

L605 钴基合金室温低周疲劳测试

EHF-004

摘要：本文依据《ASTM E606-2021 应变控制疲劳试验方法》标准，采用岛津 EHF 系列电液伺服疲劳试验系统，在室温条件下对 L605 钴基合金开展了不同应变幅的低周疲劳测试。结果表明，岛津 EHF 系列试验机具备高精度的应力与应变控制能力，适用于复杂加载条件下的高精度重复加载试验。该合金在循环加载下呈现先硬化后软化的典型循环应力响应特征。通过获取应变 - 寿命曲线，为更好揭示材料在塑性应变控制下的裂纹萌生与扩展行为，为实际工况下部件的寿命预测提供了基础数据。

关键词：L605 合金 低周疲劳性能 应变控制

技术特点：

- ❖ EHF 系列疲劳机和 4830 控制器稳定性高，能够精确评估 L605 合金的低周疲劳性能。
- ❖ Servo 4830 软件操作界面友好，数据查看分析便捷、直观、高效。

L605 钴基合金（固溶强化型高温合金）因其优异的高温强度、抗氧化性及良好的生物相容性，广泛应用于航空发动机燃烧室、燃气轮机热端部件及心血管支架等关键领域。这些应用场景普遍面临复杂的热 - 力耦合服役环境，部件在频繁启停、热循环或脉动载荷作用下，往往承受高于弹性极限的交变应变，导致材料在相对较低的循环周次内发生失效——即典型的低周疲劳行为。因此，系统开展 L605 合金的低周疲劳测试，不仅是评估其工程可靠性的必要手段，更是支撑部件寿命预测与结构优化的核心基础。

低周疲劳测试的核心在于模拟部件在真实工况下的塑性应变主导失效过程。通过控制应变幅、温度及加载波形等参数，能够获取材料的循环应力响应、Manson-Coffin 寿命曲线及裂纹萌生与扩展机制。对于 L605 合金而言，其微观组织中的碳化物分布、晶粒尺寸及固溶强化元素的均匀性，均对疲劳性能产生

显著影响。测试结果可揭示合金在循环加载下的软化 / 硬化行为、氧化与疲劳的交互作用，以及微观结构损伤演化规律，为热处理工艺优化、加工参数调整及失效预防提供直接依据。

在工程应用层面，低周疲劳测试数据是建立材料本构模型和疲劳寿命预测方法的关键输入。对于航空发动机热端部件，测试结果有助于确定安全检修周期与设计许用应变水平；对于心血管支架等微型器件，低周疲劳测试则用于评估其在数亿次脉动循环下的结构完整性，是产品通过临床认证的重要依据。因此，围绕 L605 合金开展系统的低周疲劳测试，兼具理论研究价值与工程应用意义。

本报告围绕 L605 合金在室温条件下的低周疲劳行为展开研究，系统分析其循环变形特性、寿命规律及微观损伤机制，为该合金在高端装备与医疗器件中的可靠应用提供数据支撑与理论参考。

实验部分

1.1 仪器

EHF-UV050K2A（配有 4830 伺服控制器）

Servo 4830 软件

1.2 分析条件

试验类型：疲劳 / 耐久测试

传感器容量：±50 kN

试验力精度：0.5 级

试验行程：±50 mm

引伸计标距 GL：12 mm

引伸计线性度：≤ 满量程的 0.15%

■ 试验介绍

本研究遵循《ASTM E606-2021 应变控制疲劳试验方法》标准，开展室温条件下应变控制的低周疲劳试验。试验采用轴向对称应变控制方式，加载波形选用三角波（应变速率一定），在应变比 $R=-1$ 条件下进行拉-压疲劳加载，设置应变幅 $\Delta\varepsilon/2$ 分别为 $\pm 0.4\%$ 、 $\pm 0.6\%$ 、 $\pm 0.8\%$ 和 $\pm 1.0\%$ 。疲劳试验过程中，采用标距为 12 mm 的轴向引伸计实时监测试样应变，并利用疲劳测试系统中的测压元件同步采集应力响为确保试验结果的可靠性，各试验条件下均测试 2 根试样，低周疲劳试验应在 20000 次循环之前停止。图 1 为 EHF-U 电液伺服疲劳试验机和 4830 伺服控制器，图 2 为低周疲劳样品尺寸和形状图，图 3 为带有引伸计夹持的测试样品图，表 1 为试验条件，表 2 为应变幅值、位移值和应变速率。



