

钛合金六角头螺栓头部成形过程的有限元分析

Finite Element Analysis on Head Forming Process of Ti-6Al-4V Hexagon Bolt

北京航空制造工程研究所 赵庆云 于雷 刘风雷 刘华东

[摘要] 航空用螺栓的头部多样、形状复杂,通常情况下利用锻工艺成形。研究采用塑性成形仿真软件,针对 Ti-6Al-4V 六角头螺栓的头部成形过程进行了有限元模拟,对成形各阶段的应力、应变、温度变化以及材料流动情况进行了分析,同时对成形过程中的缺陷进行了预测,为工艺设计和改进提供了依据。

关键词: 有限元模拟 Ti-6Al-4V 六角头螺栓 锻

[ABSTRACT] Bolt head used in aviation industry is various and very complex, and usually formed by forging. By using a simulation software, the head forming process of Ti-6Al-4V hexagon bolt is simulated, and the stress field, strain field, temperature field and material flow are analyzed. Meanwhile the possible faults like folding and crack are predicted, which can offer theory basis for the design and improvement of the process.

Keywords: Finite element method Ti-6Al-4V Hexagon bolt Forging

航空用钛合金螺栓的头部大都采用锻成形,即在可锻温度下利用专用模具使坯料发生塑性变形并充填模具型腔来实现头部的成形,其成形原理如图 1 所示。之所以采用模具锻的方法进行螺栓的头部成形,除了提高成形效率外,还可以使金属材料的晶粒流线不被破坏,提高螺栓的强度,尤其是动强度。因此,对于锻成形工序的研究显得尤为重要。

本课题采用有限元软件对钛合金六角头螺栓锻成形过程进行仿真,对头部成形过程特点以及各因素的影响进行研究,掌握变形过程中各种场量的变化情况,并对成形过程中工件的充模情况、可能出现的裂纹、折叠等缺陷进行预测,从而为工艺设计和改进提供重要的指导^[1-2]。

1 有限元模型与工艺参数的设定

六角头螺栓的头部成形是一种体积成形问题,弹性变形远远小于其塑性变形,因此可以将材料视为刚塑性材料。研究采用刚塑性有限元法对六角头螺栓的头部

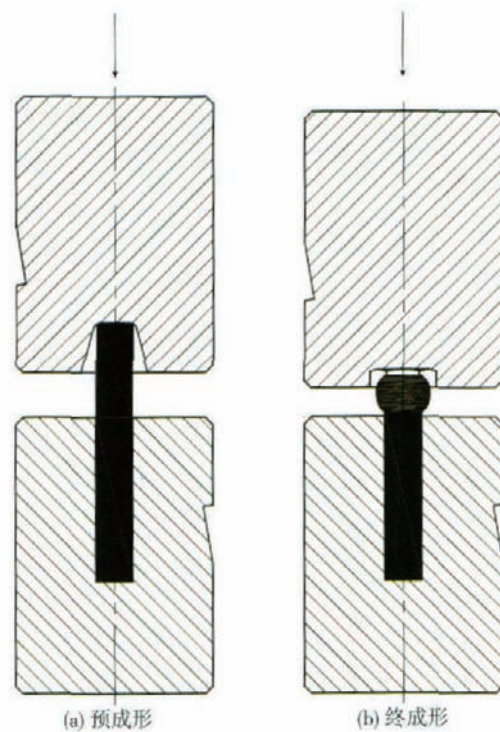


图1 六角头螺栓头部成形原理图
Fig.1 Hexagon bolt head forming principle

成形过程进行模拟。

1.1 本构方程及屈服准则

采用 Levy-Mises 应力应变关系方程

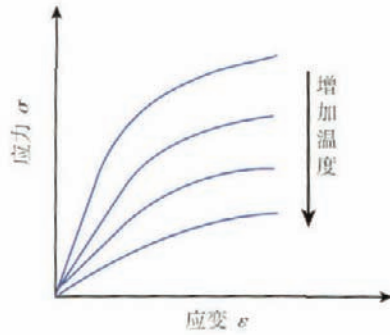
$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\lambda} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (1)$$

