

# 车轴亚临界淬火后表面残余应力的实验研究

任栋

(太原工业学院 山西 太原 030000)

**摘要:** 车轴内部应力对车轴强度有一定影响,尤其是表面残余应力的大小更加重要,对车轴的疲劳寿命有着很大的影响。通过《AAR M-101》F级钢车轴表面的残余应力进行检测、研究发现,车轴经过亚临界淬火热处理工艺后,表面残余应力变成有利于车轴疲劳寿命的压应力,在后续的机械加工中不断优化机加工参数,也可以提高表面压应力。本文对车轴经过亚临界淬火后的表面参与应力进行实验测量及分析。

**关键词:** 车轴; 亚临界淬火; 表面残余应力; 机加工参数; 疲劳寿命

## 0 引言

车轴是铁路车辆走行部分的关键零部件之一,车轴的强度和疲劳寿命决定着车辆的安全与否。因此,在对车轴设计和加工过程中提出了更高要求,要求在加工过程中要严格执行工艺文件,还要不断研究新的制造工艺来提高车轴质量。美国铁路协会标准明确要求整个车轴加工过程中,必须按照文件要求对车轴热处理时有亚临界淬火这道热处理工艺。经过亚临界淬火热处理工艺,从而使车轴表面能够具有理想的残余应力值。同时,在欧洲车轴标准 BS EN13261《铁路应用—轮对和转向架—车轴—产品要求》中,也对车轴残余应力有明确要求,此标准中规定了残余应力值应该不大于 $+100\text{N/m}^2$ 。但是,以上的两个标准并没有规定车轴在亚临界淬火后对车轴表面的残余应力有明确指标要求。某些项目车轴表面残余应力要求为车轴亚临界淬火后表面残余应力要求为 $-207\text{N/m}^2$ ,也就是要求亚临界淬火热处理后表面为压应力。

## 1 表面具有残余应力时的作用

已经有文献表明,整个车轴的疲劳强度和疲劳寿命都与最终成品状态时的表面残余应力有很大关系。假设车轴表面层中有压应力 $\sigma$ ,那么当车轴在受到外界循环载荷时,表面的最大合应力由原来的 $\sigma_{\max}$ 降低为 $\sigma_{\max}-\sigma$ ,此时车轴表面层所受到的合应力比没有压应力时要低。虽然应力幅值没变,但是所受到的平均应力下降了。假设车轴表面层中有拉应力 $\sigma$ ,那么当车轴受到外界循环载荷的时候,表面的最大合应力就从原来的 $\sigma_{\max}$ 增大为 $\sigma_{\max}+\sigma$ ,这时车轴所受到的合应力就比没有残余应力时要大,而且很可能大于车

轴的疲劳强度,从而造成车轴的疲劳破坏。因此,从提高车轴表面抗疲劳破坏能力方面来说,更希望车轴表面具有的残余应力是压应力,而且压应力值大一些较好。

## 2 亚临界淬火工艺的研究

亚临界淬火热处理工艺是对调质热处理后的车轴加热到相变点以下的某一温度,再通过冷却处理的一种工艺。某项目车轴要求车轴在正火和回火后,进行半精加工,然后对半精加工后的车轴进行亚临界淬火处理,从而有效增加表面残余应力值。

车轴的材质要符合《AAR M-101》F级钢的要求,经锻造、热处理、粗车、精车、滚压等工序完成。其中锻造是通过精锻机进行锻造,始锻温度在 $1050\sim 1150^\circ\text{C}$ ,本次试验设定的锻造结束时温度值是 $950^\circ\text{C}$ 。热处理采用一次正火热处理加上一次回火热处理的方式,其中正火热处理的保温温度为 $880^\circ\text{C}$ ,回火热处理的保温温度为 $580^\circ\text{C}$ 。项目要求车轴半精加工后应进行亚临界淬火,亚临界淬火时车轴温度应加热至 $1000\sim 1050^\circ\text{F}$ 。亚临界淬火介质为水,亚临界淬火后车轴直径留有0.187英寸的精加工余量。根据国际标准对相应的数值进行换算,可以算出车轴在进行亚临界淬火热处理时加热温度需要控制在 $537\sim 565^\circ\text{C}$ ,车轴在进行淬火热处理前需要保留 $4\sim 5\text{mm}$ 的精加工余量。

