

基于 Inspire Extrude 的白车身门槛梁用铝型材 挤压仿真模拟与模具结构优化

FEM simulation and die design optimization of Aluminum profile applied in carbody side-sill based on Inspire Extrude

陈亮¹, 谢国文¹, 田永生¹, 陈晓红¹, 尤彬波¹, 吴雄伟¹

(1. 广汽研究院 工艺工程部 广州 511434)

摘 要: 本文借助于基于任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 有限元法的 Altair 挤压仿真分析模块 Inspire Extrude 软件, 在产品开发阶段针对车身门槛梁用大型复杂截面的分流宽展模进行正向稳态挤压仿真模拟, 对型材出口流速、位移等结果进行分析, 预测型材挤出的弯曲、翘曲等问题。同时基于初步的仿真分析结果, 通过优化初始模具结构中的分流孔、调整工作带长度等方面, 再次进行挤压仿真模拟, 得到出口流速趋于均匀的分析结果。最后对优化后的模具结构进行生产验证, 实际表明仿真分析结果基本与生产一致, 缩短了产品开发周期, 降低了模具调试成本。

关键词: 车身用型材 铝挤压 有限元模拟仿真 ALE 有限元

Abstract: A direct steady extrusion simulation of multi porthole expanding die designed for complex BIW (body in white) side sill was conducted at the part development phase based on Inspire Extrude software using Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE) algorithm. With the profile exit speed and displacement results, the defects of profile deformation, warping, uneven flow rate can be obviously exposed. Optimization of the initial die structure, as to get the uniform metal flowing rate at the die exit, was implement by adjusting the parameters including the porthole and bearing length. And finally the optimized die design geometry was again imported and simulated with Inspire Extrude software. As a result, the velocity uniformity at the die exit was much improved. Moreover, the simulated results matched well with results in actual production, which lead to shorten the vehicle development cycle and cost reduction.

Key words: BIW (body-in-white), Aluminum extrusion, Numerical modelling, ALE method

1 概述

近年来, 为解决全球气候环境的温室效应, 降低燃油车尾气排放问题, 全球电动汽车市场不断发展。车身的轻量化是提高电动车续航里程, 解决用户“里程焦虑”的有效方法之一。

在车身轻量化方案中，铝挤压型材以其比钢更低的密度，相对于冲压铝板更低的制造成本，同时以具备多车型平台共用的潜力得以在电动车下车身各类梁中得以广泛应用[1]。

由于车身加强梁类挤压型材（如门槛梁、中通道和前/后纵梁等）大多具有多型腔、截面大、壁厚薄特点，同时强度和精度要求高，因此在前期车身设计开发阶段，对铝型材进行工艺同步仿真分析具有十分重要的作用。

车身铝型材多以中大型、复杂的分流模宽展模为主，前期的产品截面和挤压模具结构设计将直接影响挤出型材模具的寿命、型材表面质量和尺寸精度。传统的铝挤压模具以工程师经验为主导进行设计，并未经仿真分析而直接进行开模，后期在生产线上进行多轮试错调试，其中不可避免地耗费大量的调试时间和成本[2,3]。

近些年在铝挤压行业和汽车研发单位开始逐渐引入挤压仿真分析软件对型材产品进行出口流速、应力应变情况及挤出产品形状和模具寿命进行模拟，从而使产品、工艺及模具设计在最优状态下进行制作生产，缩短开发周期、降低开发成本和提升产品质量[4]。

本文将以广汽传祺某电动车型的中大型复杂多腔体截面门槛梁型材为例，采用基于任意拉格朗日-欧拉（ALE）有限元法[5-7]的 Inspire Extrude 挤压仿真分析软件，对初始模具结构进行挤出过程中分流体和型材出口流速、截面各区域相对出口速度差异百分比、型材挤出变形位移云图进行仿真模拟和分析。初步分析结果显示型材挤出流速严重不均衡，模具和工艺若不优化，将使后期的调试周期和成本大幅增加。为了在产品开发阶段将模具结构调整至最优状态，本文中基于铝挤压热状态下的金属流动分配的最小阻力定律原则，通过分流孔优化、供流槽体大小及工作带长度等的优化，再次导入优化后的模具进行仿真分析，直至获取型材截面各区域出口流速趋于均匀的新的优化模具结构。随后，优化后的模具结构进行生产验证，结果表明仿真分析结果与实际生产匹配度基本一致，获得了良好的挤出产品，大大缩短了产品开发周期，降低了模具调试开发成本。