式中, λ 为状态变量和材料的参数。

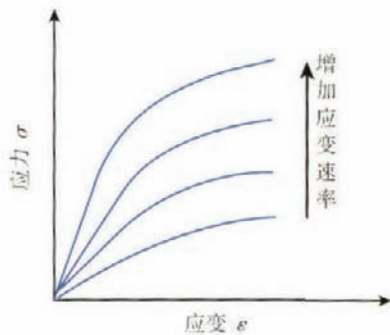
材料在变形过程的流动应力与累积应变、瞬时应变速率和当时的温度有关。图 2 显示了应力应变曲线与温度及应变速率的关系,在其他系数相同的情况下,增加工件温度,所需变形的应力减小;同样,在其他系数相同的情况下,增加变形率,所需变形的应力也增加^[3]。

1.2 热-力耦合

由于坯料是在可锻温度下进行的塑性变形,因此其成形过程的模拟必须考虑热-力耦合问题。螺栓头部锻过程是一个有内热源的瞬态热传导问题,采用下面的微分方程进行描述:



(a) 不同温度下的应力-应变曲线



(b) 不同应变速率下的应力-应变曲线

图2 应力-应变曲线与温度、应变速率的关系

Fig.2 Relationship between stress-strain curve and temperature, strain rate

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k \frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k \frac{\partial T}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [k \frac{\partial T}{\partial z}] + Q, \quad (2)$$

式中, ρ 为密度; T 为温度; k 为导热系数; Q 为塑性功生成热引起的内热源, 表示为 $Q=0.9\bar{\sigma}\dot{\varepsilon}$ ($\bar{\sigma}$ 为等效应力, $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变速率)。

采用加权余量法可将式(2)转化为

$$\int k T_i \delta T dV + \int \rho c \dot{T} \delta T dV - \int \alpha \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} \delta T dV = \int q_n \delta T dS, \quad (3)$$

式中, q_n 为边界热流密度, 包括工件自由边界与空气间的对流和辐射、工件与模具间的热传导以及接触边界上的摩擦生热的影响^[4]。

结构离散后, 式(3)可转化为一个关于节点温度的微分方程组, 解该方程组可得工件内的温度场。实际分析中, 在每一增量步中分别计算温度和变形, 通过二者之间的联系将它们的相互影响考虑进去, 以便达到热变形过程的耦合^[5]。

1.3 有限元离散及工况设定

由于工件与模具都是轴对称图形, 因此, 为了节省计算时间, 采用 1/4 对称体来模拟。螺栓零件材料为典型 Ti-6Al-4V 钛合金。考虑到模具在成形过程中变形

很小, 因此上、下模具均设为刚体, 上模为主动模具。坯料与模具之间的摩擦采用剪切摩擦模型, 摩擦因子取 0.3。采用四面体实体单元, 坯料单元数为 6 172 个, 节点数 1 527 个; 上模单元数 5 768 个, 节点数 1 421 个; 下模单元数为 5 884 个, 节点数 1 430 个。坯料与模具的有限元模型如图 3 所示。

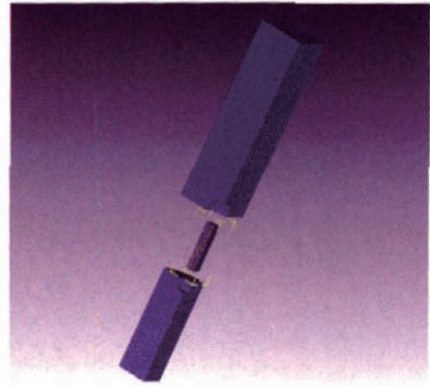


图3 有限元计算模型

Fig.3 FEM of head forming process

按照实际零件的成形过程, 整个模拟过程分 4 步进行:

- (1) 第 1 步: 工件加热出炉后到放入模具前的间隔时间内, 工件与外界环境间的热传导过程。
- (2) 第 2 步: 锻前, 工件在下模具上有短暂的停留, 在这个时间内, 工件与下模间发生的热传导过程。
- (3) 第 3 步: 第一锻过程, 即初冲, 预成形过程。
- (4) 第 4 步: 第二锻过程, 即二冲, 终成形过程。

2 模拟结果与分析

2.1 变形过程分析

- (1) 工件与环境之间的热传导过程。

坯料加热后, 工件与环境间有热传导, 一般工件再加热炉中加热到 850℃, 然后取出放于模具中, 环境温度取 20℃。图 4 为第一模拟过程最后一步的模拟结果, 可见坯料温度从芯部到外表面逐渐降低。

