

基于 QForm 挤压仿真软件的表皮缺陷预测研究

刘寒龙¹, Ivan kniazkin²

(1. 北京创联智软科技有限公司; 2. QForm Group)

摘要: 本文提出了一种使用 QForm 挤压仿真软件中实现的创新方法, 此方法主要分析型材挤压工艺中遇到的一种主要缺陷, 即坯料表皮缺陷。该算法的验证是基于文献^[1, 2]中的大量实验案例研究进行的。此外, 还分析了空心型材的结果精度对初始参数变化的敏感性。在此基础上, 为所提出的算法的成功工业应用制定了实用建议。

关键词: 皮下缩尾; 尾端缺陷; 有限元; QForm Extrusion

Investigation of the skin contamination predictability by means of QForm Extrusion

Abstract: The paper presents an innovative approach implemented in QForm Extrusion FEM software to analyse one of the core defects encountered in profile extrusion known as billet skin defect. The validation of the algorithm has been performed based on a number of experimental case studies taken from the literature ^[1,2]. Additionally, the sensitivity of the accuracy of the results to the variation in initial parameters has been analysed for both types of profile shapes: solid and hollow. Based on this, practical recommendations have been formalised for the successful industrial use of the presented algorithm.

Key words: Skin Contamination; Back-End Defect; FEM; QForm Extrusion

介绍

铝型材挤压是一种可以生产多种横截面形状的工艺: 从简单的实心形状到复杂的空心形状。由于这些型材用于非常重要的行业, 因此它们在几何形状和性能方面有严格的要求。此外, 当前挤压工艺设计需要高生产效率和材料利用率。

在型材挤压过程中不可避免地形成的典型缺陷之一是坯料表皮缺陷, 它是一种缩尾缺陷。通常如果模具的分流孔设计不合适或坯料的压余长度太短, 则会在棒料挤压结束时会出现这种缺陷。最终会导致油污或氧化皮等杂质进入到型材上(图1)。

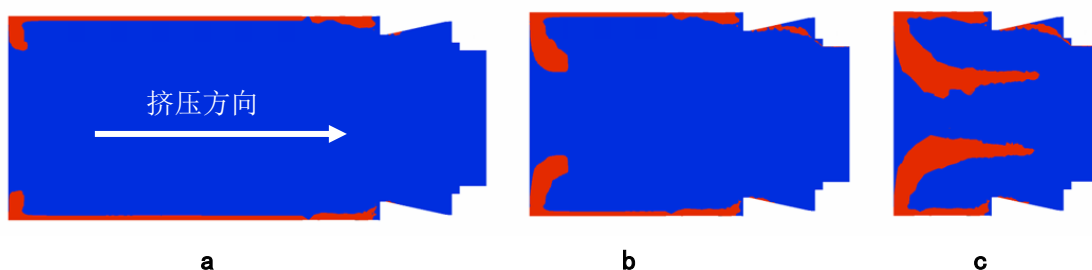


图1 挤压不同的阶段的表皮, 表皮显示为红色: a 开始, b 中间, c 结束时

总之，这会导致型材表面缺陷和成品性能不稳定^[3]。在技术文献中，通常区分两种类型的坯料表皮流动^[2, 3]。流动类型一，也称为向内流动，当含有杂质的材料沿着挤压筒和模具表面之间形成的死区流入分流孔时发生。由于这种流动中涉及的材料形成型材的外部形状，因此这种流动可能只导致表面缺陷。当处在挤压筒尾端的表层处流入模具分流孔，导致缺陷材料出现在型材横截面的内部时，就会发生流动类型二，也称为正向流动。

型材的表面污染是铝挤压过程中缩尾产生的潜在原因。如果选择适当的压余长度来清除表皮上所有积聚的污染物，就可以避免这种情况。工艺过程的复杂性迫使人们需要一种数字工具来准确预测最佳压余长度。尽管压余长度会显著影响整个工艺的效率，但很少有关于这一主题的论文。据作者所知，仅有两项研究来研究工业复杂截面型材上的皮下缩尾缺陷^[4, 5]，其中使用任意拉格朗日-欧拉方法的数值模拟来分析表皮和尾端缺陷。在[6]中，拉格朗日方法用于模拟挤出过程，并通过跟踪位于污染层厚度距离处的点阵列来检查表皮流动。一方面，使用纯拉格朗日方法提高了预测精度，但另一方面，导致模拟的计算时间显著增加。