2 产品、模具设计与有限元模型的建立

2.1 产品及其初步模具结构设计

图 1 所示为某电动车型用门槛梁铝型材产品信息。图 1(a)为型材三维视图，图 1(b)为型材截面尺寸。产品共计 6 个空腔，产品长宽最大尺寸达 220mm*181mm，产品断面积约为 3087.7mm²，交货长度约 2m，属于大型铝型材产品。同时该型材模芯数量多且呈现非对称状态（最大尺寸约 70*80mm，最小尺寸为 50*50mm），这对挤压过程中金属的均匀分配和模具均匀受力带来了很大的挑战。

该挤压型材材料牌号为 6005A，截面壁厚在 2.0,2.5,3.0mm 之间分布，规划在 28MN 挤压机上正向挤压生产，棒料直径为 262mm。如表 1 设计详细的挤压工艺参数[8]。根据公式计算得到该型材产品的挤压比系数： $\lambda = F_0/F_1 = (\pi \cdot 262^2)/(4 \cdot 3087.7) \approx 17.5$ ，其中 F_0 , F_1 分别表示棒料直径和单根产品的断面积。 λ 符合 6005A 铝合金合理挤压比 12-40 范围。

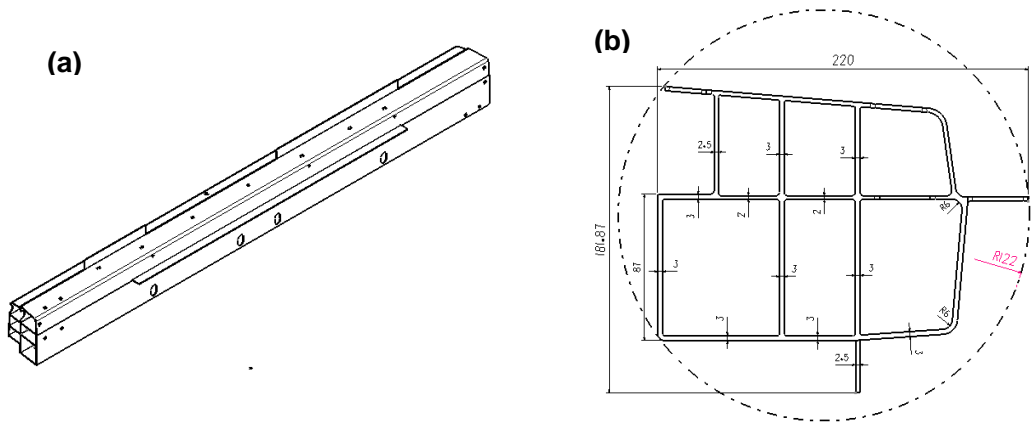


图 1 型材产品信息 (a) 3D 立体图, (b) 截面尺寸图

表 1 挤压工艺参数

分析类型	坯料 (直径*长度 mm)	坯料预热温度 (°C)	模具温度 (°C)	挤压筒温度 (°C)	挤压速度 (mm · s ⁻¹)	挤压比
正向稳态	262*930	500	480	460	5	17.5

图 2(a)为该型材的初始模具设计三维图,受挤压机棒料吨位限制,采取分流宽展设计,共计 8 个分流桥和 8 个分流孔(如图 2(b))。模具总体装配尺寸为 $\phi 500\text{mm} \times 250\text{mm}$,如图 2(c)所示下模按单级焊合室进行设计,高度为 30mm。主要区域工作带长度分布如图 2(d),根据距离模孔中心距离及型材厚度,长度按 $3-4t$ (t 为型材厚度)进行布置。

