



# 轨道列车用大型扁宽铝型材 挤压模具设计及优化

案例制作：林高用 教授

中南大学材料科学与工程学院

# 内容 提 纲



● 案例来源及背景

● 106XC挤压型材

● CAE虚拟试模及模具优化设计

● 106XC型材挤压生产

● 结束语

# 一、案例来源及背景

➤ **案例来源：**国内某模具加工企业

➤ **案例背景：**在铝型材挤压时，尤其是大型、复杂、空心型材挤压时，模具的工作条件十分恶劣，引起模具损坏的因素也较复杂。因此，在模具设计时应选择合适的模具材料，选择合适的挤压设备，进行可靠的强度校核，规定合理的热处理工艺和加工工艺，选择合理的模具结构等。

轨道列车车体用大型扁宽铝合金结构型材属于难成型型材，在挤压生产过程中，金属流动十分不均匀，宽展时金属反向流动，很难平衡供料，往往需要**5次**以上的挤压试模、修模才能生产出合格产品。传统的模具设计和工艺分析主要依靠工程类比和设计经验，并没有较完整的理论体系。只有在模具投入生产以后，才从产品的质量中得到评价和分析，通过反复修模使模具达到使用要求，这必然**增加模具设计和制造的成本**，并**提高模具设计的风险**。

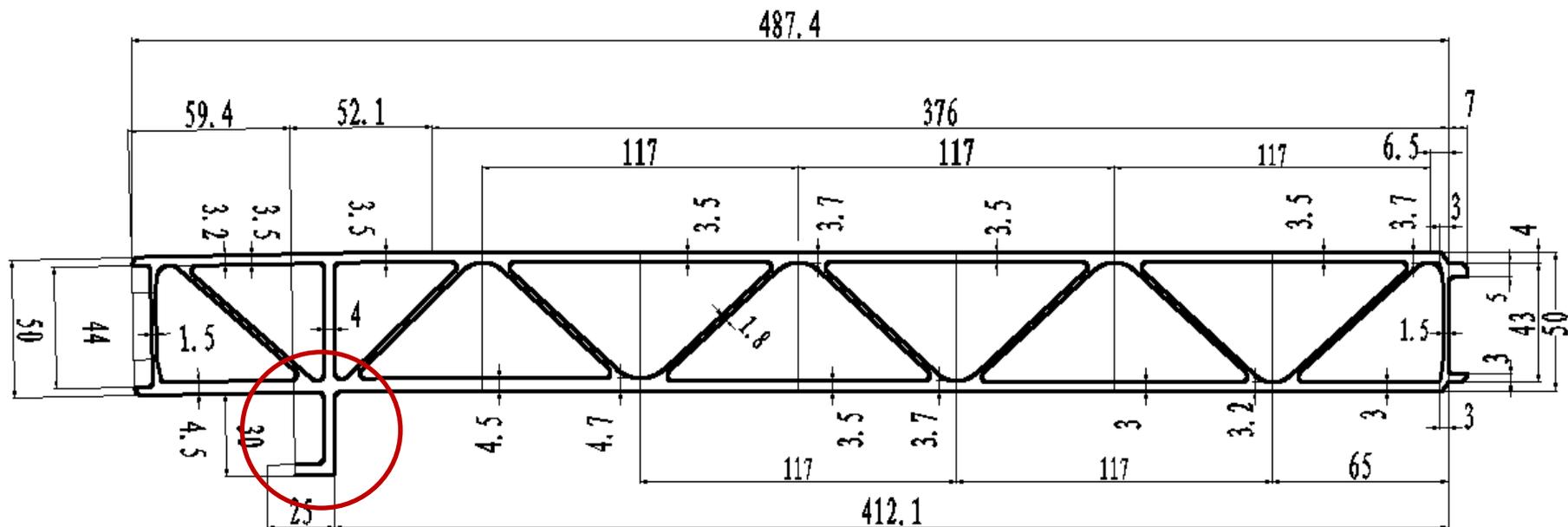
# 一、案例来源及背景

## ➤ 案例背景：

在铝合金挤压过程中，通过CAD/CAE/CAM技术的集成运用能为模具优化设计提供重要参考信息，显著提高模具使用寿命，缩短模具开发周期，降低成本，提高经济效益；同时，也能减轻模具设计者的劳动强度。

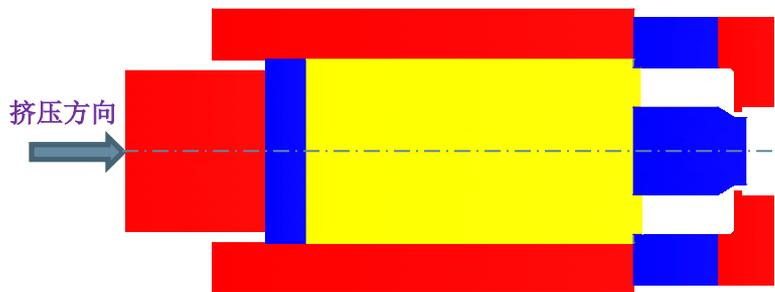
本案例涉及的**106XC大型型材**分流挤压模，是**山东丛林公司**订购的产品，因此工程试模及挤压生产均在该公司完成。通过研究生联合培养的形式，开展轨道列车车体铝合金型材挤压生产用大型、复杂、精密挤压模具的设计、加工、热处理及虚拟试模等方面的系统研究。