与上述案例研究不同，本文旨在通过 ALE 数值模拟找到一种预测坯料表皮的方法，使用在 QForm Extrusion 中实现的创新方法，将预测的高精度与模拟的快速计算相结合。

坯料表皮流动模拟方法的描述

数值模拟中常用的描述变形材料运动的两种基本方法，即拉格朗日方法和欧拉方法。在[7]中讨论了这些方法及其组合的主要差异、局限性和其他细节。本文中用于坯料表皮追踪的方法涉及拉格朗日-欧拉网格上的点跟踪，其中的点根据整个坯料挤压模拟的每一步获得的速度解向前移动。

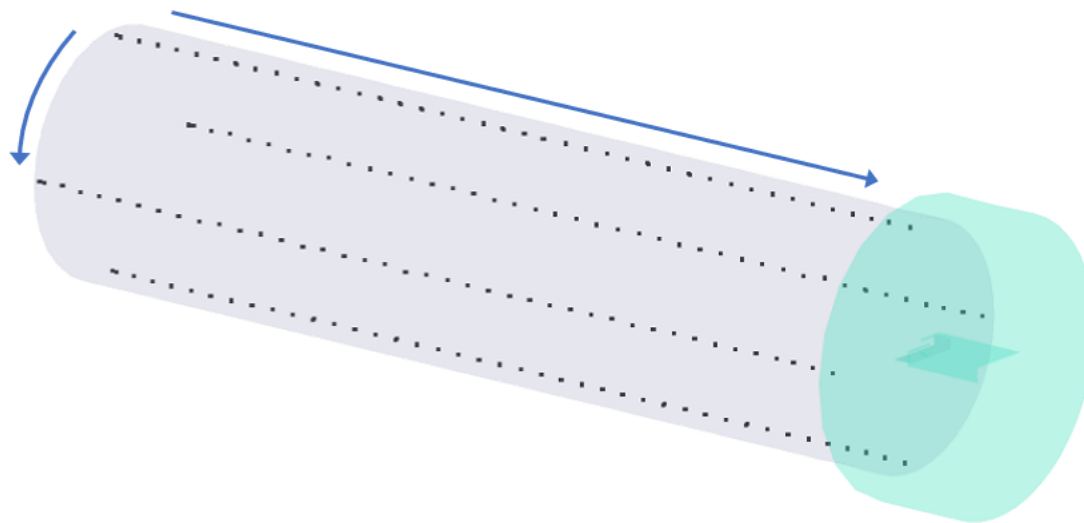


图 2 追踪点的位置分布，4 行，每行 40 个

此分析需要设置三个参数，分别是表皮厚度、线的数量和每条线的点数。表皮厚度值定义了这些点与粗糙坯料外表面的径向偏移距离。线的数量用于确定圆的扇区数量，以便沿着这些扇区的边界创建点。如果线的数量是 2，那么只有两个扇区 $2 \times 180^\circ$ ，线彼此相对，如果线数量是 4，那么有四个扇区 $4 \times 90^\circ$ （图 2）等。此外，还有一个基于指定点构建的特殊连续实体。因此，有三种不同的方法来显示跟踪的结果，即点阵列、面和场值，其显示方式与 FEM 的所有标准典型结果相同（图 3）。这种模拟可以通过执行标准子程序在后处理中执行。