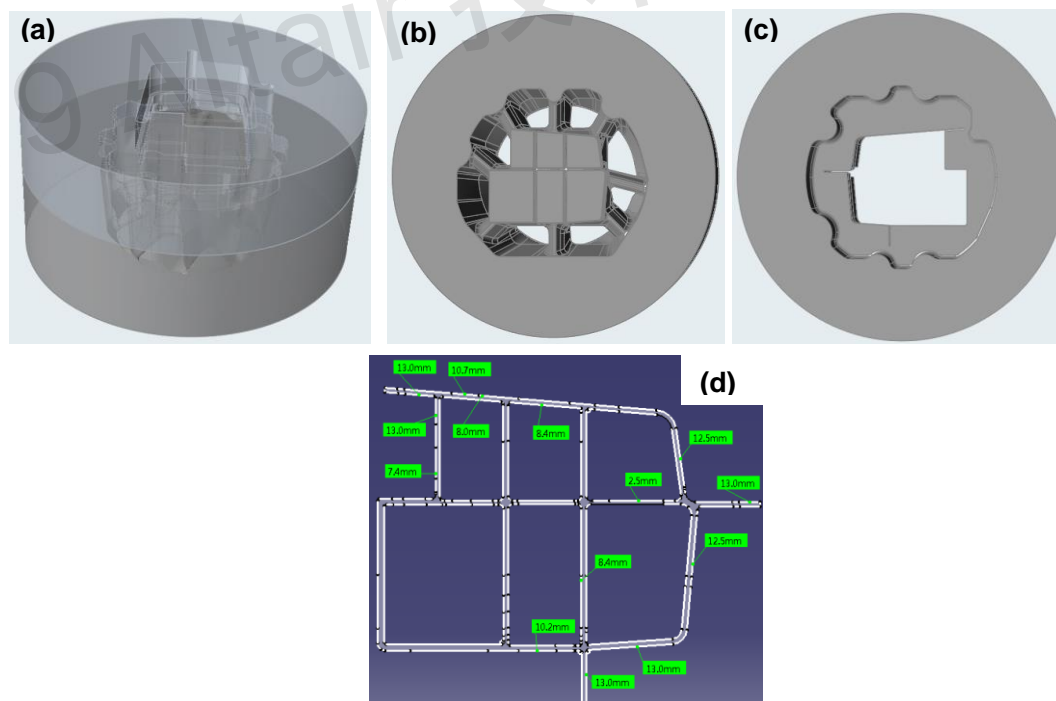


图 2 门槛梁初始模具结构设计:
(a) 整体装配图; (b) 上模; (c) 下模; (d) 工作带长度分布

2.2 有限元模型

如图 3(a)所示为根据模具型腔抽取的流体模型，共计将流体分为五个主要部分：棒料、分流孔区域、焊合室、工作带和型材区域。根据五个区域的功能作用进行网格划分如图 3(b)。

挤压棒料、分流孔、焊合室中的流动金属采用四面体四节点单元，共计 1337446 个单元；工作带和型材区域采取三棱柱六节点单元进行网格划分，共计 450350 个单元；整个模型合计 1787796 单元网格数，节点数 532876。

