

气冷转向辊的结构优化和应力分析

朱 军

宝钢日铁汽车板有限公司, 上海

收稿日期: 2022年5月31日; 录用日期: 2022年12月12日; 发布日期: 2022年12月19日

摘 要

气冷转向辊是热镀锌机组的重要设备, 基于对旧气冷转向辊的失效分析, 设计了新的气冷转向辊, 对比旧气冷转向辊, 新辊做了多个方面的结构优化: 旧气冷转向辊在电机端无轴套, 新气冷转向辊电机端添加了长247 mm壁厚77.5 mm的轴套。旧气冷转向辊自由端轴套尺寸长155 mm, 壁厚62.5 mm, 新气冷转向辊自由端轴套尺寸加长为200 mm, 壁厚加厚为77.5 mm。侧板开口形状也不同, 由旧辊的圆孔改为梯形孔; 加强筋布置也有所调整; 为确保新辊的正常工作, 对新辊的应力状况进行了仿真计算和分析。为此, 建立了新气冷转向辊的有限元计算模型, 对新气冷转向辊进行了应力分析和热应力分析。在相同的工况条件下, 对旧气冷转向辊和新气冷转向辊电机驱动端和自由端的应力情况作了对比计算。计算结果表明, 新气冷转向辊在电机驱动端和自由端的应力状况都有明显的改善。

关键词

气冷转向辊, 结构优化, 应力分析

Structure Optimization and Stress Analysis of Air-Cooled Steering Roll

Jun Zhu

Baosteel-Nippon Steel Automotive Steel Sheets Co. Ltd., Shanghai

Received: May 31st, 2022; accepted: Dec. 12th, 2022; published: Dec. 19th, 2022

Abstract

The air-cooled steering roller is an important equipment of the hot-dip galvanizing unit. Based on the failure analysis of the old air-cooled steering roller, a new air-cooled steering roller is designed. Compared with the old air-cooled steering roller, the new roller has made structural optimization in many aspects: The old air-cooled steering roller has no shaft sleeve at the motor end,

and the new air-cooled steering roller has added a shaft sleeve with a length of 247 mm and a wall thickness of 77.5 mm at the motor end. The free end shaft sleeve of the old air-cooled steering roller is 155 mm long and 62.5 mm thick. The free end shaft sleeve of the new air-cooled steering roller is 200 mm long and 77.5 mm thick. The opening shape of the side plate is also different, and the round hole of the old roller is changed into a trapezoidal hole; the arrangement of reinforcing ribs is also adjusted. In order to ensure the normal operation of the new roller, the stress condition of the new roller is simulated and analyzed. Therefore, the finite element calculation model of the new air-cooled steering roll is established, and the stress analysis and thermal stress analysis of the new air-cooled steering roll are carried out. Under the same working condition, the stress of the driving end and free end of the old air-cooled steering roller and the new air-cooled steering roller are compared and calculated. The calculation results show that the stress condition of the new air-cooled steering roller at the driving end and the free end of the motor has been significantly improved.

Keywords

Air Cooled Steering Roll, Structural Optimization, Stress Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塔顶上安装的气冷转向辊是带钢热镀锌机组重要的设备，是影响镀锌板表面质量重要的辊子之一，如图 1 所示。

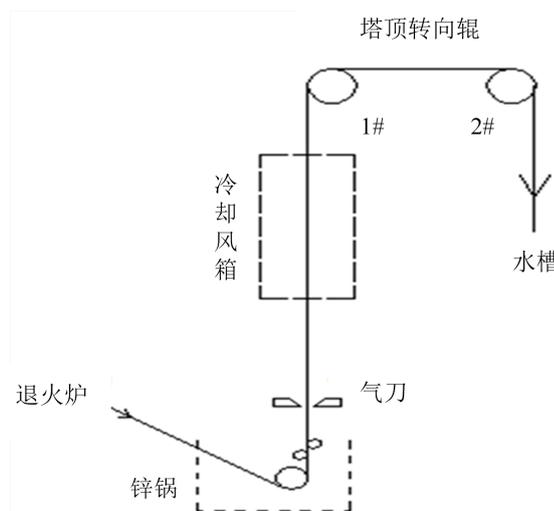


Figure 1. Air cooled steering roller of hot dip galvanizing unit

图 1. 热镀锌机组的气冷转向辊

带钢从锌锅出来后垂直向上到达塔顶的气冷转向辊，经过气刀和冷却风箱，带钢温度并未完全冷却，到达塔顶转向辊时带钢的温度大概是 200℃~360℃。塔顶的气冷转向辊不仅要稳定带钢和控制板型，同

