体育器材用65Mn弹簧钢弯曲疲劳裂纹扩展行为

刘宁宁[1] 曹佳民[2] 高滋翔[1] 刘建峰[3]
（1. 山西大同大学 体育学院，大同 037009）
（2. 山西大同大学 教学实验与实训中心，大同 037009）
（3. 内蒙古科技大学 材料科学与工程学院，包头 014010）

摘要：【目的】针对体育器材用65Mn弹簧钢的疲劳断裂失效行为进行研究，以揭示其疲劳断裂失效演化规律。【方法】利用光学显微镜、扫描电镜、3D显微镜及数字图像相关（Digital Image Correlation, DIC）应变仪，分析65Mn弹簧钢在不同应力比条件下标准三点弯曲（Single-Edge Notched Bend Three, SENB3）试样的微观组织、断口形貌与疲劳裂纹扩展特性。【结果】结果表明，在加载相同最大应力的条件下，随着应力比由0.1增至0.5，弹簧钢的疲劳裂纹扩展速率加快，疲劳断裂寿命由8.5×10^5次缩短到4.1×10^5次；弹簧钢的疲劳裂纹扩展路径由大偏折及桥接形式向较平直形态转变，疲劳裂纹扩展路径在低应力比时比高应力比时更易偏折，裂纹总长度也更长。低应力比时，裂纹在1 mm和3 mm处的应变值均大于高应力比。疲劳断口形貌显示，低应力比时，断口坡度大、曲折，断口呈小台阶面，二次裂纹较多；而高应力比时，断口坡度小、平滑，断口呈大台阶面。应力比处于较低水平时，裂纹闭合效应突出、扩展路径偏转明显，进而降低了疲劳裂纹扩展速率。

关键词：体育器材；65Mn弹簧钢；疲劳；裂纹扩展；组织
中图分类号：TG142 **DOI：**10. 16579/j. issn. 1001. 9669. 2026. 10. 010

0 引言

体育器材的疲劳性能是延长器材使用寿命、保障运动员安全的核心指标[1-2][3]100-108[4-5]。然而，体育器材在使用中反复承受交变载荷作用，若疲劳强度不足，会导致其疲劳裂纹过早萌生与扩展，最终发生瞬时断裂，进而引发人员意外受伤[6][7]59-65[8-11]。65Mn弹簧钢因强度高、弹性好，常用于制作体育器材中蹦床弹簧、射箭弓片、臂力棒等弹性部件[12-14]。

现阶段，国内外关于65Mn弹簧钢的研究工作主要集中在两大核心方向。其一，探究热处理及变形工艺对材料微观组织的调控机制。刘乐等[15]依托Gleeble-3500热模拟试验机开展热压缩试验，系统探究了65Mn弹簧钢的动态再结晶特性，分析了不同变形参数对再结晶晶粒尺寸的影响规律，发现提升变形温度、降低应变速率能够减小材料的临界应变，有效促进动态再结晶进程，进而实现晶粒细化，优化材料微观组织结构。黄刚等[16]采用Formaster热膨胀仪测试与金相试验方法，精准测定了65Mn弹簧钢的连续冷却转变（Continuous Cooling Transformation, CCT）曲线，明确了该弹簧钢的关键相变参数：A_{C1}=719 ℃、A_{C3}=747 ℃、M_s=267 ℃。在临界冷却速率35 ℃/s的条件下，弹簧钢淬火后可形成均匀细小的显微组织，具备优异的硬度，并且淬透性比用传统工艺制备的弹簧钢有较大幅度的提升。其二，众多学者围绕热处理及表面改性工艺对65Mn弹簧钢力学性能的影响开展了大量研究，王慧鹏等[17]借助Ansys有限元仿真软件，对65Mn弹簧钢表面激光熔覆工艺的温度场分布及成型后的力学性能进行数值模拟，发现相较于传统电弧焊覆层，激光熔覆层的晶粒结构更为致密，组织分布均匀性更佳，可有效提升基材的强度、塑性与韧性。王超等[18]以65Mn弹簧钢表面Ni60A/WC复合涂层为研究对象，探究了激光能量密度对涂层摩擦磨损性能的影响规律，通过优化调控激光能量密度参数，显著提升了复合熔覆层的表面硬度与耐磨性能。王志明等[19]采用超声冲击（Ultrasonic Impact, UI）与固体粉末渗铬（Solid Powder Chromizing, SPC）复合改性工艺对65Mn弹簧钢进行渗铬处理，系统研究了改性后渗铬层的物相组成、涂层厚度及元素分布特征；同时，发现使用UI处理可显著改善铬原子的扩散效果，优化SPC

收稿日期：2026-06-03 修回日期：2026-07-04
基金项目：国家级大学生创新创业训练计划项目（202310120003）；山西大同大学横向项目（202505004）
作者简介：刘宁宁，女，1987年生，山西阳高人，博士，讲师，硕士研究生导师；主要研究方向为运动劳损及运动器材使役性能；E-mail：dtlnn2016@163.com。
引用格式：刘宁宁，曹佳民，高滋翔，等. 体育器材用65Mn弹簧钢弯曲疲劳裂纹扩展行为[J]. 机械强度，2026，48(10)：86-94.
Liu Ningning，Cao Jiamin，Gao Zixiang，et al. Bending fatigue crack propagation behavior of 65 Mn spring steel for sports equipment[J]. Journal of Mechanical Strength，2026，48(10)：86-94.
免费获取

工艺的改性效果，有效增大渗铬层厚度，并提升钢材的抗拉强度。曹修全等[20]聚焦层流等离子体表面淬火工艺，分析了搭接率参数对65Mn弹簧钢表层微观组织与综合力学性能的调控规律，指出层流等离子体表面淬火搭接率是影响淬火区域组织特性、表面耐磨性的主要因素。狄彦军等[21]、杨宾等[22]分别从等温球化退火和盐浴淬火方面研究了65Mn弹簧钢组织对力学性能的影响。此外，李红英等[23]通过优化回火工艺参数，对65Mn弹簧钢疲劳性能进行调控，发现高温回火处理可有效提升该钢材的疲劳裂纹扩展阈值，显著抑制疲劳裂纹的扩展速度。然而，以上研究大多集中于优化热处理工艺，提高65Mn弹簧钢的常规力学性能及拉/压疲劳性能，鲜有关于65Mn弹簧钢在弯曲加载条件下疲劳裂纹扩展影响方面的研究报道。事实上，蹦床弹簧、射箭弓片、臂力棒等体育器材大多处于弯曲疲劳工况，弯曲疲劳断裂是其主要的失效形式[24-25]，仅研究拉/压疲劳条件下的65Mn弹簧钢疲劳断裂行为尚存在一定的局限性。因此，深入探究体育器材用65Mn弹簧钢的弯曲疲劳裂纹扩展行为，对于保障体育器材的可靠性与使用者的安全性具有重要意义。

