

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.02.009

基于HyperXtrude的铝型材挤压成型的数值模拟

倪正顺, 刘石柏, 何 畅

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 利用HyperXtrude有限元软件, 对多边形空心铝型材的挤压成型过程进行数值模拟分析, 获得了挤压过程中速度场、应力场、温度场以及晶粒尺寸分布。模拟结果表明: HyperXtrude有限元软件能精确地预测挤压过程中型材的变形, 这可为铝型材挤压模具设计和修正模具缺陷提供依据。

关键词: HyperXtrude; 铝型材; 数值模拟; 挤压模具

中图分类号: TG375+.41

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)02-0038-05

Numerical Simulation of Aluminum Profile Extrusion Based on HyperXtrude

Ni Zhengshun, Liu Shibai, He Chang

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: By means of the finite element software system of HyperXtrude, makes a numerical simulation analysis on the extrusion process of polygon hollow aluminum profile, and obtains the distribution of velocity, stress, temperature as well as grain size during the process. The simulation results show that the HyperXtrude can accurately predict the profiles deformation in the extrusion process, which provides important basis for the design and manufacture of the extrusion dies.

Keywords: HyperXtrude; aluminum profile; numerical simulation analysis; extrusion model

0 引言

铝合金由于具有密度小、比强度和比刚度高、耐腐蚀、易成型、美观耐用、可表面处理、可回收再生等特点, 因而被广泛应用于交通运输、航空航天、船舶、建筑、民用装饰等领域^[1]。在生产实际中, 铝合金挤压模具设计不当, 会使模具和型材产生一系列问题, 如应力集中使模具产生裂纹, 模孔排列及工作带设计不合理而使型材产生扭拧、弯曲与波

浪等缺陷^[2]。传统的模具设计者往往是根据自己的设计经验, 并用反复试模、修模的方法来解决上述问题^[3]。随着计算机软硬件的发展, 特别是CAD/CAE/CAM在模具设计中的广泛应用, 为模具设计与制造带来了较大的便利^[4]。

针对铝型材热挤压工艺和模具设计, 本文以多边形空心铝型材为研究对象, 利用HyperXtrude软件对挤压成型过程进行数值模拟, 获取铝型材稳态挤压成型的速度场、应力场、温度场、晶粒尺寸分布

收稿日期: 2011-12-12

基金项目: 湖南省科学技术厅科技计划基金资助项目(2007FJ4190), 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湘教通[2010]244号)

作者简介: 倪正顺(1964-), 男, 湖南桃源人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事机械设计和CAD/CAM/CAE研究,

E-mail: nizhengshun@126.com

通信作者: 刘石柏(1982-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士生, 研究方向为塑性成型理论及应用,

E-mail: liutao8419@126.com

等资料, 并对其进行分析与研究, 以期为铝型材挤压模具的设计和模具缺陷的修正提供依据。

1 HyperXtrude 有限元基本理论

铝型材挤压成型过程是一个复杂的非线性、大变型的热-力耦合的塑性成型过程。传统的有限元方法较难准确模拟成型过程的变化情况。HyperXtrude有限元采用任意拉格朗日-欧拉法 (arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 来描述铝型材挤压成型的变形过程。该方法将Lagrange方法和Euler方法结合起来, 吸收了2种方法的优点, 克服了其各自的缺点。ALE方法对物体进行网格划分时, 虽然网格与物体是分离的, 但网格既可以固定, 也可以任意方式运动, 在模拟过程中既避免了计算时网格畸变及重划分所带来的问题, 又保证了模拟分析的准确性。因此, 被广泛用于模拟分析大位移、大变型的问题^[5]。

HyperXtrude采用更新的拉格朗日算法 (updated Lagrange formulation), 通过迭代的罚函数有限元模型 (penalty finite element) 来分析不可压缩流体的流动。因为控制方程是非线性的, 因此需要采用迭代的方法来计算。此外HyperXtrude采用广义极小残差 (generalized minimum residual, GMRES) 隐式算法来计算非线性控制方程^[6-7]。

对于非牛顿流体, 黏度与温度和剪切率呈非线性关系, 这使问题更复杂。ALE方法是以非线性的纳维叶-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程作为控制方程, 用来描述ALE方法的基本控制方程是连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + c_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\rho \left(\frac{\partial v_j}{\partial t} + c_i \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_i} + p_i; \quad (2)$$

