

内空冷式热轧卷筒的计算与应用设计

吴久福 余峰 司马攀峰

(湖南科美达电气股份有限公司 湖南 岳阳 414000)

摘要: 热轧卷筒在工作时卷取的钢带的温度可达 $550 \sim 850^{\circ}\text{C}$, 持续的高温给内部滑动零部件带来严重考验, 正常使用一定周期后必须下线维护, 更换滑动零部件。为了解决频繁下线增加的成本及对生产造成的影响, 本文提出了一种热轧卷筒内部空气冷却的思路, 先理论计算其可行性, 再利用 ANSYS 对冷却效果进行有限元仿真。对某型热轧卷筒的结构进行初步设计, 并进行试验, 验证方案的可行性。

关键词: 热轧卷筒; 空气冷却; 连杆; 柱塞; 有限元

0 引言

热轧卷筒是热轧线的 A 类核心设备, 一般由空心轴、延伸轴、扇形板、芯轴、胀缩油缸、连杆及柱塞等零部件组成, 如图 1 所示。其工作原理: 芯轴在外部胀缩油缸的拉动下, 芯轴上的四棱锥斜面通过柱塞顶开扇形板, 使热轧卷筒胀开, 柱塞中装有压缩弹簧, 可以消除扇形板、柱塞、芯轴之间的间隙; 工作时柱塞还承受钢卷对热轧卷筒的压力。卸卷时, 胀缩油缸推动芯轴, 芯轴带动连杆拉动扇形板, 使热轧卷筒收缩。连杆、柱塞、弹簧等为胀缩作用的关键零部件, 其使用寿命直接决定着热轧卷筒的使用寿命。

热轧卷筒在工作时, 外面包裹着 $550 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 的钢带, 钢带的热量通过传导、辐射等方式始终在向热轧卷筒内部传递着, 会造成热轧卷筒内部的零部件温度过高, 以致影响其机械性能。因此, 常规热轧卷筒一般都是在卷钢间隙 (一卷与下一卷之间) 采取外部强制喷淋水进行散热, 由于喷淋时间有限, 只能对扇形板表面起到较为有限的冷却作用, 而对内部的连杆、柱塞、弹簧等零部件的冷却效果不太好。

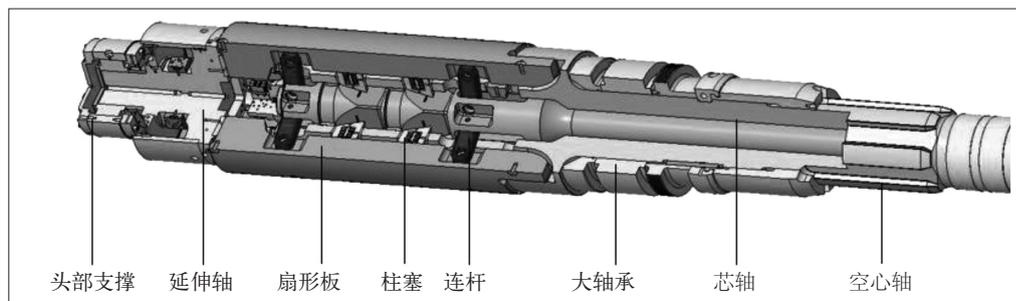


图 1 热轧卷筒结构示意图

一般热轧卷筒在使用一定的周期后, 连杆、柱塞等易在高温下磨损, 配合间隙加大, 影响热轧卷筒卷取效果, 需下线维护更换这些零部件。内部温度过高问题一直是影响热轧卷筒一次上机使用寿命的主要原因^[1]。

1 冷却方案的思路

针对涉及的技术难题, 本文提出一种新的空气内冷连杆柱塞式热轧卷筒, 在外部喷淋冷却水的同时, 能够进一步针对内部连杆、柱塞等零部件进行冷却与散热。

具体实施方案是在热轧卷筒内部增加一路压缩空气, 与干油润滑类似。压缩空气经旋转接头进入, 通过管道设计, 将压缩空气引入到热轧卷筒内部, 与热轧卷筒内部的高温气体产生强制对流换热, 将热空气强制排出, 带走连杆等零部件的热量。同时, 引入压缩空气后热轧卷筒内部压缩空气能够形成一个正压, 对外部热量进行屏蔽, 能够避免一定的热辐射量。通过上述两个效果, 可实现热轧卷筒内部的降温。另外, 引入压缩空气可将热轧卷筒内部氧化皮、铁锈等杂物清除, 改善热轧卷筒的工作条件, 从而提高热轧卷筒的使用寿命^[2]。

