

飞机起落架内螺纹冷挤压成形过程的研究

Study on Process of Cold Extrusion Forming Internal Thread of Aircraft Landing Gear

南京航空航天大学机电学院 沙小伟 黎向锋 左敦稳 张敏 缪宏

[摘要] 利用高级非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,采用刚塑性有限元法对内螺纹冷挤压成形过程进行了模拟,得出了挤压成形过程中应力、应变的分布规律,全面地阐述了金属塑性成形有限元仿真技术。研究表明挤压时工件在扭矩的作用下,外表面产生压应变,内表面产生拉应变,应变自内向外逐渐增大,最外层达到最大值,大大提高挤压内螺纹件的抗拉强度和抗疲劳性能,对内螺纹冷挤压成形的工艺参数控制及塑性成形有限元仿真具有指导意义。

关键词: 内螺纹 塑性成形 有限元 应力应变

[ABSTRACT] The FE simulation process of cold extrusion forming internal threads with advanced non-linear FEA software ANSYS/LS-DYNA by using FEA method of rigid-plastic is achieved. Then the distribution law of stress and strain in cold extrusion forming are obtained, and the FEA method of metal plastic forming is described in detail. The result indicates that compression strain on external surface and tensile strain on internal surface of the work piece are produced by tapping torque in cold extrusion process, and strain increases gradually from inside surface to outside surface, the maximal strain appears on outermost surface, the tensile strength and fatigue property of internal threads are greatly improved, which plays a guideline role for controlling technical parameters in cold extrusion process of internal threads and simulation of FEA method in plastic forming.

Keywords: Internal thread Plastic forming FE Stress and strain

起落架是飞机的重要承力部件,在飞机安全起降过程中担负着极其重要的使命。螺纹零件是起落架零件中一种非常重要的结构件和紧固件,使用数量非常多,但是由于螺纹零件的加工,尤其是形状结构复杂的高精度螺纹的加工,普遍存在劳动强度大、生产效率低、生产成本高及螺纹零件精度值低等问题,因而严重降低了起

落架零件的机械强度和使用寿命。采用冷挤压成形^[1]工艺净成形内螺纹是当今起落架内螺纹抗疲劳加工的一个发展趋势。

冷挤压成形工艺净成形内螺纹利用金属的塑性成形原理,加工的内螺纹精度高、表面粗糙度值低、具有良好的表面完整性,极大地提高了内螺纹件的强度和疲劳性能。传统的内螺纹冷挤压加工仅适合于强度低、塑性好的有色金属以及低碳钢的加工,一般不适用于高强度材料加工。本课题研究的是高强度钢的加工,高强度钢不仅具有较高的强度,而且具有良好的横向塑性和断裂韧性,塑性成形抗力大。高强度材料的塑性成形过程是一个复杂的弹塑性大变形过程,涉及几何非线性、材料非线性、接触非线性等一系列难题,因此建立适当的“过程模拟”非常重要^[2]。目前应用于塑性成形的数值模拟方法主要有上限元法(UBM)、边界元法(BEM)和有限元法(FEM)。

近年来随着计算机技术的飞速发展以及有限元技术自身的完善,有限元法(FEM)作为一种高效的数值分析方法,在塑性成形领域显示出巨大的作用。本课题拟采用高级非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对内螺纹冷挤压成形过程进行模拟,观察成形过程中的应力、应变,从而得出冷挤压加工中的某些规律,由此提供较为可靠的成形工艺参数。

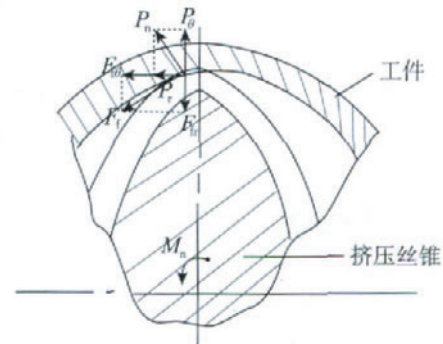


图1 挤压变形区金属受力图
Fig.1 Stressed diagram of extrusion deformed area of metal

1 冷挤压变形区金属受力分析

如图 1 所示,挤压丝锥进入工件底孔时,丝锥棱齿与工件材料接触面的金属受到法向载荷 P_n 的作用^[3],该法向力可以分解成引起金属沿径向流动的径向力 P_r ,以及引起金属沿旋转方向流动的切向力 P_θ ,而在与丝锥旋转的相反方向上接触面金属受到滑动摩擦力 F_f 的作用。此外,当丝锥沿轴向旋入时,金属将会受到轴向力 P_z 的作用。所以,整个挤压变形区的金属受到三向力的作用。

