

# 有限元在板材轧制过程中的应用

宝山钢铁集团技术中心 阴雪莲 焦四海

**摘要：**本为介绍了 ABAQUS 软件在板材热轧工程中的一些典型应用。分析了钢板加速冷却过程中残余应力的影响因素，阐明了各因素对冷却后板坯温度分布的影响。分析了板材轧制过程的传热状况，给生产设计提供了合理的工艺参数。最后，用有限元方法对 MAS 轧制过程的厚度分布进行控制分析。

**关键词：**热轧 加速冷却 有限元计算 温度场 板形控制

## 1 前言

金属板带热轧过程是一个非常复杂的弹塑性大变形过程，既有材料非线性、几何非线性，又有边界接触条件非线性变化，因此其变形机理非常复杂，难以用准确的数学关系式来描述。随着板带轧制技术的日益发展，人们对其在成型过程中的变形规律、变形力学的分析越来越重视。有限元技术随着大型有限元模拟软件的日益成熟和完善，已成为一种被广泛应用于板带轧制过程的有效数值计算方法。

ABAQUS 软件提供了复杂的非线性分析程序，且拥有功能强大的子程序接口。因此无论是从计算收敛性、精确程度的角度，还是从方便程度的角度，均有较高的优选价值。

## 2 板材轧制过程的应用分析

### 2.1 钢板加速冷却过程中残余应力分析

加速冷却工艺广泛应用于生产高强度、高韧性和具有良好焊接性的钢板，但客户却普遍反映钢板带有一定的残余应力，影响后续加工。这里用有限元方法分析了加速冷却过程中钢板的残余应力，并在其中嵌入了用户子程序，体现了相变对力学性能的影响。

#### 2.1.1 有限元模型

模型中板坯采用了宽度为 3.5m 的低碳微合金钢，厚度分别为 20mm、30mm、40mm 和 50mm。为节省计算时间并确保计算精度，板坯的长度定为 4m，宽度方向按对称面取一半进行分析，如图 1 所示。材料的力学性能通过软件的用户子程序来实现，考虑到了冷却速度、相变及相变温度的影响。

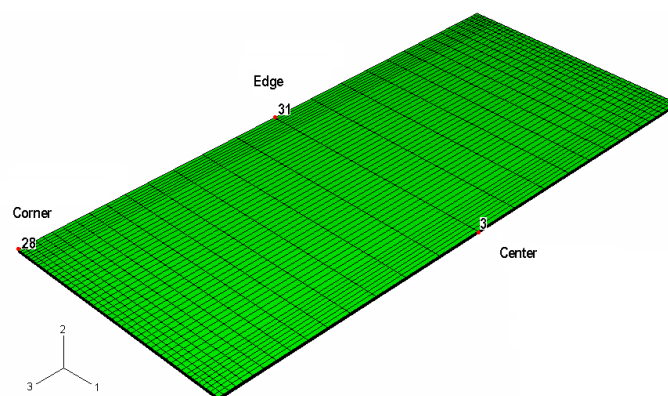


图1 板坯网格划分

将冷却过程分为两个阶段，首先从 750℃ 开始进行 10s 的喷水冷却，然后进行第二个阶段的空冷。对于 20mm 厚的板坯，水冷的平均冷却速度约为 25℃/s，冷却到平均温度 500℃ 截止。

在分析切割后钢板的扭曲变形时，用到了 ABAQUS 中 element remove 的功能。作为初步研究，仅计算了切边宽度为 500mm 的情况。

### 2.1.2 分析方案

这里研究了板坯不同初始状况对残余应力的影响，板坯的初始状况包括初始温度分布及板坯凸度。初始温度分布包括整体 750℃ 的均匀分布和边部 710℃、心部 750℃ 在宽度方向呈抛物线趋势的不均匀分布。板坯凸度是指板坯中部和边部厚度的差值，这里分别研究了凸度为 0mm、0.25mm、0.5mm 和 1mm 的情况。在实际生产中，初始温度均匀分布、凸度为 0 的情况是不可能存在的，模拟这种情况只是作为参照比较的依据。

