

机车车轴表面深滚压工艺试验分析

姚猛¹, 孙强¹, 赵文渊²

1. 山西大同大学机电工程学院 山西大同 037001

2. 中车大同电力机车有限公司 山西大同 037001

摘要: 以中白车轴为研究对象, 开展了车轴深滚压工艺试验分析, 在原有浅滚压工艺的基础上, 研究了表面粗糙度与进给量对滚压力的影响。并将原有滚压工艺流程进行优化, 由单次滚压改为二次滚压, 使得车轴滚压影响层深度及表面硬度增幅满足了设计要求。同时比较了优化前后的滚压工艺对车轴表层硬度及残余应力的影响, 数据表明, 优化后的滚压工艺进一步提升了车轴的表面质量与使用寿命, 本研究也可为机车车轴深滚压工艺参数的合理选用提供数据支撑。

关键词: 车轴; 表面强化; 深滚压; 试验研究; 工艺优化

1 序言

随着“一带一路”倡议的实施与发展, 电力机车凭借着其极高的运输能力与较低的运输成本, 在盘活周边国家经济发展、推动能源转型等方面发挥了举足轻重的作用。“中白货运机车”是由中车大同电力机车有限公司根据白俄罗斯国内的运输特点及需求生产的一款宽轨耐高寒重载货运电力机车。由于其特殊的运行条件, 对该款车型各关键零部件提出了更高的要求。其中, 对车轴制造工艺过程中滚压影响层深度及表面硬度的增幅提出了明确要求。要求表面硬度的增幅在20%以上、影响层深度在0.02~0.04倍的滚压面公称直径范围内, 按照原有滚压工艺无法满足上述要求。

车轴作为轨道车辆承受载荷的关键部件, 其表面性能的好坏直接影响车轴本身的疲劳寿命乃至整车的运行安全。表面滚压强化工艺可以将零件经过机械加工后表面凸出位置的材料挤压到凹处, 降低其表面粗糙度^[1]。在滚压过程中材料表面发生塑性变形, 表面晶粒细化或随滚压方向压扁, 形成一定的滚压影响层深度, 提升材料表层硬度, 并且在零件中形成了残余压应力, 提高了耐腐蚀性、耐磨性和

抗疲劳性能^[2-5]。吴焕等^[6]分别对车轴圆弧段及直线段开展了滚压试验研究, 探讨了主轴转速、进给速度与滚压力对表面粗糙度及表面硬度的影响; 金显贺等^[7]对比了分别经浅滚压与深滚压处理后的车轴表面残余应力值, 结果表明经深滚压处理后的车轴表面残余压应力值明显大于前者; 纪东东等^[8]将断裂力学原理应用于扩展有限元寿命计算中, 计算得到了含有初始表面裂纹的深滚压高速列车车轴的剩余疲劳寿命。

但是, 目前对车轴表面滚压工艺的研究主要集中于对表层硬度、表层残余应力和表面粗糙度的研究, 缺少对车轴滚压影响层深度的研究。结合研究现状与生产实际, 本文开展了以提升车轴滚压影响层深度及表面硬度增幅为目标的车轴深滚压工艺试验研究。

2 研究对象与目标

2.1 试验材料

试验材料为中白车轴, 材料为EA1N 车轴钢, 其化学成分见表1。

2.2 研究目标

对中白车轴表面滚压工艺进行优化升级, 使车

基金项目: 2022年度山西省高等学校科技创新计划创新平台项目(2022P009)。

表1 EA1N 车轴钢元素含量（质量分数）（%）

元素	C	Mn	Si	P	S
含量	0.34	0.10	0.31	0.005	0.015
元素	Cr	Ni	Cu	V	Fe
含量	0.11	0.01	0.005	0.005	余量

轴满足GOST 31344标准要求。

（1）滚压影响层深度要求 要求滚压影响层深度为（0.02~0.04） D ，其中 D 为滚压面的公称直径。

（2）滚压硬度检测要求 要求车轴滚压表面硬度的增加幅度不低于20%。

（3）残余应力检测要求 参照EN 13261标准规定的残余应力测试，采用X射线测试法。如图1所示，在轴颈、轮座、齿轮座和轴承座的中间横截面沿圆周方向相距120°取3点进行应力测试，要求3点应力差不超过40MPa。