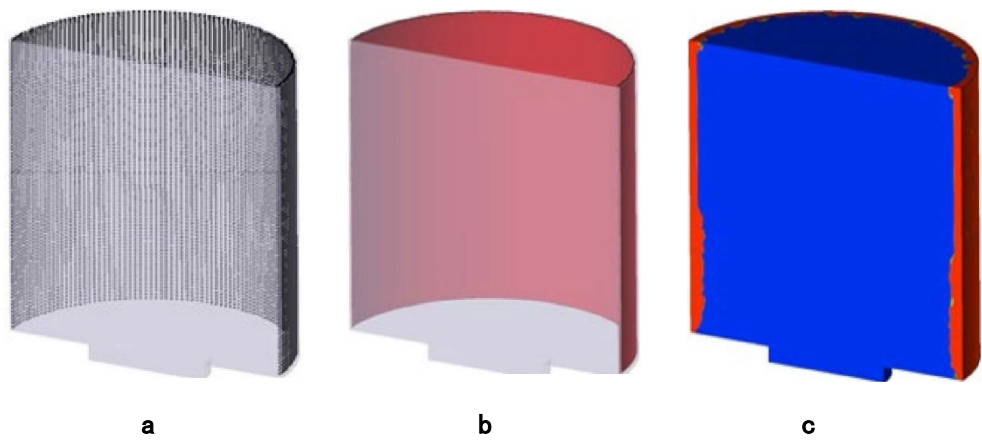


图 3 表皮追踪的不同显示方式，a 点阵列，b 面，c 场值

案例描述

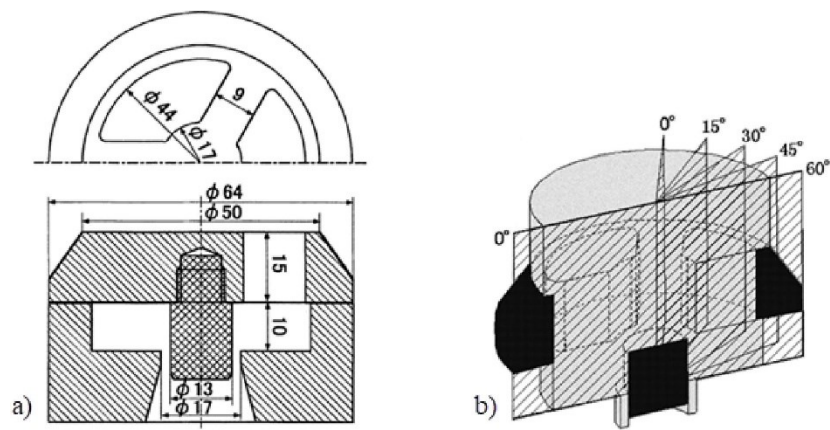


图 4 案例几何详情，a 模具，b 实验分析的截面

在这个案例中^[2]，使用 AA1100 合金作为芯材，使用 AA1050 作为坯料表皮材料。合金的腐蚀特性不同，从而可以对坯料表皮传播进行定性识别。为此，作者设计了一种具有六重对称性的舷窗模具（图 4a）。研究分为两个重要步骤：分析在不使用润滑的情况下，不同挤压杆行程下坯料表皮形状的演变，以及分析取决于行程和挤压筒上不同摩擦条件的坯料表皮模式。对于这两种情况，分析了五个不同剖面的坯料表皮扩展结果（图 4b）。表 1 列出了工艺参数和关键尺寸。根据提供的数据，使用材料流动域和模具的耦合进行了几次模拟（图 5）。

表 1 几何和工艺参数

参数	值
合金牌号	AA1100
挤压比	20.9
挤压筒温度[°C]	400
坯料温度[°C]	400
模具温度[°C]	400
润滑剂	变量 有，无

挤压速度[mm/s]	0.017
坯料长度[mm]	50
坯料直径[mm]	49.5
挤压筒直径[mm]	50
挤压杆行程[mm]	变量，从 25 到 46
坯料表皮厚度[mm]	0.5

