

# 低温对 EH36 钢循环软化和硬化的影响

郭雨帆 李建光

西南林业大学土木工程学院

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7259

**[摘要]** 钢材在实际运用中经常会遭受循环荷载冲击，导致发生循环硬化和循环软化，从而使构件过早断裂失效。本文研究了不同温度下 EH36 钢循环软化和循环硬化的关系。通过对 EH36 钢进行低温等应变幅循环加载试验，研究分析 EH36 钢不同温度下循环变形行为和疲劳寿命。研究表明，随着温度的降低钢材的疲劳寿命也随之减少，其中在 20℃-0℃ 范围内时下降明显，在 0℃ 至 -40℃ 范围内时下降较为平缓。研究不同温度下特定循环周次的应力-应变滞回曲线发现，随着疲劳寿命的增加，试件表现出循环硬化行为，当硬化到最大值，试件开始循环软化现象。此外，还讨论了循环硬化循环软化与疲劳寿命的关系，得出在低温状态下，试件的脆性会增加。研究结果有助于 EH36 钢在低温环境下的运用和分析。

**[关键词]** 低周疲劳；循环荷载；滞回曲线；循环软硬化

## Effect of low temperature on the cyclic softening and hardening of EH 36 steel

Guo Yufan and Li Jianguang

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University

**[Abstract]** Steel in the actual application often suffers from cyclic load impact, resulting in cyclic hardening and cyclic softening, so that the component premature fracture and failure. In this paper, we study the relationship between cyclic softening and cyclic hardening of EH 36 steel at different temperatures. The cyclic deformation behavior and fatigue life of EH 36 steel were studied and analyzed in EH 36 steel. The study shows that the fatigue life of steel also decreases with the decrease of temperature, especially in the range of 20℃ -0℃, and the decrease is relatively gentle in the range of 0℃ to -40℃. The stress-strain retardation curve of specific cyclic cycles at different temperatures found that with the increase of fatigue life, the specimen showed cyclic hardening behavior. When the hardening reached the maximum value, the specimen began to soften. In addition, the relationship between cyclic hardening and cyclic softening and fatigue life is also discussed. It is concluded that the brittleness of the specimen will increase at low temperature. The research results are helpful for the application and analysis of EH 36 steel in low temperature environment.

**[Key words]** low weekly fatigue; cyclic load; stagnation curve; cyclic soft hardening

### 1 引言

随着社会的发展，基础设施建设也在不断升级和完善，以满足人们对更高效、更便捷的生活方式的需求。其中，钢材作为一种钢材是一种广泛应用于建筑、桥梁和其他结构中的重要工程材料。EH36 钢它具有高强度、优良的高韧性和耐久性等特点，因此受到了广泛研究和应用。正因如此，Wang<sup>[1]</sup>等通过对“雪龙 1 号”极地破冰船 EH36 钢在不同温度下的拉伸试验和疲劳行为，获得了材料力学性能和低温疲劳裂纹扩展特性，Zhu<sup>[2]</sup>等通过室温下的疲劳裂纹扩展速率测试和断裂韧性测试研究了 EH36 钢的疲劳裂纹扩展行为和断裂韧性，建立了 EH36 钢微观断口形貌与断裂韧性之间的关系。EH36 钢的屈服强度和抗拉强度会随温度的降低而升高<sup>[3]</sup>。EH36 钢通常作业环境比较

恶劣，EH36 钢被广泛应用于海洋、船舶、桥梁、建筑等领域<sup>[4]</sup>。王钰<sup>[5]</sup>等学者通过用 Q690 高强度和 EH36 高强度，用热模拟和微区测试两种方法，研究了 EH36 钢的力学性能以及电学行为。为提高 EH36 钢的抗疲劳性能，Wang 等<sup>[6]</sup>学者对 EH36 钢进行 LSP 实验和疲劳测试，研究了光斑直径、激光冲击加工等对 EH36 焊件的疲劳裂纹扩展率的影响。在低温状态下，大多数金属钢材的力学性能会受到很大影响<sup>[7]</sup>。

目前，大多数学者研究 EH36 钢都是在常温条件下，低温下小变形循环硬化行为研究较少，作者通过使用电液伺服疲劳试验机并配备高低温湿热试验箱，模拟 EH36 船用钢材在低温时所受的交变荷载，研究了不同温度条件下该材料的力学性能及其疲劳寿命的影响。

