

仿真技术在轨道车辆冷弯成形件中的应用

■ 南车青岛四方机车车辆股份有限公司（山东 266111） 吕安松 安 剑 付炳欣

摘要：为满足轨道车辆不锈钢车体高强度、轻量化和耐蚀性的要求，高强度奥氏体不锈钢冷弯制件在轨道车辆行业应用越来越广泛。目前轨道车辆车体冷弯制件制造商多依赖试错法，这种方法生产效率低、试制成本高。本文以地铁车辆车体用边梁为例，介绍了采用COPRA设计仿真软件，对成形辊花进行优化设计，通过仿真计算可以提前预测成形过程中可能出现的缺陷，从而优化成形工艺和轧辊模具结构，缩短了试制周期、降低了试制费用。

冷弯技术是一种节材、节能、高效、先进适用的板金成形工艺。近几年，随着不锈钢材料在高速动车组和城轨地铁车辆上的广泛应用，为适应轨道车辆对不锈钢车体高强度、轻量化以及外形美观的要求，车体主要的承载件和外观制件大量采用了冷弯成形技术。目前，不锈钢车体使用的冷弯成形制件质量已经超过车体总重的10%以上，冷弯成形由于其工艺上的优势，在轨道车辆方面应用越来越多。

1. 冷弯成形设计软件 COPRA

COPRA软件是德国Date M公司解决辊式冷弯型钢设计的集成软件，可以模拟冷弯型钢的成形过程，在计算机屏幕上显示出实际结果，进行成形工艺模拟和辊花设计等工作，技术人员可以通过修改变形顺序和成形角度，用计算机模拟预测某一变形道次上产品的缺陷，然后修改设计。

在多方面帮助设计者得到最优的设计结果，快速完成工艺分析工作。

仿真分析以设计资料提供的冷弯型钢件截面图为原始输入条件，根据经验设计，不同的辊花展开图，通过软件快速优化后选择最优的辊花图进行轧辊配对设计，并以此估算轧辊模具成本。选择初步优化设计进行有限元数值仿真，对成形过程进行仿真，预测产品可能会出现的缺陷，进一步优化轧辊模具设计，提高产品的成形质量，缩短产品的开发周期。

2. 应用实例

以不锈钢地铁车体用边梁（见图1）为例。边梁采用2.0mm的EN1.4318高强度奥氏体不锈钢，该材料强度高、回弹大。而不锈钢材料强度的增加，相应地给制件的冷弯成形带来了一定的困难。需要对其加工硬化性、大回弹、成形所需的大动力、润滑方法和高表面质量等情况进行特殊考虑。边梁材料性能如附表所示。



图1 车顶边梁截面图

（1）工艺分析。该零件采用冷弯成形制造时，设计该零件冷弯成形工艺路线为：开卷→矫平→修边→冷弯成形→回弹控制→矫直定型→定尺切断→打包。

其中冷弯成形和回弹控制是关键技术及工序。成形辊花的设计原则为材料按照理想的方式平滑顺畅流动，适当足够的成形道次数，避免材料的划伤和表面缺陷。针对材料EN1.4318的超高强度和很强的加工硬化性能，首先需要解决材料的巨大回弹量，采取过弯补偿方式措施。在不产生产品缺陷的前提下，尽可能地减少成形道次数，以减少加工硬化

边梁材料力学性能表

材料	厚度/mm	轧制方式	0.2%规定强度/MPa	1%规定强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂延伸率/(%)
N1.4318	2.0	冷轧	350	380	650~850	35

的影响。

通过设计过弯变形方法实现回弹补偿。由于材料的强度很高，回弹角度的确定是关键。采用COPRA RF软件中的BISWAS回弹计算公式：

$$\frac{r_{i1}}{r_{i2}} = 1 - 1.5 \cdot \frac{r_{i1}}{r_f} + 0.5 \cdot \left(\frac{r_{i1}}{r_f} \right)^3$$

式中， $r_f = (E \times t) / 2 \times S$ ， r_{i1} 为要弯曲半径（mm）， r_{i2} 为回弹后半径（mm）， r_f 为屈服曲率（mm）， E 为杨氏模量（MPa）， t 为板料厚度（mm）， S 为材料屈服应力（MPa）。