- (2) 工件与下模热传递过程。

将坯料放入下模, 工件与下模间的传热系数设为 1。图 5 为此过程最后一步的模拟结果, 下模吸收工件热量后, 温度上升, 而工件与下模接触区域温度进一步降低。

- (3) 第一锻过程——预成形。

此模拟过程主模具为上模, 考虑润滑, 取上模与工件间的传热系数为 11。图 6 为预成形各阶段工件的变形情况。如图 7 (a) 所示, 在工件上选取 P1 ~ P7 共 7 个点, 图 7 (b) 显示了预成形各阶段工件的温度分布情况。由图可见距上模较近 P1、P2 两点和距下模较近的

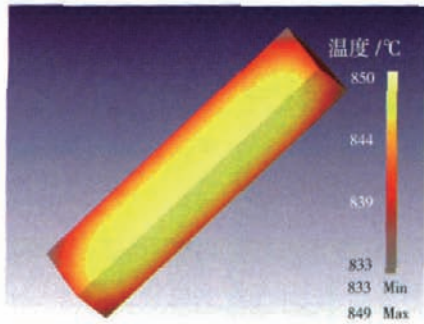
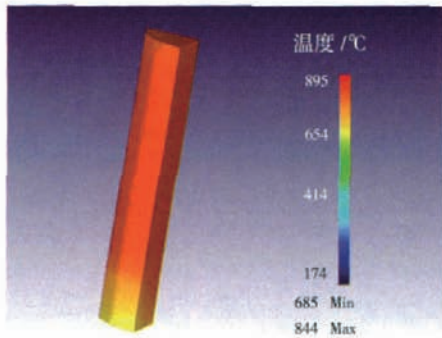
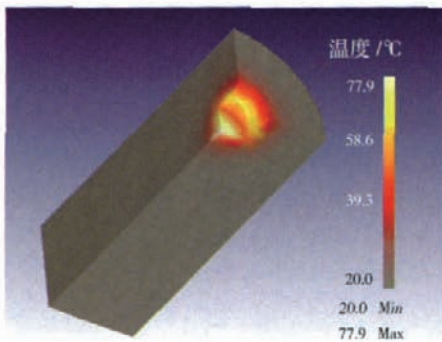


图4 第一步结束时工件的温度分布

Fig.4 Temperature distribution of workpiece after the first step



(a) 工件



(b) 下模

图5 第二步模拟结束时工件和下模的温度分布

Fig.5 Temperature distribution of workpiece and down die after the second step

P3、P4 两点的温度随着变形的进行,呈急剧下降趋势;且距离上下模较近的 P1 和 P7 点的变形曲线相同,次近的 P2 和 P6 点的变形曲线相同,且 P1 和 P7 的温度下降更快。而位于头部中心的 P3、P4、P5 点的温度变化曲线相同,随着变形的进行,温度升高。这是由于部分塑性变形功转换为热量,造成变形量大的中心部位温度升高,而靠近上下模的部分由于与模具间传热,且变形量小,因此温度呈下降趋势,越是与模具较近的部位,模具吸收的热量越大,温度下降越明显。

图 8 显示了坯料的流动方向,与实际成形过程中工

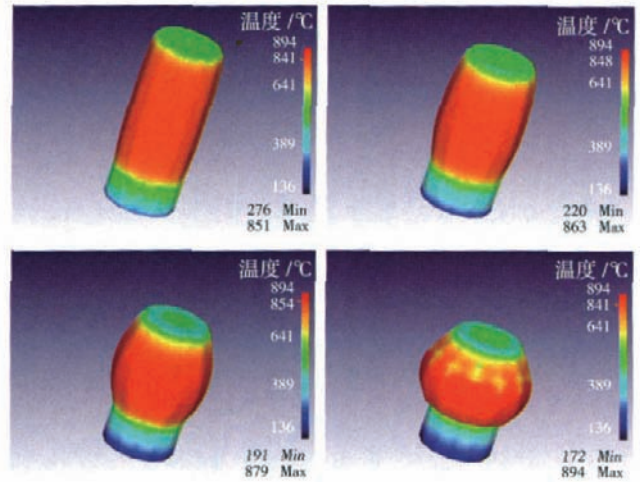
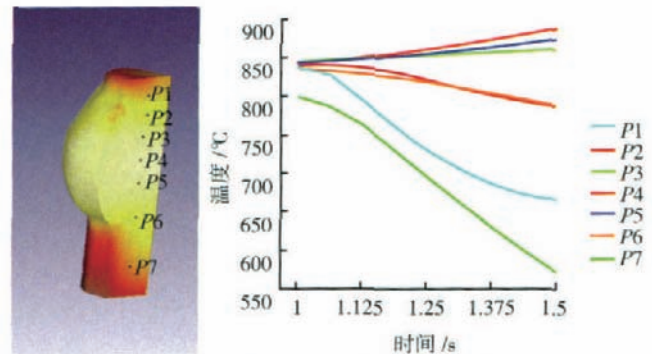