## 二、106XC挤压型材

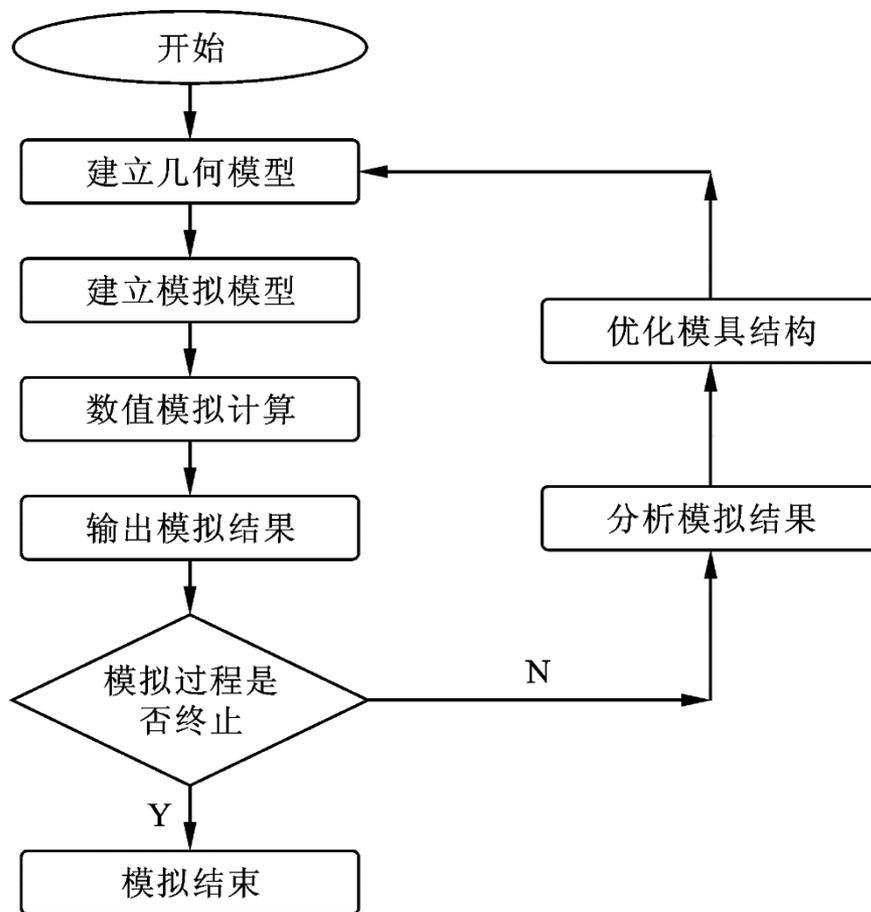


106XC型材位于车体侧板部位，属于大型、多腔、薄壁、扁宽型材。型材最大外接圆直径 $D_{外}=500\text{mm}$ ，供料长度24.6m，型材各处壁厚相差较大，最大壁厚4.5mm，最小壁厚1.5mm，型材宽487.4mm，尤其单侧有一个L形翅片（红色圆）。因此，属于非对称、难成形宽扁铝型材。

# 模具设计思路



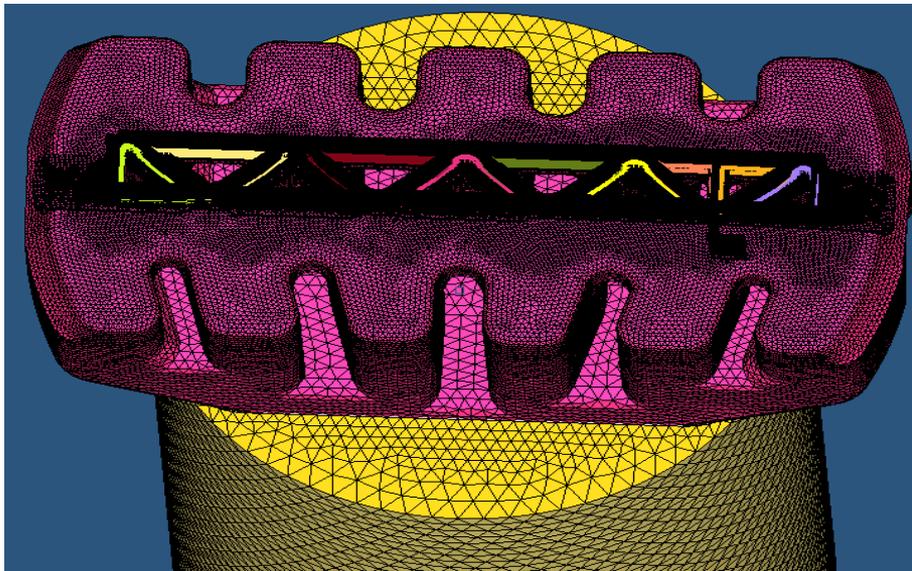
- 在挤压成形过程中，铝合金要经历加热、整体流动、分流、焊合、定型、冷却等多个交叉耦合阶段，采用物理实验和现有的测量仪器与手段基本上无法了解铝合金的成形机理和变形规律。
- 运用**CAE仿真技术**则可以模拟挤压成形过程，揭示金属的流动规律和各种物理场量的分布、变化情况，可用于指导开展模具优化设计，从而减少实际试模次数，降低试模成本。



优化设计方案流程图

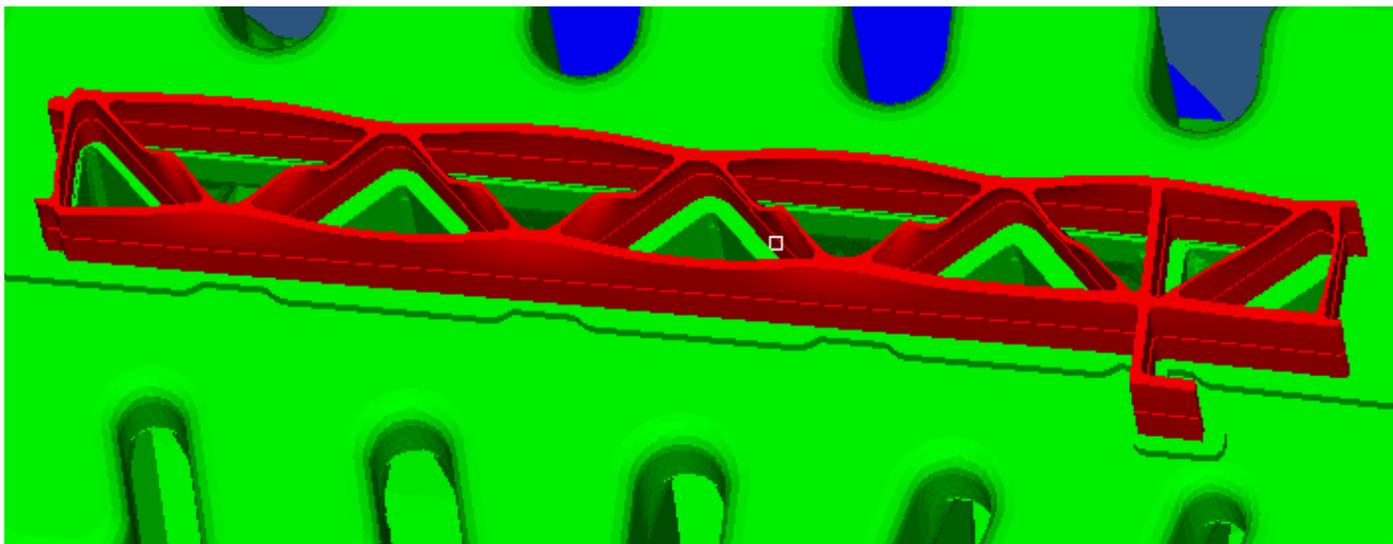
## 计算机仿真模拟初始参数设置

物理参数	设定值
坯料温度/°C	510
模具温度/°C	480
挤压筒温度/°C	460
挤压速度/(mm/s)	1
库仑摩擦系数	0.4
剪切摩擦因子	0.95
传热系数/(W/m <sup>2</sup> )	3000
坯料直径/mm	450



