

7050 铝合金热挤压成形过程的有限元模拟

许柏华¹, 张 翔², 王晓溪³

(1. 山东山矿技工学校 理论教研组, 山东 济宁 272100; 2. 江苏徐州工程机械研究院, 江苏 徐州 221004;
3. 徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221111)

摘 要: 针对传统工程机械用销轴数量多、重量大、工况差等不足,以 7050 高强轻质铝合金代替传统钢质材料,采用 DEFORM-3D 有限元分析软件,对 7050 铝合金热挤压成形过程进行有限元数值模拟,分析了挤压载荷、金属流动速率、等效应变、等效应力和温度场等参量的变化规律。结果表明,销轴的热挤压变形过程可分为 4 个阶段,即挤压填充阶段、开始挤出阶段、稳定挤压阶段和终了挤压阶段;工件内部等效应变分布横向均匀性较好,除了尾部变形不均匀外,其他部位应变分布基本一致;在挤压凹模模口处形成死区,工件内部等效应力达到最大值。

关键词: 7050 铝合金;热挤压;有限元模拟;变形行为

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2014)05-0327-06

Finite element simulation on hot extrusion process of 7050 aluminum alloy

XU Bohua¹, ZHANG Xiang², WANG Xiaoxi³

(1. Research Group of Theory, Shandong Mining Technical School, Jining 272100, China;
2. Jiangsu Xuzhou Engineering Machinery Research Institute, Jiangsu 221004, China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221111, China)

Abstract: Being in great quantity, heavy weight and poor working conditions in conventional engineering machinery, finite element method was used to simulate the deformation behavior of 7050 aluminum alloy during hot extrusion process in order to verify if the aluminum alloy can replace conventional steel. Meanwhile, parameters like extrusion load, flow rate of metal particles, effective strain, effective stress and temperature field were analyzed. The results demonstrated that the hot extrusion process can be divided into four stages, i. e. upsetting and filling stage, extrusion start stage, stable extrusion stage and the end stage separately. The

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 江苏省大型工程装备检测与控制重点建设实验室开放课题(JSKLEDC201309)

作者简介: 许柏华(1973—),女,山东省济宁人,讲师,硕士,主要从事先进机械装备设计及加工制造技术与机械制造职业教育研究。

distribution of effective strain in the transverse direction is more homogeneous than that in the longitudinal direction, achieving almost good homogeneity in the billet except for the head part. At the hole of the extrusion die, dead zone is formed and the effective stress reaches the maximum value.

Key words: 7050 aluminum alloy; hot extrusion; finite element simulation; deformation behavior

作为工程机械中最为常见、通用性最强、用量最大的结构类零件,销轴的使用工况复杂且对其力学性能和安全性要求较高。为了适应工程机械结构的轻量化设计思想,实现销轴材料“以铝代钢、节能减排”的目标,近年来逐渐采用轻质高强铝合金代替传统钢材^[1-2]。7050 铝合金系典型的 Al-Si-Mg-Cu 系高强变形铝合金,化学成分及相组成均较为复杂。在实际铸造生产中,由于受到熔炼条件和变质工艺等因素的限制,合金力学性能的提高幅度十分有限,尤其是塑性相对较低,不能很好地满足工业生产中销轴对合金优良综合性能的要求。因此,常常需要后续热挤压成形来改善合金组织,提高力学性能^[3-4]。

热挤压过程中,挤压制品的组织 and 性能,挤压模具的受力、磨损和使用寿命等,与变形材料的金属流变特征、应力应变状态、变形温度等参数密切相关。因此,实际生产过程中对挤压工艺设计、挤压变形参数的选择提出了更高的要求。计算机模拟仿真技术的出现,为求解分析塑性成形问题提供了可能^[5]。通过模拟金属材料的变形过程,可获得变形过程中成形材料及模具在任意变形时刻各质点、各方向的热力学参数变化规律。然而,目前国内外对高强轻质铝合金挤压方面的研究较少,且多数局限于冷挤压变形^[6-8],热挤压的工艺制订和模具设计主要根据经验,因此不可避免地存在一定的盲目性。

为此,本研究采用有限元模拟仿真技术,借助 DEFORM-3D 软件分析平台,对 7050 铝合金销轴热挤压成形过程进行有限元数值模拟,分析了挤压载荷、金属流动速率、等效应变、等效应力和温度场等参量的变化规律,以期为 7050 铝合金销轴的改性研究及挤压模具的优化设计提供技术指导。