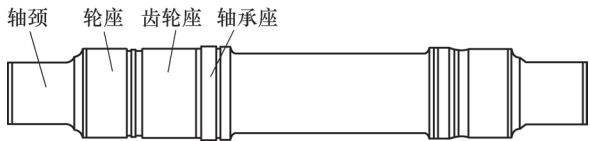


图1 车轴样品残余应力检测位置示意

3 原有工艺流程及试验

原有的工艺流程是先对车轴进行磨削加工，在表面粗糙度值 R_a 达到0.6~0.8 μm 后，再对轴颈、轮座、齿轮座和轴承座等部位进行滚压。由于车轴各部位研究结果具有相似性，所以这里我们选取轴颈与轮座为研究对象。

中白车轴现场滚压实物如图2所示，滚压设备为CK6180i数控滚压车床，刀具选用EG 90单辊滚光刀具。滚压参数中，压入量为0.8mm，主轴转速为120r/min，进给量为0.12mm/r。



图2 中白车轴现场滚压实物

3.1 滚压影响层深度测试

滚压影响层深度是以硬度值为评价依据，具体检查方法为：在试样车轴轴颈、轮座处各切1个纵向磨片，切割位置如图3所示。在磨片上，从表面沿着直径方向测试硬度，每隔0.5mm检测1个点，直到15mm为止。其中硬度是在98.1N（10kgf）负载下，按照维氏硬度测定方法使用金钢石锥在HV单元上测定。将硬度测量结果以图像形式展示，通过图像确认滚压影响层深度。

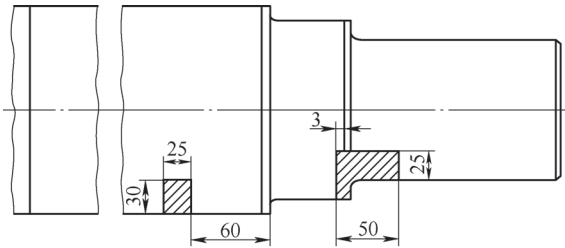


图3 质量检测纵向磨片位置示意

从图4中可以看出：轴颈在距表面深度2.5mm以下，硬度值基本不发生变化，这表明轴颈的滚压影响层深度约2.5mm。同理，轮座滚压影响层深度约3.5mm。轴颈与轮座的公称直径分别为178mm、254mm，其滚压影响层深度标准要求分别为3.56~7.12mm、5.0~10.0mm。由此可见，经原有滚压工艺处理后的车轴滚压影响层深度的实际检测数据与标准要求相差较大。

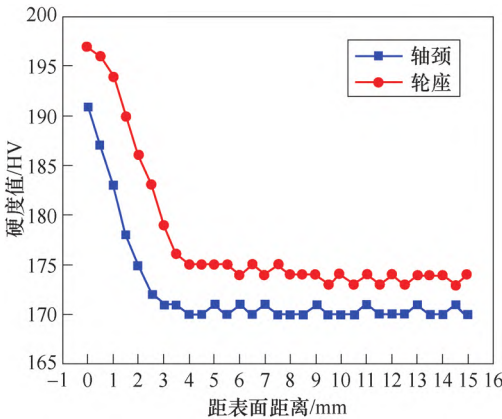


图4 原有滚压工艺处理后不同深度处硬度值曲线

3.2 滚压前后表面硬度检测

轴颈表面硬度由滚压前的170HV增加至滚压后的191HV，硬度提升了12.4%；轮座表面硬度由滚压前的174HV增加至滚压后的197HV，硬度提升13.2%，均未能满足表面硬度增加 $\geq 20\%$ 的要求。