$$\begin{cases} F_z = P_z \\ F_\theta = P_\theta + F_{f\theta} = P_n (\cos\theta + \mu\sin\theta) \\ F_r = P_r + F_{fr} = P_n (\sin\theta - \mu\cos\theta) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, μ 为摩擦系数, θ 为 P_n 与水平轴线的夹角 ($0^\circ < \theta < 90^\circ$)。因为法向载荷 P_n 和轴向力 P_z 都是压力,所以, F_z 和 F_θ 也为压力,对于径向力 F_r ,若 P_r 大于 $F_{fr}(\tan\theta > \mu)$,则为压力,否则为拉力。挤压前, θ 由下式决定:

$$\tan\theta = \frac{d - K + K \sin\omega_\alpha}{ZK \cos\omega_\alpha}, \quad (2)$$

式中, d 为丝锥外径, K 为铲背量, Z 为丝锥棱齿, ω_α 为铲模凸轮的转角,且有 $\sin\omega_\alpha \geq 0, 0 \leq \cos\omega_\alpha \leq 1$,所以将式 (2) 改写成

$$\tan\theta \geq \frac{d - K}{ZK}, \quad (3)$$

通常 K 取 (0.02 ~ 0.06) d ,棱齿 Z 不超过 15,故 $\tan\theta > 1$,而 μ 总小于 1,即 $\tan\theta > \mu$ 。

综合以上的分析,可得出内螺纹冷挤压变形区的金属处于三向压缩应力状态,其塑性由于三向压缩应力的存在而得到大大提高,这十分利于内螺纹的挤压成形。

2 有限元分析

2.1 有限元法的应用类型

根据金属材料非线性本构关系式的不同,有限元法在金属塑性成形模拟过程中的应用主要分为 2 类:弹(粘)塑性有限元法^[4]和刚(粘)塑性有限元法^[5]。

(1) 弹(粘)塑性有限元法考虑了金属变形中的弹性效应,其理论基础是 Prandtl-Mises 本构方程。它分为小变形弹塑性有限元法和大变形弹塑性有限元法。小变形弹塑性有限元法用来分析金属成形过程的前期情况,大变形弹塑性有限元法则用于变形量发生很大变化的后期阶段。它们适用于弹性变形量无法忽略的成形过程模拟,广泛用于板料的成形分析。

(2) 刚(粘)塑性有限元法忽略了金属成形过程中的弹性变形,其基本理论是 Markov 变分原理。刚(粘)塑性有限元法应用于锻造、挤压、拉拔、轧制。其中,刚塑性有限元法通常适用于冷加工,而对于热加工则需要用刚粘塑性有限元法,由于忽略了金属塑性成形过程中的弹性效应,刚(粘)塑性有限元不能求解弹性效应,也不能进行残余应力的计算。目前刚(粘)塑性有限元已经广泛应用于金属体积成形过程的模拟中。

由于本课题是对中等直径内螺纹的冷挤压过程进行仿真研究的,属于冷加工变形问题,所以采用刚塑性有限元方法。

2.2 问题描述及建模依据

本课题对中等直径内螺纹冷挤压过程进行有限元仿真研究,考察挤压成形过程中的应力场、应变场。现有的有限元软件只能建立较为简单的模型,对于较为复杂模型的建立有一定困难,而目前的三维建模软件发展比较成熟,可以解决许多复杂模型的建模问题。文中所使用的六棱挤压丝锥 MJ22 × 1.5 在有限元软件中的建模不容易实现,因此首先利用三维建模软件 PRO/E 造出三维实体模型,然后再导入到有限元软件中进行分析。