## 2 材料加工及其实验方法

本次试验所用的 EH36 钢母材由湖南华菱湘潭钢铁有限公司生产。母材钢板的尺寸为 300mm×120mm×20mm，依据《GB/T 15248-2008 金属材料轴向等幅低循环疲劳实验方法》和《GB/T26077-2010 金属材料疲劳试验轴向应变控制方法》<sup>[8-9]</sup>设计的低周疲劳试样，将母材加工成试验所需要的试件如图 1 所示，平行段长度为 13.37mm。

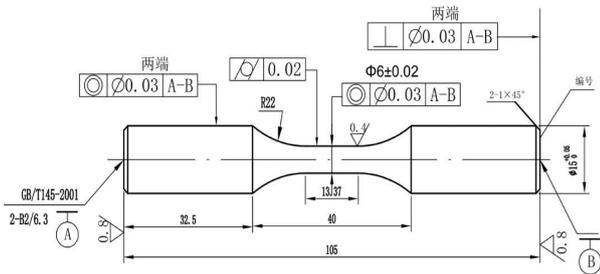


图 1 (Figure1) EH36 钢试样

金属材料的疲劳试验在专门的疲劳试验机上进行，高周疲劳和低周疲劳在不同的试验机上进行，低周疲劳试验所采用的是有电液伺服疲劳试验机如图 2 所示。该试验机采用的是中航试金石检测科技有限公司实验室的 MTS-100KN-12 型电液伺服疲劳试验机，并配备高低温湿热试验箱以确保试样是在预定的温度下进行。该实验在四个不同温度下进行，分别是 20℃、0℃、-20℃以及-40℃，所有试样均是在全自动数控机床进行打磨加工，本实验应变范围为 1.2%，循环加载波形为三角波，应变比 R=-1。

## 3 试验结果分析

### 3.1 疲劳寿命与温度的关系

通过试验可得，EH36 钢在不同温度下的循环次数有所差异，试验结果如图 2 所示

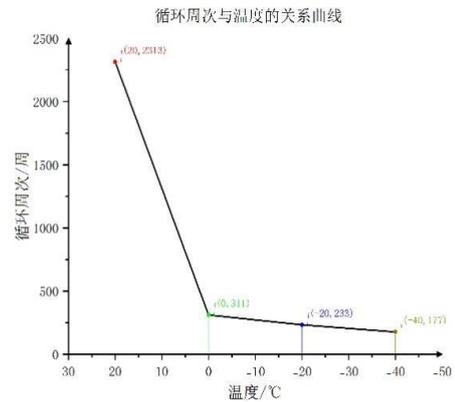


图 2 (Figure2) 循环周次与温度的关系曲线

由图 2 可得，在等应变幅 1.2%下，随着温度的降低材料的循环次数也在减少。温度在 20℃-0℃时，循环次数从 2313 周下降到 311 周，0℃到-40℃时循环次数从 311 周下降到 177 周，得出 EH36 钢低周疲劳寿命随温度的降低而减少。

### 3.2 应力-应变滞回曲线下的循环硬化软化现象

为了方便更好的反映 EH36 在不同温度下的循环荷载变化情况，选取不同温度下的特定周次的滞回曲线。不同温度下的应力-应变滞回曲线如图 3 (a)、(b)、(c)、(d) 所示。