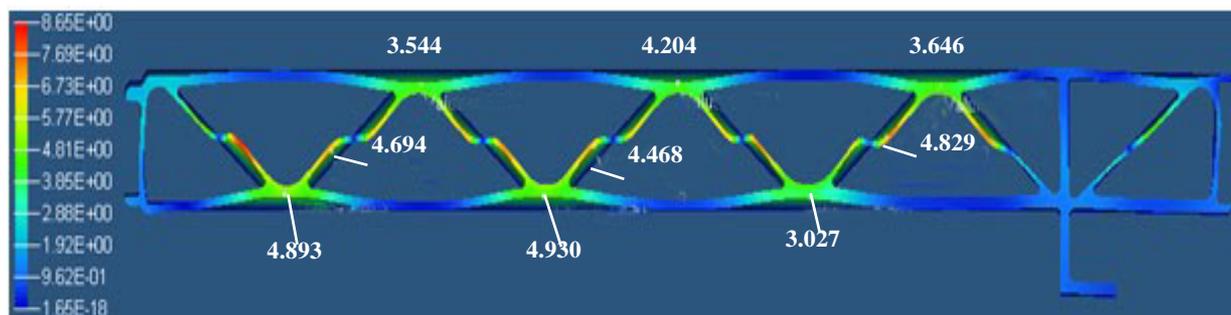
计算机仿真模拟模型

## 初始设计数值模拟结果分析



型材上、下大面与各斜筋连接节点内凹，八条斜筋不平整。

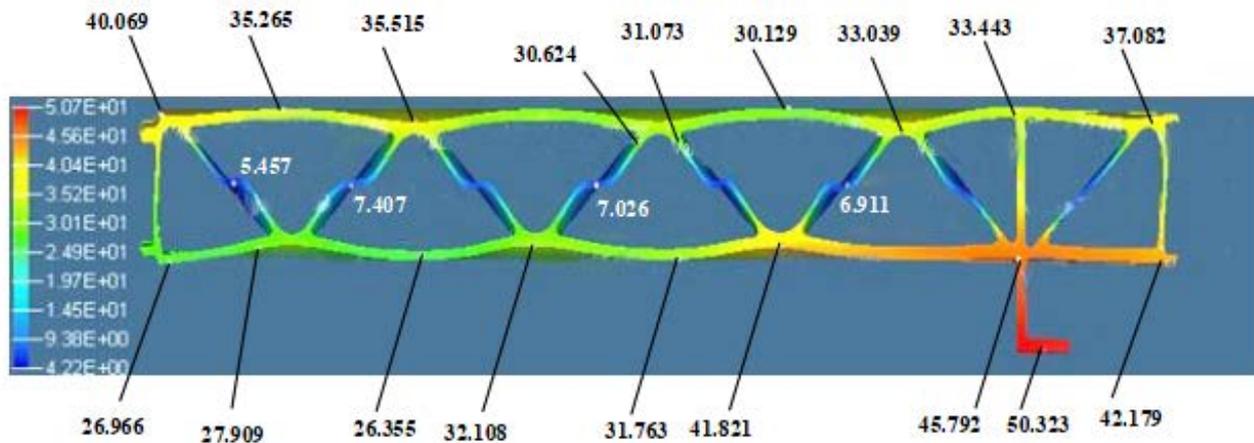
初始设计方案模拟的挤出型材图



型材上、下大面与各斜筋连接节点、型材八条斜筋变形量均较大，最大变形量达到8.65mm。

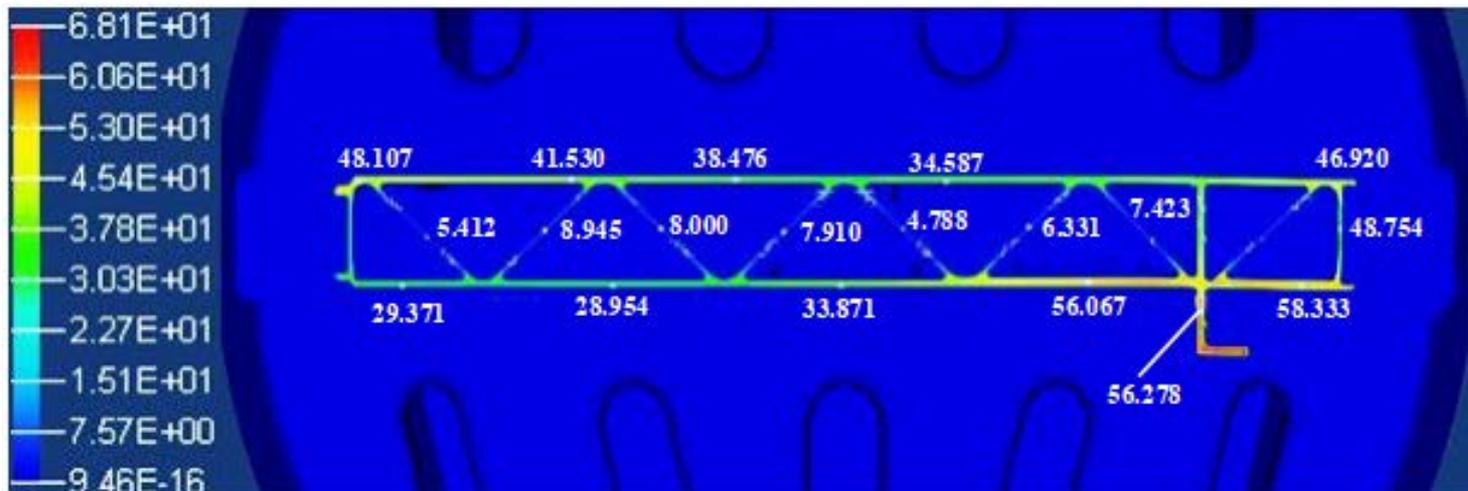
初始设计方案模拟的挤出型材变形分布图

# 初始设计数值模拟结果分析



初始设计方案模拟的挤出料头速度分布图

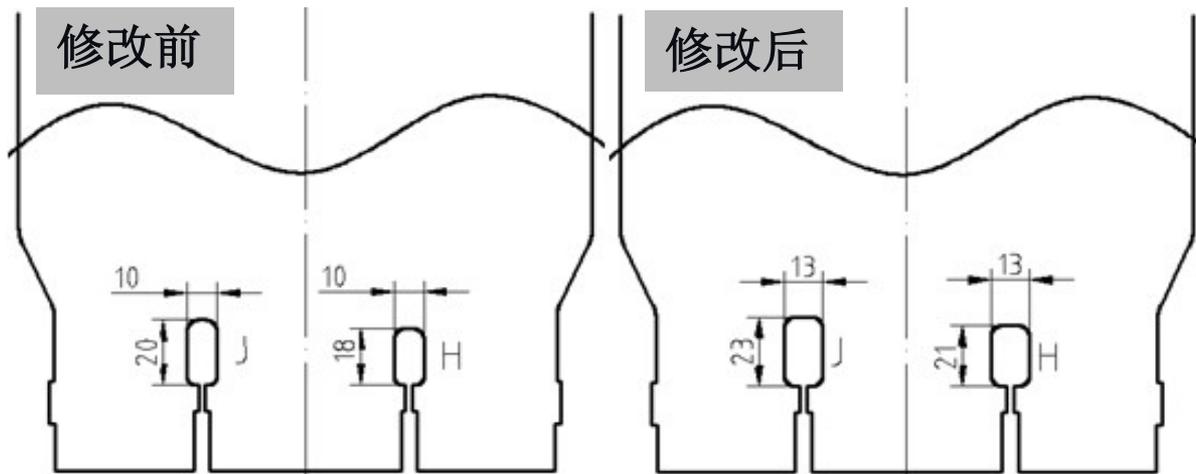
型材中间斜筋部位金属流速太慢，与此对应，型材右下角翅片部位金属流速48mm/s左右；且型材下边大面右侧部分与左侧部分流速不均衡，右侧部分金属流速整体偏快10 mm/s以上。