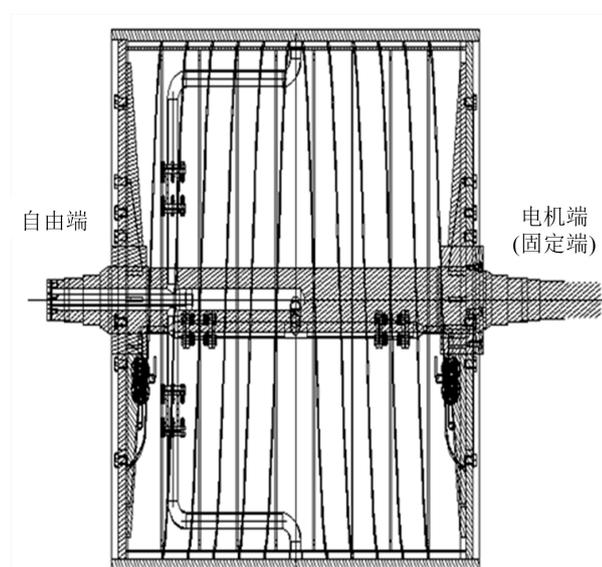
时要防止锌渣粘结在气冷转向辊表面在带钢上造成压印、亮点、划伤等缺陷。因此，气冷转向辊不仅要散热均匀、表面质量要求高，气冷转向辊的辊面要耐磨和耐压溃。目前国内外塔顶的气冷转向辊主流设计是采用大辊径，辊径为 $\Phi 1500\text{ mm}\sim\Phi 2000\text{ mm}$ ，气冷转向辊的冷却采用的是辊内气冷或水冷结构，气冷转向辊的辊面采用淬火或堆焊硬面层加喷涂碳化钨来提高辊面的耐磨和耐压溃能力[1]-[6]。

近期，旧的气冷转向辊因失效而下线，已有文章对已下线的气冷转向辊进行了失效分析[7]。主要结论是：对转向辊进行整体着色探伤和目测检测，转向辊的失效之处有两处，一是自由端键槽连接处轴和孔(包括键和槽)之间产生了约 9.1 mm 的周边间隙，二是固定端轴与筋板的焊接焊缝开裂。自由端键槽连接处轴和孔(包括键和槽)之间产生约 9.1 mm 周边间隙的原因是：由于采用的是轴套和轴过渡配合的连接方式，轴和孔之间最大间隙 0.042 mm (不排除实际间隙量更大)，在转向辊启动和停止的时候，轴和孔之间会有相对移动，使得轴和孔之间产生摩擦并带来磨损。由于轴和孔的材料分别是 35 钢和 $SS400$ ，表面硬度不高，耐磨性并不好，轴和孔之间也无法采取润滑措施，在长时间的工作过程中，轴和孔的这种摩擦和磨损就一直存在，轴和孔之间的间隙就会逐渐加大。固定端轴与筋板的焊接焊缝开裂的原因是：自由端轴和孔之间存在的大间隙(轴和孔周边间隙达 9.1 mm)，会造成轴套所连接的筒体在转动过程中产生剧烈的振动，振动会传导到筒体的另一端即固定连接端，恶化了固定端的受力状况，也恶化了固定端焊缝的受力状况；焊缝在长期的周期性应力作用下会产生疲劳，疲劳作用会大大降低焊缝的断裂强度；转向辊的工作环境温度为 $200^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 左右，长期在这个温度环境下工作，焊缝特别是不锈钢焊条焊缝会产生蠕变，也会降低焊缝的强度；固定端连接的四个焊缝的焊接质量不会完全相同，在某个强度较低或受力最大的点如焊缝的焊趾首先出现微裂纹，这个微裂纹在周期性应力作用下，会逐渐扩展，则这个焊缝就起不到承载应力的作用，全部应力就会加到其它三个焊缝焊趾的上面，恶化了其余三个焊缝焊趾的受力状况，加速了其余三个焊趾的开裂，如果余下的三个焊趾有一个焊缝中存在问题，就会先期开裂。余下的焊趾受力状况会进一步恶化。如此，四个焊趾会先后都开裂，并扩展一直到焊缝的根部[7]。

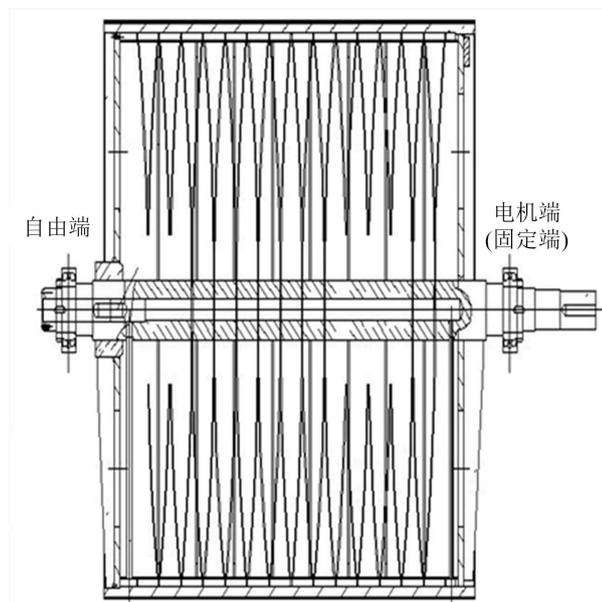
基于对旧气冷转向辊的失效分析，在设计新的气冷转向辊时要对气冷转向辊的结构进行改进。