2 冷却气道的设计

2.1 压缩空气的引入

热轧卷筒为旋转部件, 要将压缩空气引入热轧卷筒, 需要增加一个气体旋

转接头，热轧卷筒本身就有个旋转接头与油缸连接，具有稀油及润滑油接口，所以只需在原旋转接头上增加一个压缩空气接口即可。经与专业旋转接头厂家交流，目前市场上已有能够满足稀油、润滑油、压缩空气同时进入的旋转接头。

2.2 空心轴内部气路设计

根据热轧卷筒易损件的损坏情况，可确定冷却目标为扇形板底部的连杆、柱塞等易损件。出气孔应该设计在主轴的凹槽内，并对应在柱塞及连杆附近，使压缩空气在扇形板与主轴之间形成一个流动的空气层，形成空气隔热层的同时将热量带走。

空心轴中设计有两路主气路，主气路到达卷取位置后分别向4个主轴滑动槽分出分支气路，分支气路可设计多个，以达到最优的冷却效果为佳，基本方案如图2所示。

3 理论计算

根据热轧卷筒的结构布局，确定可设计两路 $\phi 25 \sim \phi 30$ 的气路引入压缩空气，然后在热轧卷筒中部开设12路 $\phi 12$ 支路，分别对应4块扇形板的内部。

主气路采用 $\phi 25$ 管路，各分支路采用 $\phi 12$ 管路。常规压缩空气压力0.6MPa，出口压力下降至常规压缩空气压力的1%，根据伯努利方程的简单表达式可推出气体流速，如式(1)、式(2)所示：

$$\Delta P = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \quad (1)$$

式中： ΔP - 压力差 (MPa)；

ρ - 空气密度 (kg/m^3)；

V - 气体流速 (m/s)。

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

1标准大气压约0.1MPa。0℃，1标准大气压下，空气的密度约为 $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ 。一定温度下，气体的体积与压强成反比；压缩空气在0.6MPa下的体积是0.1MPa下体积的1/6；0.6MPa的压缩空气密度为 $1.29\text{kg}/\text{m}^3 \times 6 = 7.74\text{kg}/\text{m}^3$ 。

根据牛顿的定义：加在质量为1kg的物体上，使之产生 $1\text{m}/\text{s}^2$ 加速度的力为1N，则气体流速计算公式如式(3)所示：

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{\frac{2 \times 0.006 \times 10^6 \text{ N}/\text{m}^2}{7.74 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} / \text{m}^3}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 0.006 \times 10^6 \text{ m}^2}{7.74 \text{ s}^2}} \\ &= 39\text{m}/\text{s} \end{aligned} \quad (3)$$

求出气体流速后，可以计算出气体流量：

$$\begin{aligned} Q &= A \cdot V \\ &= 3 \times 3.14 \times (12/2 \times 10^{-3})^2 \times 39\text{m}^3/\text{s} \\ &= 794\text{L}/\text{min} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： A - 管道面积 (m^2)。

压缩空气的初始温度一般为23℃，在高温环境下的温升可达50℃，则根据公式(5)可计算1s可带走的热量：

$$P = mc \Delta T = 0.749 \times 7.74 \times 10^3 \times 50/60\text{W} = 4.8 \times 10^3\text{W} \quad (5)$$