初始设计方案模拟的模孔金属流速分布图

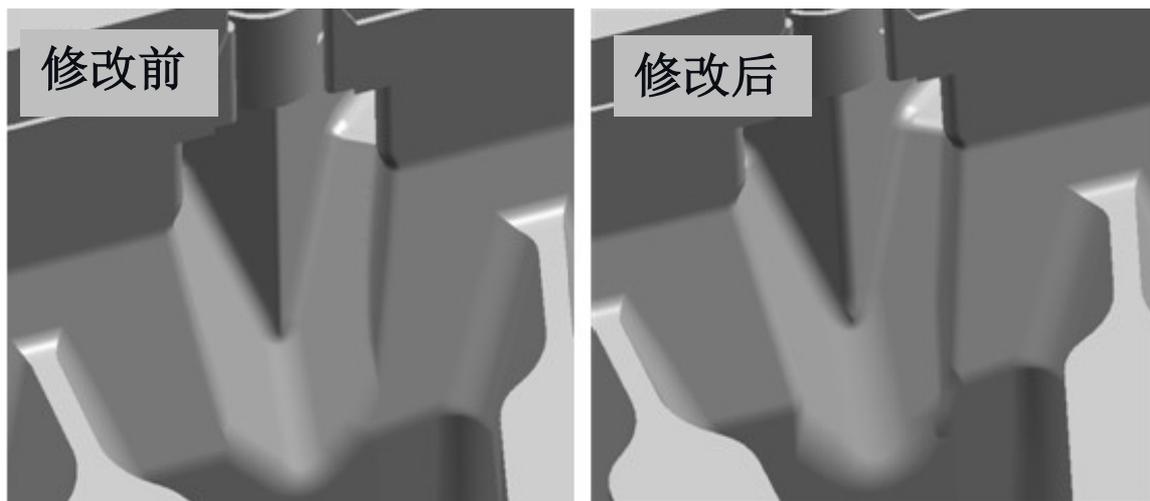
模孔出口处金属流速分布与型材出口处金属流速分布规律一致。

## 第一次优化设计数值模拟结果分析



模具引流通孔第一次优化前后对比图

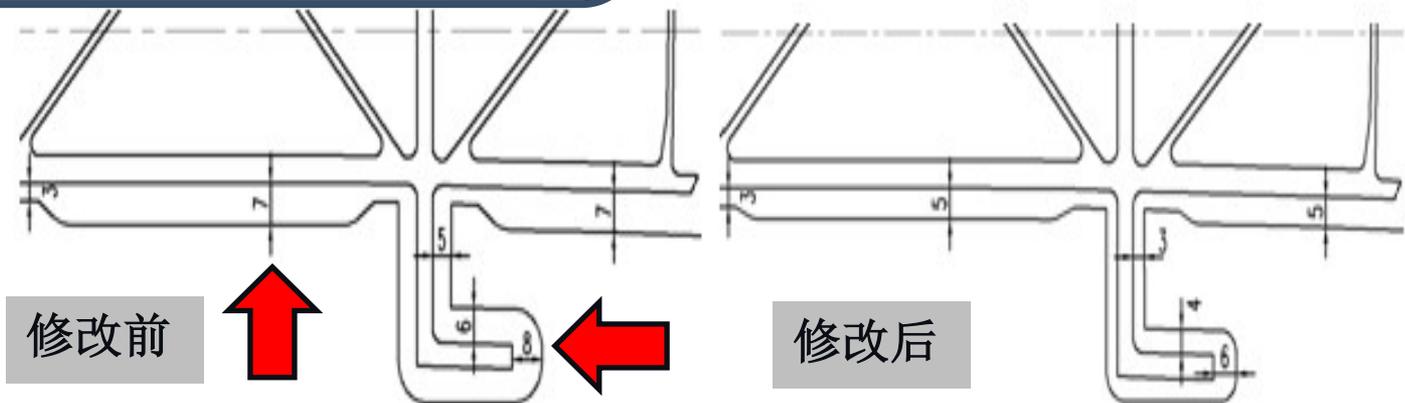
将原来J处  
 $10 \times 20\text{mm}$ 的引流通孔调整为  
 $13 \times 23\text{mm}$ ；将  
原来H处  
 $10 \times 18\text{mm}$ 的引流通孔调整为  
 $13 \times 21\text{mm}$