能量守恒方程为

$$\rho \left(\frac{\partial E}{\partial t} + c_i \frac{\partial E}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial \tau_{ji} v_j}{\partial x_i} + p_j v_j + \frac{\partial (k_{ij} T_j)}{\partial x_i} + \kappa. \quad (3)$$

式(1)~(3)中, v 为材料位移;

τ 为柯西应力;

T 为热力学温度;

ρ 为材料密度;

E 为内能;

k_j 为热传导系数;

κ 为每单位体积的热源;

t 为时间;

p_i 是作用于物体上单位质量的体力;

c_i 为物质点相对于网格点的运动速度, 即为对流速度。

2 铝型材外形与模具结构

以南方某厂生产的多边形空心铝型材为研究对象, 其主要尺寸和几何形状如图1。

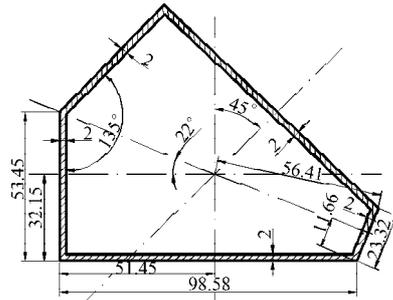


图1 型材截面尺寸

Fig. 1 The section size of the profile

型材壁厚均为2 mm, 截面面积为646.14 mm², 采用平面分流组合模挤压生产。铝型材是在高温、高压等加工条件下挤压成型的, 属于非线性、大变型问题。在挤压过程中, 坯料与模具之间存在摩擦阻力以及温度传递等复杂的热-力耦合作用, 这对模具的使用寿命有较大影响。因此, 合理布置模具分流孔的位置、数目并设计合理的工作带具有重要意义。图2为模具结构设计图。

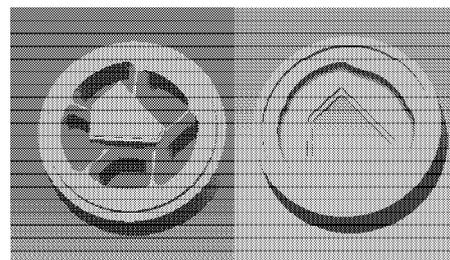


图2 模具结构设计图

Fig. 2 The die structure design

3 铝型材的挤压成型模拟

3.1 模具的有限元分析模型

挤压铝型材的模具用Pro/E软件设计完成后, 选用Pro/E中的装配模块将上、下模实体重新装配, 然后以IGES格式或ASM格式保存, 再在HyperXtrude软件中以CAD格式将模型导入。对模型进行网格划分时, 型材截面的最薄处至少分布5层单元网格, 在工作带区域, 沿挤压方向至少分布8层单元网格。工

作带和自由面上采用三棱柱单元网格划分, 其他部分采用四面体单元网格划分。网格划分按照工作带→焊合室→分流孔→坯料(变型体)的顺序进行。模拟时, 设置型材截面网格单元最小尺寸为 0.5 mm, 其他部分网格单元尺寸逐渐增大, 即离工作带越远处, 单元网格尺寸越大, 整个模型划分成约 44 万个单元网格。图 3 为有限元分析模型。

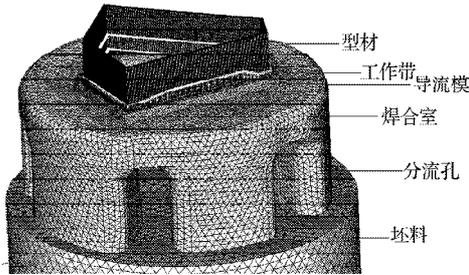


图3 有限元分析模型

Fig. 3 The finite element analysis model

3.2 挤压工艺参数

采用平面分流组合模对铝合金坯料 AA6063 进行正向挤压, 表 1 为模拟挤压参数, 参数均来自某厂生产实际。

表1 模拟挤压参数

Table 1 The extrusion parameters used in simulation

挤压筒直径 / mm	挤压比	挤压速度 / (mm · s ⁻¹)	坯料初始温度 / °C
210	51.65	1	480

3.3 挤压时的摩擦模型

金属坯料在高温、高压条件下挤压变形时, 受模具接触表面摩擦阻力的作用, 并伴随着坯料的塑性变形。一般采用如下 2 种模型。

1) 库仑摩擦模型

$$f = \mu \sigma_n \quad (4)$$

式中: f 为摩擦应力;