本文以65Mn弹簧钢为研究对象，分析3种不同应力比下三点弯曲疲劳裂纹的扩展速率特点，探讨珠光体形貌、裂纹扩展路径、断口特征等对疲劳裂纹扩展速率的影响，系统地研究疲劳裂纹尖端应变场的演变规律。该研究为完善体育器材用弹簧钢弯曲疲劳断裂理论体系，以及为金属材料疲劳裂纹扩展领域的研究提供了新的视角与数据支撑。

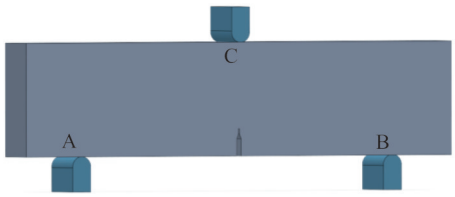
1　试验材料与方法

试验材料为经820 ℃淬火+540 ℃盐浴回火后的65Mn弹簧钢，其化学成分如表1所示。依据国标GB/T 6398—2017制备标准三点弯曲试样（Single-Edge Notched Bend Three，SENB3），采用显微目视法读取不同循环次数N时对应的裂纹长度a，据此绘制裂纹长度-循环次数曲线，利用Origin软件完成数据求导与拟合处理，得到疲劳裂纹扩展速率da/dN-ΔK曲线，SENB3的试样尺寸和加载方式如图1所示。疲劳裂纹扩展试验在POWER SWING MOT高频疲劳试验机上进行，设定最大载荷F_{max}=18 kN。为明确应力比对材料疲劳裂纹扩展速率的影响规律，参考文献[7]59-65，选取3种应力比R进行疲劳试验分析（R分别取0.1、0.3、0.5），并对应设定最小载荷F_{min}分别为1.8、5.4、9 kN，进行弯曲疲劳试验。为了避免试验结果的随机性，在每种应力比R条件下重复测试3个相同的试样，并计算疲劳裂纹扩展数据的均值。为了研究疲劳裂纹尖端的应变场演变规律，在SENB3试样的表面制作高对比度的散斑图案，用于数字图像相关（Digital Image Correlation, DIC）应变测量，采用XTDIC三维全场应变测量系统，对各SENB3试样的应变进行测量。在加载载荷恒定为18 kN的试验条件下，分别采集裂纹长度为1 mm与3 mm这2个特征位置的试验数据，系统记录并分析试样裂纹尖端区域的全场应变场分布特征。使用GALA3 TESCAN场发射扫描电镜（Scanning Electron Microscope, SEM）观察SENB3试样的疲劳裂纹扩展轨迹，在试样完全断裂后，用丙酮超声波清洗疲劳断口，采用3D Smart Zoom5显微镜观察疲劳断口的完整宏观形貌，采用扫描电镜观察1 mm和3 mm位置处的断口微观形貌，对试样进行抛光与4%硝酸酒精腐蚀处理后，利用蔡司Axio Vert. A1光学显微镜（Optical Microscope, OM）开展微观组织观测。

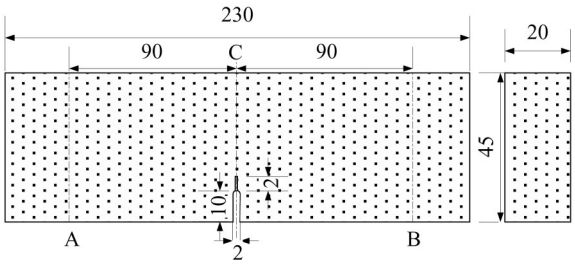
表1　65Mn弹簧钢化学成分

Tab. 1　Chemical composition of the 65Mn spring steel　%

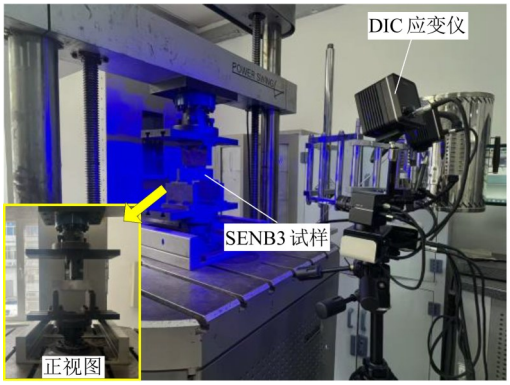
C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
0.65	0.22	0.99	0.15	0.09	0.17	余量