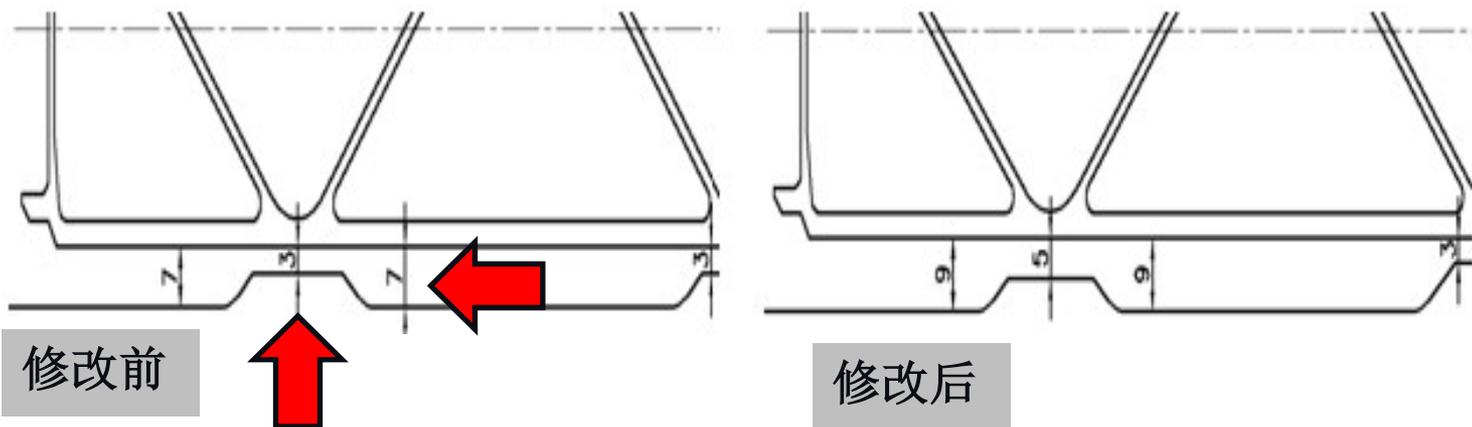
模具引流斜槽优化前后对比图

增大引流斜槽的  
斜度，将引流斜槽  
 $26^\circ$ 喇叭角  
调整为 $30^\circ$

## 第一次优化设计数值模拟结果分析



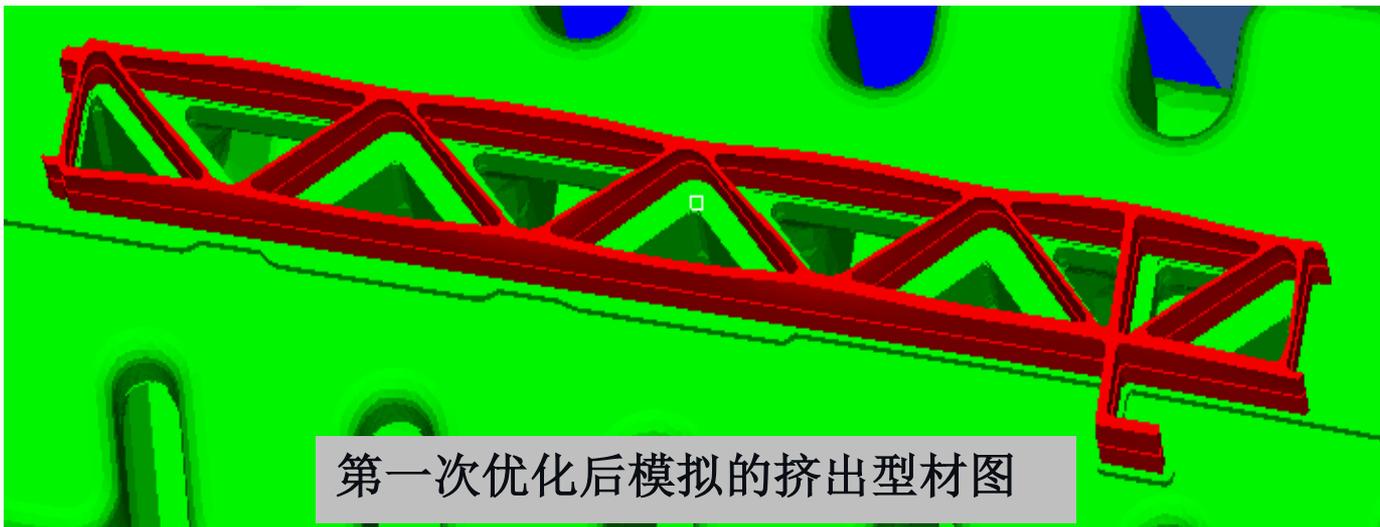
缩窄右下侧及平模部位二级**焊合室**尺寸，降低其对应处金属流速。



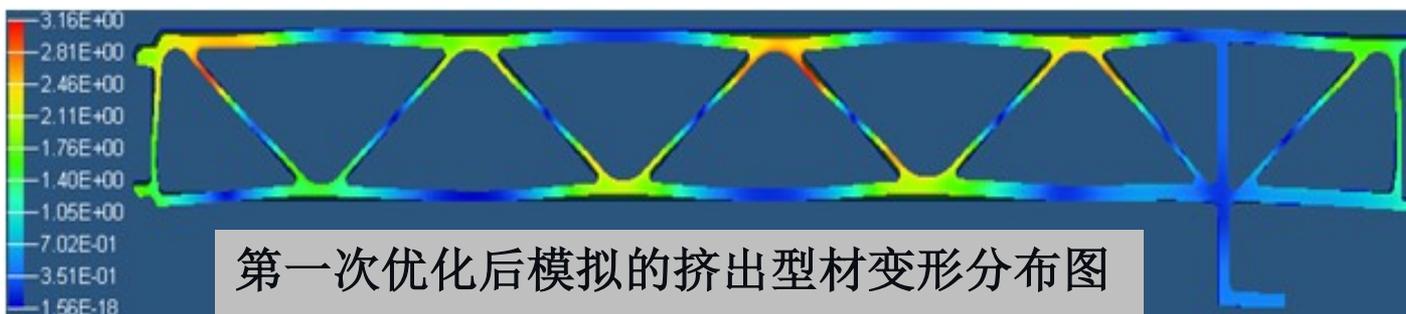
扩宽左下侧部分二级**焊合室**尺寸，加大对左下侧部位金属供料。

模具二级焊合室优化前后对比图

## 第一次优化设计数值模拟结果分析



型材上、下大面与各斜筋连接节点内凹趋势缓解，八条斜筋不平整现象得到有效改善



型材各部分变形量大大降低，最大变形量降低近半，说明模具优化设计措施合理

