，KHONSARI M M，SHAO S. Critical operating stress of persistent slip bands in Cu [J]. Computational Materials Science，2019，165：114-120.
[25] KRUML T，POLÁK J. Fatigue softening of X10CrAl24 ferritic steel[J]. Materials Science and Engineering：A，2001，319/320/321：564-568.