（a）加载示意



（b）试样尺寸



（c）疲劳试验及DIC应变同步测量

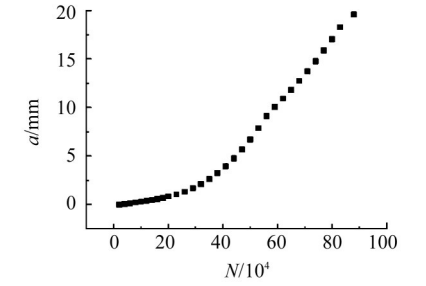
图1　三点弯曲疲劳试验

Fig. 1　Three-point bending fatigue test

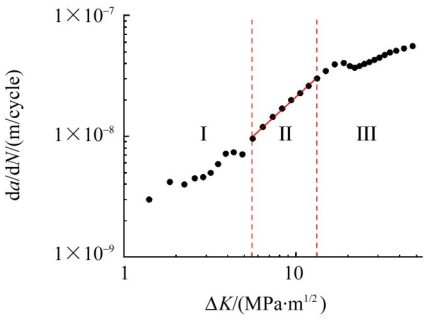
2　疲劳裂纹扩展速率分析

图2~图4所示分别为不同应力比R条件下SENB3

试样的疲劳裂纹扩展曲线。对比其中的a-N曲线可以看出,3种应力比R条件下疲劳裂纹扩展长度a均随循环周次N的增加而逐渐增大,曲线整体表现出显著的非线性扩展规律,但疲劳断裂寿命存在较大差异。由图2(a)可知,当应力比R为0.1时,试样的疲劳断裂寿命最长,为8.5×10^5;随着应力比R由0.1增大到0.3,由图3(a)可知,试样的疲劳断裂寿命大幅缩短,缩短至5.5×10^5;而当应力比R增大至0.5时,由图4(a)可知,试样的疲劳断裂寿命缩短至4.1×10^5。整体来看,随着应力比R的增加,疲劳断裂寿命缩短。由图2(b)、图3(b)和图4(b)可知,标准SENB3试样的da/dN-ΔK曲线呈现3个明显的区域:近门槛区(第Ⅰ阶段)、稳态扩展区(第Ⅱ阶段,Paris区)、快速扩展区(第Ⅲ阶段),在3组不同应力比下,疲劳裂纹扩展速率da/dN均随应力强度因子幅值ΔK的提升不断增大。对比Ⅱ区可知,在双对数坐标下,虚线中间部分数据近似呈线性分布,说明SENB3试样的疲劳裂纹扩展速率在Ⅱ区内符合Paris定律。



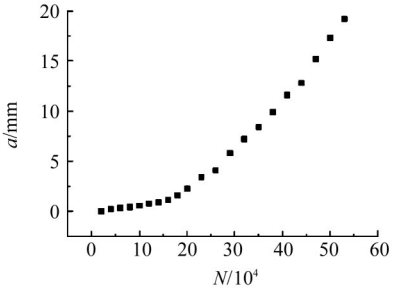
(a) a-N曲线



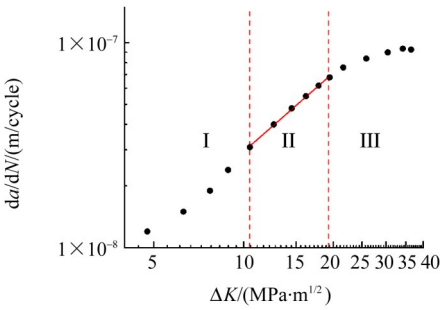
(b) da/dN-ΔK曲线

图2 R=0.1时试样疲劳裂纹扩展曲线

Fig. 2 Fatigue crack growth curves of the specimen at R=0.1



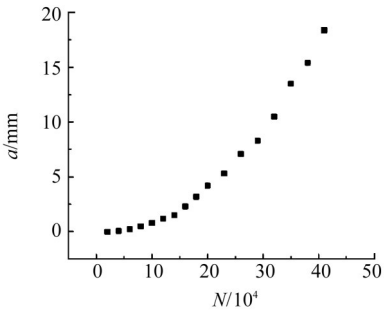
(a) a-N曲线



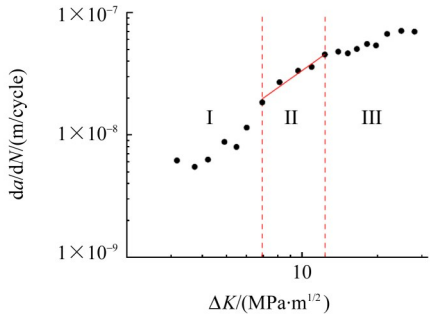
(b) da/dN-ΔK曲线

图3 R=0.3时试样疲劳裂纹扩展曲线

Fig. 3 Fatigue crack growth curves of the specimen when R=0.3



(a) a-N曲线



(b) da/dN-ΔK曲线

图4 R=0.5时试样疲劳裂纹扩展曲线

Fig. 4 Fatigue crack growth curves of the specimen when R = 0.5

图5所示为3种应力比R下的疲劳寿命和统计误差条。从弹簧钢疲劳裂纹扩展闭合和张开的角度分析,低应力比R=0.1时循环平均应力偏低,每次试验中裂纹启裂时间、扩展路径离散性大,寿命数据波动明显,误差达±0.43,这缘于低应力比时裂纹闭合效应显著,裂纹扩展受塑性钝化、残余压应力干扰更强。随R的增大,平均应力增大,裂纹闭合程度减弱,塑性残余应力对裂纹扩展的抑制作用弱化,裂纹稳定扩展阶段时间占比提升,裂纹萌生随机性降低,试验重复性变好。R=0.5时裂纹扩展速率稳定,3组试样断裂循环次数差异小,误差仅±0.21。整体规律表明,应力比的增大可削弱裂纹闭合带来的试验分散性,使测试误差减小。

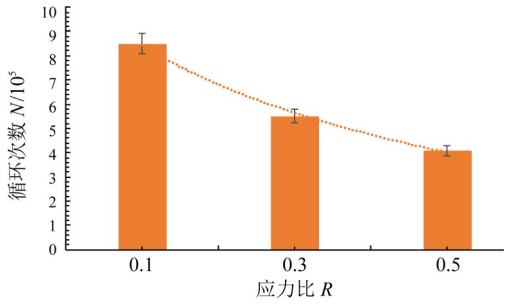


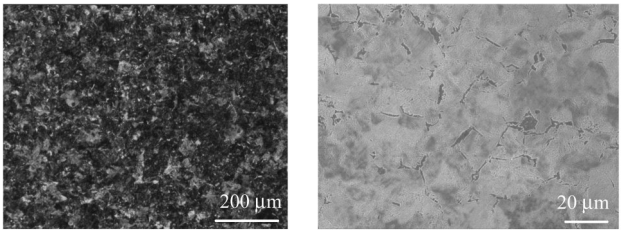
图5　不同应力比下的疲劳寿命和统计误差条

Fig. 5　Fatigue life and statistical error bars under different stress ratios

3　组织及疲劳裂纹扩展路径分析

图6为65Mn弹簧钢经820 ℃淬火+540 ℃回火的金相图。由图6可知，金相组织以回火托氏体为主，还有少量未溶先共析的铁素体，整体分布均匀，其中回火托氏体呈现典型的细珠光体形貌：多边形铁素体基体上弥散分布着大量极细粒状、短片状渗碳体颗粒，渗碳体尺寸多在亚微米级别，晶界清晰，无明显过热长大。由于淬火温度在A_{c3}临界点以上，奥氏体化过程中少量碳化物未完全溶解，最终形成分散的白色块状先共析铁素体，沿原奥氏体晶界零星分布，内部珠光体片层间距较小，且片层取向杂乱、排布方式复杂，呈现多方向交错分布的特征。该类多角度交织的珠光体片层结构在不同应力比的交变载荷作用下会产生差异化的滑移行为，从而对疲劳裂纹的扩展过程产生显著影响。