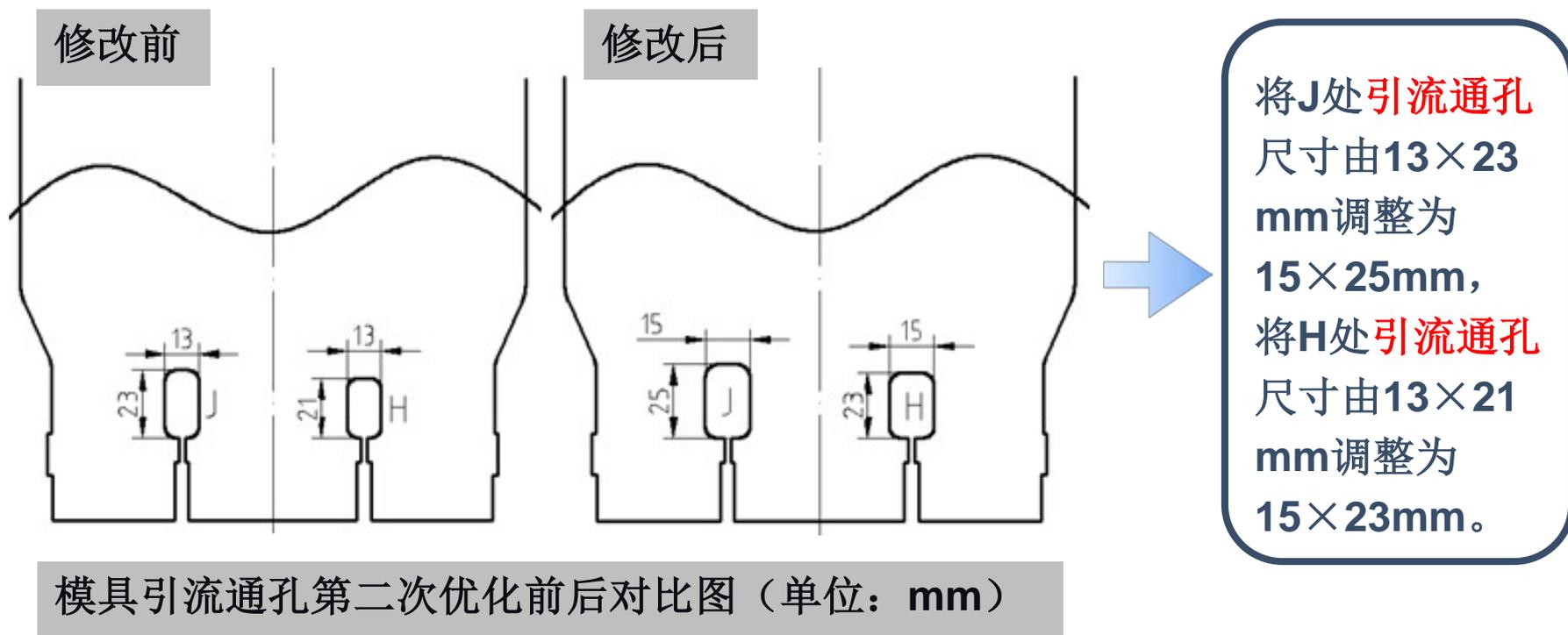
## 第一次优化设计数值模拟结果分析



第一次优化后模拟的挤出型材速度分布图（单位：mm/s）

**中间斜筋**流速得到较大程度改善但仍偏慢，速度普遍只有20mm/s左右；型材上侧大面左右两角部A、B处金属流速偏快，达到38mm/s以上；型材中间立筋C处及平模（翅片）部位金属流速稍快，流速34mm/s左右，因此还需进一步优化设计。

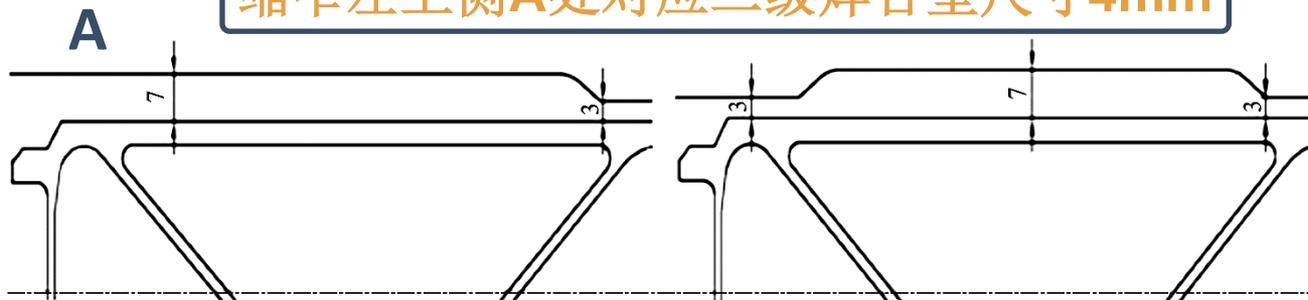
## 第二次优化设计数值模拟结果分析



## 第二次优化设计数值模拟结果分析

缩窄左上侧A处对应二级焊合室尺寸4mm

修改前



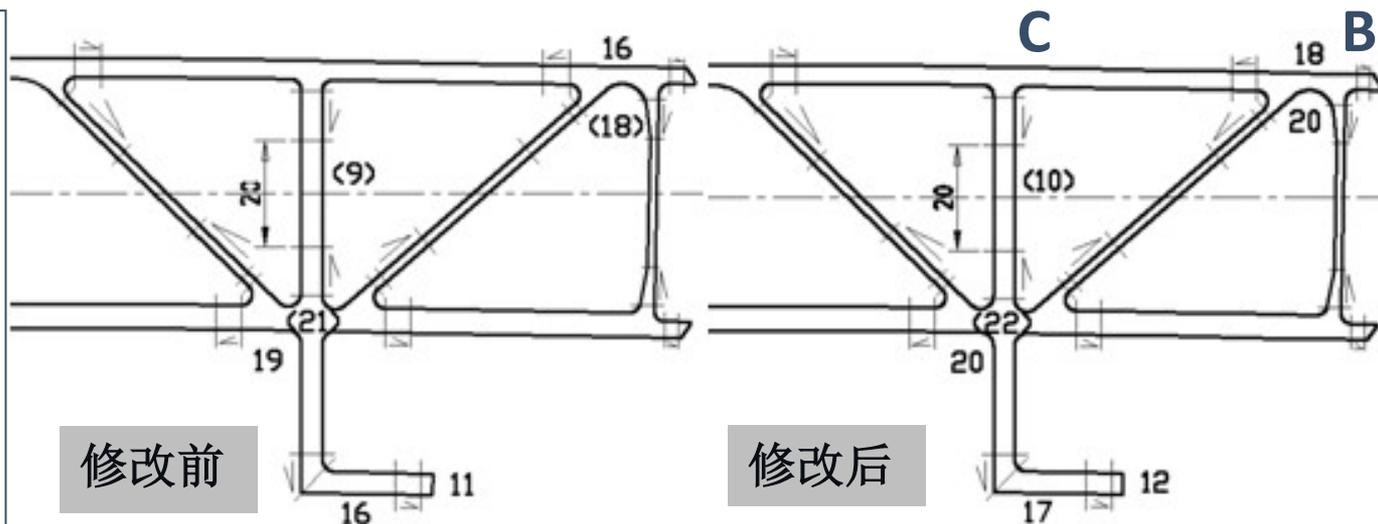
修改后

(a)

(b)