2. 新气冷转向辊的结构设计

针对旧气冷转向辊的不足，设计了新的气冷转向辊，如图2(a)所示。



(a) 新气冷转向辊结构



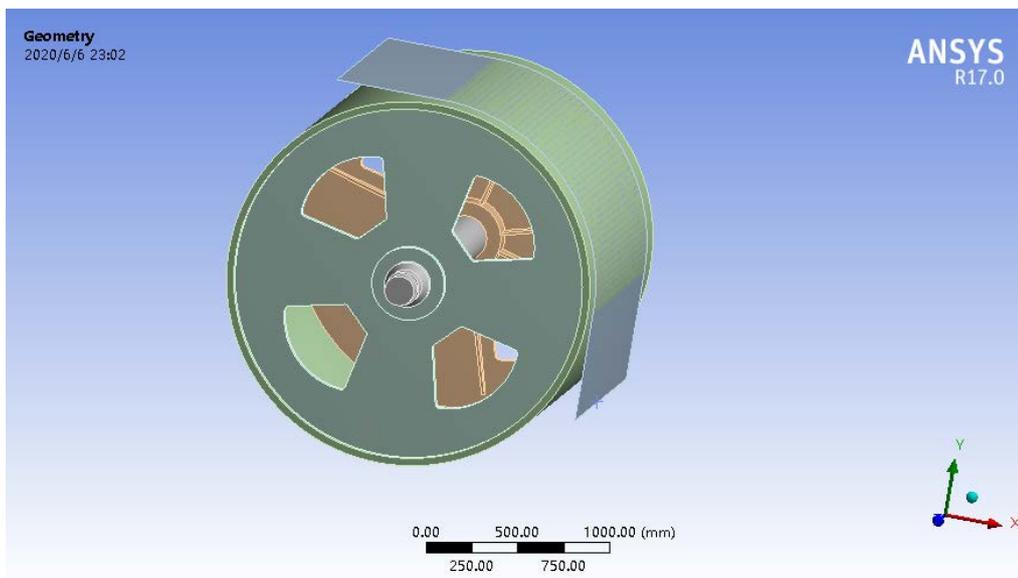
(b) 旧气冷转向辊结构图

Figure 2. Structural diagram of new and old air-cooled steering rolls

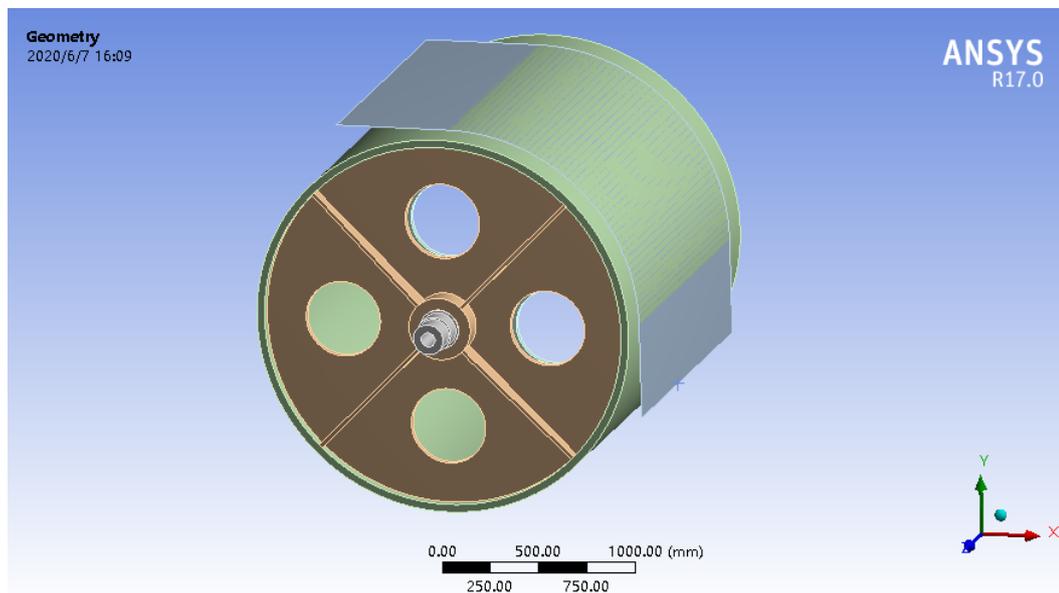
图 2. 新旧气冷转向辊结构图

对比新旧气冷转向辊的结构图，图 2(a)和图 2(b)，新气冷转向辊在三个方面进行了改进：

- 1) 旧转向辊在电机端(图 2(b))无轴套，新气冷转向辊在电机端(固定端)(图 2(a))增加了轴套，轴套长 247 mm，壁厚 77.5 mm；
- 2) 新气冷转向辊自由端轴套尺寸长度为 200 mm，壁厚为 77.5 mm，旧转向辊自由端轴套尺寸长 155 mm，壁厚 62.5 mm，新气冷转向辊自由端轴套的长度和壁厚均增加了；
- 3) 新气冷旧转向辊侧板开口的形状也不同，由旧辊的圆孔改为新辊的梯形孔；如图 3 所示。



(a) 新气冷转向辊侧板



(b) 旧气冷转向辊侧板

Figure 3. Side plates of new and old air-cooled steering rolls**图 3.** 新旧气冷转向辊侧板图