图 1 EHF-U 电液伺服疲劳试验机和 4830 伺服控制器

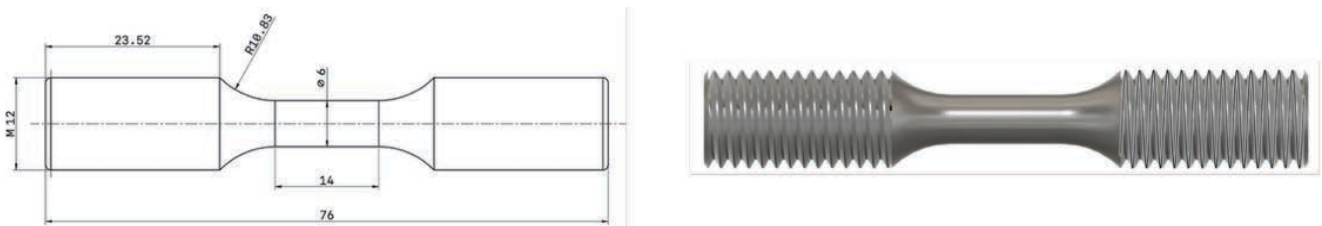


图 2 低周疲劳样品尺寸和形状图

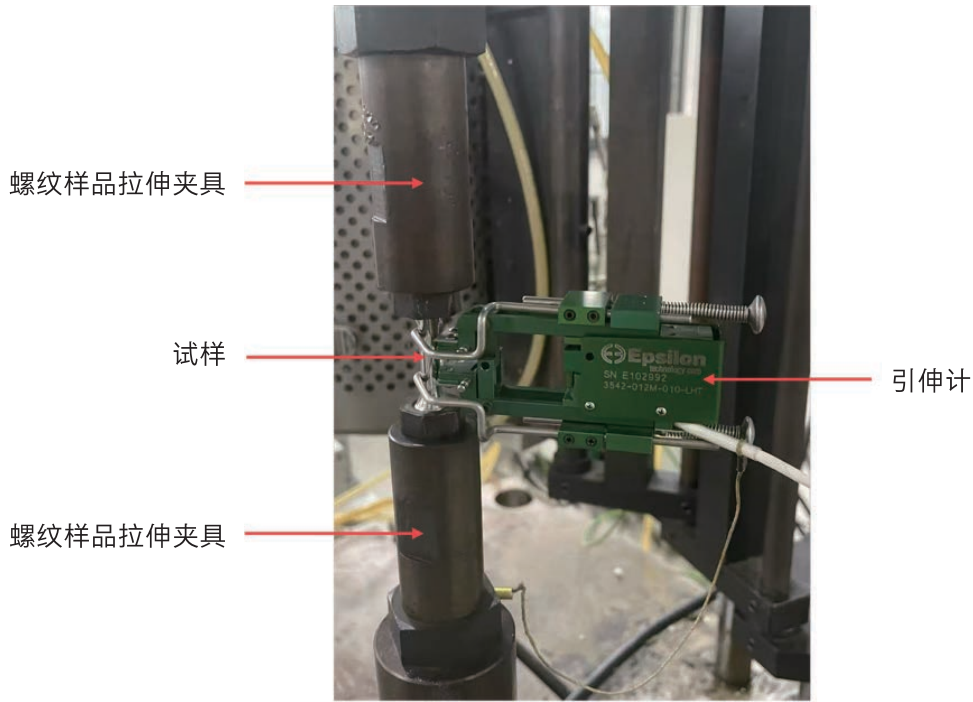


图3 试验测试过程图

表1 试验条件

参数	参数设定
试验类型	疲劳 / 耐久测试
仪器	EHF-UV050 疲劳试验机
控制器	4830 控制器
载荷传感器	±50 kN
波形	三角波 (应变速率一定)
应变比 R	-1
应变幅 $\Delta\varepsilon/2$	±0.4%、±0.6%、±0.8%、1.0%

表2 应变幅值、位移值和应变速率

应变幅 $\Delta\varepsilon/2$ (%)	标距 (GL=12mm) 位移 (mm)	应变速率 (S^{-1})
±0.4	±0.048	0.007854
±0.6	±0.072	
±0.8	±0.096	
±1.0	±0.120	