### 2.1 亚临界淬火工艺试验

为了在生产时能够满足车轴的技术要求,首先通过对材质为《AAR M-101》F级钢车轴进行亚临界淬火热处理,然后检测热处理引起车轴力学性能以及车轴的微观组织的变化情况。通过对比车轴1/2半径处拉伸试验检测结果,可以对比出车轴在亚临界淬火热处理后

抗拉和屈服强度、延伸率和断面收缩率的值基本无差异；同时通过对比试验发现车轴的晶粒度值在热处理前后显微组织也无明显变化，显微组织都包含铁素体与珠光体。但是车轴在经过亚临界淬火后可以提升2%左右的表面抗拉强度，可以提升9%左右的屈服强度，仅仅稍微降低点延伸率与断面收缩率的值。通过试验发现，亚临界淬火工艺对车轴内部的力学性能和组织结构都影响不大，但却可以提高车轴表面的屈服强度，对提高车轴疲劳强度有明显的作。

## 2.2 亚临界淬火对车轴表面残余应力的影响

### 2.2.1 试验内容

在车轴热处理完以后，对车轴进行半精加工，半精加工后车轴表面粗糙度需达到Ra3.2。然后再将经过半精加工工序后的车轴进行下一个工序即亚临界淬火工艺处理，先将车轴加热温度为(570±10)℃，然后进行2h的保温。亚临界淬火热处理工艺所用的介质是水，水温需要保持在25~40℃，所以需要大量的水，整个淬火时间需满足0.5h，在淬火结束后车轴表面温度需要接近水温。最后再对车轴进行精加工，粗加工后加工余量保留3~4mm，然后再对精车以后的车轴表面检测其残余应力大小。

经过亚临界淬火后精加工完成的车轴如图所示，测量点位置是图中1、2、3、4、5的位置，位置1和位置2是车轴轮座中间、位置3是车轴中间位置、位置4和位置5靠近轴身到轴承座的过渡处，测试这5个点的车轴表面和近表面残余应力，检测方法采用的是X射线非破坏性检测方法。按照项目要求，车轴轴向方向表面的残余应力检测结果应大于-207MPa(-30000psi)。

### 2.2.2 残余应力测量结果

残余应力检测是检测的车轴表下0.1mm处的应力值，采用电解腐蚀方法去除车轴表面材质，根据国家标准GB/T 7704-1987《X射线应力测定方法》对车轴表面的残余应力进行测量。检测在图中1~5每个部位进行旋转120°测量，车轴一周360°每旋转120°测量1个点，一周测量3个点，测量结果见表。

表 车轴轴身表面残余应力检测结果 /MPa

测点位置	0°	120°	240°
部位1 (轴向表面)	-300	-305	-293
部位1 (径向表面)	-317	-319	-326
部位2 (轴向表面)	-324	-310	-332
部位2 (径向表面)	-270	-254	-268
部位3 (轴向表面)	-306	-308	-318
部位3 (径向表面)	-310	-320	-307
部位4 (轴向表面)	-306	-308	-306
部位4 (径向表面)	-331	-329	-359
部位5 (轴向表面)	-292	-308	-308
部位5 (径向表面)	-241	-309	-301

从测量结果可以看出，所有测量点的测量结果都大于-207MPa，且结果均为压应力。

## 3 机加工参数对车轴残余应力的影响

### 3.1 车削参数对车轴残余应力的影响

为了能够在车轴表面获得更好的压应力，对车轴的精加工余量方案做进一步的调整设计，采取小切削量多次加工的方法来减少大切量带来的表面拉应力。同时利用滚压加工过程中滚压对表面的压应力，采用滚压工艺也能更好地提高车轴表面的压应力。