理论计算的回弹结果如图2所示。设计的过弯回弹补偿如图3所示。

基于以上要点，设计了边梁的冷弯成形工艺辊花图（见图4、图5）。

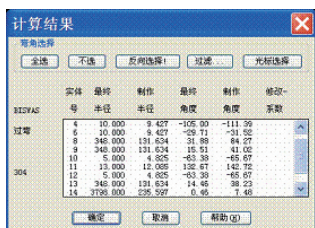


图2 回弹的理论计算结果

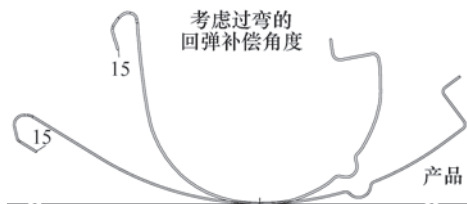


图3 过弯回弹补偿

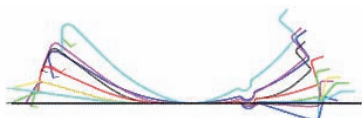


图4 辊花图设计

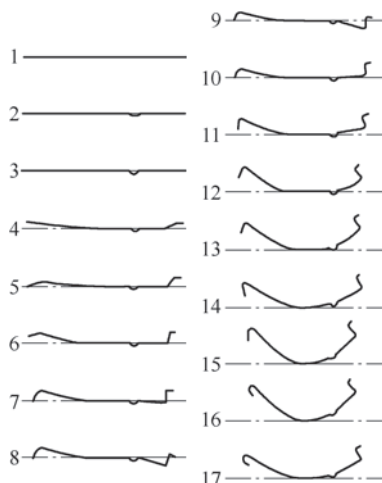


图5 辊花图设计

(2) 初步分析优化。COPRA RF冷弯成形软件中，DTM变形技术模块可以实现应力应变的计算和仿真，是一种简化的仿真分析技术。计算一个结果需要的时间在几秒至几分钟之间，分析效率高。可以用于设计的初步优化。

使用该模块，对所设计的辊花进行初步分析，可以确定出弯曲和曲率引起的材料应变、找到轧机使用的最适宜的辊花工艺参

数（见图6）。

(3) 模具设计及成本估算。根据优化后得到的辊花图，可以初步设计出成形时使用的轧辊模具图（见图7）。

通过轧辊设计图可以计算出轧辊质量。因为行业中轧辊的成本是按照轧辊的质量计算的，轧辊质量就直接反应了模具的成本（见图8）。

(4) 指导生产。确定成形方案后，对成形过程使用COPRA FEA进行有限元分析计算，COPRA FEA是Data M公司提供的专门用于冷弯成形行业的非线性有限元分析软件。该软件采用了MSC MARC的核心算法，实现了COPRA与MARC的无缝连接。通过该软件，可以直接导入COPRA RF的设计数据，从而快速实现有限元分析的前处理，大大简化了前、后处理。有限元网格划分如