为保证新气冷转向辊工作的可靠性，下面就新气冷转向辊的结构进行数字模拟和应力分析。

3. 新气冷转向辊的强度分析

3.1. 分析条件

下面就新气冷转向辊的强度(或应力)进行数字模拟和分析。其计算参数如下：转轴现场测得的温度在 $97^{\circ}\text{C}\sim 101^{\circ}\text{C}$ 之间，轧辊面温度从二侧板的 80°C 逐步上升到中间的 130°C 。侧板温度在辊面和转轴两者温度之间，环境温度在 50°C 以上。辊面速度，理论值为 180 m/min ，正常生产在 $80\sim 140\text{ m/min}$ ，转向辊直径 2 m ，转向辊转动角速度为 2.3 rad/s 。转向辊电机，仅作未开机启动时驱动辊子，正常生产，电机电流一般在 0 左右，甚至是负数。电机功率为 11 KW ，电流 20.3 A ，实际电流 -0.1% (两根辊子均是，说明带钢带着辊子转的)。钢板张力是 90 KN ，是通过周边张力计辊实际测量的。钢板厚度：这项辊可能 3 条机组通用的，有条机组最大板厚是 4.2 mm 的，带钢厚度： $0.5\sim 3\text{ mm}$ ，带钢宽度： $830\sim 1730\text{ mm}$ 。建模计算时取钢带板厚 3 mm ，钢带宽度 1700 mm 。

3.2. 新辊几何模型

根据气冷转向辊的结构尺寸，选择了转向辊转动过程中的一种特征位置情况(假定钢带包角为 45° 度角)。按实际工作情况，建立了钢带作用下的转向辊计算模型。钢带包角作用方向正对转向辊侧板开孔。如图 3(a)所示。

3.3. 应力计算

1) 新辊整体结构应力分布情况

计算表明新辊转轴支承部位的应力最大，为 35.55 MPa 。二端侧板应力最大为 14.7 MPa ，如图 4 所示。

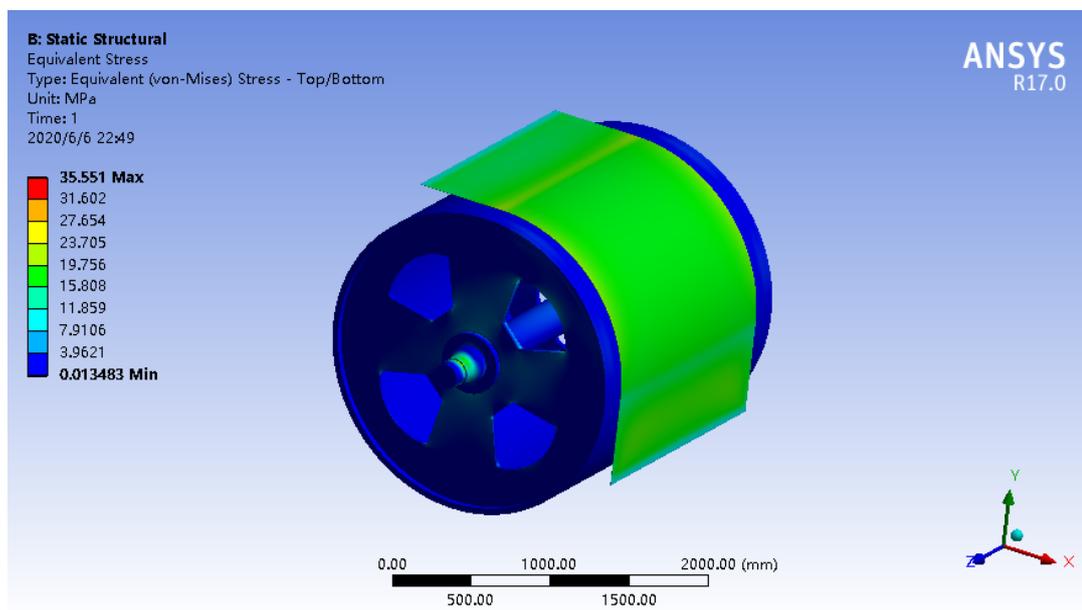


Figure 4. Stress distribution of the overall structure of the new air-cooled steering roll
图 4. 新气冷转向辊整体结构应力分布情况