■ 试验结果

图 4 显示室温条件下低周疲劳不同应变水平循环应力响应曲线。应变幅值随疲劳寿命的演化曲线可描述材料的循环软化或循环硬化行为，循环应力响应曲线在应变幅 $\Delta\varepsilon/2$ 为 $\pm 0.6\%$ 、 $\pm 0.8\%$ 、 1.0% 时具有相似的特征，即从第 1 个到第 10 个循环应力明显增加，合金呈现出循环硬化特征；第 10 个至第 200 个循环应力出现下降趋势，呈现出循环软化特征，此后应力缓慢下降直至断裂。

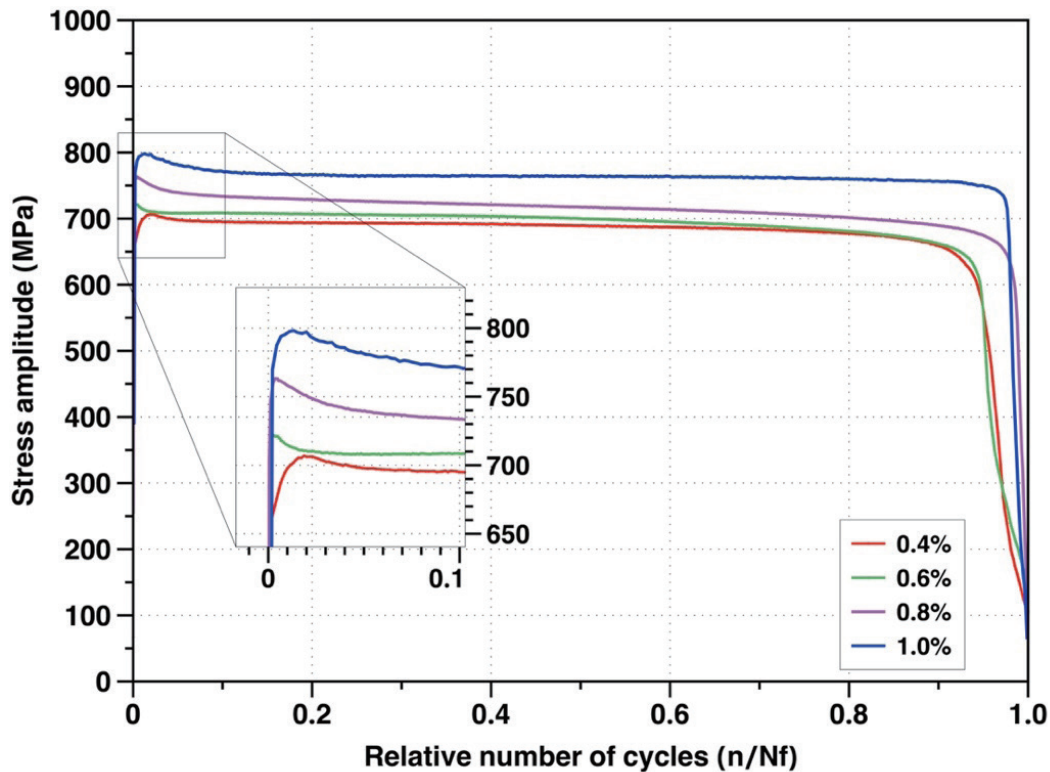


图 4 循环应力应变响应图

图 5 为室温条件下不同应变幅值下的半寿命循环应力 - 应变滞回曲线。滞回曲线反映了在一个循环周期内应力随应变的变化规律。滞回环的宽度表征塑性应变幅 $\Delta\varepsilon_p$ ，其高度即为应力幅。由图可知，滞回环的宽度与应力幅均随应变幅值的增加而增大，表现出一致的变化趋势。循环应力 - 应变滞回曲线表明，材料在疲劳过程中同时发生弹性变形与塑性变形；滞回环所围面积可用于衡量材料在单个循环中所耗散的塑性应变能。可以看出，随着应变幅值的增大，滞回环包围的面积逐渐增加，材料的塑性应变能相应提高。结合疲劳寿命曲线可知，塑性变形对疲劳寿命的影响程度随应变幅值的增大而增强。