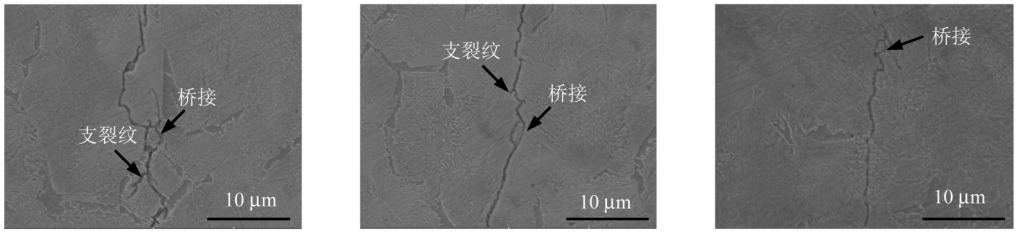
图7所示为标准SENB3试样的疲劳裂纹扩展路径形貌。由图7可知，3种应力比下的裂纹扩展轨迹存在较为明显的差异。当应力比R为0.1和0.3时，裂纹扩展路径存在明显的大曲折、Z字形回折、大桥接现象，其中，当应力比R为0.1时，裂纹总长度最长；而应力比为0.5时，裂纹扩展路径存在平直和小桥接现象，裂纹总长度最短。这表明，在相同循环次数下，应力比R为0.1时，裂纹扩展最慢；而应力比为0.5时，裂纹扩展最快。总体而言，随着应力比R由0.1增加到0.5，65Mn弹簧钢疲劳裂纹扩展路径由曲折分叉向相对平直稳定转变。这是因为在低应力比下，裂纹扩展更易受到微观组织和局部障碍作用的影响，路径更复杂，相较于低应力比，较高应力比的条件能够约束裂纹扩展走向，使主裂纹扩展路径更具规律性、曲折程度显著降低。此外，当裂纹扩展路径出现大量曲折、Z字形回折与桥接结构时，裂纹向前延伸时须频繁改变走向，每一次偏转都要消耗额外的塑性变形能；界面桥接结构还会产生桥联约束力，抵消部分外加载荷驱动能。所以，同等循环应力下，裂纹拓展需要消耗更多能量，有效驱动裂纹向前发展的能量占比下降，这也是弹簧钢低应力比时疲劳裂纹整体扩展速率显著降低的主要原因。



（a）OM像　　（b）SEM像

图6　金相图

Fig. 6　Metallographic chart



（a）R=0.1　　（b）R=0.3　　（c）R=0.5

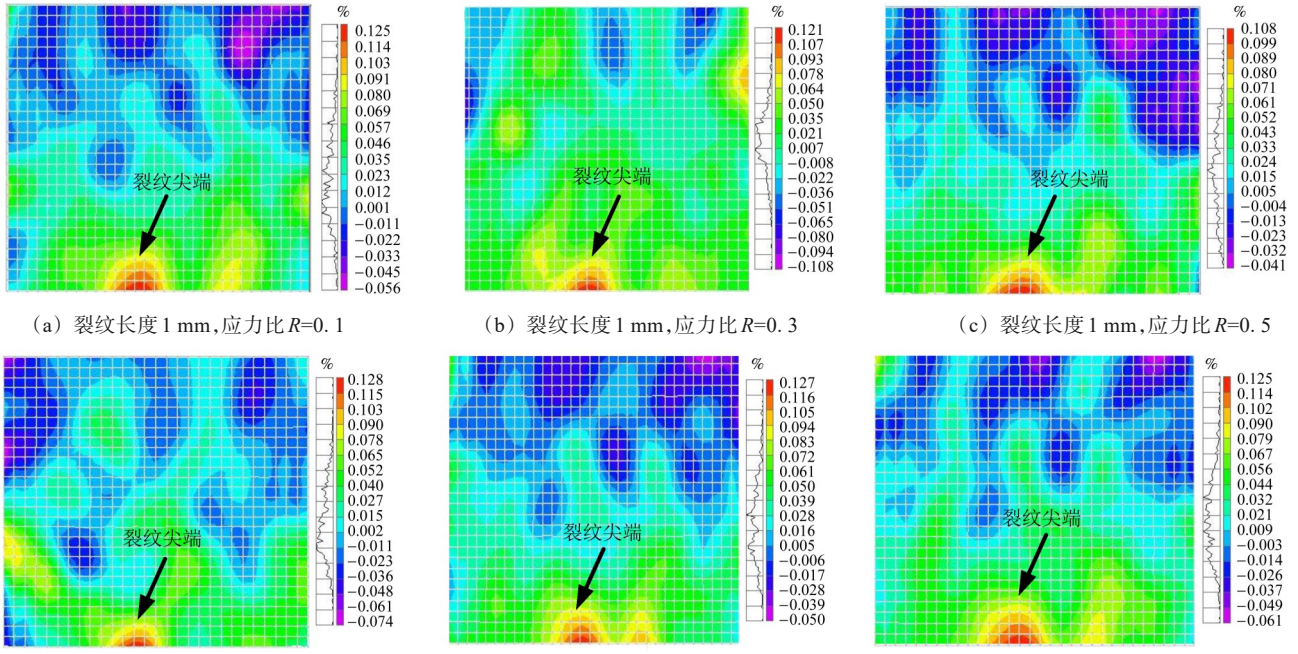
图7　标准SENB3试样Ⅱ区疲劳裂纹扩展路径SEM像

Fig. 7　SEM images of the fatigue crack propagation path in Zone Ⅱ of the standard SENB3 specimen

4　疲劳裂纹尖端DIC应变分析

应力比作为影响疲劳行为的关键参数，对裂纹尖端应变场分布与裂纹扩展路径有较大影响[26]。图8所示为DIC测量结果。对比图8(a)、图8(b)和图8(c)可知，相同裂纹长度下，裂纹尖端应变场分布特征随应力比的变化产生较大变化：当裂纹长度先、后扩展至1 mm和3 mm时，3种应力比条件下的裂纹尖端最大应变呈现出递减趋势。由于材料在外力作用下产生的变形以应变形式呈现，应变分布存在差异的根源在于裂纹尖端应力场分布各不相同。由图8(d)、图8(e)、图8(f)可知，当裂纹长度为3 mm时，应力比R=0.1、0.3、0.5对应的最大应变值分别为0.128、0.127、0.125，应变值随应力比的增大呈现出单调递减的趋

