

# 表面超声强化对 35CrMo 钢腐蚀疲劳性能的影响

刘宇 李金航 李禄亨

(吉林大学机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘要:** 采用超声冲击/滚压复合强化处理 35CrMo 钢表面, 分析强化表层的微观组织和硬度及强化前后的预腐蚀疲劳性能。试验结果表明, 在超声冲击/滚压复合强化处理后, 35CrMo 钢表层发生了强烈塑性变形, 微观组织明显细化。随着向基体深入, 微观组织逐渐过渡到与基体一致。在相同的实验条件下, 未强化试样的表面发生严重腐蚀, 而强化试样表面的腐蚀痕迹较少且浅。在相同的应力水平下, 强化试样的疲劳寿命显著高于未强化试样的疲劳寿命。

**关键词:** 35CrMo 钢; 超声强化; 腐蚀; 疲劳

近年来, 我国的高速铁路发展迅速, 高速动车组逐渐成为铁路客运的主力军。动车组的运行品质、动力性能和行车安全关键在于转向架的结构和性能, 而轮对车轴又是转向架的重要组成部分, 在机车运行过程中不仅承受车身自重、车轮转动产生的弯曲载荷、牵引齿轮传递的扭矩以及因蛇形运动造成的轴向载荷, 还要承受来自线路的冲击及振动产生的附加载荷, 是危险极易发生的部位。车轴的主要失效形式为疲劳破坏。受服役环境的影响, 疲劳过程往往还伴随着腐蚀的发生。腐蚀加速了疲劳破坏, 使原本的疲劳寿命严重缩短。腐蚀和疲劳均从表面开始。显然, 车轴的表面质量是决定其腐蚀疲劳性能的关键因素。为了降低失效事故的发生概率, 极大地延长服役寿命, 必须对车轴表面进行强化处理。

国内外普遍采用的车轴表面强化方法包括高频淬火处理、滚压、高能喷丸等, 效果均不够理想, 某些工艺下的表面粗糙度得不到保证, 无法提高腐蚀疲劳性能。超声冲击/滚压复合强化处理可以在很大程度上兼顾上述方法的优点, 同时消除表面粗糙度对腐蚀疲劳带来的不良影响。本文选用车轴常用材料 35CrMo, 对其进行超声冲击/滚压复合强化处理, 对强化表面进行表征并测试其腐蚀疲劳性能, 据此评价超声强化对腐蚀疲劳性能的影响。

## 一、试验材料及方法

本文采用的试验材料为 35CrMo 钢, 其化学成分及力学性能见表 1 和表 2。

表 1 35CrMo 钢的化学成分 (wt.%)

C	Si	Mn
0.32~0.40	0.1 ~ 0.37	0.40 ~ 0.70
P	S	Cr
≤ 0.03	≤ 0.03	0.8 ~ 1.10
Mo	Ni	Cu
0.15 ~ 0.25	≤ 0.30	≤ 0.30

表 2 35CrMo 钢的力学性能

屈服强度	抗拉强度	延伸率	硬度
835MPa	985MPa	12%	18 (HRC)

35CrMo 钢疲劳试样形式如图 1 所示。

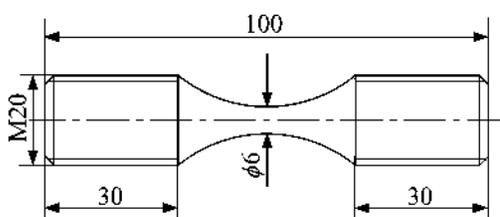


图 1 疲劳试样形状及尺寸

对疲劳试样的表面进行超声冲击/滚压复合强化处理。处理参数为: 主轴转速 246 r/min, 轴向进给 10mm/min, 输出振幅 10 μm, 静压力 600N, 往复处理 3 遍。考虑到疲劳试样的形式, 断裂必然发生于中间段, 故对中间圆弧段沿轴向处理 20mm。

对超声冲击/滚压复合强化处理前后的疲劳试样进行电化学腐蚀。腐蚀在质量分数为 4% 的 NaCl 溶液中进行, 腐蚀电压 15V, 腐蚀电流 2A, 腐蚀时间 4h。采用铂电极作为阳极, 阴极连接疲劳试样的中间部分, 如图 2 所示。