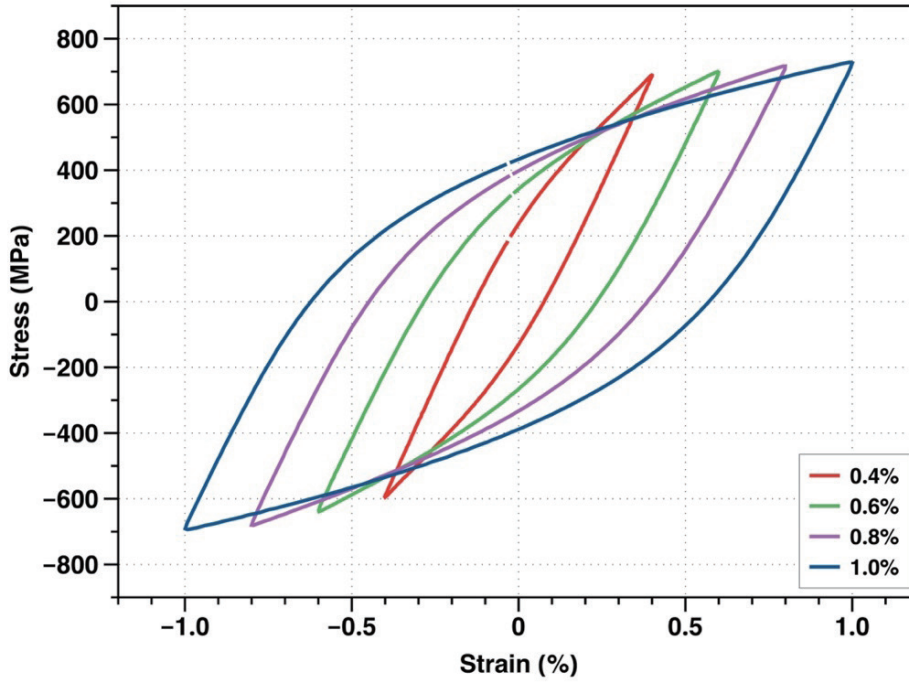


图 5 不同应变幅值半寿命滞回曲线

图 6 为室温条件下不同应变幅值 - 疲劳寿命关系图。可知随着应变幅值的增加，疲劳寿命呈现明显降低趋势。

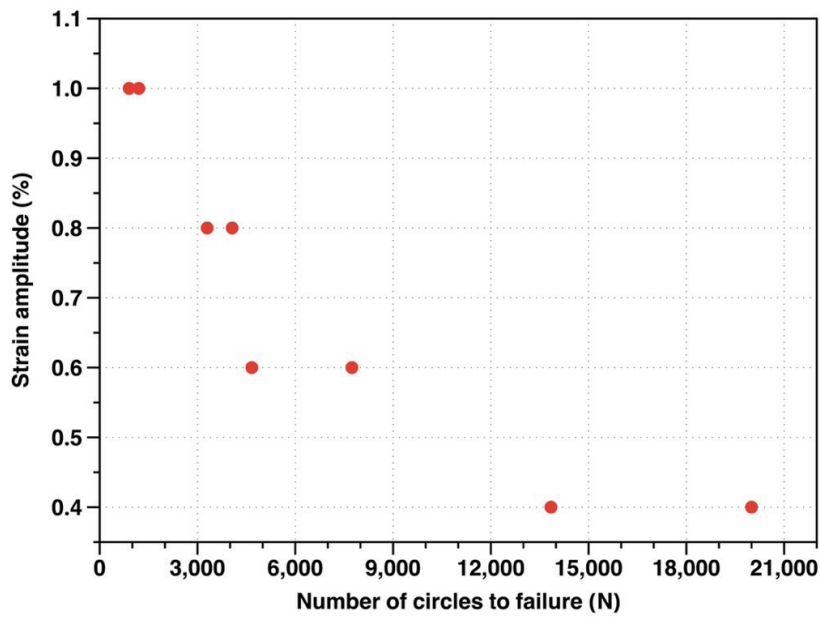


图 6 应变幅—疲劳寿命关系图

■ 结论

本研究系统开展了 L605 合金在室温条件下的低周疲劳性能测试，明确了其在不同应变幅下的循环应力响应规律，表现为先循环硬化后循环软化的典型特征。试验数据成功构建了应变 - 寿命曲线，揭示了材料在塑性应变控制下的疲劳损伤演化过程。岛津 EHF 系列疲劳试验机凭借其高精度的应力与应变控制能力，有效支撑了复杂加载条件下重复加载试验的稳定执行。该工作为 L605 合金在热端部件及医疗植入物等领域的工程应用提供了可靠的疲劳性能基础数据，并为其服役寿命评估与结构设计优化奠定了试验基础。

岛津应用云