1 有限元模型的建立

利用三维造型软件 UG 建立所需的工件和模具几何模型,模具结构尺寸与三维装配关系如图 1(a)所示。挤压模具结构设计时,采用平模模口结构,以防止坯料表面氧化皮流入成形工件。三维几何模型装配完成后,导入有限元分析软件 DEFORM-3D 中进行数值模拟,最终建立的有限元分析模型如图 1(b)所示。

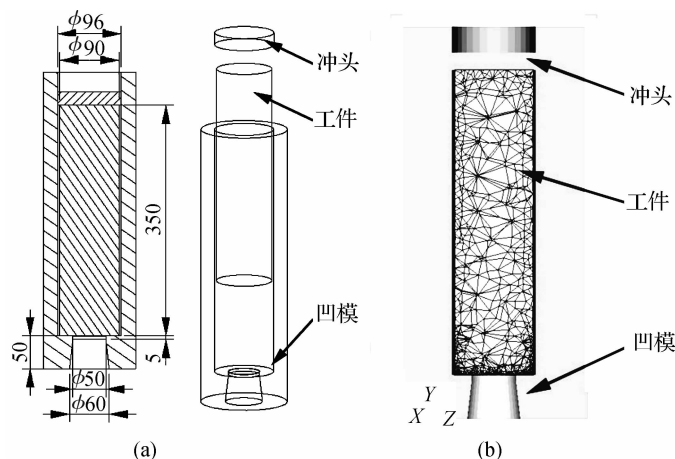


图 1 模具结构与三维模型

Fig. 1 Die structure and 3D FEM model

2 模拟参数的设置

采用刚黏塑性热力耦合有限元模型,不考虑模具变形,将其视为刚体,工件设为变形体;模具和工件间的摩擦采用剪切摩擦模型,摩擦因数设为 0.2^[5-10]。工件为 $\phi 90\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ 的圆柱体,通过用户自定义输入建立 7050 铝合金的材料模型。模拟用具体参数:初始工件温度 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$,初始模具温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,工件与模具之间传热系数 $20\text{ N}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}$,摩擦因子 0.2,冲头挤压速度 20 mm/s ,凹模工作带长度 5 mm ,挤压比 $\lambda 3.69$,工件直径 90 mm ,凹模工作带直径 50 mm 。

采用四节点四面体等参单元对工件和模具进行离散。考虑挤压速度与模拟总步长,并结合材料变形程度、模拟运算效率与计算机存储空间等因素,按挤出方向对工件进行局部网格细化^[9-10],设置 3 个等级的网格划分区,即粗化区、过渡区和细化区,如图 2 所示。其中,粗化区网格单元尺寸为 15 mm ,过渡区网格单元尺寸为 5 mm ,细化区网格单元尺寸为 2 mm 。

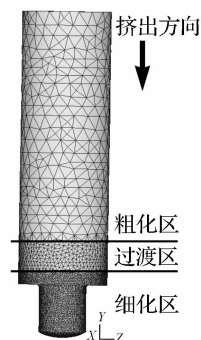


图 2 工件网格划分区域

Fig. 2 Mesh refinement of billet

3 模拟结果分析与讨论

3.1 挤压变形前后工件宏观变化

将变形前后工件的宏观变化情况进行比较,如图 3 所示。可以发现,工件挤出模具后,由于不再受到凹模的约束,在重力与残余应力的共同作用下,挤出工件略微发生翘曲。经测量,挤压后工件长度约为 $1\ 100\text{ mm}$,约为挤出前工件长度的 3.14 倍,并未达到挤压比 λ 。这是由于挤压过程采用平模模口结构,挤压终了死区金属没有完全参与变形过程所致。

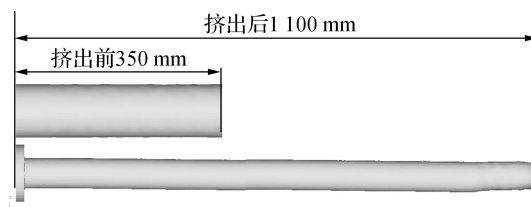


图 3 挤压前后工件长度变化

Fig. 3 Length of billet before and after extrusion

3.2 挤压变形工件的一般特征

图 4 为挤压变形过程中某一时刻工件变形的示意图。根据材料在挤压变形过程中的流动特性,可以将整个工件的变形分为 4 个区域,即 I 区:未变形区,II 区:死区,III 区:变形区,IV 区:已变形区。