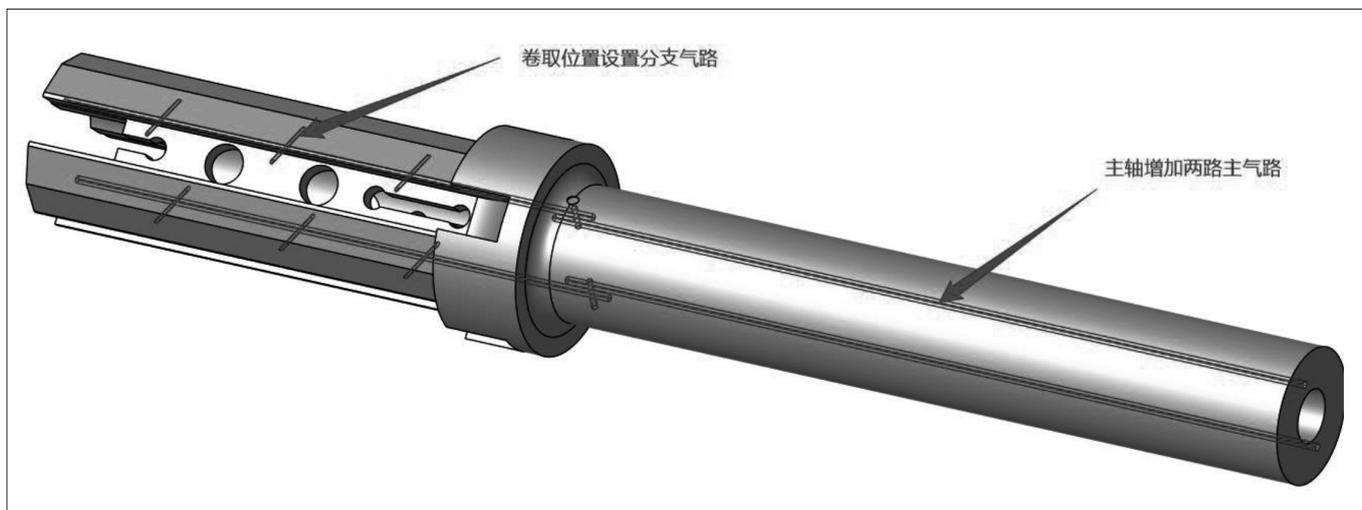


图2 压缩空气流道设计

式中： P —热功率（W）；

m —气体质量（kg）；

c —比热（J/（kg·K）），空气的比热为 1×10^3 J/（kg·K）；

ΔT —温升（℃）。

铁的比热为 0.46×10^3 J/（kg·K），一侧的连杆及柱塞等部件的重量为 50kg，只针对局部表面位置进行散热，暂定 20% 的体积，即 10kg 为散热目标的重量。利用公式（5）反推连杆及弹簧等部件可带走的温度：

$$\Delta T = P/m \cdot c = 4.8 \times 10^3 / (10 \times 0.46 \times 10^3 \text{℃}) = 1.04 \text{℃} \quad (6)$$

经计算，理论上每秒可以带走表面 1.04℃ 的温度，证明是能够有效地降低连杆等表面温度的作用，接下来进一步通过有限元分析验证并查看实际的冷却效果。

4 有限元仿真计算

4.1 简化模型

对模型进行简化，保留空心轴、一块扇形板、一侧连杆和柱塞。主轴上的气道设计按本文方案进行开孔，并在外部添加 1/4 的钢卷作为外部热源。

4.2 条件设置

正常热轧卷筒在卷钢时外部钢卷温度为 550 ~ 800℃，一般工作时卷取约 10min，间隔 10min，并且在间隔时间内进行外部强制水冷。考虑到此次分析的目的主要是对比加入空气后热轧卷筒各零件的温度情况。综合实际工况，此次分析为瞬态热分析，分析时长 20min，前 10min 外部钢卷设置成 650℃；后 10min 设置为常温，并在扇形板上添加 200W/（m²·℃）

对流换热系数，代表外部水冷；这样可以仿真出热轧卷筒内部连杆等部件的温度变化情况。通过采用 CFX 流体仿真引入的 0.6MPa 冷却空气对热轧卷筒内部对流换热系数，再次分析出热轧卷筒内部连杆等部件的温度变化情况，并进行对比。

4.3 第一次分析结果

不引入冷却气体的分析结果，如图 3 所示。连杆的最高温度在 10min 末升温到 442℃，在 20min 末冷却到 116℃。柱塞的最高温度在 10min 末升温到 311℃，在 20min 末冷却到 118℃。

引入冷却气体的分析结果，如图 4 所示。出气口设置在扇形板底部。连杆的最高温度在 10min 末升温到 413℃，在 20min 末冷却到 92℃。柱塞的温度快速升温到 28℃ 左右后，进入一个缓慢升温的过程。

4.4 结果分析

由第一次分析结果可知，由于连杆插入到扇形板内部，造成连杆的升温比柱塞高 131℃。气路设置在空心轴槽内，无法对插入扇形板位置的连杆进行冷却，引入冷却空气后，连杆的温度仅下降了 30℃ 左右，而柱塞由于处于非常充分的冷却气体中，所以基本不会由于钢卷的影响产生较高的温度。

根据以上分析，引入气体至最需要冷却的连槽处，将两路气体对应扇形板的连杆槽，一路气体引入空心轴槽内。

4.5 第二次分析结果

引入两路气体到连杆槽，一路气体设置在扇形板底部。分析结果如图 5 所示。连杆的最高温度在 10min 末升温到 360℃，在 20min 末冷却到 78℃。柱塞的最高温度在 10min 末升温到 271℃，在 20min