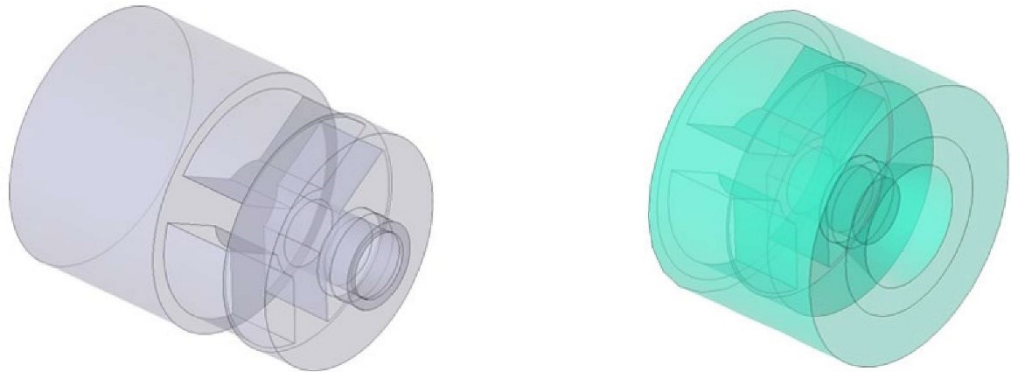


图 5 研究案例的几何：材料流动域（左）和带弦窗模具（右）

模拟中使用的模型说明

耦合求解

考虑模具的变形和温度变化情况下，模拟了材料的流动和温度。这意味着模具变形影响材料的流动，而模具变形本身取决于材料的接触压力。类似地，坯料材料中的温度变化不仅由塑性变形和摩擦产生的热量决定，还受到与模具的热交换影响。这种耦合解是通过多次迭代与流动域的网格自动重新划分相结合而获得的。坯料与模具之间的热流量由下面 Newton-Richmann 定律计算：

$$q_n = \alpha(T_1 - T_2)$$

(1)

α 是热传导系数（在 QForm 中默认等于 30000W/m²），考虑了工件与润滑剂，润滑剂与模具的热传递。T1 是坯料温度，T2 是模具温度。

表 2 AA1100 合金的 Hensel-Spittel 参数

参数	空心型材
A[MPa]	265
m ₁ [K ⁻¹]	-0.00458
m ₂	-0.12712
m ₃	0.12
m ₄	-0.0161
m ₅ [K ⁻¹]	0.00026
m ₇	0

$m_8[K^{-1}]$	0
m_9	0

流动应力

流动应力方程(2)Hensel-Spittel 定义了流动应力 (σ_s) 取决于应变 (ε)，应变速率 ($\dot{\varepsilon}$) 和温度 (T)，用于描述两个案例中使用的坯料材料的流动曲线。表 3 包含模拟中使用的参数值。

$$\sigma_s = A \cdot e^{m_1 T} \cdot T^{m_9} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} \cdot (1 + \varepsilon)^{m_5 T} \cdot \varepsilon^{m_7 \varepsilon} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_8 T} \quad (2)$$

摩擦

Levanov 摩擦定律用于描述铝和钢之间的摩擦。这个摩擦模型是库仑和西贝尔摩擦定律的归纳。当法向接触压力较低时（通常为工作带区域），Levanov 的切应力接近库仑切应力。当法向接触压力较高时（这对于坯料表面的其余部分来说是典型的），Levanov 的切应力接近 Siebel 的切应力。根据 Levanov 摩擦模型，工件接触表面上的切应力 (τ) 取决于摩擦系数 (m)、工件材料的流动应力 (σ_s)、法向接触压力 (σ_n) 和 Levanov 系数 (n)：

$$\tau = m \cdot \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 - e^{-n \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}\right) \quad (3)$$