势。除了最大应变数值的差异，应变场的均匀性同样具有明显区别，当应力比R=0.1时，高应变区域范围更大，应变梯度更小，应变分布相较于R=0.3和R=0.5更均匀，这说明低应力比条件下，裂纹尖端的应力能够更均匀地分散在裂纹尖端周围，应力集中得到更有效的缓冲。而随着应力比升高到0.5，裂纹尖端的高应变区域明显缩小，应变梯度陡增，应变集中仅局限于裂纹尖端极小范围内，反而更容易引发裂纹的快速失稳扩展。



（a）裂纹长度1 mm，应力比R=0.1　（b）裂纹长度1 mm，应力比R=0.3　（c）裂纹长度1 mm，应力比R=0.5

（d）裂纹长度3 mm，应力比R=0.1　（e）裂纹长度3 mm，应力比R=0.3　（f）裂纹长度3 mm，应力比R=0.5

图8　标准SENB3试样疲劳裂纹尖端应变值

Fig. 8　Strain values at the fatigue crack tip of standard SENB3 specimens

结合断裂力学中的裂纹闭合理论，可以对以上现象做出解释：低应力比R条件下，循环载荷的平均应力更低，疲劳卸载后裂纹尖端会产生更强的残余压应力，进而诱发强烈的裂纹闭合效应，即当载荷卸载至最小值时，裂纹口的上、下表面提前闭合，在再次加载过程中，加载载荷需要首先克服残余压应力才能重新打开裂纹，用于推动裂纹延伸的有效应力强度因子随之明显减小[3]100-108[27]142-157。正是这种裂纹闭合效应的存在，使得相同最大应力加载条件下，低应力比的裂纹尖端虽然整体应变更大，但变形分布更均匀，同时裂纹尖端的抗变形能力、抗裂纹扩展能力也更强。这种应变分布与力学效应的差异直接反映在裂纹扩展路径与最终疲劳寿命上，即高应力比R=0.5条件下，裂纹闭合效应极弱，裂纹尖端应力集中程度高，裂纹会沿应变最大的直线方向快速扩展，几乎没有偏转阻滞的过程；而低应力比R=0.1条件下，裂纹闭合效应强，裂纹尖端扩展过程中会不断受到残余压应力的阻滞，裂纹扩展速率显著降低。结合图2~图4可知，65Mn弹簧钢试样的这种差异非常显著，当应力比R=0.1时，疲劳裂纹萌生晚、扩展慢，整体疲劳断裂寿命最长；而应力比增至R=0.5时，疲劳裂纹扩展驱动力持续处于较高水平，裂纹萌生与扩展速率加快，试样疲劳断裂寿命最短，这与文献[27]142-157的结果相近。上述结果充分证明了应力比通过调控裂纹闭合、改变裂纹尖端应变场分布，影响疲劳断裂寿命。

以上现象可以用裂纹闭合理论加以解释。对于金属材料，疲劳加载过程中闭合参数U与应力比R存在对应关系（Elber公式）[28]160-165，即

$$U = 0.5 + 0.4R \tag{1}$$

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \tag{2}$$

式中，$K_{\max}$为最大应力强度因子；$K_{\min}$为最小应力强度因子。

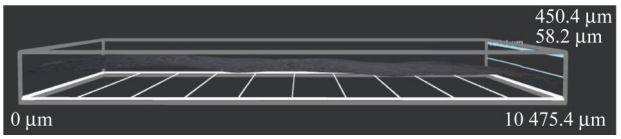
由式(1)可知，随着应力比R的增大，闭合效应减弱（U趋近于1）。当R较低时，闭合效应显著，U值较小。本试验中，借助DIC全场应变观测可直观获取65Mn弹簧钢三点弯曲疲劳裂纹闭合证据[29]1258-1264，在加载至峰值载荷18 kN时，由图8可知，裂纹长度为1 mm与3 mm两个特征位置区域的全场应变场分布特征为裂纹尖端高应变塑性区清晰、应变集中带沿裂纹延长。当卸载至低载荷阶段，裂纹上、下表面发生接触，裂纹尖端塑性应变带明显收缩、应变幅值大幅

下降。DIC云图显示，裂纹尾段局部应变归零，证明了裂纹面挤压闭合。对比张开与闭合载荷下裂尖最大主应变差值可知，闭合阶段有效应变范围显著缩小，证明裂纹发生闭合，导致疲劳裂纹扩展速率减小。

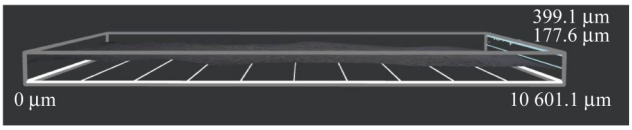
由于蹦床弹簧、射箭弓片、臂力棒等体育器材的实际受载为反复弯折，对应三点弯曲工况，在受力方向上，单轴拉压全截面同步承受交变拉压，裂纹垂直载荷平直延伸，疲劳依靠均匀整体应力场驱动裂纹，前沿驱动力一致，若仅模拟弹簧整体均匀拉伸、压缩则与真实受力情况不符，而弯曲载荷使裂纹由外表面向内扩展，内侧压应力约束塑性变形。此外，单轴拉压疲劳的裂纹闭合参数U仅由全局应力比R决定，满足Elber公式；有效应力强度因子ΔK_{eff}沿平直裂纹前缘均匀分布（$\Delta K_{\mathrm{eff}} = U\Delta K$），裂纹面接触状态同步一致[28]160-165。而弯曲疲劳受截面线性应力梯度影响，裂纹前沿沿厚度存在梯度化的ΔK，局部闭合参数U随裂纹深度的增大而逐步减小，ΔK_{eff}持续减小，在相同名义ΔK下，弯曲疲劳的裂纹闭合效应更强。