μ 为摩擦因数;

σ_n 为模具与坯料相接触处的法向正应力。

当模具与坯料接触处的法向正应力较小时, 常采用库仑摩擦模型。

2) 剪切摩擦模型

$$f = \mu \sigma_y \quad (5)$$

式中: f 为摩擦应力;

μ 为摩擦因数;

σ_y 为材料的剪切屈服应力。

当模具与坯料接触面之间的正应力较大时, 应采用剪切摩擦模型。

在实际铝型材挤压成型过程中, 坯料与模具上

模及挤压筒内壁间的接触应力较大, 挤压过程中坯料和模具温度因坯料变形而升高, 且模具与坯料之间相互黏结, 可认为不发生相对移动, 适合采用剪切摩擦模型。当坯料进入工作带后, 坯料与模具之间接触面的接触应力减小, 且金属坯料已获得一定的流动速度, 应采用库仑摩擦模型。摩擦因数一般取 0.3^[8]。

4 模拟结果与分析

按第 3 节中的方法进行挤压模拟, 得到了多边形空心铝型材挤压成型的模拟结果, 如图 4~12 所示。图 4 为型材出口截面速度分布图。

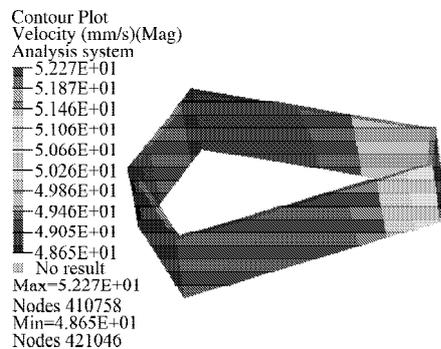


图4 出口截面速度分布

Fig. 4 The outlet-section velocity distribution of profile

由图可知, 型材出口截面的速度基本均匀, 且呈对称分布, 其中最大速度为 52.27 mm/s, 离挤压中心最远处速度最小, 为 48.65 mm/s, 二者均与型材的理论挤压速度 51.65 mm/s 较接近, 且速度波动在允许的范围。

图 5 为金属坯料从上模分流孔入口处沿 z 轴方向的截面图。

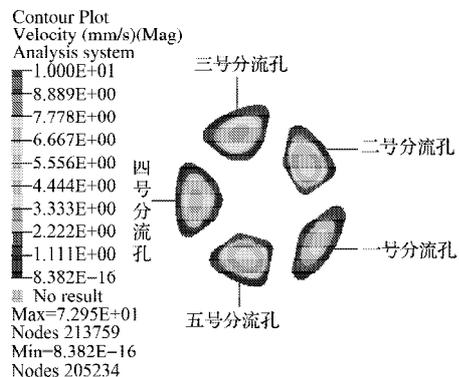


图5 分流孔内坯料速度分布

Fig. 5 The billet velocity distribution in portholes

由图可知, 2 号分流孔与 5 号分流孔内坯料流速略大, 这是因为距挤压中心近的缘故。但整体流速较均匀, 型材出口速度也对称分布, 说明分流孔的

布置较合理。

图6为型材出口截面的位移分布图, 图7为型材的变形分布图。

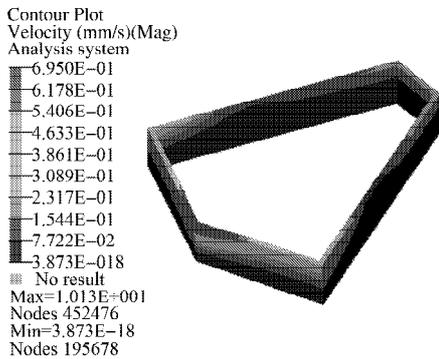


图6 型材位移分布

Fig. 6 The displacement distribution of profile

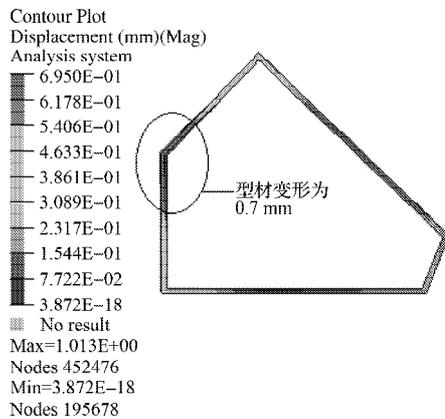


图7 型材变形分布

Fig. 7 The deformation distribution of profile

由2图可知, 型材出口截面的位移及变形分布基本均匀且对称, 型材在同一处位移与变形都达到最大值0.7 mm, 这是因为金属坯料在此处的流动速度最小。因此实际生产的铝型材可能在此处下凹, 但对型材外形、性能的影响较小, 在允许范围内, 基本满足实际应用要求。