2) 新辊二侧腹板与轴的应力分布情况

最大应力出现在转轴支撑部位，为 35.55 MPa，如图 5 所示(图中红色标识 Max 处)。

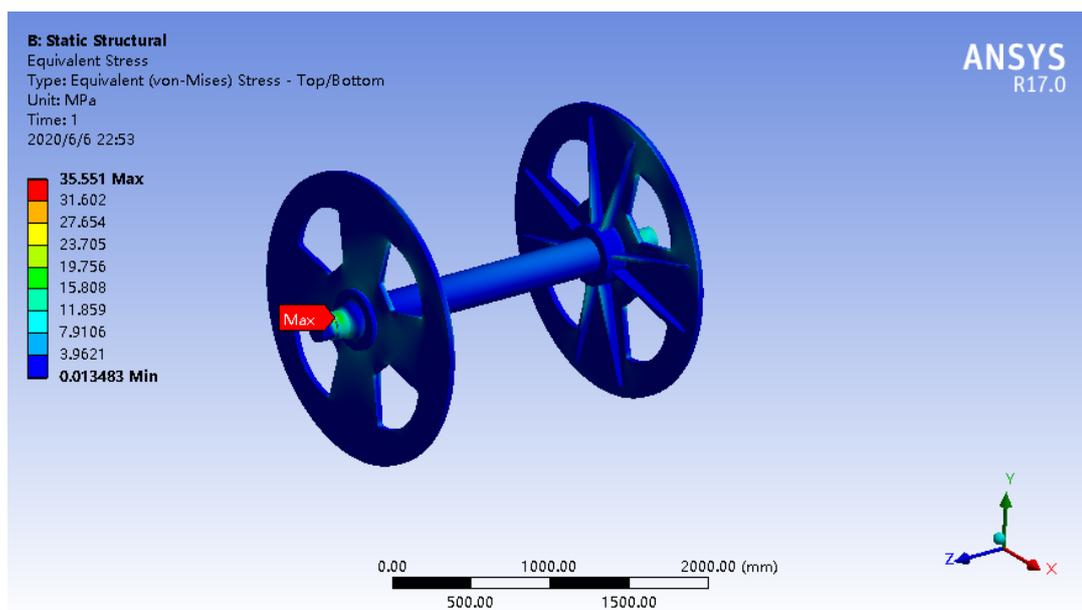


Figure 5. The maximum stress of the new roller appears at the supporting part of the rotating shaft
图 5. 新辊最大应力出现在转轴支撑部位

3) 新辊二侧板应力分布情况

侧板的最大应力出现在开孔处，应力值为 14.7 MPa。加强筋与轴套连接处的最大应力为 13 MPa。侧板应力值较低，应力分布情况较均衡，结构设计合理，如图 6 所示。

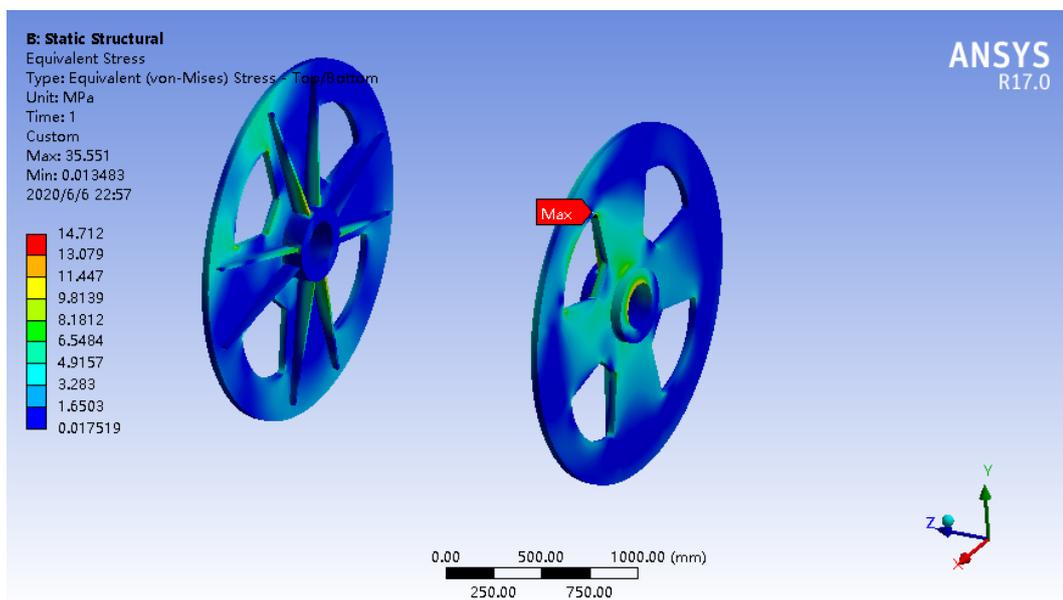


Figure 6. The maximum stress of the side plate of the new roll appears at the opening
图 6. 新辊侧板的最大应力出现在开孔处