5　断口形貌分析

图9所示为不同应力比下弹簧钢的疲劳断口宏观形貌。由图9可知，不同应力比条件下的弹簧钢疲劳断口存在显著差异，表现为低应力比时的疲劳断口整体起伏更大、形貌更粗糙，而高应力比条件下的疲劳断口相对光滑、平坦，宏观起伏度明显更低。3D显微镜轮廓扫描结果显示，应力比R为0.1的试样疲劳断口的最大起伏度达450.4 μm；应力比R为0.3的试样最大起伏度为399.1 μm；而应力比R为0.5的试样疲劳断口的最大起伏度仅为279.6 μm，最大起伏度随应力比升高呈现递减的趋势，这在一定程度上验证了疲劳断口宏观形貌的差异规律。同时，3D显微镜轮廓扫描结果还显示，相同加载循环次数下，应力比R为0.1试样的疲劳裂纹总长更大，最终失稳断裂时的临界裂纹尺寸也更大，反映出低应力比条件下裂纹扩展速率更低的特征。应力比引发断口起伏度出现差异的核心机制来源于断裂力学中的裂纹闭合效应[29]1258-1264。当应力比较小时，循环载荷平均应力较小，卸载阶段裂纹尖端塑性区产生的残余压应力较大，裂纹闭合现象较突出。在裂纹扩展过程中，闭合效应会持续阻滞裂纹尖端的扩展，迫使裂纹不断改变扩展方向，绕过晶界、第2相粒子等组织障碍，最终形成曲折多变的扩展路径，反映在宏观断口上就是更大的起伏度和更粗糙的表面形貌。应力比增大后，平均应力水平显著提高，削弱了卸载过程中残余压应力的作用效果，使得裂纹闭合现象逐渐减弱，裂纹尖端始终受到较高的有效驱动应力，会沿最大主应力方向直线扩展，很少发生方向偏转，这也让裂纹走向趋于规整，断口形貌光滑度提升，整体起伏程度更低。这种形貌差异本质上反映了裂纹扩展阻力的不同。低应力比下曲折的扩展路径会不断消耗裂纹扩展的能量，每一次偏转都会降低裂纹尖端的应力集中程度，使裂纹扩展速率持续维持在较低水平，因此裂纹能够扩展更长距离；高应力比条件下裂纹扩展路径更为规整，扩展阻力大幅减小，裂纹扩展速率持续提升，裂纹较快达到临界尺寸，进而使试样提前发生失稳断裂，疲劳寿命显著缩短。



（a）应力比R=0.1



（b）应力比R=0.3

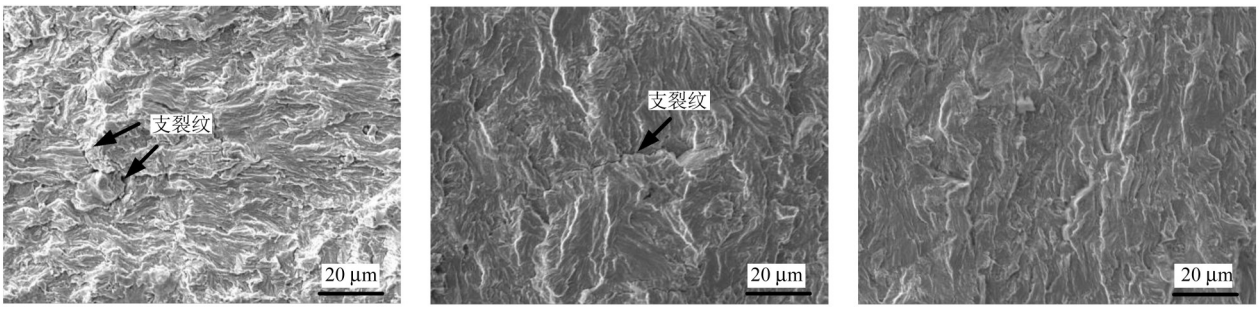


（c）应力比R=0.5

图9　标准SENB3试样疲劳断口宏观形貌

Fig. 9　Macroscopic fracture morphology of standard SENB3 specimens under fatigue

图10所示为断口分别在1 mm和3 mm处的微观形貌。当应力比R=0.1时，裂纹长度约为1 mm处的断口局部可见少量撕裂棱及支裂纹。随着裂纹扩展至约3 mm，断口表面起伏程度增大，撕裂棱和台阶状形貌更加明显，支裂纹更加显著，裂纹长度增加会使尖端ΔK升高，萌生的支裂纹能够分担并消耗疲劳裂纹的扩展动力。当应力比R=0.3时，裂纹长度约为1 mm处的断口表面相对平整，局部仅有少量撕裂棱。随着裂纹扩展至约3 mm，断口表面起伏程度增加，台阶状形貌比0.1应力比时更加明显。当应力比R=0.5时，裂纹长度在1 mm处的断口大台阶较多，支裂纹较少。当裂纹扩展至3 mm时，断口表面起伏微弱，台阶形貌特征更为明显。对比以上结果可以看出，应力为0.5时台阶较大，支裂纹少，每次循环条件下疲劳裂纹延伸程度明显增加，故而相比低应力比条件，其扩展速度更快。



（a）裂纹长度1 mm，应力比R=0.1　（b）裂纹长度1 mm，应力比R=0.3　（c）裂纹长度1 mm，应力比R=0.5

（d）裂纹长度3 mm，应力比R=0.1　（e）裂纹长度3 mm，应力比R=0.3　（f）裂纹长度3 mm，应力比R=0.5

图10　标准SENB3试样疲劳断口微观形貌

Fig. 10　Microscopic morphology of fatigue fracture of standard SENB3 specimens

6　结论

通过对体育器材用65Mn弹簧钢标准SENB3试样在不同应力比R下的疲劳裂纹扩展速率、裂纹尖端应变、微观组织、断口形貌的研究，得到以下主要结论：

1）在最大载荷18 kN条件下，随着应力比R由0.1增加到0.5，弹簧钢的疲劳裂纹扩展速率增加，疲劳断裂寿命由8.5×10^5缩短到4.1×10^5；低应力比时，裂纹1 mm和3 mm处的应变值均大于高应力比时的应变值。

2）随着应力比的增加，弹簧钢疲劳裂纹扩展路径由大偏转及桥接形式向较平直转变。疲劳裂纹扩展路径在低应力比时比高应力比时更易偏折，裂纹总长度更大；低应力比的弹簧钢疲劳裂纹扩展轨迹中存在明显的裂纹桥接、Z字形回折及分支裂纹，这种曲折的裂纹扩展路径及分支裂纹可以明显消耗裂纹扩展的能量，是其具有较高抗疲劳裂纹扩展能力的主要原因。

3）低应力比时，疲劳断口表面起伏程度较大，台阶状形貌、撕裂棱及局部二次裂纹更加显著，裂纹扩展路径曲折，耗能更高；而高应力比时，疲劳断口坡度小、平滑，疲劳断口呈大台阶面较多，显示出低应力比疲劳断裂寿命更长、高应力比疲劳寿命更短的特征。

参考文献（References）

[1] Da Silva J C G, Silva K F, Batista C E C F, et al. Development of prototypes in sport: a systematic review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, 2025, 239(4): 800-812.