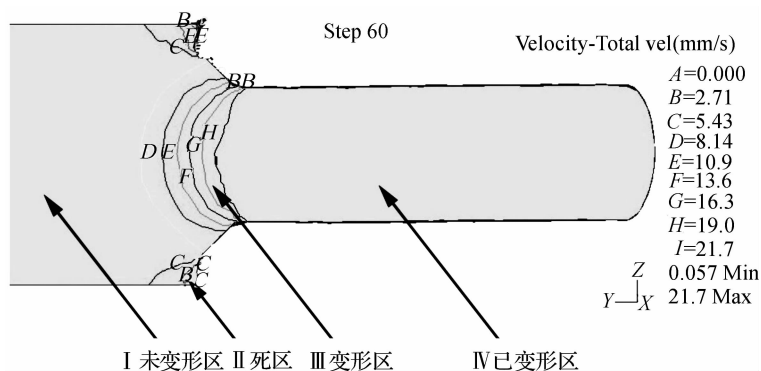


图 4 工件挤压变形特征

Fig. 4 Deformation characteristics of billet

3.3 挤压载荷变化

图 5 为挤压变形过程中的载荷-时间曲线。根据载荷曲线的变化趋势,可以将整个挤压变形过程分为 4 个阶段,分别为 I 挤压填充阶段,II 开始挤出阶段,III 稳定挤压阶段,IV 挤压终了阶段。

3.3.1 挤压填充阶段

由于工件与挤压筒之间存在间隙,挤压开始时,金属首先向四周间隙自由流动,载荷较小,基本维持在 170 kN 附近,金属在冲头作用下不断被镦粗直至充满挤压筒。

3.3.2 开始挤出阶段

当工件材料充满挤压筒间隙时,金属周向流动受到挤压筒内壁约束,材料开始从挤压筒流入凹模模口,完成挤压变形后进入工作带。随着挤压进程的继续,被挤入工作带的材料越来越多,挤压载荷迅速增大到峰值。此时,金属充满挤压筒和凹模模口,变形逐渐趋于稳定。

3.3.3 稳定挤压阶段

此阶段材料连续、稳定流动,工件上同一断面上的金属质点以一定速度进入工作带后平稳流出。由于摩擦较小,材料经过挤压变形后类似于刚性平移,因此,随着挤压筒内工件长度的减小,工件与挤压筒之间的摩擦力减小,载荷大小基本不变,总体载荷基本平稳。

3.3.4 挤压终了阶段

当参与挤压变形的材料长度达到工件原长的 90% 以后,即进入挤压终了阶段。由于该阶段材料内部变形不均匀,实际生产中该段材料将作为废料被切除^[11]。

3.4 等效应变分布

图 6 为不同挤压变形阶段下工件的等效应变分布情况。从图 6(a)中可以看出,最初工件近似呈镦粗状态,材料开始从挤压筒流入凹模模口,在挤压凹模模口附近等效应变梯度较大,剪切变形较为剧烈。结合图 6(b)和图 6(c)可以看出,随着金属不断流出,凹模模口完成挤压,材料基本不再发生变形,类似于刚性平移阶段,应变量也逐渐趋于稳定。由于头部金属挤出凹模模口时,金属的流动速度存在差异,即中心快、四周慢,从而导致工件整体变形不均匀,变形后头部呈现圆棒状。从图 6(d)中还可以看出,随着大部分材料被依次挤出凹模模口,死区金属也开始参与变形,但工件尾部阶段等效应变分布梯度较大且分布均匀性较差。