4) 新气冷转向辊上钢带应力情况

计算得到新气冷转向辊上钢带最大应力为 21.8 MPa，属弹性范围，不影响钢带性能，如图 7 所示。

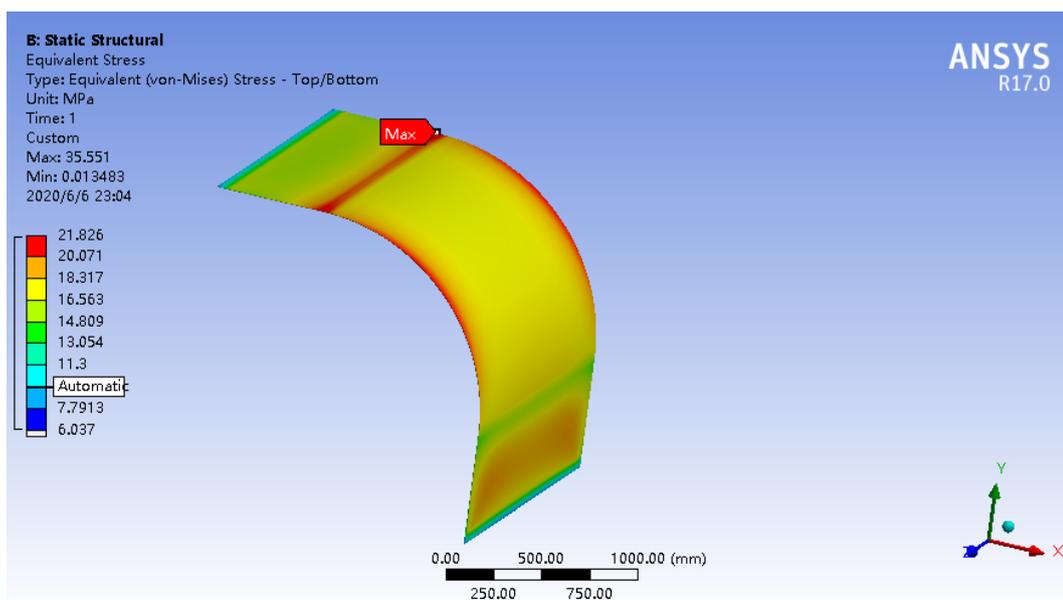


Figure 7. Maximum stress of steel strip on new air-cooled steering roll
图 7. 新气冷转向辊上钢带最大应力

3.4. 新气冷转向辊热应力计算

按照实际工况进行热应力分析。计算参数如下：根据现场温度测量，二端侧板外沿温度为 80℃左右，轴套处温度为 100℃左右，现场环境温度 50℃左右，空气对流换热系数 $2e-5W/mm^2 \cdot ^\circ C$ ，钢材的热膨胀系

数为 $1.2e-5/^{\circ}\text{C}$ ，钢材导热系数为 $0.0605 \text{ W/mm}\cdot^{\circ}\text{C}$ 。计算得到热变形引起的应力最大值为 82.8 MPa (图中红色标识 Max 处)，加强筋处的最大热应力值为 22.88 MPa 。如图 8 和图 9 所示。