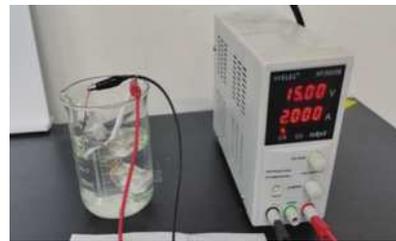


图 2 电化学腐蚀实验

腐蚀完毕后, 在 HYG-50 型高频疲劳试验机上进行超声冲击/滚压复合强化处理前后两组试样的疲劳试验。采用拉-拉加载方式, 应力比为 R=0.1, 最大载荷循环次数为 107。

此外, 对超声冲击/滚压复合强化 35CrMo 钢的表层进行金相观察。金相试样的制备步骤为: 切取包含强化表面在内的 10'10'10mm 试样; 对试样进行镶嵌, 使侧面露于外部; 采用 400~2000# 水砂纸依次打磨试样表面, 再用 0.5 μm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末抛光, 最后采用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀。

## 二、试验结果及分析

### (一) 超声强化 35CrMo 钢表层微观组织

35CrMo 钢经超声冲击/滚压复合强化处理后的断面形貌如图 3 所示。金相组织主要为珠光体及贝氏体。

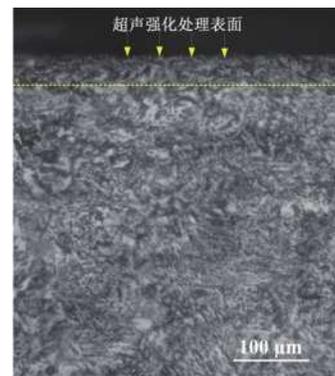


图 3 超声强化 35CrMo 钢表层微观组织

超声冲击/滚压复合强化处理后, 表层产生了严重的塑性变形。表层的微观结构得到细化, 使其在金相照片中看起来更加致密,

相分布也更加均匀。同时,从表层还能看出塑性流动的方向。这是因为在超声冲击/滚压的复合作用下,表层材料塑性变形的方向与剪切应力的方向趋于一致,微观组织在剪应力的方向上被挤压拉长。由于塑性变形呈梯度下降,随着向基体的深入,晶粒逐渐增大到原始尺寸。

### (二) 电化学腐蚀 35CrMo 钢表面形貌

图 4 为 35CrMo 钢在 NaCl 溶液中电化学腐蚀 4 小时后的表面形貌。从图 4 (a) 中可以看出,未超声强化的疲劳试样表面均匀分布着大块的腐蚀痕迹,原始表面几乎被锈迹所覆盖。鉴于被腐蚀材料为铁基合金钢,故锈迹呈现典型的红褐色,且腐蚀坑较深,表面被严重破坏。

从图 4 (b) 中可以看出,超声强化的疲劳试样表面也出现了腐蚀痕迹,但腐蚀的程度明显轻于未超声强化的疲劳试样。试样中间圆弧段仍有较大面积的表面较为光滑平整,未受腐蚀环境影响。靠近夹持端两侧的区域,腐蚀逐渐严重。这是因为超声强化处理区域为沿轴向长 20mm 的中间圆弧段。腐蚀严重的区域已不在超声强化的范围内。

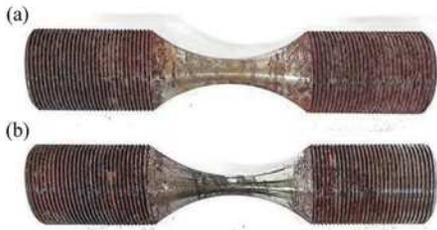


图 4 电化学腐蚀 35CrMo 钢表面形貌: (a) 未超声强化; (b) 超声强化

此外,超声强化处理区域内的腐蚀痕迹较浅,受腐蚀环境影响的表面仅限于最外层,次表面无明显破损,也未观察到大量传统意义上带有一定深度的腐蚀坑。在图 4 (b) 中试样中间段表面上观察到的腐蚀痕迹有一部分是附着在试样表面的铜锈。这部分铜锈来自缠绕在试样中间段的导电铜丝。一般情况下,铁比铜更容易被腐蚀。这是因为铁在金属活动性顺序中的位置比铜靠前,在腐蚀环境中更容易失去电子,形成阳极反应,从而发生氧化腐蚀。在超声强化试样表面观察到铜锈说明在相同的腐蚀时间内,超声强化不仅可以极大地延缓腐蚀过程,更可以在某种程度上“调节”被强化材料的腐蚀电位,使其能够适应更严苛的服役环境。