图8为型材出口截面温度分布图。

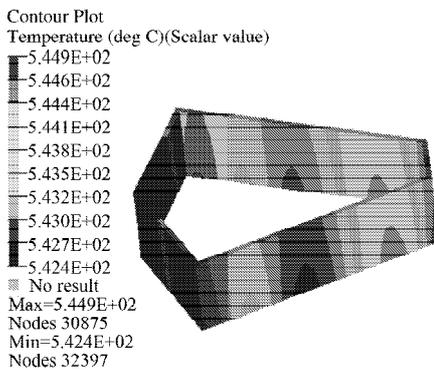


图8 型材温度分布

Fig. 8 The temperature distribution of profile

由图可知, 型材温度分布较均匀且对称分布, 温差较小。

图9为型材的晶粒尺寸大小分布图, 图10为型材的抗拉伸强度分布图。

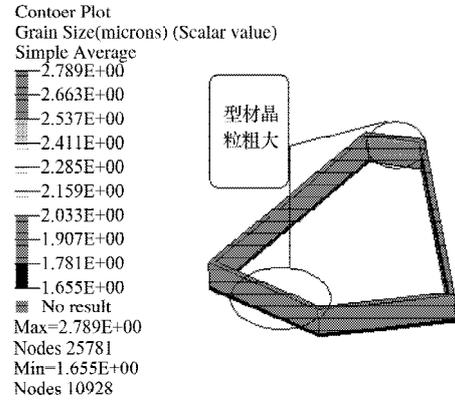


图9 型材晶粒尺寸分布

Fig. 9 The grain size distribution of profile

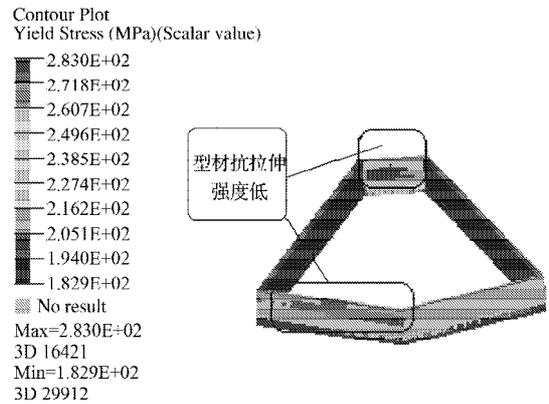


图10 型材强度分布

Fig. 10 The strength distribution of profile

由2图可知, 在型材晶粒尺寸越大的地方, 型材的抗拉伸强度越小; 反之型材的抗拉伸强度越大。这与材料晶粒尺寸较大时, 其抗拉伸强度较低的理论相吻合。

图11与图12分别为挤压模型整体应力与应变分布图。

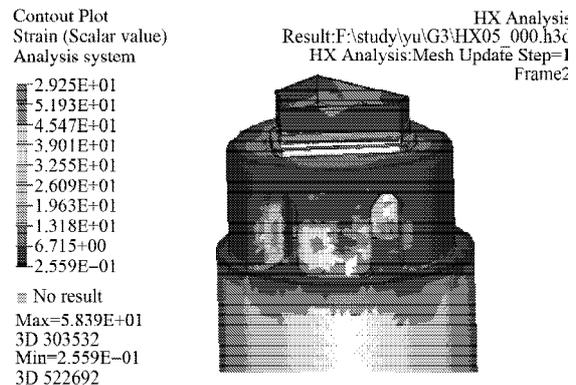


图11 模型应力分布

Fig. 11 The stress distribution of the model

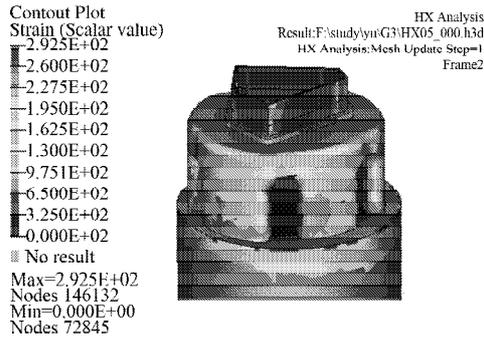


图12 模型应变分布

Fig. 12 The strain distribution of the model

由2图可知,在工作带附近,应力值较大,导致模孔工作带容易磨损,甚至疲劳破坏。这是因为不仅在模孔工作带处金属变形最剧烈,而且在焊合室底部圆角及坯料与挤压筒拐角接触的位置存在较大的死区,平模挤压时更是如此。由于死区的存在可阻止坯料表面的杂质、氧化皮等流到制品表面,从而获得良好的制品表面质量。但此处材料的应变较大,属于大变型区,因此消耗的挤压力较大,模具容易产生变形,引起模孔变大或变小,甚至压坏模具。特别是在挤压一些低塑性、难变型金属和合金时,模具产生的变形更大,从而对模具的寿命影响也较大^[9]。

上述采用 HyperXtrude 有限元软件对铝型材的挤压过程的速度场、温度场等模拟结果表明:采用 HyperXtrude 有限元软件模拟时,避免了单元网格的畸变和重划分,提高了有限元模拟时的计算精度,同时还能比较精确地预测铝型材挤压时型材速度场、温度场等分布趋势,为设计者提供参考。

5 结论

利用 HyperXtrude 有限元软件对多边形空心铝型材挤压成型过程进行数值模拟,得到了如下结论:

1) HyperXtrude 软件功能强大,能较好地描述金属挤压时的金属流动情况。

2) 应用 HyperXtrude 对铝型材挤压成型过程进行模拟分析,不仅可减少挤压变形时网格重划分,节省时间,还能方便快捷地构建挤压有限元模型和精确地预测挤压过程中型材的变形趋势。这样可减少试模、修模的次数,提高模具设计效率,降低模具制造成本,实现模具开发的高质量、低成本、短周期。

参考文献:

[1] 刘静安,谢水生. 铝合金材料的应用与技术开发[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:10-140.

Liu Jing'an, Xie Shuisheng. Application and Development of Aluminum Alloys[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 10-140.

[2] 舒洁,刘全坤,胡龙飞. 铝合金挤压模具型腔曲线优化设计[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(1):85-88.