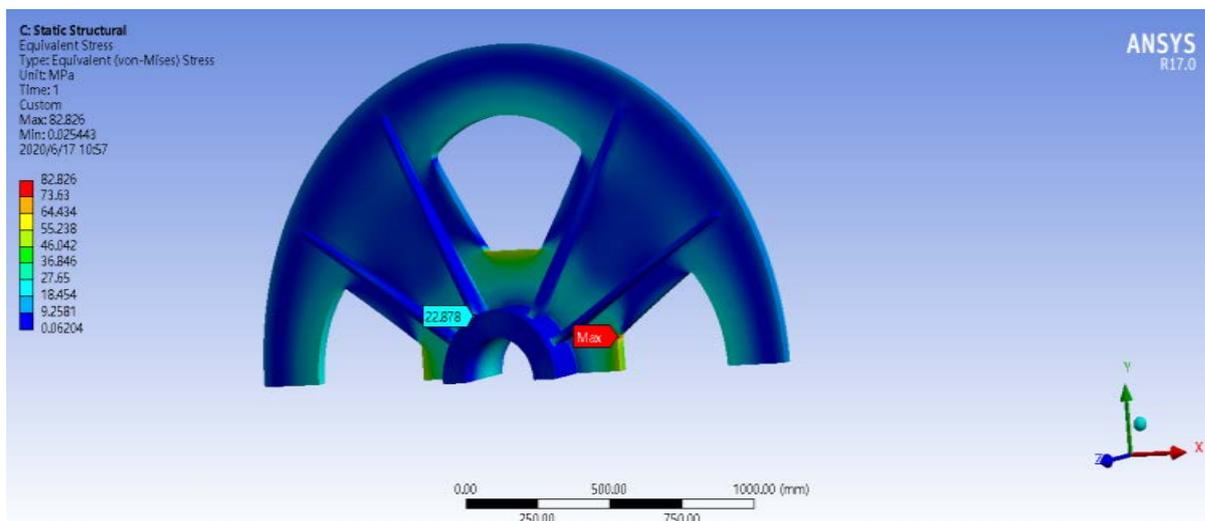


Figure 8. Stress caused by thermal deformation of fresh air-cooled steering roll

图 8. 新气冷转向辊热变形引起的应力

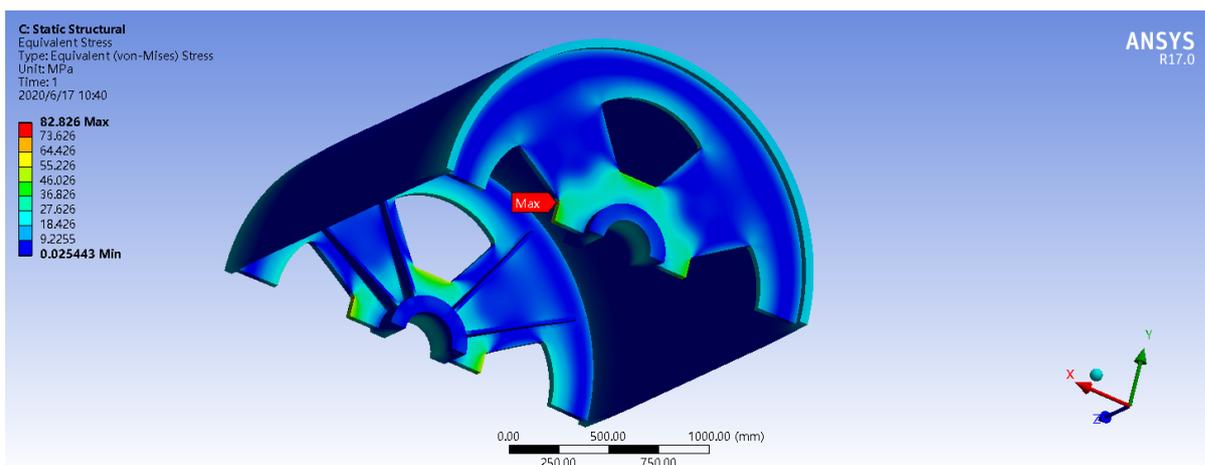


Figure 9. The maximum thermal stress at the reinforcing rib of the new roll

图 9. 新辊加强筋处的最大热应力值

3.5. 新旧转向辊应力比较

1) 电机驱动端应力比较

在相同的工况下，新旧气冷转向辊在电机驱动端的应力分布如图 10 和图 11 所示。

可见，由于新设计的气冷转向辊电机驱动端采用的是轴套连接，加强筋与轴套连接处的应力为 13.3 MP ，而旧转向辊电机端无轴套，加强筋直接焊接在转轴上，加强筋与转轴焊趾处的最大应力 25.8 MPa ，可见新结构大大降低了加强筋趾处的应力。

2) 自由端应力比较

同样计算了新旧气冷转向辊在自由端的应力分布如图 12 和图 13 所示。

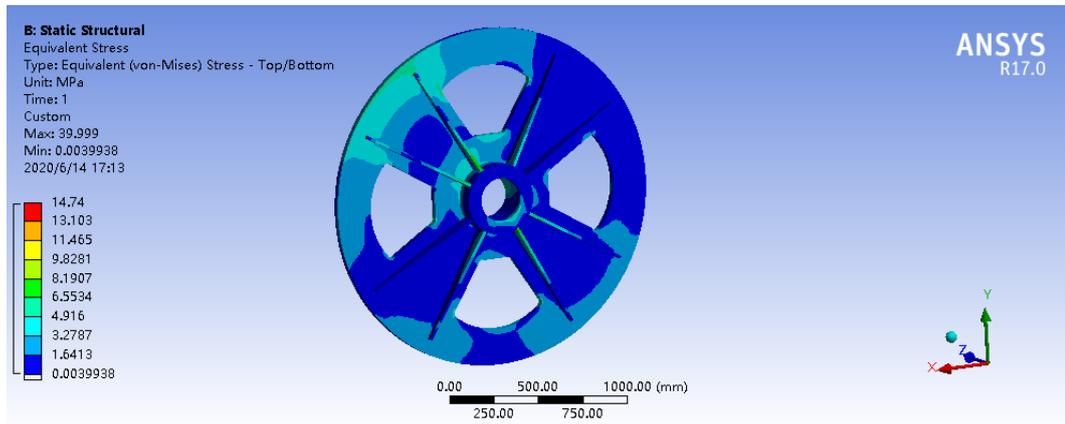


Figure 10. Maximum stress at the toe of reinforcing rib at the motor end of new air-cooled steering roll
图 10. 新气冷转向辊电机端加强筋趾处的最大应力

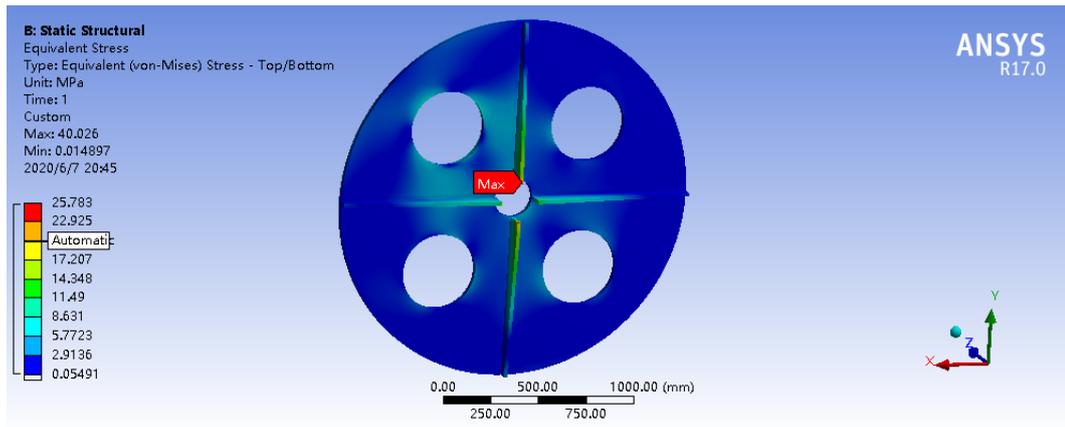


Figure 11. Maximum stress at the toe of reinforcing rib at the motor end of used air-cooled steering roll
图 11. 旧气冷转向辊电机端加强筋趾处的最大应力