二级焊合室优化前后对比图（单位：mm）

调整右上侧B处、立筋C处及平模部位工作带长度，B处对应工作带长度加长2mm，立筋C处及平模部位工作带长度调高1mm

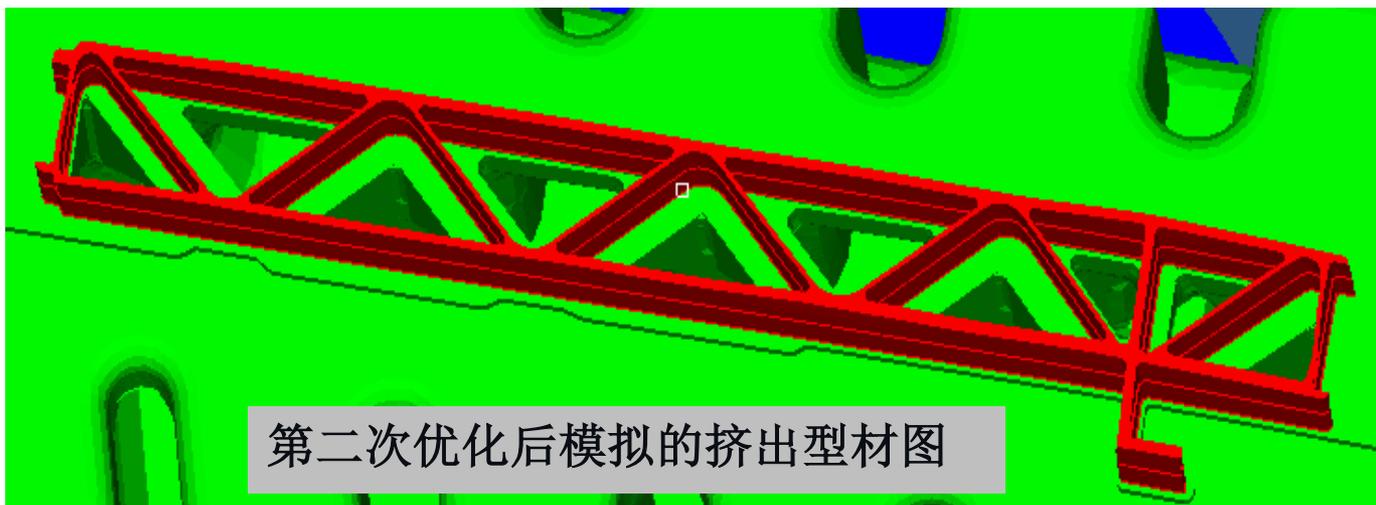


修改前

修改后

工作带优化前后对比图（单位：mm）

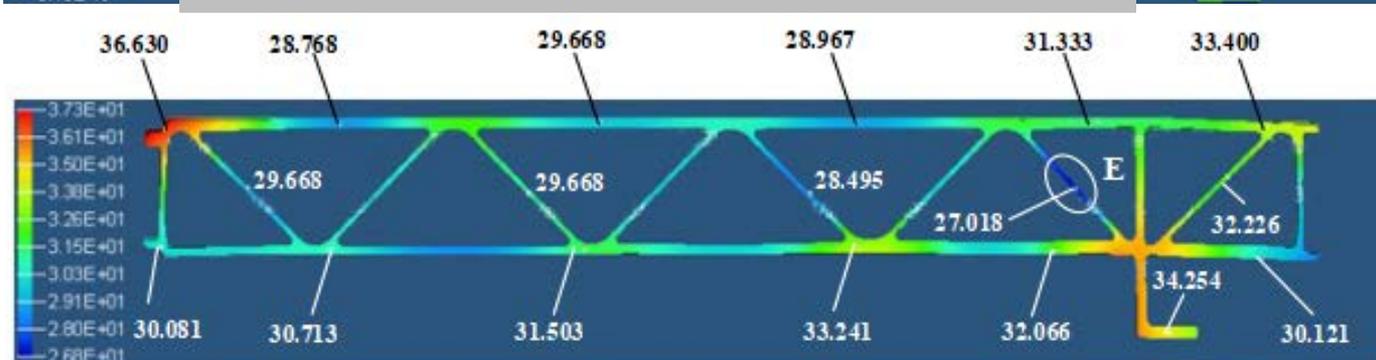
## 第二次优化设计数值模拟结果分析



挤出型材成型好，各处平整，无明显异常变形。



除左上侧D处变形量超过1外，其它部位变形均较小。



除D处及E处外，型材其余各处金属流速基本在 $31.77 \pm 4$  mm/s范围内。

针对模具第二次优化后模拟发现的问题,对模具结构和参数再次进行优化设计,具体改进方案如下:

(1)型材左上侧 D 处金属流速稍快,需减小对此处的供料;参照第二次优化前后 B 处金属流速变化情况,具体优化措施: D 处对应工作带长度增加 1.5 mm。

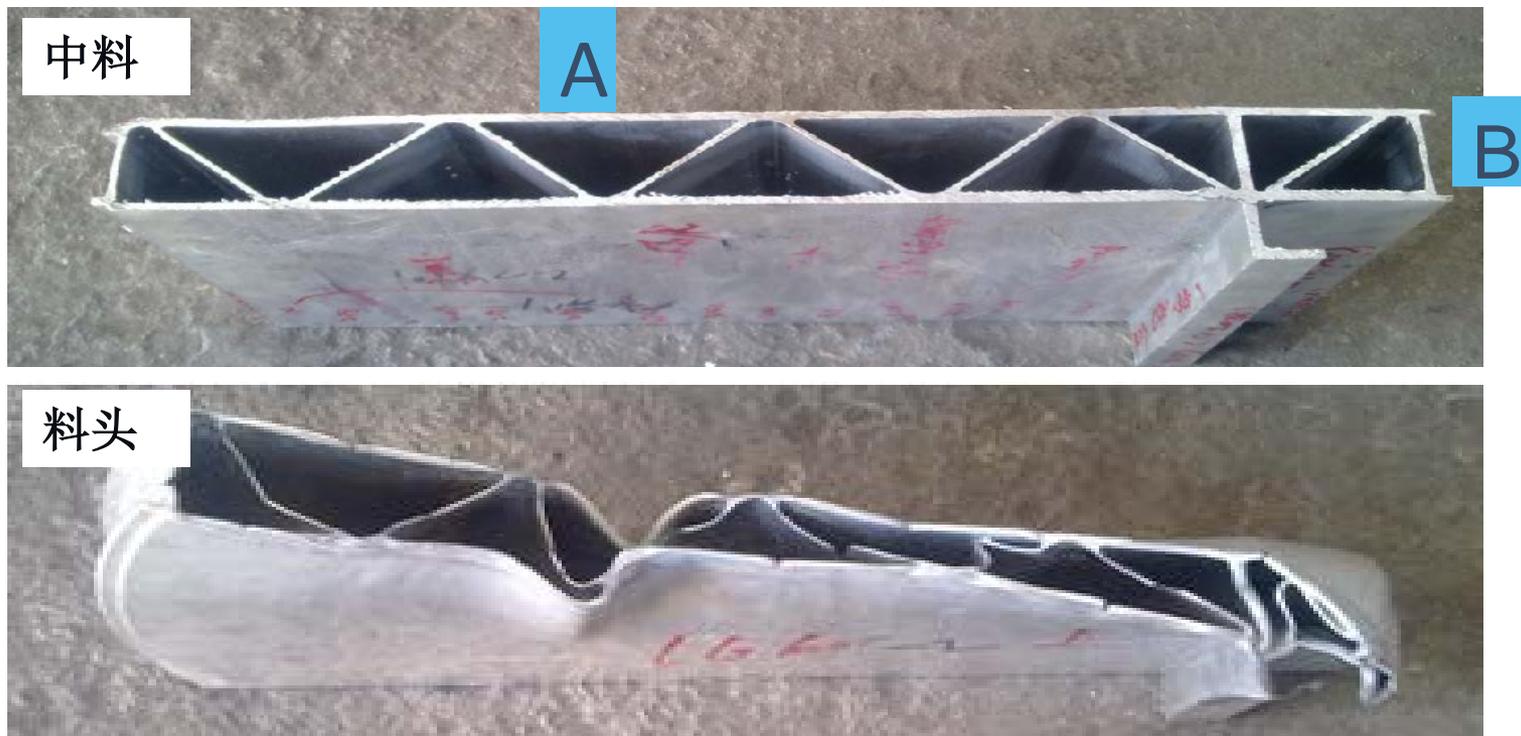
(2)型材中间斜筋 E 处金属流速慢,可缩短其对应处工作带长度,具体优化措施: E 处对应工作带长度降低 0.5 mm。

由于经第二次优化设计模拟得到的型材成型已较好,无大面不平整、连接节点内凹及斜筋扭拧等变形现象发生,且除去流速最快、最慢部位,型材其他各处流速较均衡。此外,模具引流斜槽经电火花加工后边部有很多毛刺部位,均要进行手工打磨抛光,而打磨抛光主要根据抛光工人经验,加工后难与设计及三维建模的引流斜槽部分一致,因此,加工好的模具必须进行实际生产试模。

参照第二次优化设计更改工作带模拟前后结果,第三次优化设计后,可保证挤出型材各处流速在  $31.77 \pm 4 \text{ mm/s}$  范围内。对此模具结构,后续未再进行挤压过程虚拟试模。