3.3 残余应力检测

残余应力的检测采用X射线测试法，在轴颈与轮座的中间横截面沿圆周相距120°取3点进行残余应力测试，轴颈测试位置代号分别为1-1、1-2和1-3，轮座测试位置代号分别为2-1、2-2和2-3。检测设备及检测过程如图5所示：试验设备为Proto iXRD便携式残余应力分析仪，测量方法采用同倾法，Cr靶K α 辐射，准直器为圆形 ϕ 1mm。具体测量参数见表2。



a) 车轴样品残余应力检测设备



b) 检测过程

图5 车轴样品残余应力检测设备及检测过程

表2 残余应力检测测量参数

测量参数	数值
管电压/kV	20
管电流/mA	4
曝光时间/s	1
曝光次数/次	10
Beta角/(°)	-25~25

经原有滚压工艺加工后的轴颈与轮座各部位残余应力见表3，轴颈与轮座各部位3点轴向和周向残余应力差值均小于40MPa，满足规范要求。

表3 原工艺滚压后各部位残余应力（单位：MPa）

测试位置	轴向	周向
1-1	-442	-250
1-2	-406	-217
1-3	-437	-251
2-1	-311	-184
2-2	-344	-221
2-3	-319	-185

4 工艺优化及改进试验研究

针对车轴滚压影响层深度与滚压后表面硬度无法满足标准要求的问题，分析二者的影响因素，确定出滚压力的大小对二者起主要作用，而滚压力的大小又与初始表面粗糙度、压入量和滚压刀具的半径有关。

从节省制造成本的角度出发，基于车间现有滚压设备和滚压刀具，以轮座为研究对象，考虑通过改变初始表面粗糙度和压入量来增大滚压力，从而提升滚压影响层深度及滚压后表面硬度。

4.1 初始表面粗糙度对滚压力的影响

设置压入量0.8mm，在保证其他参数不变的前提下，将车轴表面粗糙度值 R_a 分别控制在1.0 μ m、2.0 μ m和3.0 μ m左右进行滚压试验。结果表明，车轴表面粗糙度值 R_a 控制在3.0 μ m左右时滚压力最大，可达到3.6kN；表面粗糙度值 R_a 控制在1.0 μ m左右时滚压力最小，仅有2.9kN。由此可得，相同的压入量下，表面粗糙度值越小，滚压力越小。

4.2 压入量对滚压力的影响

单辊滚光刀具要求滚压力不得超过8kN，过高的滚压力可能会伤刀。我们在保证不伤刀的前提下，分别对经磨削及车削工艺处理后的车轴进行滚压试验。

车轴磨削后表面粗糙度值 R_a 为0.6~0.8 μ m时对车轴进行滚压，当压入量从0变化到3.6mm时，滚压力由0增至7.6kN。但随着压入量的增大，车轴表面出现起皮现象，这一现象与我们的初衷相违背。

为了避免车轴表面发生起皮现象，造成车轴的表面粗糙度下降，仅对车轴进行精车，使其表面粗糙度值 R_a 在1.5~2.0 μ m进行滚压。当压入量为从0变化到4mm时，滚压力由0增至7.9kN，且车轴表面无起皮现象。

4.3 优化工艺流程

根据上述试验结果，对车轴原有表面处理工艺流程进行优化，在精车外圆工序后对轴颈、轮座等部位进行首次滚压，通过对表面粗糙度及压入量的控制，使得滚压力足够大，以保证滚压影响层深度，此过程我们称之为车轮深滚压。考虑到在深滚压过程中容易使车轴变形，尺寸不易保证，故在深滚压之后对车轴进行磨削，以保证车轴尺寸精度。最后，考虑到车轴对表面残余应力有一定的要求，

则再对车轴进行一次浅滚压。

中白车轴的具体工艺流程如下：精车外圆→深滚压轴颈、轮座、齿轮座、轴承座、密封座及圆弧→磨削轴颈、防尘座→磨削轮座、齿轮座、轴承座及密封座→浅滚压轴颈、轮座、齿轮座、轴承座、密封座及圆弧。其中：深滚压时，轴颈处压入量设置为3.7mm，轮座、齿轮座、轴承座和密封座压入量设置为3.8mm；浅滚压压入量均设置为0.8mm。