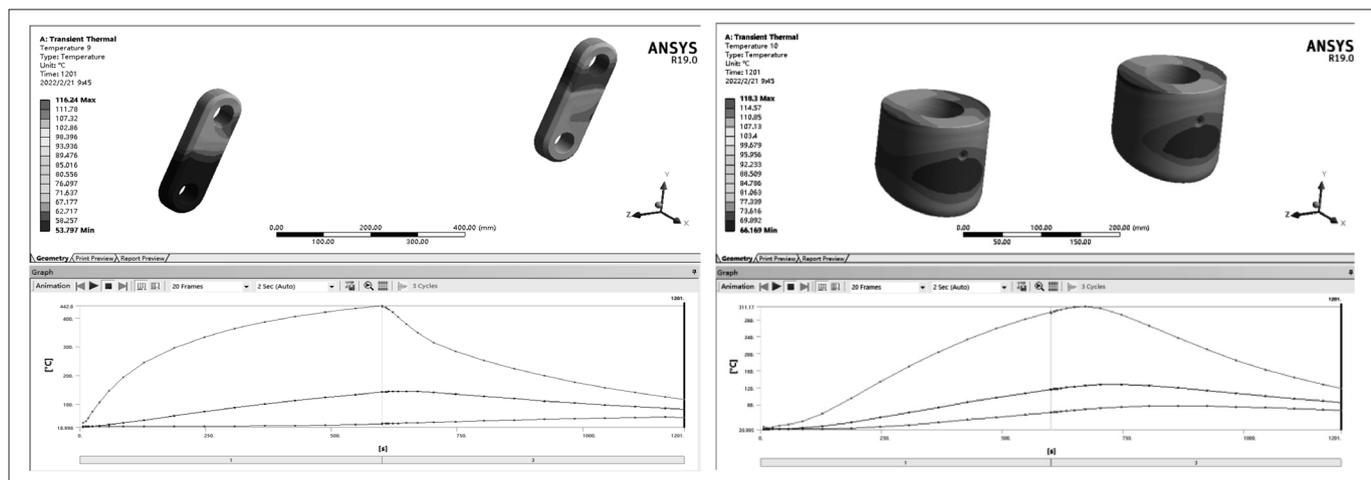


图 3 冷却前的温升曲线

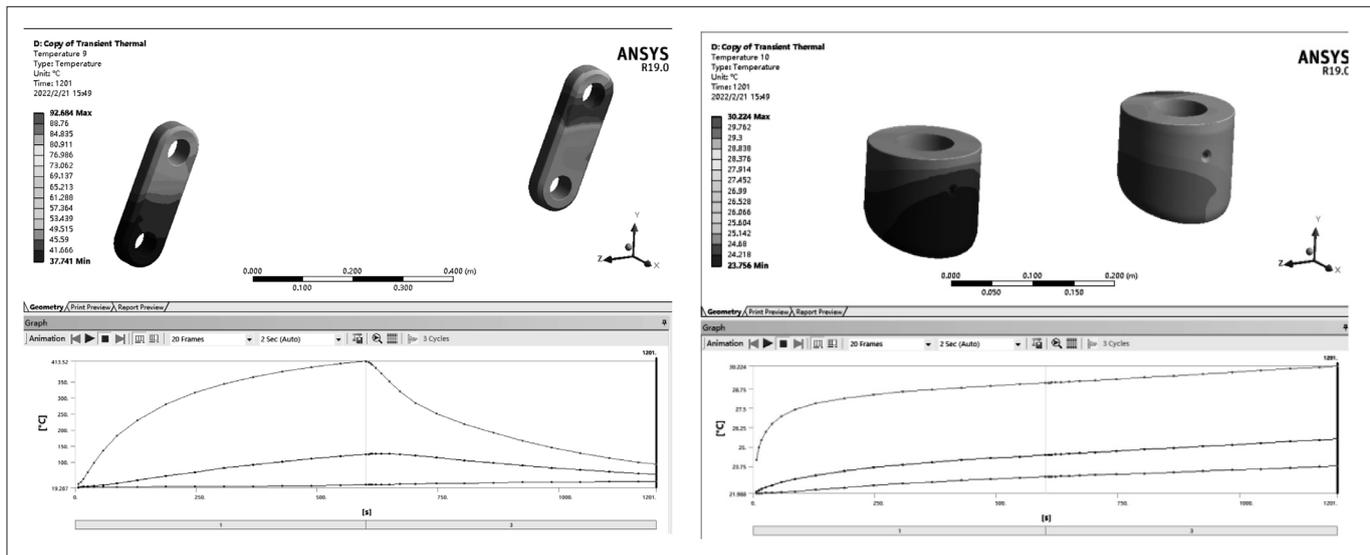


图4 冷却后的温升曲线

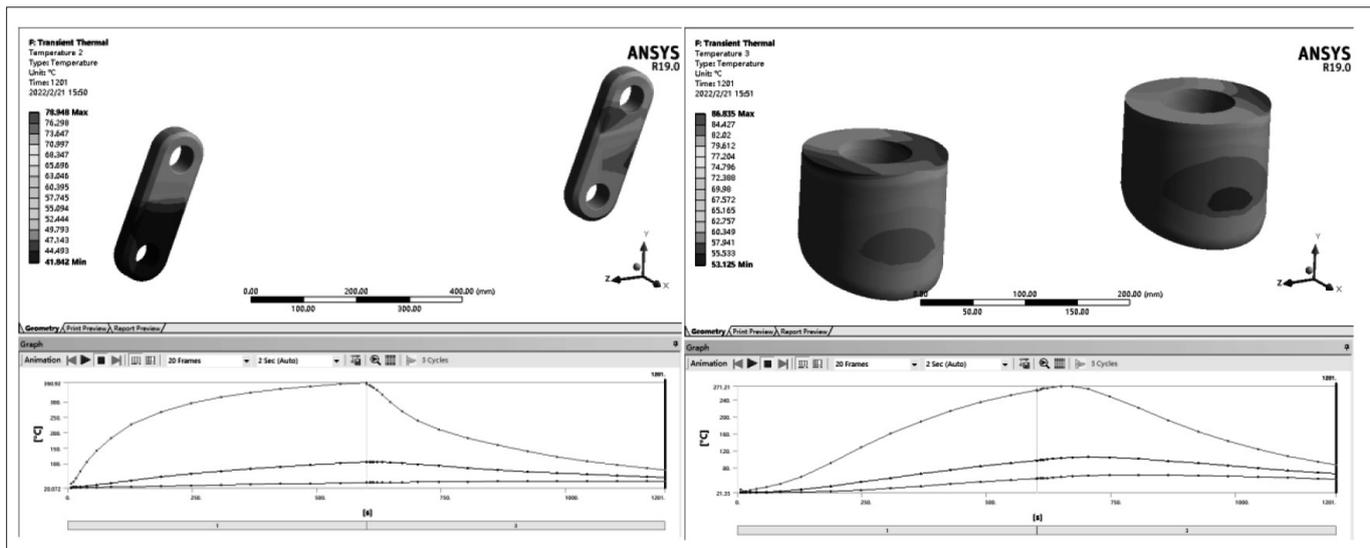


图5 冷却后的温升曲线分析结果

末冷却到 86℃。

4.6 结论

将以上分析的数据导出，温度分布曲线对比如图6所示，引入冷却气体后的温度分布明显有下降，下降 70 ~ 80℃，能够对连杆、柱塞的使用工况带来很大的改善。

5 试验

为了验证以上计算及仿真结果，利用报废的旧件进行加热及冷却试验，在报废的空心轴上加工空气流道，利用陶瓷加热器对扇形板外圆加热，分别做不引入和引入压缩空气的试验。试验现场如图7所示。

陶瓷加热器功率不大，加热速度较慢，首先将扇

形板外圆温度加热到 200℃后再对连杆及柱塞进行测温，试验数据见表1。加冷却气体和不加冷却气体时，连杆和柱塞的温度变化较大，证明在热轧卷筒内部加入冷却气体能够有效地改变连杆、柱塞等易损件的温升，可有效地提高寿命。

6 结语

本文先理论计算再进行有限元分析，并通过现场试验，都能够证明在热轧卷筒内部引入冷却气体能够有效地对各滑动部件进行降温，达到提高使用寿命的目的。只需更换旋转接头，并在空心轴上增加通气孔，实现方法非常简单，并且可以和原结构热

(下转第33页)