图6 预成形各阶段工件的变形

Fig.6 Deforming of billet during pre-forming



(a) 选取的工件上的不同点

(b) 温度分布

图7 预成形各阶段工件上的温度分布

Fig.7 Temperature distribution of workpiece during pre-forming

件在上模的压力下向模具型腔的填充方向是一致的。图 9 为上模所受的锻锻载荷随加载步的变化曲线图,可见初始为自由锻粗变形,变形过程平稳,材料的流动阻力相对较小,载荷保持平稳上升,后期材料受到模具型腔的约束,变形抗力加大,且与接触面的摩擦力也加大,因此模具所受载荷也迅速加大。



图8 预成形时工件材料流动方向

Fig.8 Material flow direction of billet during pre-forming

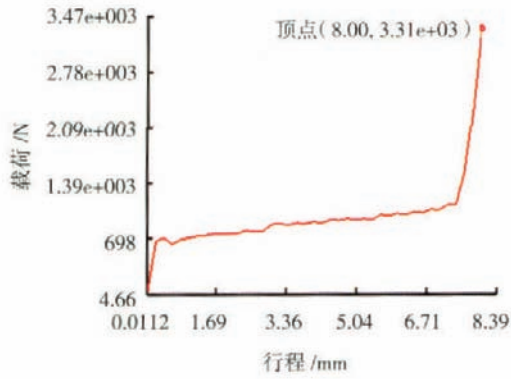


图9 预成形上模载荷曲线
Fig.9 Load curve of top die during pre-forming

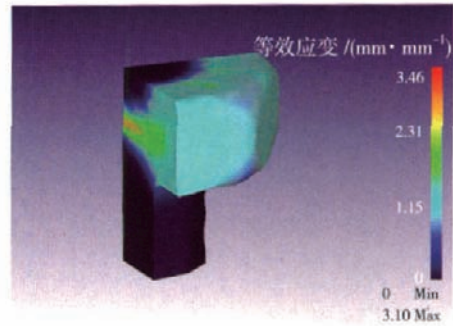


图11 终成形终了时的等效应变分布
Fig.11 Equivalent strain distribution of workpiece after final forming

(4) 第二锻造过程——终成形。

预成形后紧接着进行终锻成形,图 10 为终成形各阶段的变形和温度分布情况。从图 11 的等效应变分布来看,等效应变最大值区域位于头部中心,分析材料流动情况可知,处于中心的这部分材料受轴向压应力和径向拉应力的作用,变形量最大。

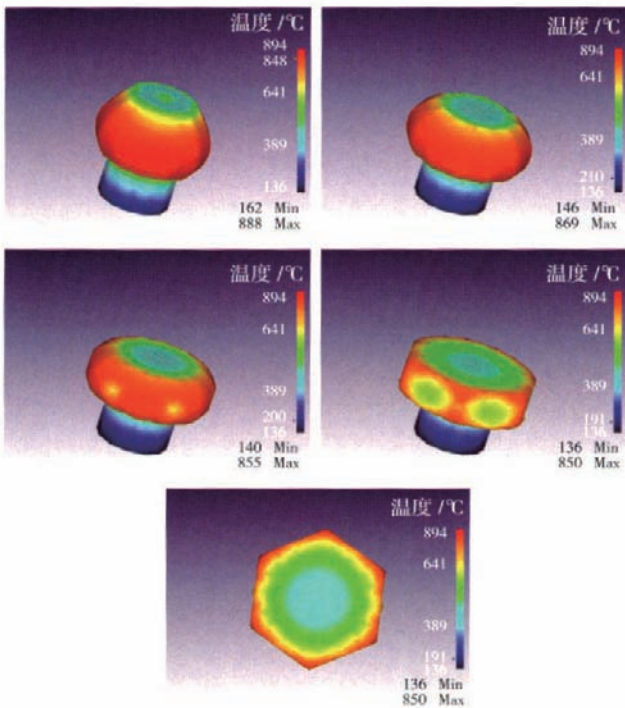


图10 终成形各阶段工件的变形和温度分布
Fig.10 Temperature distribution and deformation during final forming