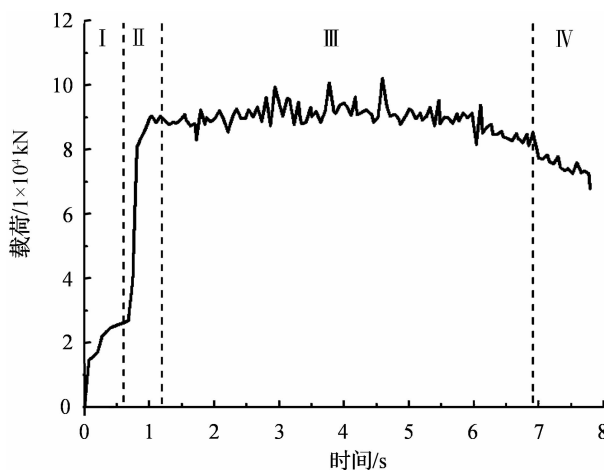


图 5 挤压变形过程的载荷-时间曲线

Fig. 5 Load-time curve during extrusion

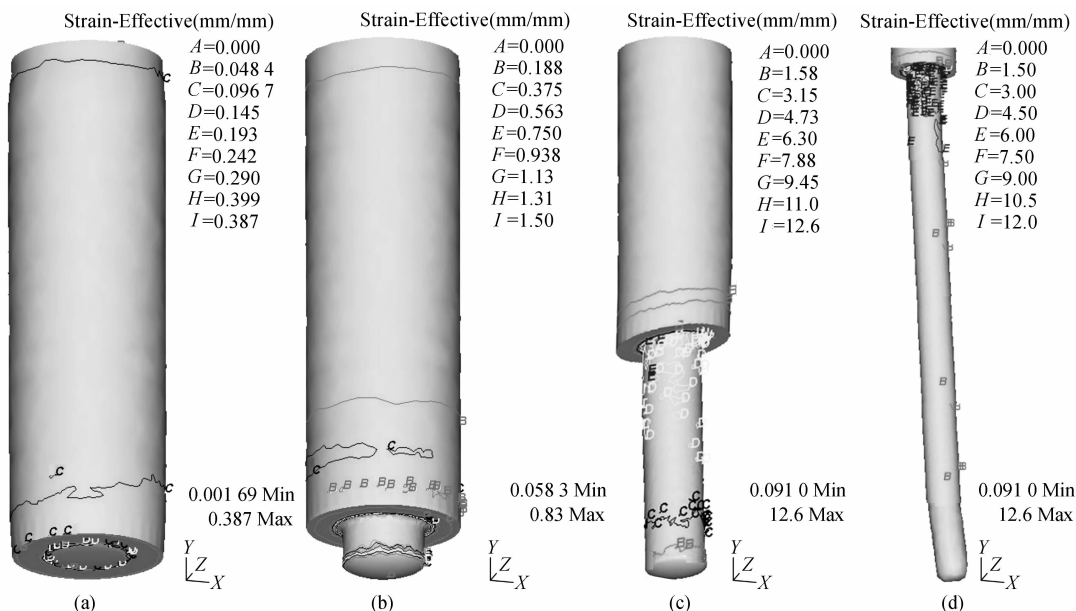


图 6 不同挤压变形阶段工件等效应变分布图

Fig. 6 Effective strain distribution in different deformation stages

3.5 其他相关场量变化

在稳定挤压变形阶段中,选取2个不同变形时刻工件的中心纵截面部位进行分析研究,观察变形过程中材料内部其他场量的变化情况。图7~9分别为不同变形时刻下,金属流动速率、等效应力及温度场的分布云图。

从图7可以看出,金属质点的流动呈现出“中心快、四周慢”的变化规律,并且在凹模模口附近,金属流动速率变化显著,四周金属逐渐向凹模模口附近汇聚,两边逐渐形成流动死区,如图7圆圈所示。这也是后续挤压完成后,死区金属最终进入工件尾部而致使该部分金属变形不均匀,需要进行切除的原因。

从图8可以看出,金属在凹模模口附近变形最为剧烈,等效应力梯度最大,在变形死区部位,金属等效应力达到最大值。如果该部位模具结构设计不合理,在残余拉应力的作用下,挤压件将会出现表面裂纹,最终影响制品的表面质量和尺寸精度^[11-12]。

在挤压过程中,温度是一个重要的工艺参数,如工件的变形抗力、工件与模具之间的摩擦力等都与温度密切相关。此外,挤压件的尺寸精度、微观组织、表面质量、力学性能和变形过程中的金属流动等都直接受到温度的影响。从图9可以看出,挤压件在凹模模口处温度最高,温度梯度最大。这一方面是因为除了挤压筒与工件之间的接触摩擦产生热量外,在塑性变形过程中的变形能将不断转换成热能的形式,使得工件局部温度升高^[12];另一方面,当挤压速度较快时,由于工件与模具之间来不及充分热传递,导致工件局部温升明显。需要注意的是,在挤压过程中,局部温度分布不均匀,可能使微观组织不均匀,最终对其性能产生不利影响。