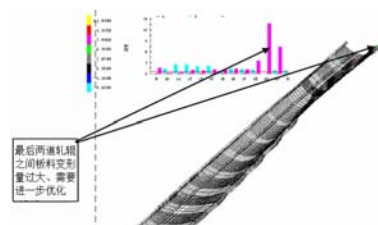


图6 边梁辊花DTM分析

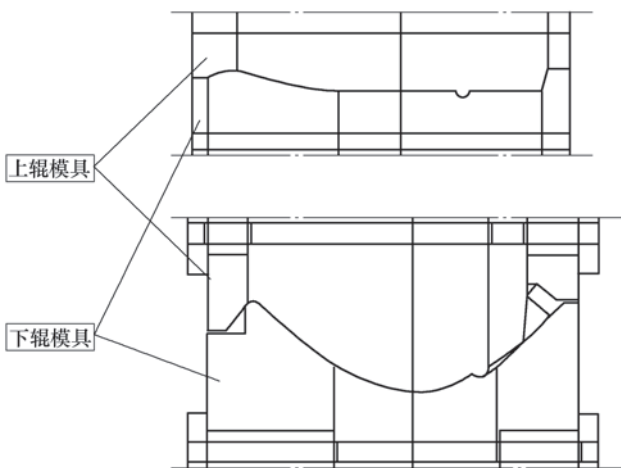


图7 轧辊模具设计

序号	机架序号	方案3	方案4	备注
		轧辊总重/kg	轧辊总重/kg	
1	1	410.019	690.550	
2	2	554.341	695.789	
3	3	548.945	691.546	
4	4	549.729	696.420	
5	5	545.631	696.969	
6	6	532.103	667.987	
7	7	530.383	655.585	
8	8	510.930	640.195	
9	9	697.378	1 154.481	
10	10	1 199.318	1 096.462	
11	11	1 130.477	1 096.324	
12	12	1 159.991	1 080.725	
13	13	1 170.312	1 324.327	
14	14	1 137.374	6.633	
15	15	1 110.324	1 354.808	
16	16	1 451.901		
17	17	1 312.630		
18	18	1 182.048		
19	19	1 166.795		
20	20	1 348.828		
21	21	1 494.018		
22	22	1 634.952		
总重 (kg)		2 1338.4	1 2538.8	方案3-方案4 -8 799

不同设计方案
模具重量
比较

图8 不同方案轧辊质量对比

图9所示。

图10所示是车顶边梁仿真成形后的最终形状，可看出两小翻

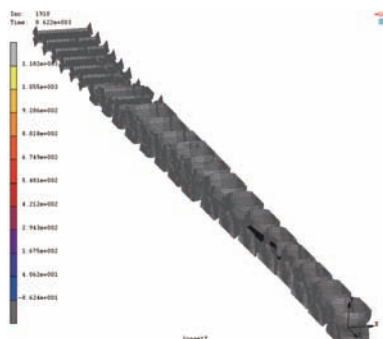


图9 成形模具网格划分

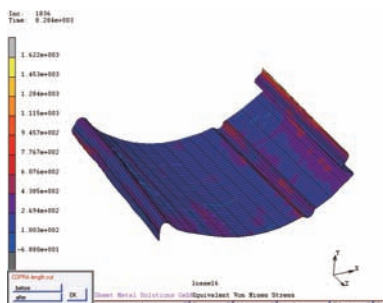


图10 边梁仿真成形后的最终形状

边略有边波产生。

图11所示是设计截面与仿真截面对照，红色轮廓为仿真截面，蓝色为辊花截面（设计截面）。两侧都出现明显偏差。分析原因是左侧上辊配辊不完整。右侧上辊配辊多余，造成干涉。后续需要对轧辊进一步修改优化。

各个机架的应变历程（选择边缘上的节点分析）如图12所示，除第17机架外最大应变均小于2%，属于较好的成形状态。

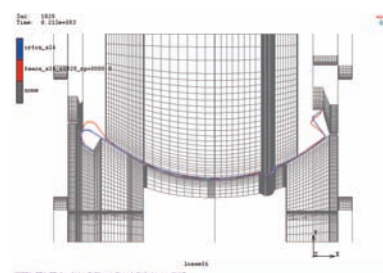


图11 设计截面与仿真截面对照

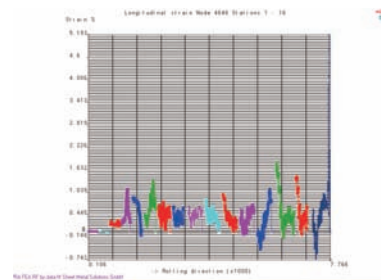


图12 成形过程的应变历程

通过在生产前对成形过程中易产生的缺陷进行预测，可以提前采取控制措施，减少缺陷的发生。图13、图14为最终生产的制件，质量良好，满足了使用要求。



图13 最终生产制件

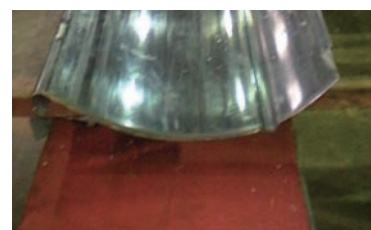


图14 最终生产制件断面

3. 结论

由于不锈钢强度高，成形难度大，常常产生表面划痕、扭曲、局部边波等缺陷，随着计算机技术的发展，计算机辅助设计与计算机仿真技术正逐步应用到冷弯成形行业中。通过FEA仿真，有助于发现成形中可能出现的问题，从而进行优化设计加以避免。它不仅可以提高冷弯制件的成形质量，也可大大缩短产品的开发周期。**MW**

(收稿日期：20151024)