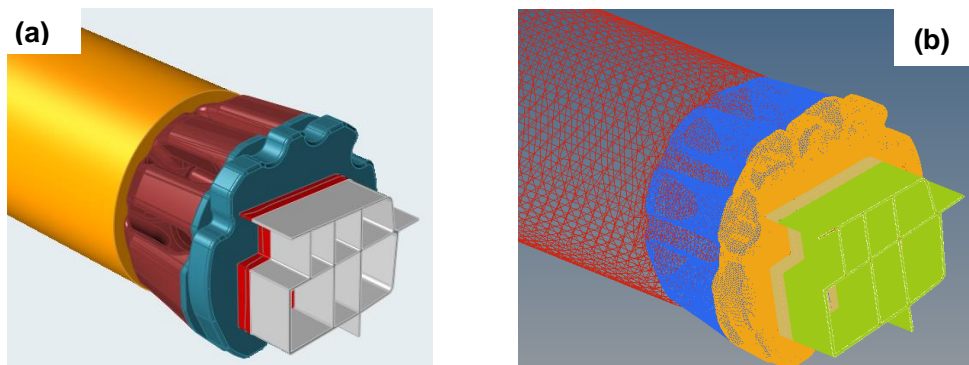


图 3 几何体及有限元模型的建立
(a)有限元抽取的流体模型；(b)网格划分情况

本案例采用 ALE 有限元算法进行正向稳态挤压仿真模拟，结合了更新的 Lagrangian 方法和 Eulerian 算法各自优点，减少边界网格畸变，可有效地解决挤压大变形问题。本案例材料为 6005A，采取的材料模型为双曲正弦流变应力模型 SineHypInv [9]，其本构方程如下：

$$\sigma_f(\dot{\epsilon}, T) = \alpha \operatorname{arcsinh} \left\{ \left[\frac{\dot{\epsilon} + \dot{\epsilon}_0(T) \frac{Q}{eRT}}{A} \right]^{\frac{1}{m}} \right\}$$

式中： σ_f 为流动应力；R 为气体常数；T 为温度； α 为应力常数；A 为应变因子的倒数；Q 为激活能；m 为应力系数； $\dot{\epsilon}_0(T)$ 为初始应变速率，其值取决于温度场的给定。计算求解在 Altair PBS Works 的高性能计算机平台 HPC (CPU(24 核，2.2GHz)，RAM-128GB) 上进行。

3 初始模具方案仿真分析结果

图 4(a)为金属流经分流孔时的速度云图，由于分流孔的配比情况导致图 4(a)中虚线框内①②③④处金属流速较其他区域要快，导致分流孔对应的型材区域在模具出口变形差异明显。如图 4(b)为型材出口变形位移量，最大值达到约为 55mm，最小值仅有约为 4mm。

同时，截取型材出口截面，其出口速度云图如图 5。从图 5(a)中可以看出，截面左上角和右下部分，即实线框内区域的出口速度最快，基本在 65mm/s 左右。且在图 5(a)虚线框内出口速度极不均匀，相邻侧选点进行速度测量可知（如图 5(b)），出口速度最大值约为 65mm/s，最小的出口速度仅有约 20mm/s，该相邻区域速度相差约 70%，导致此处变形严重，甚至无法正常挤出中间加强筋条。