这里主要分析厚度为 20mm 的板坯，用以阐明初始状况对冷却过程的温度变化、残余应力分布、切割后的板条变形情况的影响。

### 2.1.3 计算结果

#### 1. 初始状况对板坯温度的影响

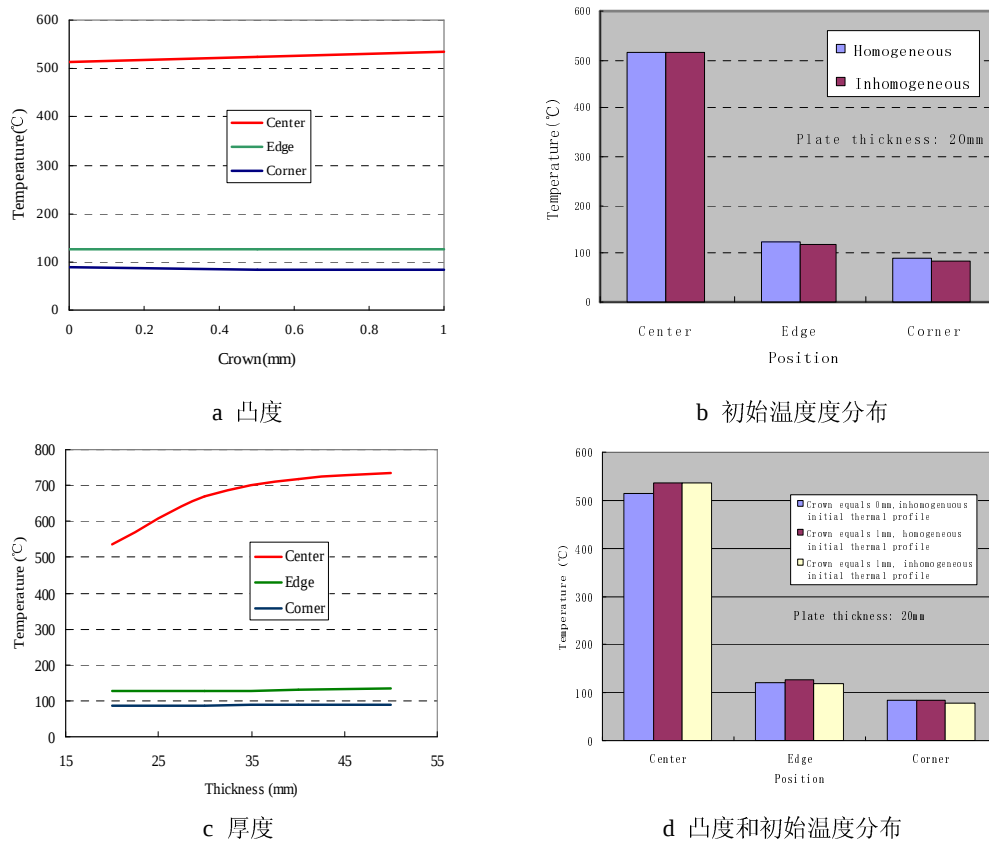


图2 各种因素对水冷后板坯温度的影响

图2-a 展示了凸度对板坯水冷后典型节点温度的影响。凸度的增加导致了水冷后心部温度较高，而对边部和角部温度影响并不大。

初始温度分布对水冷后板坯典型节点温度的影响如图 2-b 所示。在心部，温度并没有太大差别，而边部和角部的温度差别则比较大，初始温度分布不均匀的板坯边部和角部温度较低，尤其是在水冷之后。对于初始温度均匀分布的板坯，边部和心部的温差为 386℃，角部和心部的温差为 424℃；对于初始温度非均匀分布的板坯，温差分别为 393℃和 429℃。

以上的分析表明虽然板坯的初始状态对残余应力的产生有一定影响，但水冷阶段的不均匀冷却才是主要原因。对于厚板，这种水冷的不均匀性要大于薄板。具有不同厚度、凸度为 1mm、初始温度不均匀分布的板坯 10s 水冷后的温度分布情况如图 2-c 所示。随着板厚的增加，边部和角部的温度并没有明显的变化，然而心部的温度却从 535℃变到了 735℃。这种由板坯厚度引起的温差要远远大于由初始温度和凸度引起的温差，将导致板坯中产生较大的残余应力。

## 2. 残余应力分布及切割后板条的变形情况

板坯沿纵向切割后，断面的残余应力得以释放，板条发生变形，如图 3 和图 4 所示。在切割完的 0.5m 宽的板条上，残余应力从 200MPa 左右变化到约 60MPa，边部和端部的应力值较低。图 7 展示了切割下来的板条在 1 方向（宽度方向）的位移。靠近边部的位移值为正，而靠近切割面的位移值为负。两端的正位移值要大于中部的，而两端的负位移值的绝对值要小于中部的，板条的中部向外侧发生弯曲。初始温度分布不均匀的板条变形更大一些。