如图 12 (a)所示在工件上选取 P1 ~ P8 共 8 个点,图 12 (b)显示了终成形各阶段工件的温度分布情况。由图可见随着变形的进行,温度整体趋于平稳,呈缓慢下降趋势。位于头部中心的 P3、P4、P5 点相对于其他

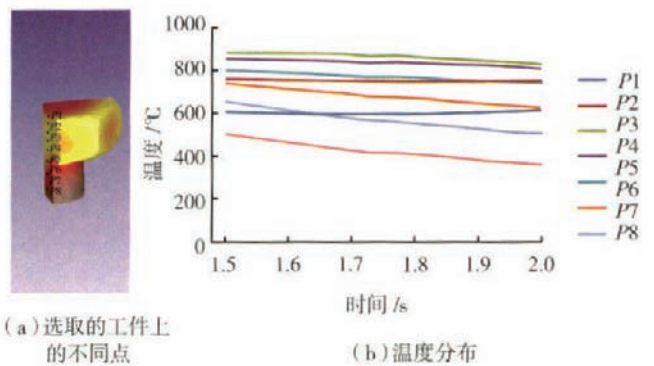


图12 终成形各阶段工件上的温度分布
Fig.12 Temperature distribution of workpiece during final forming

几点温度较高,这是由于头部中心相对其他点的变形量大,塑性变形功转化为了热量。处于杆部受到下模约束的 P7、P8 两点温度最低,这是因为这 2 点没有变形,与下模发生了大量的热传导。

如图 13 为预成形和终成形各阶段的等效应变分布,从图可以看出 P3、P4 点的等效应变最大, P6、P7、P8 点的等效应变值保持为零, P5、P1、P2、P4 点的等效应变逐级增加。

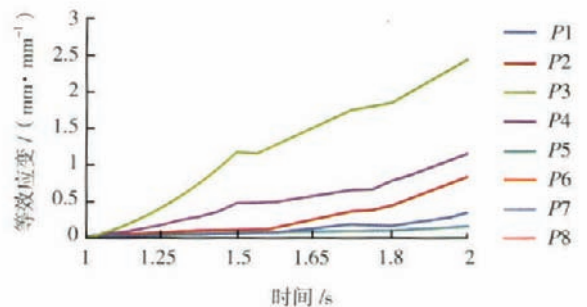


图13 工件变形阶段的等效应变分布 (对应图12 (a) 各点)
Fig.13 Equivalent strain distribution of workpiece during deformation

2.2 成形缺陷预测与分析

2.2.1 飞边

由于六角形头部采用模具型腔成形,所以需要精确计算六角头的用料,如果下料过长,则会产生飞边,如图14所示。

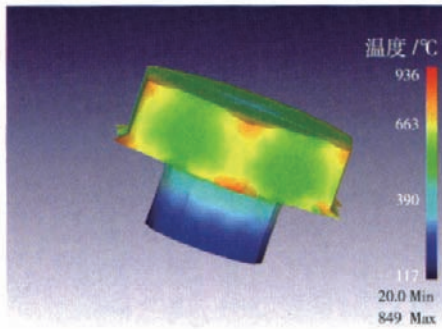


图14 坯料尺寸不合理引起的飞边

Fig.14 Flash induced by unreasonable billet size

2.2.2 螺栓头部过高

同样,需要精确计算模具行程,如图15所示,坯料长度与图12相同,如果模具不到位,上下模留有间隙,则镦出的六角头会填不满型腔,最终成形的六角头螺栓的头部会高于设计要求。