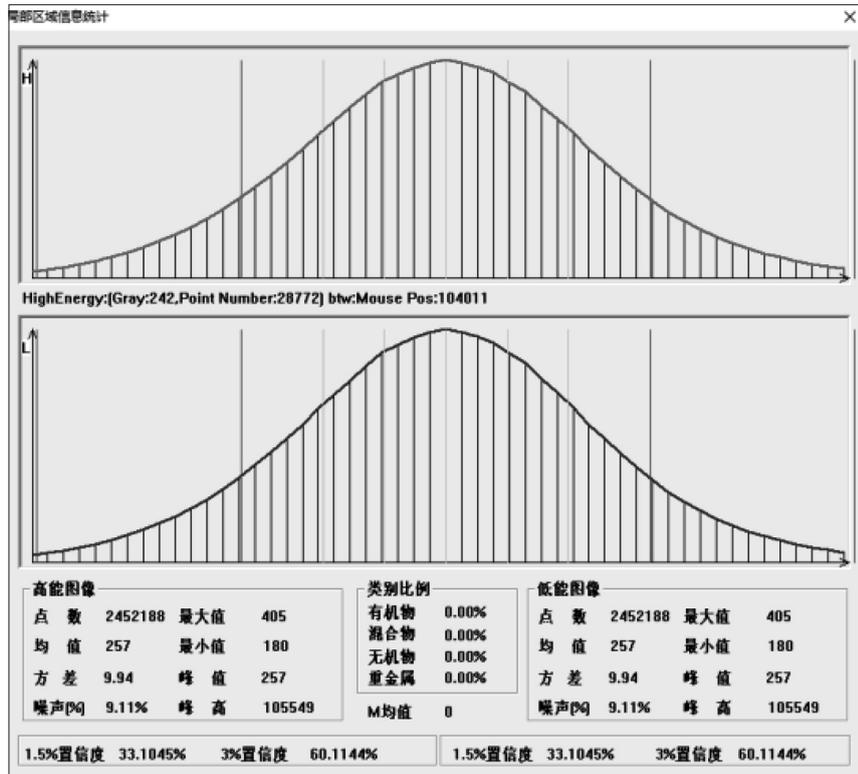


图8 消除干扰本底图像及其统计方差

[3] 中华人民共和国公安部. 乘用车X射线安全检查系统技术要求: GA/T 1731-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 辐射型货物和(或)车辆检查系统: GB/T 19211-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

作者简介: 张利(1982.04-), 男, 汉族, 山东烟台人, 工程师, 硕士研究生, 研究方向: 安全检查设备的机械设计。

(上接第28页)

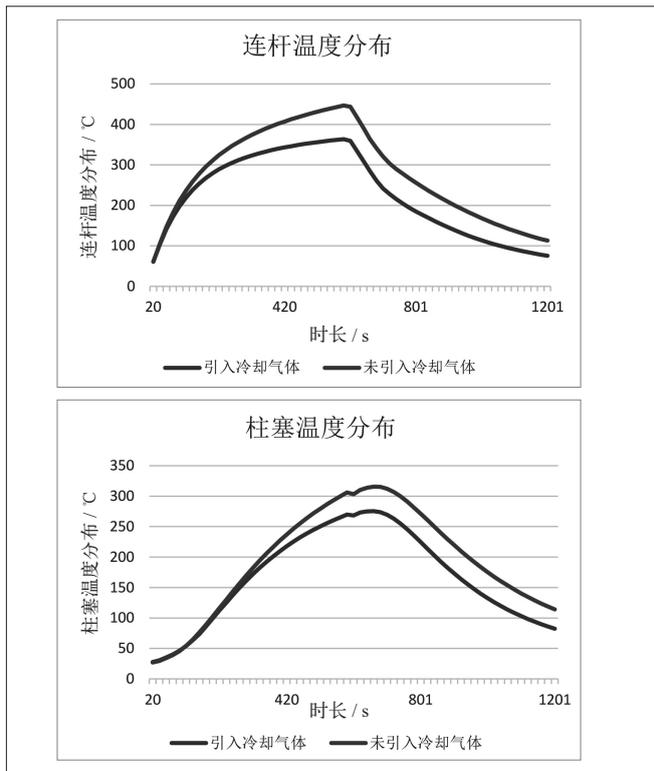


图6 温度分布曲线对比



图7 试验现场

轧卷筒完全互换使用。

参考文献:

- [1] 赵盛琨, 李勇. 热连轧带钢卷取传动过程中扇形板产生龟裂原因及防治措施[J]. 机械传动, 2016, 40(03):156-159.
- [2] 漆小虎, 何奕平. ESP生产线与常规热连轧生产线的对比分析[J]. 中国重型装备, 2019(02):1-3+6.