### (三) 超声强化 35CrMo 钢疲劳性能

在电化学腐蚀结束后,立即对 35CrMo 钢疲劳试样进行疲劳试验,每组应力水平测试 3 个试样,试验数据如图 5 所示。图中的箭头表示试样在载荷循环到 107 后仍未发生断裂。

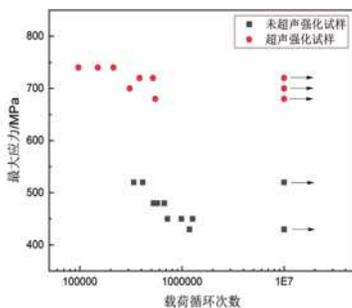


图 5 超声强化处理前后预腐蚀 35CrMo 钢的疲劳数据  
受预腐蚀情况的影响,两组试样的疲劳数据均出现一定波动;

但可以看出,在相同的载荷循环次数下,超声强化试样的疲劳强度显著高于未超声强化试样的疲劳强度。当最大应力降至 420MPa 后,所有的未超声强化试样在载荷循环 107 后均未发生断裂;而对于超声强化试样,当最大应力为 660MPa 时,试样便不再断裂。这一应力值甚至比未超声强化试样所用的最高应力水平(520MPa)还要高。超声强化试样所用的最高应力水平(740MPa)更是非常逼近 35CrMo 钢的屈服强度。

预腐蚀后,材料的疲劳极限通常会降低。因此,试验中设置的最大应力水平应该低于材料未腐蚀时的最大应力水平,如本试验中未超声强化试样的最高应力水平(520MPa)即低于 35CrMo 钢抗拉强度的 60%(591MPa)。然而,超声强化试样的疲劳强度没有受到腐蚀环境的明显影响。这与图 4 中电化学腐蚀之后观察到的表面形貌是相对应的。未超声强化试样的表面分布着大面积的腐蚀坑。在循环应力的作用下,裂纹从试样横截面较窄处的腐蚀坑快速萌生并向内扩展。具体的起裂位置在局部应力最大的腐蚀坑尖端。超声强化试样表面的腐蚀痕迹并没有发展到次表面,且大多数腐蚀痕迹来源于附着在试样表面的氧化铜。因此,表面几乎没有非常利于裂纹萌生的位置,故疲劳裂纹萌生的时间大大延长。此外,在裂纹扩展过程中,受腐蚀程度的影响,超声强化试样的截面积较未强化试样的大。这也会在一定程度上延长试样的疲劳寿命。

可见,超声强化处理能够极大地提高材料的腐蚀疲劳性能。超声强化处理后,试样表面的粗糙度明显降低。因此,在腐蚀环境中,实际参与阳极反应的微表面面积明显减小,且微表面之间形成的微型原电池数量也大幅度降低。此外,鉴于超声强化表层存在高数值的残余压应力,材料要发生氧化反应挣脱试样表面就需要更大的驱动力。这些因素在很大程度上延缓了腐蚀过程,故在相同的腐蚀时间(4h)内,超声强化试样表面还没发生大规模的腐蚀。同时,当疲劳裂纹开始向材料内部扩展时,表层的高硬度和高数值残余压应力又延缓了裂纹扩展的速度,使得最终的疲劳强度得到大幅度提升。

## 四、结论

(1) 超声冲击/滚压复合强化处理细化了 35CrMo 钢表层的微观组织。

(2) 在 4% NaCl 溶液中电化学腐蚀 4h 后,未超声强化试样的表面出现了较深的大面积腐蚀痕迹,而超声强化试样的腐蚀痕迹较少且浅。

(3) 在相同的载荷条件下,超声强化试样的疲劳寿命明显高于未超声强化试样的疲劳寿命。

## 参考文献:

- [1] 郑小花,刘名涛.车轴表面强化工艺研究[J].创新与实践,2021,28(6):26-28.
- [2] 王朝阳,黄俏梅,秦荣斌,丁志敏.超声滚压载荷对 25CrMo4 车轴钢表面强化特征的影响规律[J].特种加工,2024(1):48-52.
- [3] 王连庆,罗艳,吴圣川,谢普.喷丸强化对异物致损车轴钢疲劳性能的影响[J].机械设计与制造,2021(9):98-106.
- [4] 刘里根,肖棚,韩瑞鹏,赵海,等.铁路车轴表面强化技术研究与应用[J].表面技术,2023,52(6):96-111.

基金项目:吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20200954KJ)

作者简介:刘宇,女,博士,副教授;主要从事结构疲劳与断裂及表面改性的科研和教学工作,发表论文 50 余篇。