在 QForm 中默认使用摩擦系数为 1.25。

网格

为了研究初始网格尺寸的影响，为型材创建了两种不同的网格，其中挤压筒区域中增加的自适应系数用于使网格更细。初始网格和自适应网格差异分别如图 6 和表 4 所示

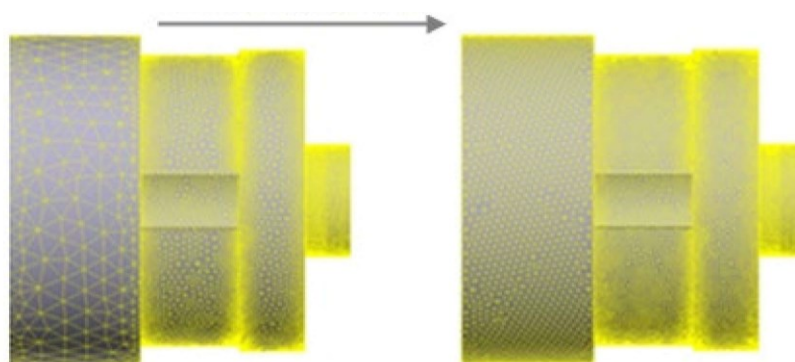


图 6 空心型材的初始网格（左）和自适应网格（右）

可以观察到，对于所提出的方法，网格密度影响了最终表面形状的平滑度，但没有显著影响其传播的定性结果。因此，对使用默认设置生成网格的情况进行了进一步的分析。

表 4 网格数量

	初始网格	自适应网格
节点, #	145586	174961
面网格, #	70958	91570
体网格, #	786554	931870

结果与讨论

在这个案例下，使用 QForm 材料数据进行模拟。模拟的总计算时间为 3 小时 30 分钟。算法验证的第一步是评估不同行程下坯料表皮形状的演变。对于所有不使用润滑剂的实验，摩擦条件是根据前面提到的 QForm 数据库中默认挤压摩擦设置的。

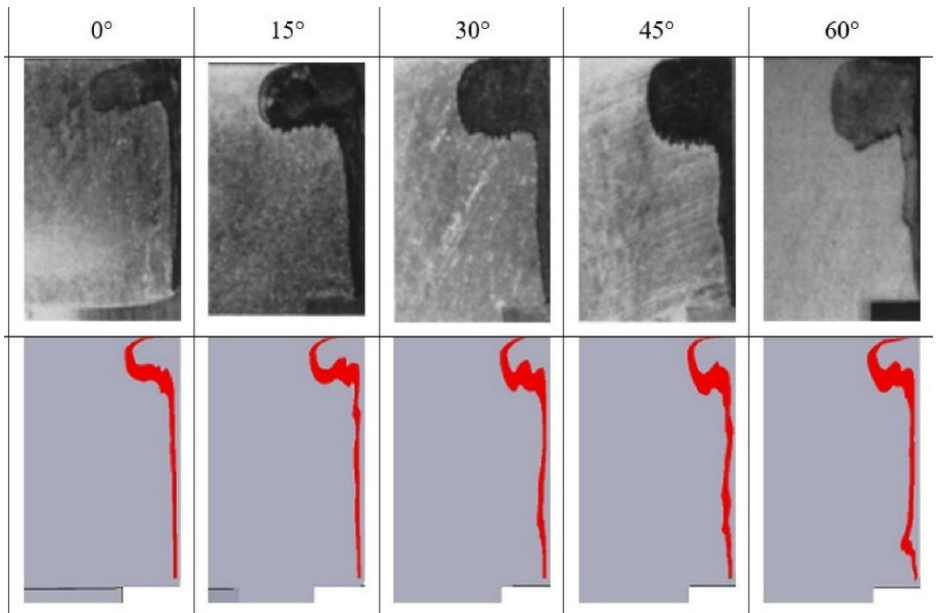


图 7 无润滑剂下行程为 35mm 时实验和模拟结果的比较

图 7 显示了第一次测试的结果，在该测试中，在 35mm 行程处停止。可以看出，污染层的最密集传播是在位于分流孔中间（60°）。其他区域坯料表皮面积会减小，从而在位于分流桥的截面处（0°）达到其最小值。仿真结果表明，坯料表皮的传播趋势与实验结果定性匹配。对于实际和模拟结果，可以在 45° 和 60° 截面中看到向内流动的原因。