工件采用含有 8 个节点的三维显式实体单元 SOLID164,该单元只用在动力显式分析中,它支持所有许可的非线性特性;丝锥采用 10 节点四面体实体单元 SOLID168,它具有中间节点,特别适合处理由不同 CAD/CAM 系统给出的不规则几何模型的网格划分问题。整个模型网格划分后共有节点 255 105 个,单元 186 546 个,如图 2 所示。其中工件共有单元 63 440 个。材料模型的选择是有限元模拟的一个非常重要的环节,它直接影响模拟结果的精度和可靠性。刚体模型在显式动力分析中具有十分重要的意义^[6],用它定义模型中相对刚

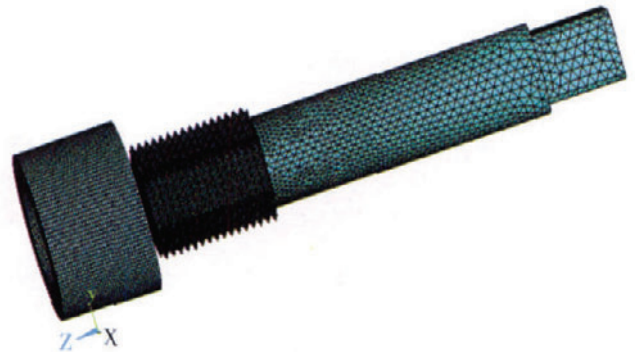


图 2 挤压丝锥及工件的有限元模型
Fig.1 Finite element model of extrusion tap and workpiece

硬的部分可以大大节省计算机时,为此将丝锥定义为刚体模型;工件则采用幂函数塑性模型,该模型特别适用于金属和塑性成形分析。

2.3 材料性能

工件材料采用 Q460 高强度钢,挤压丝锥采用 M35 高强度钢。材料设置为各向同性,弹性模量取 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$,泊松比取 0.3,密度为 $7.85 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$ 。选用传统的拉格朗日乘法,摩擦系数定为 0.33,这一数值是 Kulak 在总结了 327 组试验后推荐的^[7]。考虑到材料的非线性,材料强化采用双线性等向强化 BISO 准则。试验测得工件的屈服强度为 460N/mm^2 ,挤压丝锥的屈服强度为 660N/mm^2 。

3 计算结果与分析

冷挤压结束后,通过软件的后处理功能可以获得挤压后的应力、应变规律。图 3 为工件的应力分布图,由图可以得出工件内表面主要承受压应力的作用,自内向外应力值逐渐增大,最外层应力达到最大值。金属处于压应力状态时,对疲劳寿命影响较大,在疲劳过程中,压应力将抵消外部拉应力的影响,起到平均应力作用。因此,最内层压应力的存在,将大大提高挤压内螺纹件的抗拉强度和抗疲劳性能。

内螺纹冷挤压过程中,工件底孔直径的大小对挤压螺纹的牙高率、质量、加工效率有很大影响。高强度钢内螺纹挤压成形时,关键问题之一就是合理选择工件底孔直径:当工件底孔直径较小时,挤压余量大,塑性变形的体积就大,塑性变形功增大;另外,当挤压余量大时,丝锥和工件间的摩擦面增大,摩擦功增多。通过挤压应力的大小可以算出挤压扭矩的大小,扭矩是反映挤压顺利进行的直观指标。图 4 表示为不同工件底孔直径对挤压应力的影响情况,可以看出,随着挤压的进行,挤压所产生的应力迅速上升,当到达稳定状态时,底孔直径为 21.30mm 的工件应力明显要小于底孔直径为 21.25mm 的工件。所以,在保证挤压螺纹质量的前提下应尽可能选择大一点的工件底孔直径,以降低挤压应力。