[2] Galluzz R, Feraco S, Zenerino E C, et al. Fatigue monitoring of climbing ropes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology, 2020, 234(4): 328-336.

[3] 冯永华，刘卓，梁海啸，等. 中/高温回火对$60Si_2CrV$弹簧钢强度与疲劳性能的影响[J]. 机械强度，2026，48(1)：100-108.
Feng Yonghua, Liu Zhuo, Liang Haixiao, et al. Effect of medium/high temperature tempering on the strength and fatigue properties of $60Si_2CrV$ spring steel[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(1): 100-108. (In Chinese)

[4] 冯瑞亮，蒋卫良，朱立平. 用于调升单车鞍座高度的气弹簧性能研究[J]. 机械强度，2016，38(5)：1139-1142.
Feng Ruiliang, Jiang Weiliang, Zhu Liping. Air spring's performance in height adjusting for bicycle saddle[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(5): 1139-1142. (In Chinese)

[5] 侯雨雷，蔡庆明，高志强，等. 一种绳驱式可关节错位补偿的肘腕康复机构设计与分析[J]. 机械传动，2025，49(5)：50-57.
Hou Yulei, Cai Qingming, Gao Zhiqiang, et al. Design and analysis of a rope-driven elbow-wrist rehabilitation mechanism with joint dislocation compensation[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(5): 50-57. (In Chinese)

[6] 卓波，刘铮，郝凤霞. 金属材料的性能及在体育器材制造中的应用——评《金属材料及成形工艺》[J]. 中国有色冶金，2023，52(4)：150.
Zhuo Bo, Liu Zheng, Hao Fengxia. Performance of metal materials and its application in the manufacture of sports equipment: comment on *Metal Materials and Forming Technology*[J]. China

Nonferrous Metallurgy，2023，52(4)：150.（In Chinese）

[7] 刘硕，王启慧，王志鹏．激光增材制造体育器材用TC4钛合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]．精密成形工程，2024，16(1)：59-65.
Liu Shuo，Wang Qihui，Wang Zhipeng．Fatigue crack propagation behavior of TC4 titanium alloy for sports equipment prepared by laser additive manufacturing[J]．Journal of Netshape Forming Engineering，2024，16(1)：59-65.（In Chinese）

[8] 马文超．铸造技术对体育器材用镁合金的组织疲劳性能影响分析[J]．特种铸造及有色合金，2021，41(4)：534-535.
Ma Wenchao．Influence of casting technology on microstructure fatigue properties of magnesium alloy for sports equipment[J]．Special Casting & Nonferrous Alloys，2021，41(4)：534-535.（In Chinese）

[9] 薛海涛，梁乐杰，杜威，等．钛合金体育器材的低周疲劳行为研究[J]．塑性工程学报，2018，25(6)：292-297.
Xue Haitao，Liang Lejie，Du Wei，et al．Study on low cycle fatigue behavior of titanium alloy sports equipment[J]．Journal of Plasticity Engineering，2018，25(6)：292-297.（In Chinese）

[10] 王志远，张坤，邵广军，等．齿根疲劳裂纹扩展特性及其对啮合刚度的影响[J]．机械传动，2025，49(4)：30-36.
Wang Zhiyuan，Zhang Kun，Shao Guangjun，et al．Root fatigue crack propagation characteristics and its effect on mesh stiffness[J]．Journal of Mechanical Transmission，2025，49(4)：30-36.（In Chinese）

[11] Zhang P F，Li K Y，Ji G，et al．Exploring corrosion resistance and microstructure of manganese phosphate conversion coating on 65Mn spring steel[J]．Materiali in Tehnologije，2024，58(6)：707-717.

[12] Zhang P F，Wang D C，Cheng P，et al．Warm deformation behavior of a 65mn spring steel[J]．Materiali in Tehnologije，2021，55(5)：717-724.

[13] Wang Y J，Sun J J，Jiang T，et al．Super strength of 65Mn spring steel obtained by appropriate quenching and tempering in an ultrafine grain condition[J]．Materials Science and Engineering：A，2019，754：1-8.

[14] 张晓光，郝鑫瑞，韩绍年．疲劳损伤诱发的碟形弹簧刚度退化分析[J]．机械强度，2025，47(7)：49-55.
Zhang Xiaoguang，Hao Xinrui，Han Shaonian．Analysis of disc spring stiffness degradation induced by fatigue damage[J]．Journal of Mechanical Strength，2025，47(7)：49-55.（In Chinese）

[15] 刘乐，孟子祺，石妙杰，等．65Mn钢的动态再结晶行为[J]．金属热处理，2018，43(5)：39-44.
Liu Le，Meng Ziqi，Shi Miaojie，et al．Dynamic recrystallization behavior of 65Mn steel[J]．Heat Treatment of Metals，2018，43(5)：39-44.（In Chinese）

[16] 黄刚，吴开明，周峰，等．薄板坯连铸连轧生产65Mn钢的CCT曲线和淬透性[J]．材料工程，2012，40(4)：52-55.
Huang Gang，Wu Kaiming，Zhou Feng，et al．CCT diagram and hardenability of 65Mn steel produced by compact strip production[J]．Journal of Materials Engineering，2012，40(4)：52-55.（In Chinese）

[17] 王慧鹏，朱鹏华，舒凤远，等．65Mn钢表面激光熔覆温度场模拟及性能研究[J]．机械工程学报，2023，59(7)：216-224.
Wang Huipeng，Zhu Penghua，Shu Fengyuan，et al．Simulation and performance research of laser cladding temperature field on 65Mn steel surface[J]．Journal of Mechanical Engineering，2023，59(7)：216-224.（In Chinese）