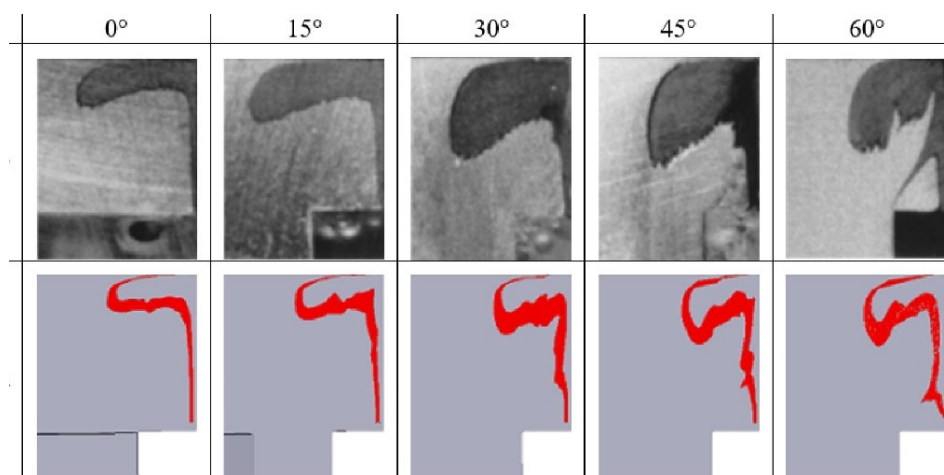


图 8 无润滑剂下行程为 41mm 时实验和模拟结果的比较

图 8 比较了相同试验的结果，但挤压杆行程等为 41 mm。在这种情况下，向内流动明确定义为截面 60° 处，这决定了靠近挤压筒表面区域的密集金属流动。而穿过分流桥中部的 0° 截面中的流动没有向内流动的迹象，坯料表皮沿挤压杆表面径向传播。对于挤压工艺的这个阶段（41 mm 行程）模拟在定性上显示了与实验中相同的结果，这间接证实了模拟使用的初始参数的整体正确。向内流动的微小偏差可能是由这种尾端缺陷对网格大小、追踪算法的细节或软件中坯料表皮视图的敏感性引起的。

类似的，图 9 显示了挤压杆行程等于 46mm 时坯料挤压过程的最终结果。在此阶段，受污染的材料流入 30°、45° 和 60° 的截面。

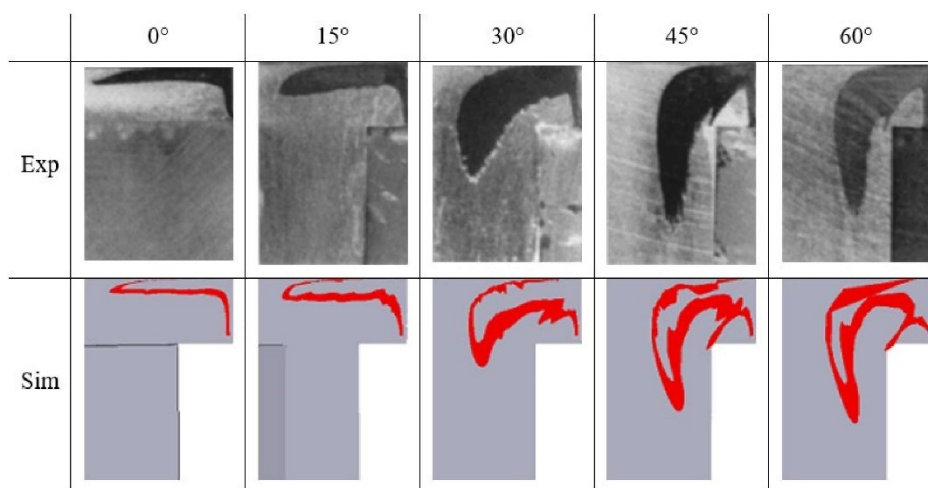


图 9 无润滑剂下行程为 46mm 时实验和模拟结果的比较

本实验研究的另一部分是评估润滑对坯料表皮流动模式的影响。为了模拟这种影响，假设挤压垫和挤压筒接触表面上的摩擦系数为 0.9。在这种情况下，模拟与实验结果非常匹配（图 10），只有微小的偏差，调整摩擦系数可以消除。在这种情况下，如果与在没有润滑剂的情况下进行类似行程相比，可以清楚地看到，接近分流孔的受污染材料的体积较小，这表明润滑对坯料表皮传播的积极影响。然而，应该注意的是，挤压铝型材的挤压筒实际通常不添加润滑剂。