4.4 优化工艺后的试验结果分析

我们应用优化后的工艺，对中白车轴进行了强化处理，其中轴颈及轮座处沿周向深度方向测得硬度值曲线如图6所示。

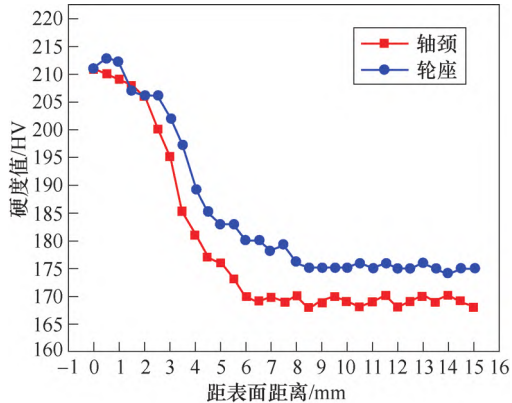


图6 优化后的滚压工艺处理后不同深度处硬度值曲线

(1) 滚压影响层深度测试 从图6中可以看出，轴颈滚压影响层深度约6mm，轮座滚压影响层深度约8mm，符合标准要求的轴颈滚压影响层深度3.56~7.12mm、轮座滚压影响层深度5.0~10.0mm。

(2) 滚压后各部位残余应力 经优化后的滚压工艺处理的轴颈与轮座各部位残余应力见表4，轴颈与轮座各部位3点轴向和周向残余应力的差值均<40MPa，满足规范要求。并且相比于优化前，轴向及周向残余应力均增大约30%。

表4 工艺优化后滚压后各部位残余应力 (单位: MPa)

测试位置	轴向	周向
1-1	-545	-350
1-2	-516	-316
1-3	-527	-343
2-1	-417	-285
2-2	-441	-311
2-3	-429	-295

(3) 滚压前后表面硬度检测 轴颈表面硬度由滚压前的162HV增加至滚压后的251HV，提升了55%；轮座硬度由滚压前的165HV增加至滚压后的246HV，提升了49%，均能满足表面硬度增加不低于20%的要求。

5 结束语

试验研究表明，通过二次滚压和增加压入量，使得中白车轴轴颈滚压影响层深度达到5mm，轮座滚压影响层深度达到8mm，表面硬度提升50%左右，满足了中白车轴滚压影响层深度及表面硬度设计规范的要求；同时，残余应力增大约30%。优化后的滚压工艺极大地提升了车轴的表面质量与疲劳强度，取得了较好的实用价值，为现场深滚压工艺参数的合理选用提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] 李光晖, 林有希, 蔡建国. 金属材料超声滚压表面强化的研究进展[J]. 工具技术, 2020, 54 (1): 3-8.
- [2] GAO X K, LI B CH, JIANG CH. The Critical Assessment for the Fatigue Limit of Nanocrystallized Surface with Micro-Notches Obtained by Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143: 105988.
- [3] LIU C, LIU D, ZHANG X, et al. On the Influence of Ultrasonic Surface Rolling Process on Surface Integrity and Fatigue Performance of Ti-6Al-4V Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 370: 24-34.
- [4] 刘也川, 张松, 谭俊哲, 等. 机械滚压对A473M钢疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2020, 48 (3): 163-169.
- [5] 冯中立, 蒲磊, 杨文贤, 等. 表面加工工艺对动车组车轴表面性能的影响[J]. 工具技术, 2023, 57 (7): 105-111.
- [6] 吴焕, 王强, 吴庆堂, 等. 车轴表面滚压工艺技术研究[J]. 新技术新工艺, 2021 (6): 20-23.
- [7] 金显贺, 薛振峰, 郑毅. 铁路车轴表面残余应力研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (5): 36-38.
- [8] 纪东东, 张继旺, 徐俊生, 等. 基于扩展有限元法的含损伤深滚压车轴剩余寿命预测[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53 (3): 417-429.

MW 20240418