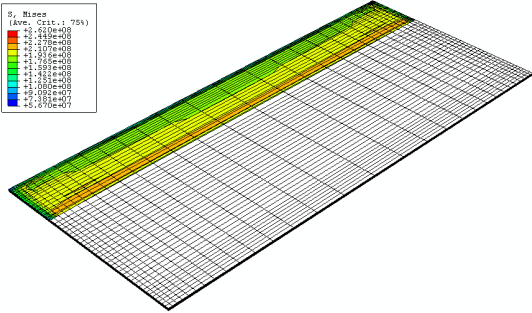


图 3 切割后板条的残余应力

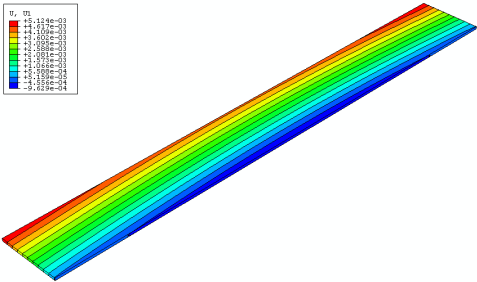


图 4 切割后板条的变形情况

## 2.2 板材轧制过程传热分析

在设计轧机前，需要计算在轧制时轧件传递了多少热量给轧辊，这对轧辊的设计有着重要意义。

这里，轧制过程每道次的压下率要求都比较大，累积压下率达到了95%，在长度方向上延伸率达到了26倍。图5是轧制前的网格分布，图6是轧制后的网格分布。在这里用到了“DISTORTION CONTROL”，使计算不会因网格变形过大而停止。

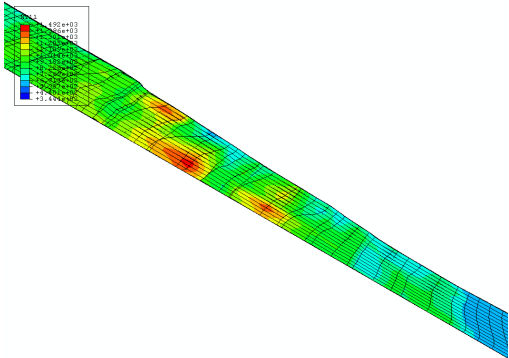
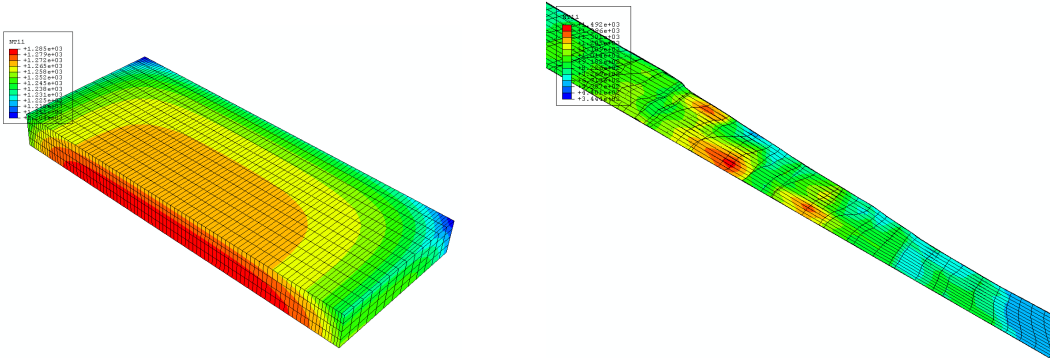