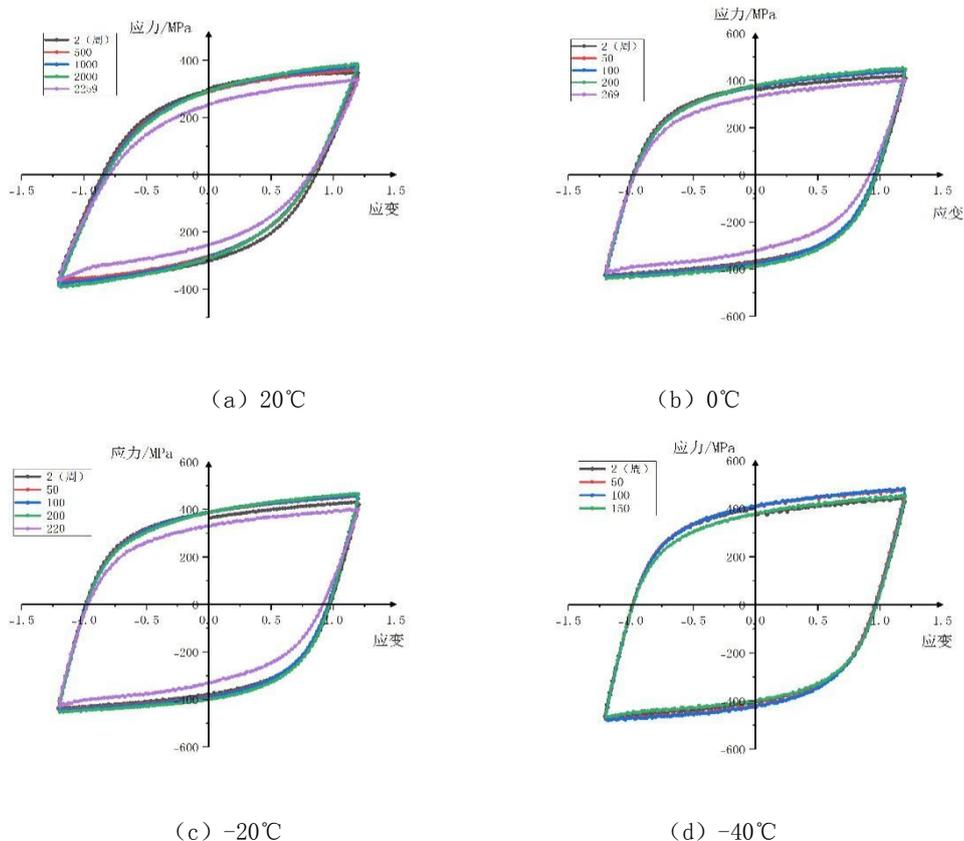
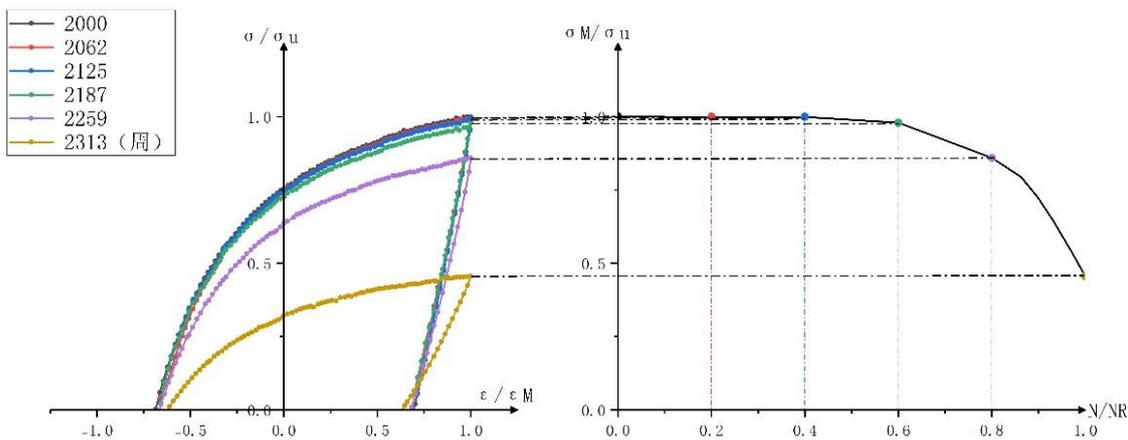


图 3 (Figure3) 不同温度下的特定滞回曲线

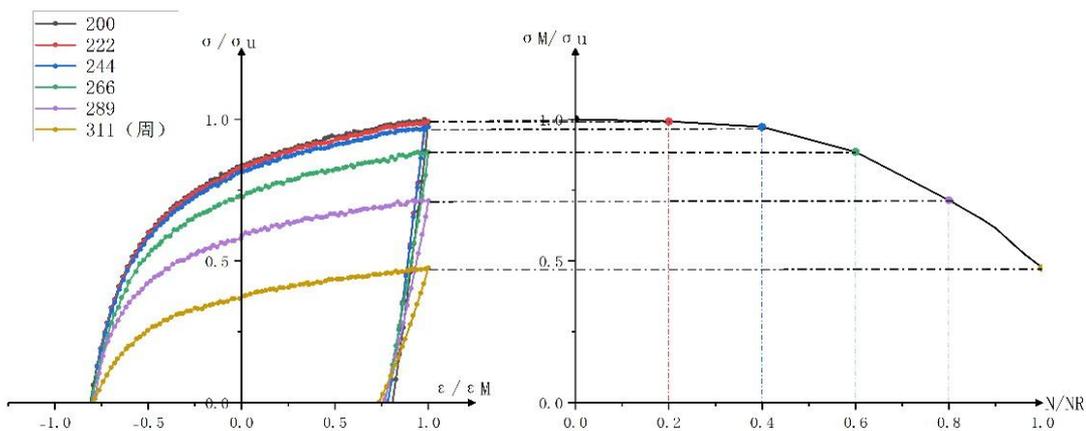
由图 3 可以看出, 随着循环周次的增加, 在等应变幅下循环应力逐渐增加, 称为循环硬化, 反之则称为循环软化。循环硬化表示材料抵抗变形的能力在逐渐提高, 循环软化则表示材料抵抗变形的能力在逐渐降低。从滞回曲线上看, 不同温度下的滞回曲线相差较为明显, 常温下第 500 周和第 1000 周的曲线相差很小, 0℃、-20℃下第 50 周和第 100 周的曲线相差很小, 表明第 500 周后常温下的 EH36 钢逐渐进入循环稳定状态, 低温下在第 50 周后进入循环稳定状态。