Shu Jie, Liu Quankun, Hu Longfei. Die Container Optimum Design for Aluminum Alloy Extrusion[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(1): 85-88.

[3] Qamar S Z, Arif A F M, Sheikh A K. Analysis of Product Defects in Atypical Aluminum Extrusion Facility[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2004, 19(3): 391-405.

[4] 闫丽. 铝型材挤压过程数值模拟及模具优化设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2007.

Yan Li. Numerical Simulation for Aluminum Tube Extrusion Process and Optimum Design of Die[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.

[5] 柳长茂. 欧拉-拉格朗日方程的形式讨论[J]. 应用数学学报,1984,7(1):36-47.

Liu Changmao. On the Forms of the Euler-Lagrange Equations[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1984, 7(1): 36-47.

[6] 黄科. AA6063矩形截面铝型材挤压有限元分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

Huang Ke. Finite Element Investigation on Extrusion of Rectangular AA6063 Profile[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[7] 王尧,周照耀,潘健怡,等. 基于ALE有限元法的铝型材挤压成型的数值模拟[J]. 锻压技术,2010,35(1):149-153.

Wang Yao, Zhou Zhaoyao, Pan Jianyi, et al. Numerical Simulation on Aluminum Profile Extrusion Based on ALE Method[J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(1): 149-153.

[8] 顾迎新,陈淑利. 空心铝型材挤压成形过程的有限元数值模拟[J]. 沈阳大学学报,2004,16(2):36-37.

Gu Yingxin, Chen Shuli. Numerical Simulation on Hollow Aluminum Section Extrusion Process Using Finite Element Method[J]. Journal of Shenyang University, 2004, 16(2): 36-37.

[9] 潘健怡,周照耀,王尧,等. 复杂横截面铝型材挤压模具的设计与数值模拟分析[J]. 塑性工程学报,2010,17(1):46-51.

Pan Jianyi, Zhou Zhaoyao, Wang Yao, et al. Design and Numerical Simulation Analysis on Extrusion Die of Aluminum Section with Complicated Profile[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(1): 46-51.

(责任编辑:邓光辉)