图5 轧制前的网格分布

图6 轧制前的网格分布

下面是有限元计算得到的结果,其中次轧件在第一和第二道被压下处各点的温度分布如图8所示,并计算得到了轧辊的温度变化,这些结果对生产设计起到了指导作用。

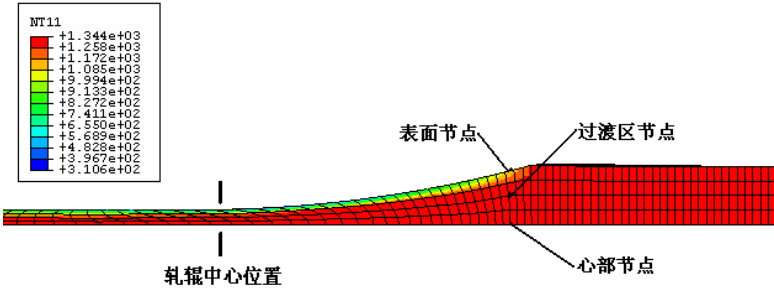


图7 典型节点示意

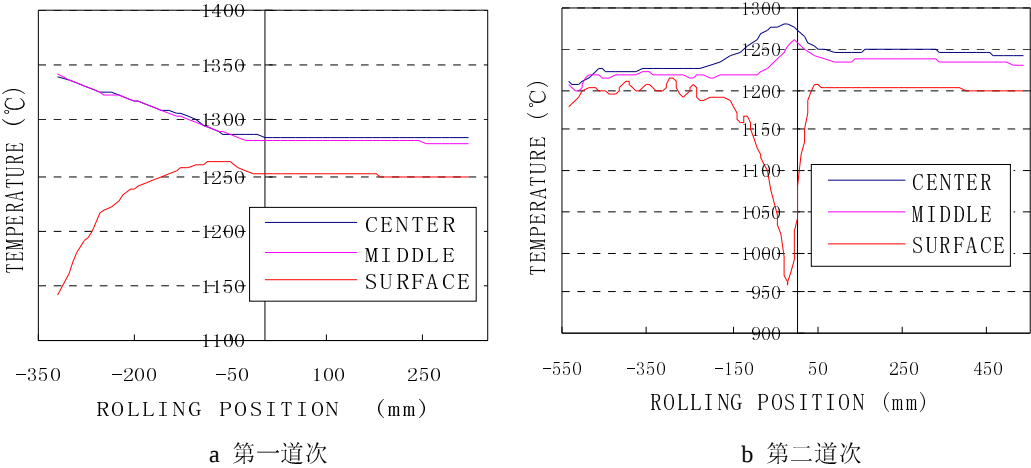


图8 轧件温度分布

### 2.3 MAS轧制平面形状控制分析

平面形状控制技术是现代宽厚板轧机标志性技术之一。国外已采用MAS等平面形状控制技术提高宽厚板的成材率。该技术通过预测每块钢板轧制终了的平面形状变化量,给出相应的压下量来控制辊缝的开度以改变板坯的厚度,最终使钢板的平面形状成为矩形。控制过程如下:

- (1) 由预报模型求得边部和端部形状的变化量,把它换算成成形轧制最终道次的板厚分布;
- (2) 在成形轧制的最后一个道次中,给沿长度方向相应各点以规定的厚度差,如图9所示;

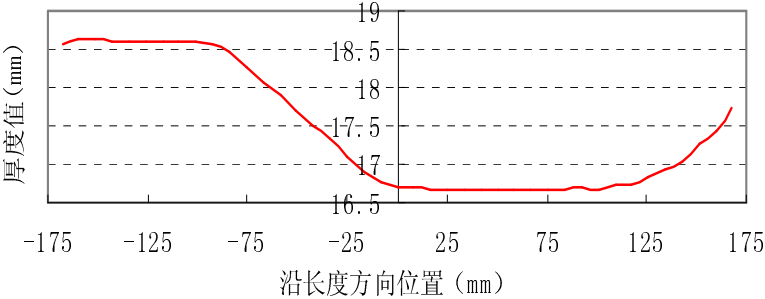


图9 MAS 轧制的厚度分布

(3) 将板坯回转90° 进行展宽轧制, 由于宽向厚度不同, 从板边到板中心的压下率也不同, 从而使平面形状得以改善。轧制后的形状如图10所示。

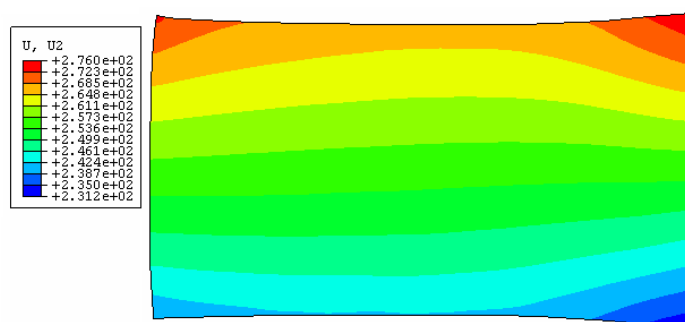


图 10 MAS 轧制最终板形

MAS 轧制法的要点是正确预报终轧后的形状, 定量取得轧制过程中的平面形状变化。用有限元方法分析MAS轧制过程的金属流动变形对指导生产及提高成材率均具有一定的实际意义。

### 3 结论与体会

随着计算机软硬件技术以及有限元计算技术的发展, 有限元法在板带轧制问题方面的应用已较成熟。在中厚板热轧成形过程中采用有限元方法进行数值模拟分析可以为实际生产提供合理的工艺参数, 加速新材料新工艺开发速度, 精确的预估、更好的实现设计, 减少物理模型的数量, 降低开发成本。总之在各个方面都预示着, 有限元在板材轧制的各个环节将发挥着重要的作用。

### 参考文献

- [1] ABAQUS 6.5 User's Manual
- [2] Sihai Jiao, Xuelian Yin. FEM Simulation of the Residual Stress in Steel Plates Experienced Accelerated Cooling. Materials Science & Technology Conference Proceedings. 2005
- [3] C Ouchi, Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes, ISIJ International, 41(6) (2001): 542-553
- [4] 杨乃忠. 宝钢5m厚板轧机上应用的平面形状控制技术. 宝钢技术, 2003, (5): 22-24