## 四、106XC型材挤压生产

### 第一次挤压试模及修模



第一次试模挤出型材实物图

型材A处大面有轻微内凹且壁厚比要求下公差薄0.15mm；B处上侧角部、下侧角部及立筋分别偏薄0.15mm，0.10mm及0.2mm。

## 第二次挤压试模及修模



模具维修操作

**修模措施：**对模芯间**工作带**则用平挫及砂纸仔细抛光，保证**工作带**垂直度及其表面粗糙度；选用磨枪对偏薄壁所对应上模**分流孔**及**模桥**打磨扩孔，加大对偏薄处金属供给。

## 第二次挤压试模及修模



第二次试模挤出型材实物图

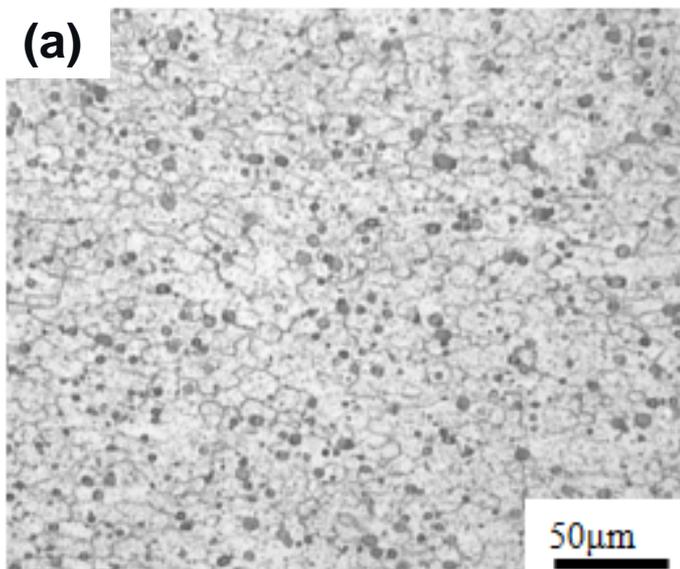
型材除红色标记所示**小爪**壁厚比下公差薄**0.1mm**外，其它部位尺寸均在要求公差范围内。红色**小爪部位**初次试模偏薄小，第一次修模对其对应分流孔及模桥打磨不到位，导致处供料略微不足壁厚仍偏薄**0.1mm**。

**修模措施：**继续用磨枪对偏薄小筋对应上模分流孔及模桥打磨扩孔，加大对偏薄处金属供给。

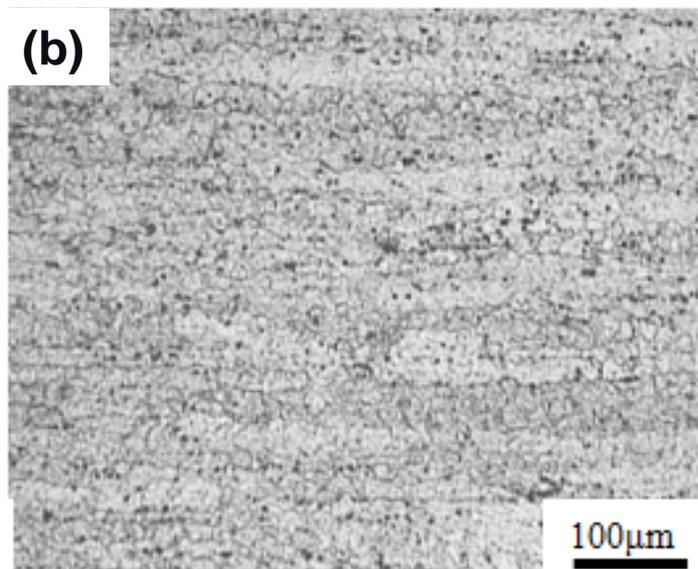
## 106XC型材力学性能检测结果

室温力学性能

$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_s$ /MPa	$\delta$ /%	冲击韧性/(J·cm <sup>-2</sup> )
270~280	220~225	12~13	90~100



挤压方向横断面金相组织



挤压方向纵断面金相组织

## 挤压生产——实际生产的 106XC 型材



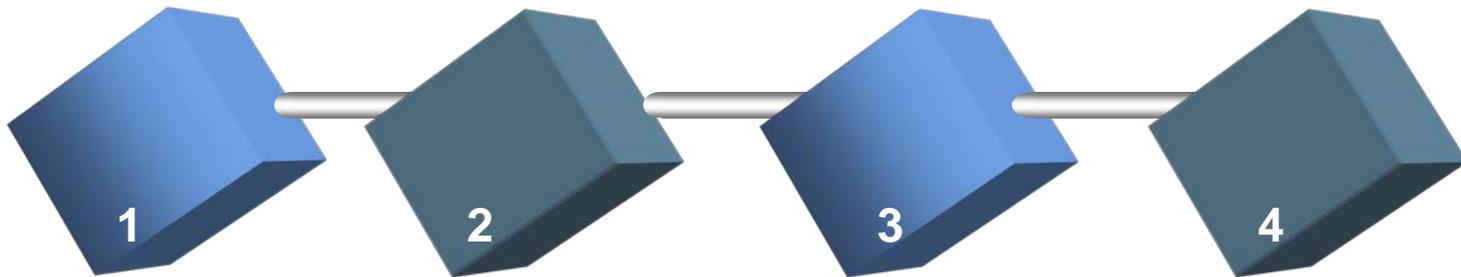
修模完成的模具装配好后再次上机挤压，**第三次试模**挤出的铝合金型材表面光滑明亮，没有擦伤、划伤和明显的挤压纹路，型材各处平面度、弯曲度、扭曲度及断面尺寸均满足要求，试模成功后的模具后续生产成功挤料**58吨**。

# 讨论

**106XC**型材挤压生产仅通过**两次实际试模**、修模就成功挤出合格型材，表明：利用数值模拟技术进行挤压过程虚拟试模，能有效评价模具设计的合理性，由此指导模具的优化设计与工程修模，从而减少实际试模次数，降低模具开发成本。

**106XC**型材挤压模具最终成功挤料**58**吨，使用寿命达到同类挤压模具国外先进水平，表明：模具的热处理工艺合理，有效保证了模具组织结构的稳定性及强韧性，对提高模具最终使用寿命具有重要作用。

## 五、结束语



实际挤压试模结果表明：**分级导流、多级分流的模具型腔设计技术**能有效平衡金属在型材宽展方向上的均衡流动。

正确修模是铝合金型材产品成功挤压生产的关键环节之一。

**两次工程试模**、修模成功挤出合格**106XC**型材，表明：采用**CAE技术**进行挤压虚拟试模，部分代替了实际试模、修模过程，可有效减少工程试模次数。

**106XC**型材挤压模具最终成功挤料**58**吨，表明：模具加工工艺保证了模具加工精度，为列车车体型材精确成形提供了基础保障。

在材料制造与装备等各种工程领域，CAE技术均大有可为！现在最缺乏的就是**懂材料、懂CAD和CAE模拟软件操作、懂加工工艺和模具、懂力学的综合型技术人才**。



**Thank You !**