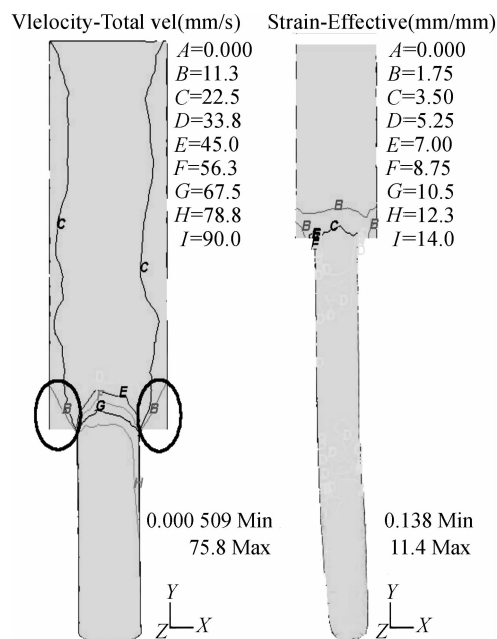


图7 金属流动速率分布

Fig. 7 Distribution of metal flow rate

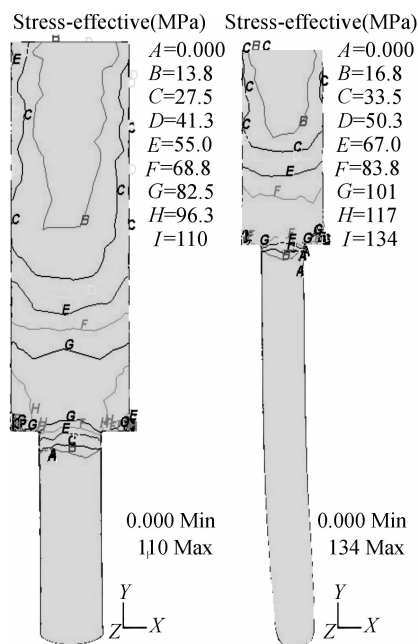


图8 工件内部等效应力分布

Fig. 8 Distribution of effective strain

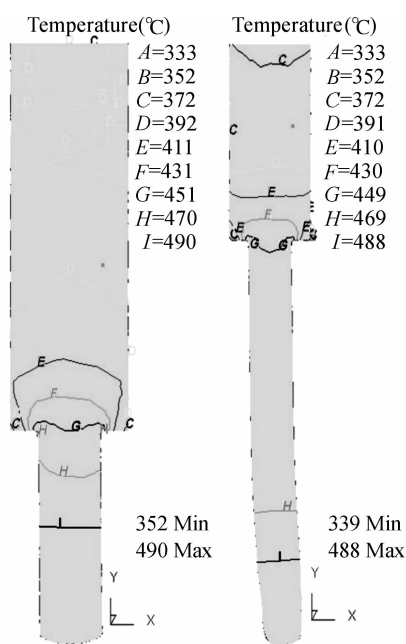


图9 工件内部温度场分布

Fig. 9 Distribution of temperature field

4 结 语

销轴的热挤压变形过程可分为 4 个阶段,即挤压填充阶段、开始挤出阶段、稳定挤压阶段及終了挤压阶段。

销轴热挤压变形过程中,其内部等效应变在纵向上从头到尾逐渐增大;在横向上除了尾部均匀性较差外,其他部位应变分布基本一致,即工件内部等效应变分布横向均匀性较好。

在挤压凹模模口处,工件内部等效应力达到最大值,该区附近死区金属发生强烈剪切变形。若模具结构设计不合理,挤压件将产生表面裂纹,影响制件表面质量和尺寸精度。此外,在挤压过程中,剧烈的塑性变形将导致该区温度急剧上升。

参考文献:

- [1] 侯亮,郭涛.轻装上阵工程机械轻量化设计之势[J].工程机械与维修,2013(10):62-68.
- [2] 高顺德,潘志毅.轻量化技术在工程机械设计中的应用[J].叉车技术,2011(1):01-02.
- [3] 吴生绪,潘琦俊.变形铝合金及其模锻成形技术手册[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [4] 俞汉清,陈金德.金属塑性成形原理[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [5] 张丹,晏建军.DEFORM 金属挤压成形工艺数值模拟技术[J].CAD/CAM 与制造业信息化,2012(1):104-105.
- [6] 段园培,张海涛,黄仲佳,等.基于 DEFORM-3D 的支撑销冷挤压成形数值模拟[J].热加工工艺,2013,42(9):125-127,130.
- [7] Chen D C, Syu S K, Wu C H, et al. Investigation into cold extrusion of aluminum billets using three-dimensional finite element method[J]. Journal of Materials processing Technology,2007,192/193:188-193.
- [8] Cetin A, Kalkanli A. Numerical simulation of solidification kinetics in A356/SiC_p composites for assessment of as-cast particle distribution[J]. Journal of Materials Processing Technology,2009,209(10):4795-4801.
- [9] 黄珍媛,李文芳,吴锡坤,等.铝型材挤压成形仿真技术研究[J].铝加工,2008(5):4-8.
- [10] 方刚,王飞,雷丽萍,等.铝型材挤压数值模拟的研究进展[J].稀有金属,2007,31(5):682-688.
- [11] 刘静安.铝型材挤压模具设计、制造、使用及维修[M].北京:冶金工业出版社,1999.
- [12] 梁波,崔红森,张军.冷挤压过程的表面处理及润滑[J].模具制造,2008,8(12):71-73.