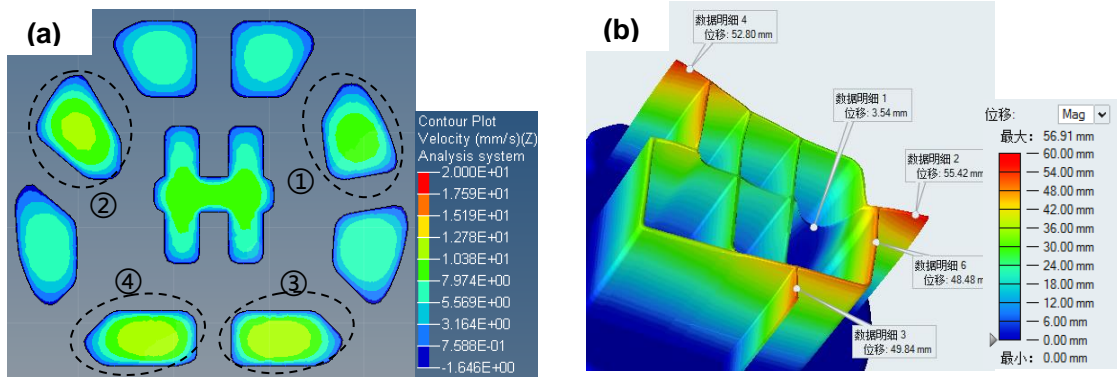


图 4 分流孔流速及出口变形位移云图

(a) 各分流区金属流速分布；(b)型材挤出整体平均位移云图

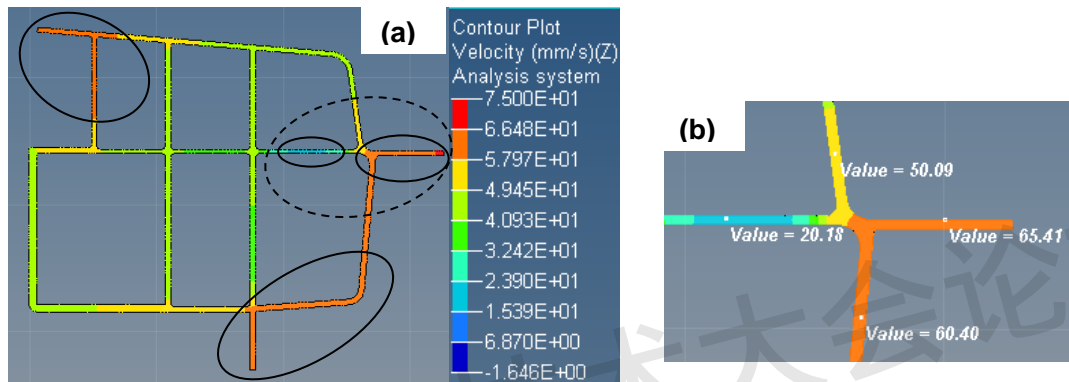


图 5 型材截面出口流速云图

(a) 模具出口 Z 向流速云图；(b) 图 5(a)中虚线框处放大及速度标注图

如图 6(a)所示为型材挤出出口相对差异图，白色型材区域为速度差异比超出 $\pm 15\%$ 范围，可以看出，型材约 50%区域挤出位置存在超差范围。如图 6(b)中所示，其中最大相对出口值为 30%，最小为约-50%，即表明存在极大的速度不均，预测可导致挤压变形翘曲等不良发生。图 6 的分析结果与图 4、图 5 中型材分流速度、出口变形位移及 Z 向出口速度结果基本吻合，即初始的模具结构设计将导致型材挤出变形严重，达不到精度要求，甚至可能导致模具报废。

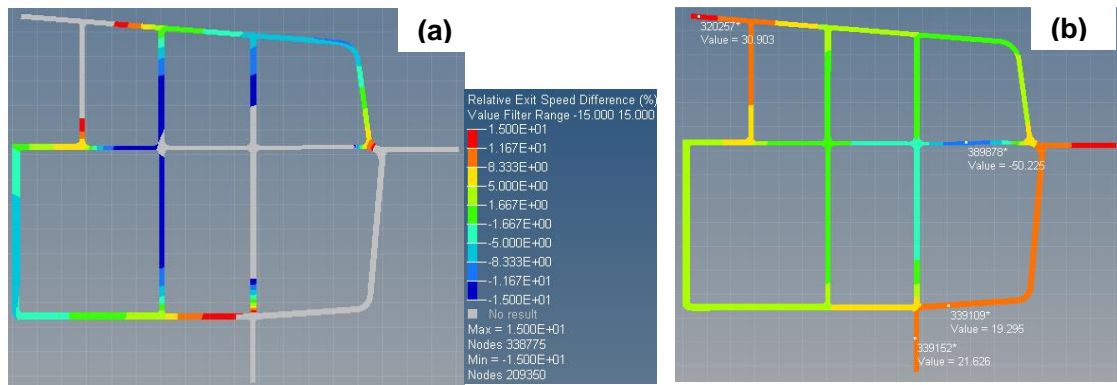


图 6 挤出出口相对速度差异云图；(a) $\pm 15\%$ 范围显示图；(b)最大最小相对差值位置

如图 10(a)所示为优化模具后的型材出口流速云图,对比图 5(a)可知,优化的型材出口流速云图颜色分布均匀,即流速趋于平衡,总体均值在 50mm/s 左右。针对初始模具右侧出口流速差异较大的问题,优化的结果如图 10(b)所示,最大流速约为 49mm/s,最小流速约为 40mm/s,相差约 18%,对比原始模具状态下的 70%速度差值,已经有了很明显的改善。

图 11(a)和(b)为在同比例标尺范围下,模具优化前后的相对出口速度差异云图。从图中可以看出优化前型材大部分区域的相对出口速度差异超过 $\pm 15\%$,而优化后的型材 90%以上区域速度差异分布基本保证在 $\pm 15\%$ 以内。这与前面的型材出口位移、出口速度分布基本一致。