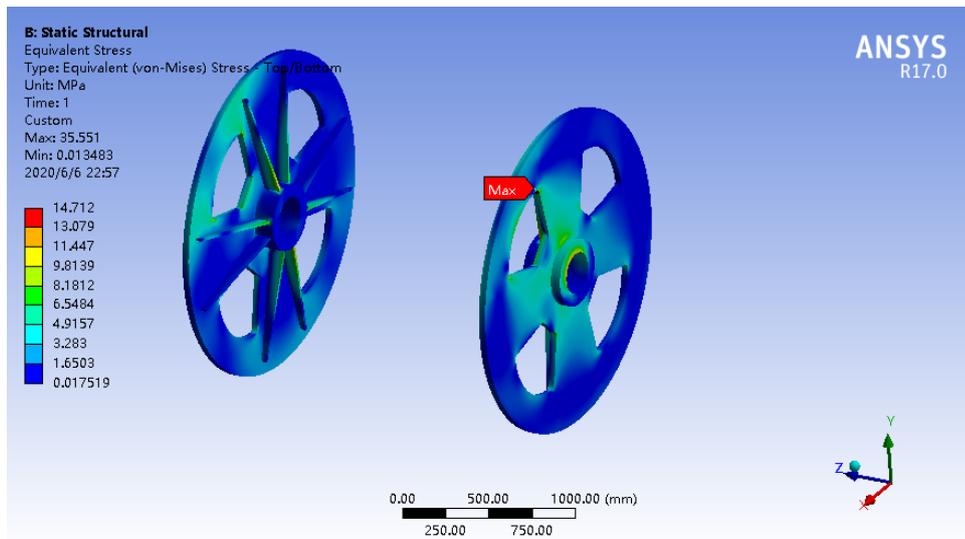


Figure 12. Stress in shaft hole of shaft sleeve of new air cooled steering roll
图 12. 新气冷转向辊轴套轴孔应力

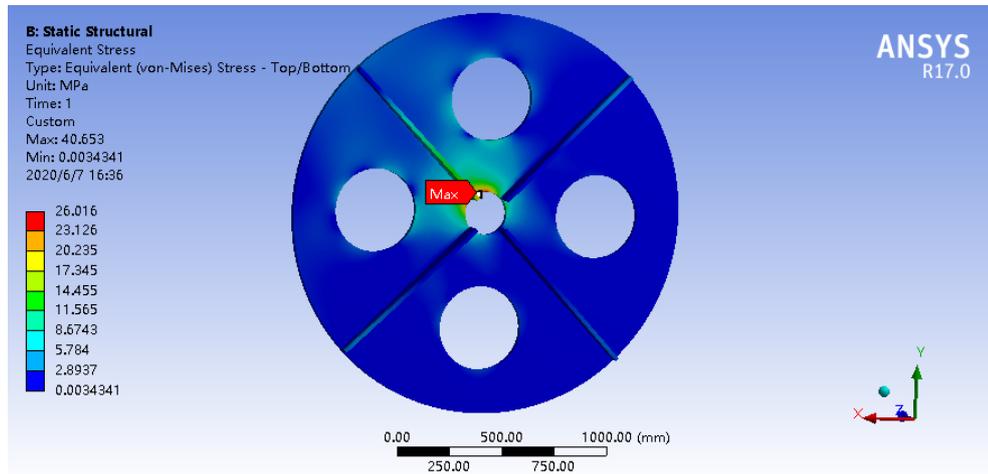


Figure 13. Stress of shaft hole at free end of used air-cooled steering roller
图 13. 旧气冷转向辊自由端轴孔应力

新转向辊自由端轴套尺寸加长加厚，由原来的 155 mm 加长到 200 mm，壁厚由原来 62.5 mm 加厚到 77.5 mm，其应力由旧辊的 10 MPa 下降到 3 MPa，下降幅度非常大。

4. 总结

1) 根据旧气冷转向辊的失效分析结论，设计了新的气冷转向辊，新的气冷转向辊主要有三方面的改进：

a) 在电机端(固定端)增加了轴套，旧的转向辊在固定端无轴套，新气冷转向辊固定端添加了长 247 mm 壁厚 77.5 mm 的轴套；

b) 旧转向辊自由端轴套长 155 mm 壁厚 62.5 mm，新转向辊自由端轴套尺寸加长为 200 mm，壁厚加厚为 77.5 mm；

c) 侧板开口形状由圆孔改为梯形孔。

2) 建立了新的气冷转向辊的有限元分析计算模型，并对新的气冷转向辊进行了工作应力分析和热应力分析。

3) 在相同的工况条件下，对新老气冷转向辊电机驱动端和自由端的应力情况作了对比计算。计算结果表明，新气冷转向辊在电机驱动端和自由端的应力状况都有明显的改善。

参考文献

- [1] 于连康. 转向辊焊接裂纹分析及焊接工艺[J]. 金属加工: 热加工, 2012(8): 2.
- [2] 赵渊博. 45 钢和 Q235 金属的焊接工艺分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2018(15): 16-18.
- [3] 吴珞菲. 预变形对 Q235 和 304L 焊接组织的影响[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [4] 胡徐彦, 秦立峰, 张峙, 等. 真空泵主轴键槽和平键失效原因分析[J]. 理化检验: 物理分册, 2013(8): 4-6.
- [5] 郑建发. 异种钢 Q235B 与 45 号钢焊接技术研究[J]. 广东化工, 2019, 46(13): 3.
- [6] 张保林, 宋丽平, 燕样样, 等. 304/Q345R 不锈钢复合板焊接工艺与焊接缺陷分析[J]. 南方农机, 2019, 50(23): 2-5.
- [7] 孙小平, 邓一鸣, 邓琦林. 气冷转向辊的失效分析[J]. 冶金工程, 2020, 7(3): 8.