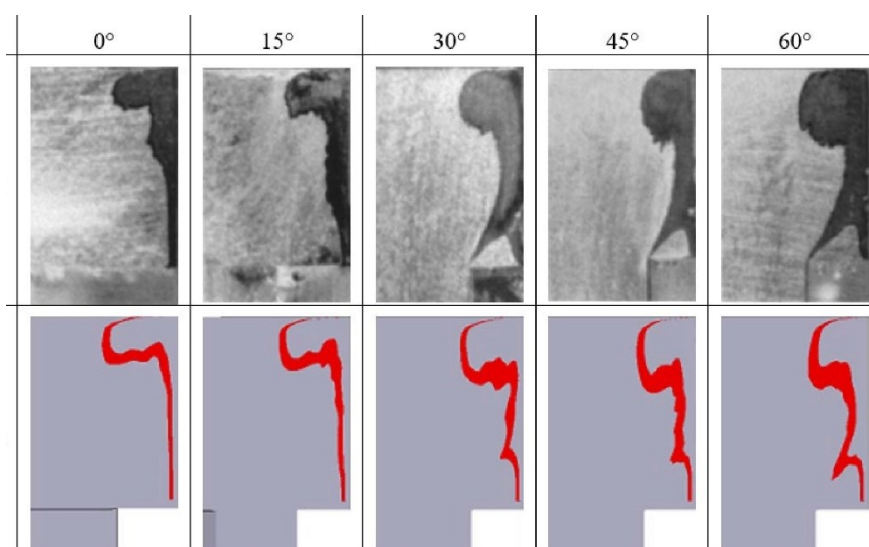


图 10 有润滑剂下行程为 39mm 时实验和模拟结果的比较

总结

在本工作中，在实验研究的基础上，验证了 QForm 挤压模拟中的坯料表皮预测的创新方法。值得注意的是，从实用的角度来看，在不使用润滑的情况下获得的结果具有更高的值，因为大多数工业挤出试验都是在没有对挤压筒进行任何润滑的情况下进行的。

本论文中所提出的研究使我们能够得出以下关键结论：

- 在有润滑和没有润滑的情况下，对表皮污染行为实现了良好的数值与实验匹配。
- 模拟的总计算时间（空心型材为 3 小时和 30 分钟）比[6]中报告的计算时间低了几倍，而不会降低预测精度。使用 Intel Core i9-9940X（14 核，最高频率 4.20 GHz）的台式电脑计算获得模拟结果。
- 摩擦力是影响污染层传播的关键参数。
- 在 QForm 挤压中使用默认摩擦设置为在没有润滑，与实验结果高度一致。
- 润滑会对污染层的传播产生积极或消极的影响。

参考文献：

- [1] Y.T. Kim, K. Ikeda, Flow behaviour of the billet surface layer in porthole die extrusion of aluminum, *Metall. Mater. Trans. A* 31 (2000) 1635-1643. <https://doi.org/10.1007/s11661-000-0173-4>
- [2] T. Ishikawa, H. Sano, Y. Yoshida, N. Yukawa, J. Sakamoto, Y. Tozawa, Effect of Extrusion Conditions on Metal Flow and Microstructures of Aluminum Alloys. *CIRP Annals* 55(1) (2006) 275-278. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60415-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60415-6)
- [3] H.S. Valberg, M. Lefstad, A.L. de Moraes Costa, On the mechanism of formation of back-end defects in the extrusion process, *Procedia Manuf.* 47 (2020) 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.207>

- [4] S. Lou, Y. Wang, C. Liu, S. Lu, C. Su, Analysis and Prediction of the Billet Butt and Transverse Weld in the Continuous Extrusion Process of a Hollow Aluminum Profile, *J. Mater. Eng. Perform.* 26 (2017) 4121- 4130. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2771-y>
- [5] M. Negrozio, R. Pelaccia, L. Donati, B. Reggiani, L. Tomesani, T. Pinter, FEM Validation of front end and back end defects evolution in AA6063 and AA6082 aluminum alloys profiles, *Procedia Manuf.* 47 (2020) 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.178>
- [6] M. Negrozio, R. Pelaccia, L. Donati, B. Reggiani, FEM Analysis of the Skin Contamination Behavior in the Extrusion of a AA6082 Profile, *Key Eng. Mater.* 926 (2022) 452-459. <https://doi.org/10.4028/p-y37nm3>
- [7] I. Kniazkin, Prediction of Underfilling Defect in Aluminium Profile Extrusion Based on ALE Simulation, *Key Eng. Mater.* 926 (2022) 537-544. <https://doi.org/10.4028/p-42gaq6>