经过多次机械加工工艺试验发现，在直径方向加工余量还保留3~4mm的情况下，分3道车削加工工序来精加工：第1道车削加工工序需要完成大部分的车削加工余量，尽可能地减少车削带来的表面拉应力；第2道车削加工工序需要把切削深度保持在0.15~0.2mm，经过这道工序后车轴表面粗糙度控制在Ra3.2；最后一道车削加工工序切削深度为0.05~0.10mm，车削完成后车轴的表面粗糙度控制在Ra1.6。经过这种分3道工序切削的方法多次试验结果发现，在最后精加工时采取减少切削深度、适当提高切削速度的方式，所

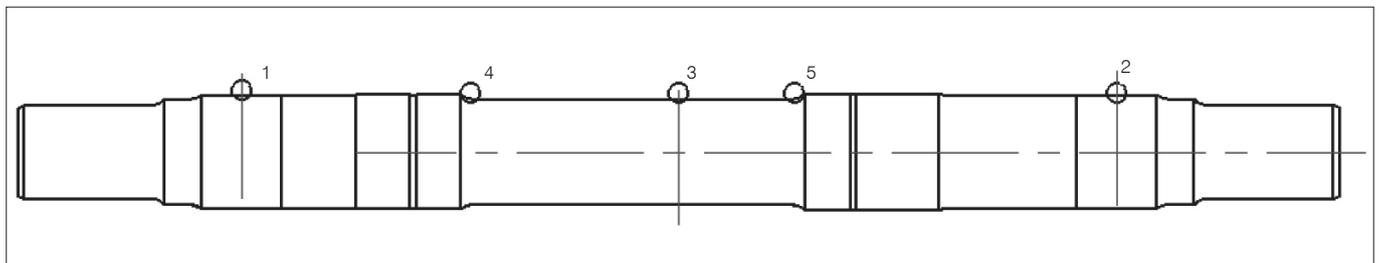


图 车轴加工简图

形成的较好的车轴表面粗糙度可以显著提高表面的残余压应力。经过几次试验,发现最终轴向压应力最大值为 $-359\text{MPa}$ ,径向压应力最大值为 $-334\text{MPa}$ ,满足车轴项目要求的指标表面残余压应力 $-207\text{MPa}$ 的要求。

### 3.2 增加滚压工艺,提高表面残余应力

根据对车轴精加工的要求,精加工后需要将车轴的所有圆弧部分在 $(550\pm 30)\text{kgf}$ 压力大小下滚压一次。滚压后发现车轴圆弧部位在经过滚压后圆弧表面明显光滑和光亮。根据已发表的文献可知,车轴经过滚压后,表面残余应力整体都有明显提升,车轴轴向平均应力可以达到 $-597\text{MPa}$ ,车轴圆周方向平均应力为 $-340\text{MPa}$ 。

## 4 结语

为了增加车轴表面的疲劳强度,采用了车轴表面亚临界淬火、滚压强化等硬化措施,通过增加表面硬度和压缩残余应力能够有效提高车轴的疲劳强度。建议设计和加工车轴时,将表面残余应力大小作为一项技

术要求。

亚临界淬火热处理工艺可以使车轴在不改变化学成分、车轴力学性能和微观组织的情况下,表面获得均匀的残余压应力,能够有效提高车轴的使用寿命。尤其是在圆弧部分滚压加工后,表面残余应力比没有滚压的部位应力值明显提升。

**基金项目:**山西省高等学校科技创新项目(16/21020823)。

### 参考文献:

- [1] 杨海泓,王瑞革.车轴表面残余应力的试验与研究[J].内燃机车,2013(4):11-13.
- [2] 林浩博.高速动车组S38C车轴疲劳、裂纹扩展特性及可靠性研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [3] 吴海英.亚临界淬火对LZ50钢车轴性能的影响[J].机车车辆工艺,2010(1):1-3+12.
- [4] 张春红.车轴钢强韧性影响因素的研究[D].贵阳:贵州大学,2010.