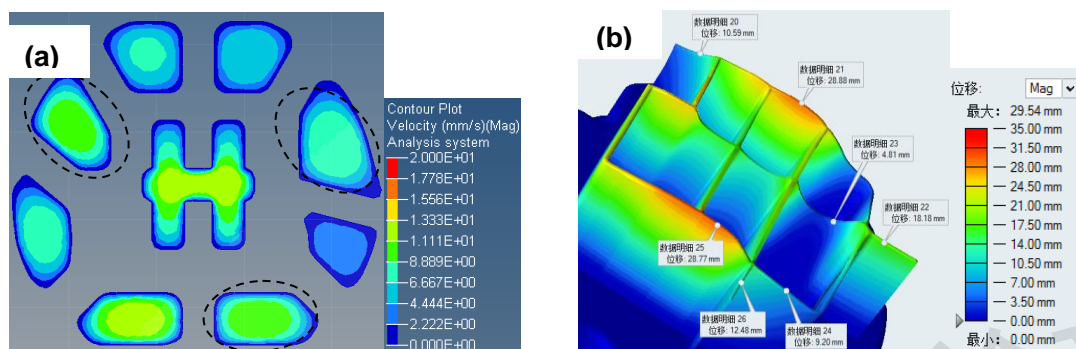


图 9 模具优化调整后的分流孔流速及出口变形位移云图
(a) 各分流区金属流速分布; (b) 型材挤出整体平均位移云图

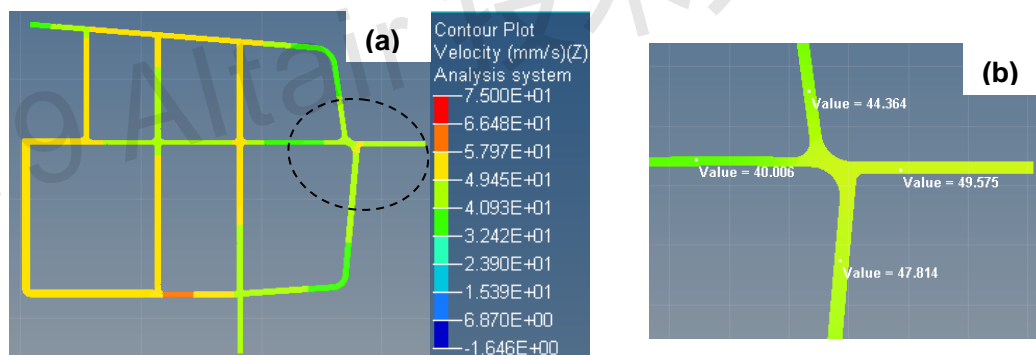


图 10 型材截面出口流速云图
(a) 模具出口 Z 向流速云图; (b) 图 5(a)中虚线框处放大及速度标注图

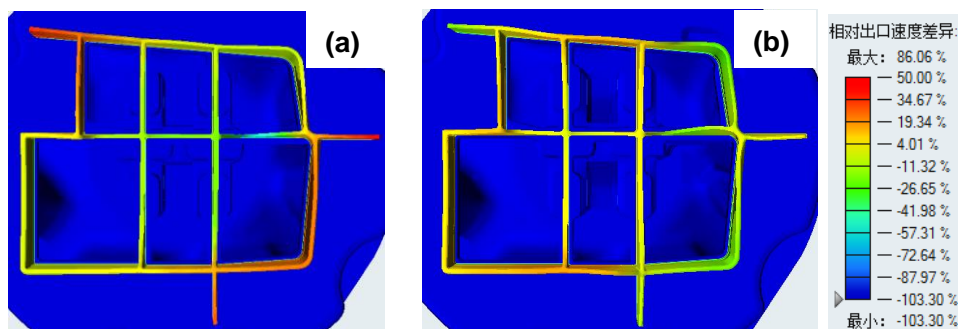


图 11 同比例标尺下挤压型材相对出口速度差异
(a) 初始模具下型材各区域相对出口速度差异; (b) 优化模具后的相对出口速度差异

4.3 生产验证

如图 12 为模具优化后的生产验证情况。从图 12(a)和(b)可以看出, 型材挤出面扭曲和翘曲情况得到有效改善, 生产一次性通过, 挤出料头各处变形与挤出模拟仿真结果基本匹配。同时对机加工完的型材进行三坐标检测, 其各处面差基本满足 $\pm 0.7\text{mm}$ 的精度要求, 符合车身搭接匹配精度要求。