滞回曲线它反映了试件在受到反复循环力的作用下的变

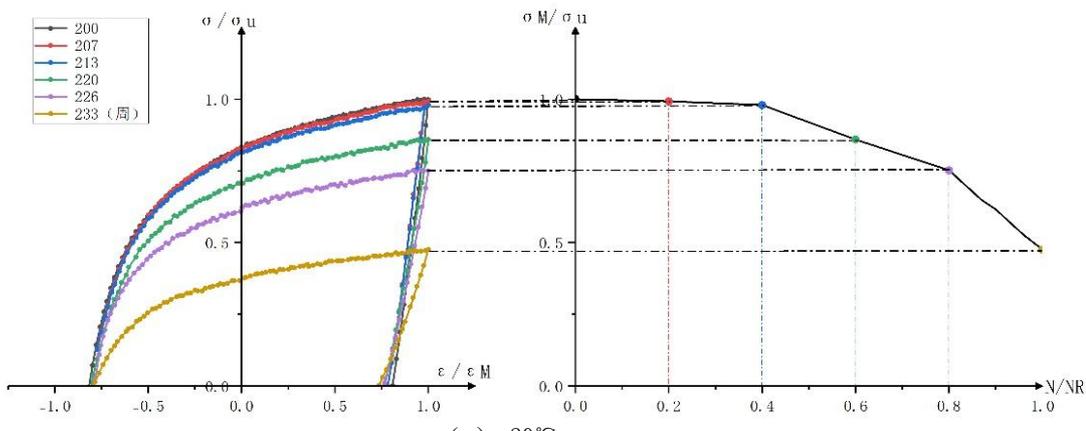
形特征。当试件受到超过弹性变形的极限时, 会发生塑性变形, 力卸载后不能恢复到原始状态, 这种残余变形会形成一个滞回环。滞回环所围成的面积表示在循环力作用下吸收与恢复时的能量差。从图 3 中看出常温下应力-应变滞回曲线的面积比低温情况下的应力-应变滞回曲线围成的面积小, 表示常温下 EH36 钢消耗的能量比低温下消耗的能量少。从低温来看, 三个温度的应力-应变滞回曲线大致相同, 虽然不同温度的峰值有所差异, 但围成的面积大致相同, 表明低温下 EH36 钢所耗散的能量基本一致。