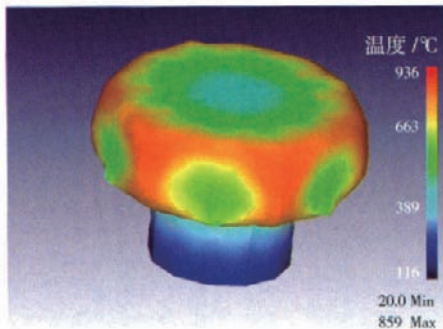


图15 模具行程不合理导致的螺栓头部过高

Fig.15 Higher bolt head induced by unreasonable die routing

2.2.3 折叠

在其他参数相同的情况下,预成形模具的形状尺寸不同,后续的终成形将产生不同的结果。如图16(a)的预成形会在终成形(见图16(b))时在六角头顶部2个区域产生折叠,这是由于模具下行之初,材料被挤出并向径向翘曲,而后期镦粗过程中被压下造成的。而图16(c)的预成形,在终成形时(见图16(d))六角头顶部则没有折叠,说明可以通过改进预成形模具的形状尺寸来防止折叠的产生。在实际生产中,冲针和模具不匹配也可能使成形件产生折叠,在加工中需引起注意。

2.2.4 裂纹

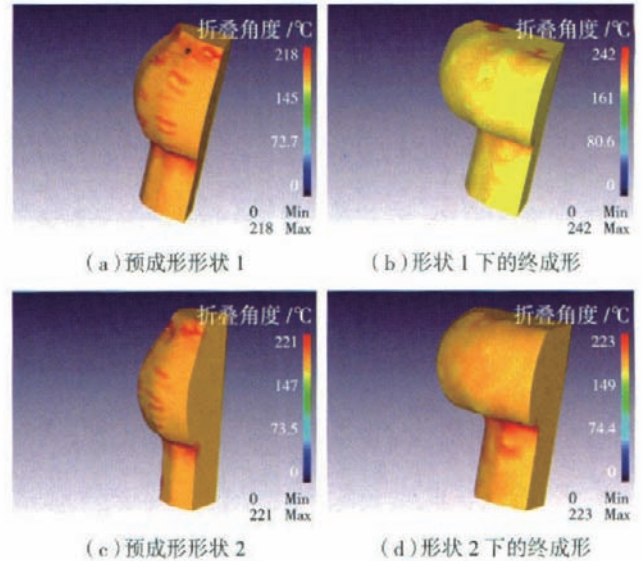
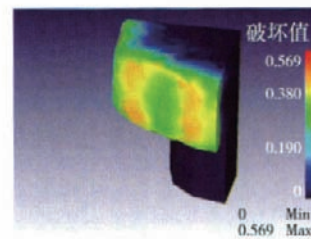


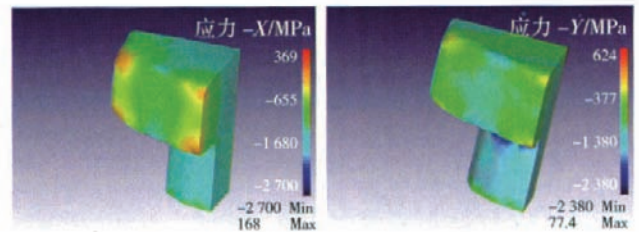
图16 不同预成形形状尺寸对终成形的影响

Fig.16 Effect of different pre-forming die sizes on final forming

有限元软件中对于裂纹的预测采用破坏值来表征,其值越大发生开裂的可能性越大。如图17(a)所示,破坏值最大的区域始终位于六角头的侧面,是裂纹易于产生部位。这是由于上模向下运动,促使坯料向模具贴合,在贴模过程中Z方向始终受到较大的拉应力作用,YZ平面内受到摩擦力的作用,在二力的综合作用下,易于产生裂纹。实际生产过程中,可以通过涂覆润滑剂来减少摩擦以避免裂纹的产生。另外,需控制成形温度,温度过低也会导致裂纹产生。



(a) 破坏分布预测



(b) 应力分布

图17 裂纹分布预测

Fig.17 Prediction of crack distribution

(下转第87页)

证和补充型号合格证持有人进行燃油系统的安全评估,安全评估的目的是确定可能导致燃油系统点火源事故的设计特征。如果该设计不满足上述条款的要求,就要进行相应的设计更改。

2.1 系统安全评估

系统安全评估的分析过程如下:

(1)首先对所研究的机型进行燃油系统描述,介绍所研究飞机的燃油系统组成以及各组成部分和各个部件的功用。

(2)对所研究的飞机燃油系统进行FHA(功能风险分析),找出能导致灾难性或危险性后果的故障模式,作为FTA(故障树分析)的顶事件。

(3)根据FHA分析出来的顶事件建造故障树。运用FTA、FMEA(故障模式及其影响分析)对飞机燃油系统进行详细的安全评估。

(4)根据上述的四元素法找出符合准则中所述的单点故障和故障组合,判断它们是否会导致危险性或灾难性点火源的发生,从而确定是否为燃油ALI的候选项目。

2.2 维修间隔的计算

确定燃油ALI的候选项目后,对这些项目进行FT(故障树)定量计算,给出每个故障的爆发间隔,以便在规定的时间内进行检查来防止故障的发生。

在此按照AC25-19给出系统对各个部件的安全要求,不同危险程度对应不同的故障概率。根据AC25-19安全要求列表中的要求,可以按照故障的危险等级,给出部件要求的故障率,再除以部件实际发生的故障率就可以得到故障的爆发时间,也就是维修检查的间隔时间。

根据已进行的FMEA对故障危险等级的分析,结合AC25-19系统安全要求中对故障概率的分析,我们可以定义出故障树顶事件的故障概率要求。可靠度分配方法有很多种,例如平均分配法、权值分配法等,这项工作一般在产品设计时进行。在这里为了说明系统是如何分配可靠度的,利用AGREE分配法对各部分进行可靠度分配。具体分配方法为:

$$P_i = \frac{1}{W_i} [1 - (1 - P)^{n_i/N}] ,$$

$$R_{e,i} = 1 - W_i P_i .$$

其中, P_i 为第*i*个分系统的失效概率; P 为系统总的失效概率; n_i 为第*i*个分系统所包含的元器件数量; N 为系统总的元器件数量; W_i 为重要度因子, $0 < W_i \leq 1$; n_i/N 为第*i*个分系统的复杂性因子。

通过分配的可靠性要求,计算各个故障的维修间隔,从而确定了候选燃油ALI的维修间隔。

2.3 确定燃油ALI

完成燃油ALI候选项目后,提交给CMCC(审定维修协调委员会)来进行进一步的评审和讨论,根据评审意见形成正式的燃油ALI,并送至适航当局进行审批。燃油ALI最终以MRB报告附录的形式公布。

3 结束语

本文简要叙述了燃油ALI的内容和要求,并给出了制定燃油系统ALI的流程。鉴于我国目前正在开展大型运输类飞机的研制工作,笔者希望本文能对我国大型运输类飞机的适航审定工作有所帮助。

参考文献

- [1] FAA. Policy statement on process for developing SFAR 88-related instructions for maintenance and inspection of fuel tank systems. U.S. Department of Transportation, 2004: 5.21.
- [2] FAA. AC 25.981-2 Fuel tank flammability minimization. U.S. Department of Transportation, 2001: 04.18.
- [3] FAA. AC 25.1309-1A system design and analysis. U.S. Department of Transportation, 1988: 6.21.

(责编 小颖)

(上接第68页)

3 结束语

(1)通过采用有限元软件对钛合金六角头螺栓的头部成形过程进行模拟,得到成形过程中的工件温度变化、材料流动情况、应力应变分布变化情况、模具受力情况,具体了解了六角头螺栓的头部变形行为。

(2)对成形过程中可能出现的缺陷——折叠和裂纹进行了预测,通过改进预成形模具的形状尺寸,可以防止折叠的产生。

(3)六角头螺栓头部采用模具成形时,需要根据螺栓长度和头部尺寸精确下料,并精确计算模具行程,这种成形工艺对加工设备提出了较高的精度要求。

参考文献

- [1] 周勇,傅蔡安.基于DEFORM-3D的微型螺钉冷成形过程有限元分析.机械设计与制造,2008(3):109-111.
- [2] 孙曙宇,傅健,谢彬.锻造成形有限元数值模拟技术.现代制造工程,2008(5):49-51.
- [3] User's Manual, DEFORM 3D.
- [4] 吕成,张立文.TC4钛合金锻造过程三维热力耦合有限元模拟.锻压技术,2007(2):28-31.
- [5] 何涛,王宝雨,胡正寰.Inconel718合金楔形轧成形热力耦合模拟.塑性工程学报,2008(7):157-159.

(责编 小颖)