在相同底孔直径下,考察不同挤压速度对挤压应力的影响,如图 5 所示。理论上,挤压速度越大,工件成形越快,生产效率越高。但是,冷挤压速度增大,单位时间内工件材料所产生的塑性变形量也多,丝锥和工件的摩擦必然加剧,产生的摩擦功也将增大,结果将导致挤压应力的上升。图 5 (a)中底孔直径为 21.25mm,挤压速度 ω 从 1.05r/s 增加到 1.67r/s 时,挤压应力上升了近 1 倍。图 5 (b)中底孔直径为 21.30mm 时也满足同样的规律。

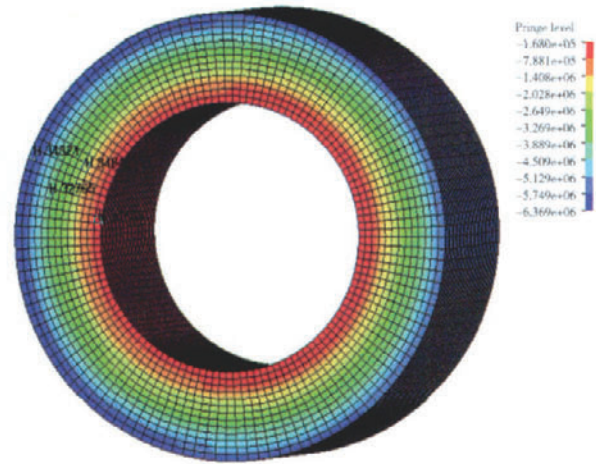


图 3 等效应力分布云图

Fig.3 Distribution nephograph of equivalent stress

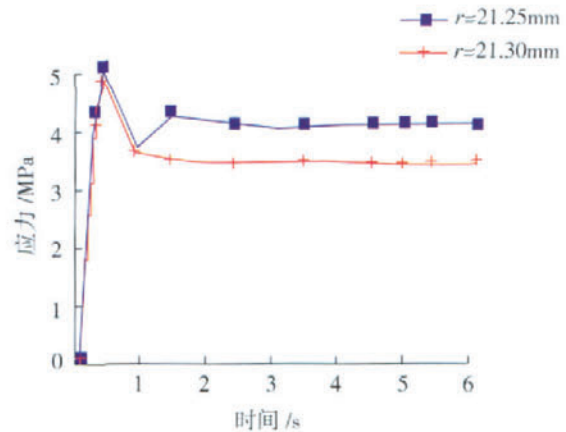


图 4 底孔直径对应力的影响

Fig.4 Influence of diameter on stress

所以在挤压成形过程中,工件挤压速度的选择也是保证挤压顺利进行的关键因素。

从挤压过程的应变云图中可以看出金属的塑性流动规律,图 6 和图 7 分别是 X 向和 Y 向的应变分布。挤压时工件在扭矩的作用下,外表面产生压应变,内表面产生拉应变,应变自内向外逐渐增大,最外层达到最大值,与实际情况相符合。

4 结论

(1) 本课题利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对内螺纹的冷挤压过程进行了仿真研究,表明有限元软件在内螺纹冷挤压应用上的可行性,直观地模拟出冷挤压过程中挤压件的应力、应变分布。在此基础上,通过改变