[18] 王超，姜芙林，杨发展，等．激光能量密度对65Mn钢表面Ni60A/WC复合涂层摩擦磨损性能的影响规律[J]．表面技术，2024，53(11)：181-192.
Wang Chao，Jiang Fulin，Yang Fazhan，et al．Effect of laser energy density on friction and wear properties of Ni60A/WC composite coating on 65Mn steel surface[J]．Surface Technology，2024，53(11)：181-192.（In Chinese）

[19] 王志明，李庆达，汪昊，等．超声冲击对65Mn钢渗铬层摩擦磨损性能的影响[J]．表面技术，2022，51(1)：52-59.
Wang Zhiming，Li Qingda，Wang Hao，et al．Effect of ultrasonic impact on the friction and wear properties of chromized layer of 65Mn steel[J]．Surface Technology，2022，51(1)：52-59.（In Chinese）

[20] 曹修全，何家荣，王林，等．搭接率对65Mn钢表面淬火组织性能的影响规律[J]．表面技术，2025，54(23)：253-264.
Cao Xiuquan，He Jiarong，Wang Lin，et al．Effect of overlap ratio on the microstructure and properties of surface-hardened 65Mn steel[J]．Surface Technology，2025，54(23)：253-264.（In Chinese）

[21] 狄彦军，平玲玲，徐学明，等．等温球化退火对热轧态65Mn钢组织与性能的影响[J]．金属热处理，2025，50(10)：192-197.
Di Yanjun，Ping Lingling，Xu Xueming，et al．Effect of isothermal spheroidizing annealing on microstructure and properties of hot-rolled 65Mn steel[J]．Heat Treatment of Metals，2025，50(10)：192-197.（In Chinese）

[22] 杨宾，王琳，申航睿，等．热处理温度对盐浴淬火65Mn钢组织与力学性能的影响[J]．金属热处理，2025，50(2)：102-106.
Yang Bin，Wang Lin，Shen Hangrui，et al．Effect of heat treatment temperature on microstructure and mechanical properties of salt bath quenched 65 Mn steel[J]．Heat Treatment of Metals，2025，50(2)：102-106.（In Chinese）

[23] 李红英，苏雄杰，陈广，等．回火工艺对65Mn钢疲劳裂纹扩展行为的影响[J]．材料科学与工艺，2013，21(5)：82-87.
Li Hongying，Su Xiongjie，Chen Guang，et al．Effects of tempering process on fatigue crack propagation behavior of 65Mn spring steels[J]．Materials Science and Technology，2013，21(5)：82-87.（In Chinese）

[24] 高滋翔，刘宁宁．GTG训练法在高校公共体育教学中的实证研究——对男大学生力量素质及坐位体前屈的影响[J]．福建体育科技，2025，44(6)：114-118.
Gao Zixiang，Liu Ningning．Empirical research on the GTG training method in college public physical education teaching：influence on the strength quality and sit and reach of male college students[J]．Fujian Sports Science and Technology，2025，44(6)：114-118.（In Chinese）

[25] 刘宁宁,李金莎. 大学生体态的认知特征及其影响因素探讨[J]. 青少年体育,2025(4):20-24.
Liu Ningning, Li Jinsha. Exploration of the cognitive characteristics of college students' posture and its influencing factors[J]. Youth Sport,2025(4):20-24. (In Chinese)

[26] Cen Y D, Chen L, Dong R, et al. Effect of quenching rate on fatigue crack growth of hypereutectoid rail steel[J]. Journal of Materials Science,2020,55(30):15033-15042.

[27] Gao G H, Liu R, Fan Y S, et al. Mechanism of subsurface microstructural fatigue crack initiation during high and very-high cycle fatigue of advanced bainitic steels[J]. Journal of Materials Science & Technology,2022,108:142-157.

[28] 吴乔国,陈学东,范志超,等. 不同应力比下疲劳裂纹扩展速率的改进公式[J]. 机械强度,2017,39(1):160-165.
Wu Qiaoguo, Chen Xuedong, Fan Zhichao, et al. Improved formula for fatigue crack growth rateunder different stress ratio[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(1): 160-165. (In Chinese)

[29] 包骐乐,代巧,邱睿. 基于DIC的工业纯钛缺口疲劳裂纹萌生及扩展表征[J]. 机械强度,2024,46(5):1258-1264.
Bao Qile, Dai Qiao, Qiu Rui. Characterization of notch fatigue crack initiation and propagation of industrial pure titanium based on DIC[J]. Journal of Mechanical Strength,2024,46(5):1258-1264. (In Chinese)

Bending fatigue crack propagation behavior of 65Mn spring steel for sports equipment

LIU Ningning[1] **CAO Jiamin**[2] **GAO Zixiang**[1] **LIU Jianfeng**[3]

(1. School of Physical Education, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

(2. Teaching Experiment and Training Center, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the fatigue fracture failure behavior of 65Mn spring steel for sports equipment, the evolution law of its fatigue fracture failure was revealed. [Methods] Optical microscope, scanning electron microscope, 3D microscope and digital image correlation (DIC) strain measurement system were adopted to analyze the microstructure, fracture morphology and fatigue crack growth characteristics of standard single-edge notched bend three (SENB3) specimens made of 65Mn spring steel under different stress ratios. [Results] The results show that under identical maximum loading stress, as the stress ratio increases from 0.1 to 0.5, the fatigue crack growth rate of the spring steel rises, and the fatigue fracture life decreases from 8.5×10^5 cycles to 4.1×10^5 cycles. The fatigue crack growth path transforms from a heavily deflected and bridged morphology to a relatively straight profile. Crack paths tend to deflect more severely and exhibit longer total crack length at low stress ratios than at high stress ratios. The strain values measured at 1 mm and 3 mm crack positions under low stress ratios are higher than those under high stress ratios. Fatigue fracture observations indicate that the fracture surfaces at low stress ratios are steep and tortuous, characterized by small facet planes and abundant secondary cracks. In contrast, the fracture surfaces at high stress ratios are gentle and smooth with large facet planes. At low stress ratios, the crack closure effect is significant and crack path deflection is pronounced, which reduces the fatigue crack growth rate.

Key words: Sports equipment; 65Mn spring steel; Fatigue; Crack propagation; Structure

Corresponding author: LIU Ningning, E-mail: dtlnn2016@163.com

Fund: National Training Program of Innovation and Entrepreneurship for College Students (202310120003); Shanxi Datong University Horizontal Project (202505004)

Received: 2026-06-03 Revised: 2026-07-04 (编辑:刘欢欢)