(a) 20℃



(b) 0℃



(c) -20℃

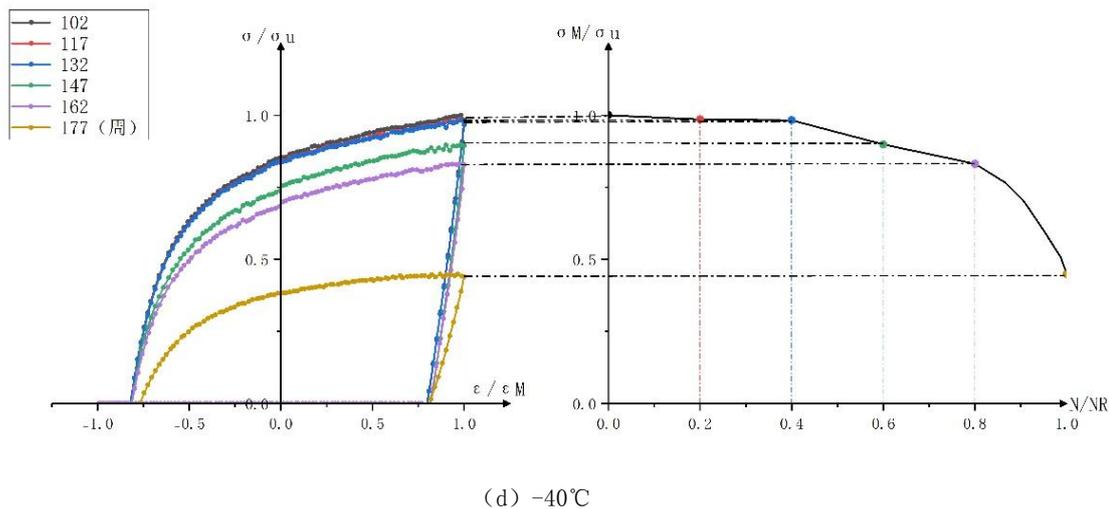


图4 (Figure4) 应力比与周次比之间的关系

### 3.3 循环硬化后应力比与周次比之间的关系

随着循环周次的增加,循环硬化逐渐达到最高值,试件开始循环软化直至断裂。选取特定周次的滞回曲线,以 $\varepsilon/\varepsilon_u$ 为X轴, $\sigma/\sigma_u$ 为Y轴创建坐标系。得出应力比与应变比之间的关系。 $\varepsilon/\varepsilon_u$ 即表示每周的应变与该周的最大应变的比值, $\sigma/\sigma_u$ 即表示特定周次的应力与整个循环的应力最大值的比值,如图4(a)、(b)、(c)、(d)所示。

从图中可以看出,不同温度下的EH36钢在达到应力最大周次后应力没有明显的下降,滞回曲线与最大应力的滞回曲线大致相同,说明EH36钢的抗拉压性能较强。其中,常温下是从循环硬化后与剩余周次比值的0.6左右开始明显下降,而低温下是从0.4左右开始明显下降,说明与常温相比,在低温环境下EH36钢的脆性更高。

## 4 总结

通过对EH36型钢进行一系列的应力-应变循环试验和数据处理,得出以下结论:

(1)在等应变幅的情况下,在20°C到-40°C的温度范围内,疲劳寿命随着温度的降低逐渐减少,其中,常温到0°C疲劳寿命下降的较为明显,从2313周下降到311周。0°C到-40°C下降较为缓慢,从311周下降至177周。

(2)在相同的应变幅下,EH36钢在不同温度条件下的应力-应变滞回曲线,随着循环周次的增加,每个周次的应力最大值在逐渐增加,应力最小值逐渐减小,称为应力硬化现象。应力最大值增加到一定程度后,开始随着周次的增加逐渐减小,应力最小值逐渐增大,此称为应力软化现象。

(3)由图4可知,在等应变幅的情况下,EH36钢常温状态下周次达到2000次时滞回曲线应力达到最大值,0°C下200次应力达到最大值,-20°C温度下000次应力达到最大值,-40°C下000次应力达到最大。当应力达到最大值后,即循环硬化结束,开始循环软化,各个温度下的应力最大值开始降低,但降低幅度有所不同,从图4可得,常温下周次比在0.6左右有明

显降低,而低温状态下周次比在0.4左右有明显降低,说明随着温度的降低,EH36钢的脆性越大。

### [参考文献]

[1]Wang K, W-u L, Li Y, et al. Experimental study on low temperature fatigue performance of polar icebreaking ship steel[J]. Ocean Engineering, 2020, 216: 107789.

[2]Zhu Qingyan, Zhang Peng, Peng Xingdong, Yan Ling, Li Guanglong. Fatigue Crack Growth Behavior and Fracture Toughness of EH36 TMCP Steel[J]. Materials, 2021, 14 (21).

[3]Qiao K, Liu Z, Sun Z, et al. Effects of low temperature overload and cycling temperature on fatigue crack growth behavior of ship steels in Arctic environments[J]. Ocean Engineering, 2023, 288: 116090.

[4]王颖,宋宗贤,王东坡,等.EH36钢焊接接头在超长寿命区间的疲劳性能[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(05):453-457.

[5]王钰.海洋工程用高强度钢焊接接头组织、力学性能及电化学行为研究[D].佛山科学技术学院,2020.DOI:10.27960/d.cnki.gfskj.2020.000173.

[8]中国航空工业总公司.GB/T 15248-2008 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法[S].北京:中国标准出版社,2008.

[9]中国航空工业总公司.GB/T26077-2010 金属材料疲劳试验轴向应变控制方法[S].北京:中国标准出版社,2010.

作者简介:郭雨帆(2000.6-),男,汉族,籍贯:河南鹤壁人,西南林业大学土木工程学院,22级在读研究生,硕士学位,专业:土木水利,研究方向:金属材料力学性能;

通讯作者:李建光(1969.12-),男,汉族,博士学位,西南林业大学土木工程学院,副教授。