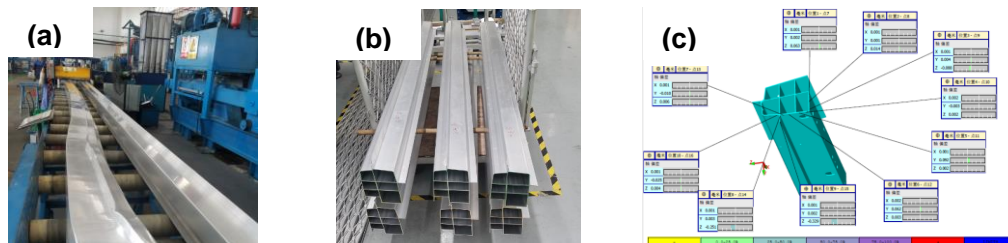


图 12 型材实际生产及精度检测情况(a) 生产现场图; (b) 锯切后的型材; (c)三坐标检测

5 结论

本文借助 Altair 公司的 Inspire Extrude 挤压仿真分析软件, 针对汽车门槛梁大型复杂的宽展分流模进行挤出仿真分析与优化, 得到最优解, 成功应用于生产指导, 为项目和产品开发过程中节约了时间和成本。通过该案例, 得出结论如下:

- (1) 凭借经验设计的初始挤压模具, 其挤出速度并不理想均匀, 仍需借助挤压仿真分析软件进行优化, 这可以减少后期的模具调试时间和成本;
- (2) ALE 有限元法可以较精确地对挤压这类高温大变形问题进行求解;
- (3) 针对型材挤出不均问题的调整, 结合仿真分析结果的分流孔金属流速、出口速度云图、挤出变形位移图等结果, 得出: 型材出口速度差异比超过 30%的区域建议优先调整分流孔大小和分流桥位置, 相对速度差异小于 30%的区域优先对其工作带长度进行优化。

6 参考文献

- [1] 李落星,周佳,张辉. 车身用铝、镁合金先进挤压成形技术及应用[J]. 机械工程学报,2012,48(18):35-43.
- [2] Shumei Lou, Yongxiao Wang, Shuai Lu, Chunjian Su, Die structure optimization for hollow aluminum profile[J], Procedia Manufacturing, 15(2018), 249-256
- [3] Z.S. Ni, S.B. Liu, C. He, Numerical simulation study of extrusion forming aluminum profile based on hyperxtrude[J], Hot Working Technology, 41 (2012) 115–118.
- [4] J. Lof, Y. Blokhuis, FEM simulations of the extrusion of complex thin-walled aluminium sections[J], Journal of Materials Processing Technology, 122 (2002) 344–354
- [5] Z.S. Ni, S.B. Liu, C. He, Numerical simulation study of extrusion forming aluminum profile based on hyperxtrude[J], Hot Working Technology, 41 (2012) 115–118.
- [6] 易杰, 王震虎, 刘志文,等. 复杂空心铝型材的挤压缺陷仿真分析及材料在分流模中的流动行为优化 (英文) [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018,

28(10):2094-2101.

[7] Altair Engineering[S]. Altair HyperXtrude 9.0 User's Manual. 2008

[8] 邓小三,刘静安.地铁车辆用 6005A 大型铝合金型材的研制与开发[J].铝加工,2004, 18(8A) 203-206.

[9] 陈建中,熊计,吴悦梅,等.铝型材宽展挤压数值模拟及模具参数优化[J]. 轻合金加工技术, 2009(1), 43-46.

2019 Altair 技术大会论文集