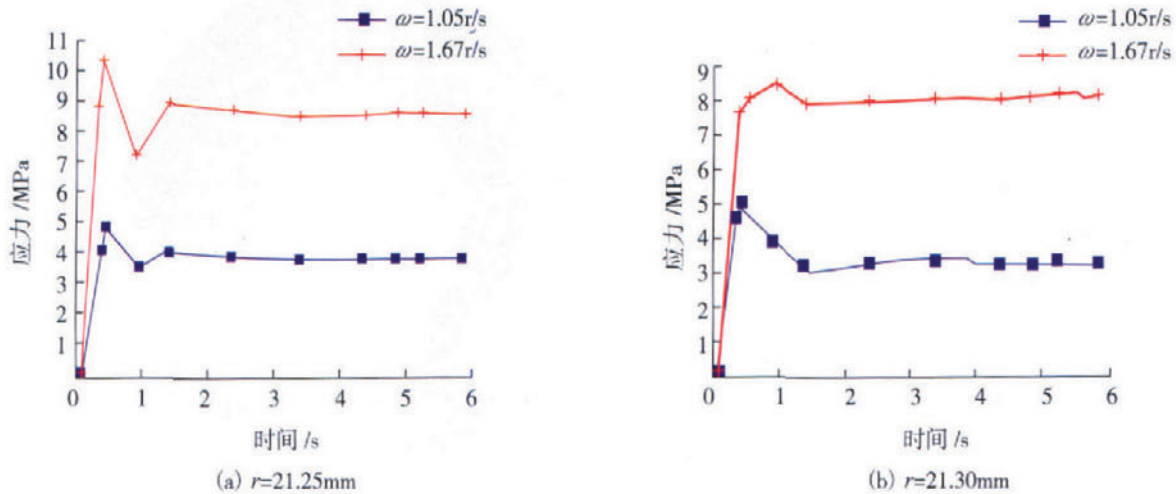


图5 挤压速度对应力的影响
Fig5 Influence of extrusion speed on stress

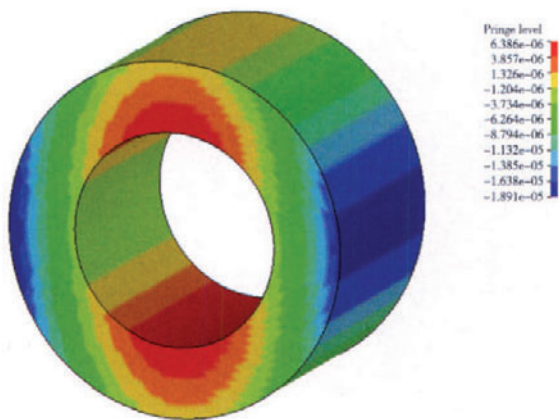


图6 X向应变分布云图
Fig.6 Distribution nephograph of strain in X-direction

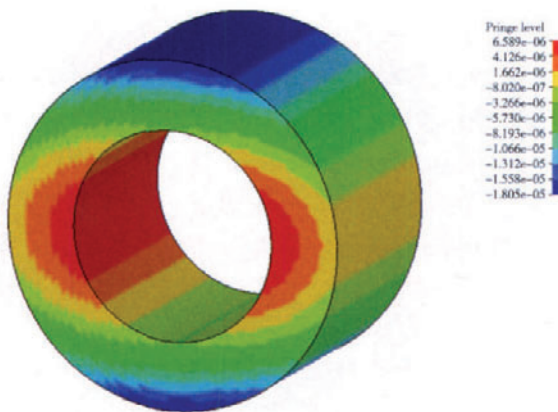


图7 Y向应变分布云图
Fig.7 Distribution nephograph of strain in Y-direction

材料的特性、挤压的速度、挤压工件的底孔直径进行模拟仿真,分别获得挤压成形过程中它们对应应力场、应变场的影响规律。

(2) 考察冷挤压成形过程中的应力、应变,可以获得挤压所需要的扭矩,而挤压扭矩是反映内螺纹冷挤压成形难易程度的综合直观指标。因此通过模拟各种因素(如挤压件底孔直径、挤压速度等)对挤压扭矩的影响,可以获得高强度钢内螺纹冷挤压成形的工艺参数,对试验的开展有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 王珉. 抗疲劳制造原理与技术. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- [2] 何涛, 杨竞, 金鑫, 等. ANSYS 10.0/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 徐九华. 高强度钢内螺纹冷挤压成形机理与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1992.
- [4] McMeeking R M. Finite element formulation for problems of large elastic plastic deformation. Int. J. Solids Struct, 1975, 11(20):601-606.
- [5] Lee E H, Kobayashi S. New solution to rigid-plastic deformation problems using a method. Trans. ASME, J. Engng Ind, 1973(95):865-869.
- [6] 尚小江, 苏建宇, 王化锋, 等. ANSYS LS-DYNA 动力分析方法与工程实例. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [7] Bulent Ekmekci. Residual stresses and white layer in electric discharge machining. Applied Surface Science, 2007(5): 9234 - 9240.

(责编 小颖)