

航空螺栓冷镦的 Deform 3D 模拟与生产实践

刘帮平, 谌曲平, 严国荣, 袁凯

(中国南方航空工业集团有限公司, 湖南 株洲 412002)

摘要: 通过对用于某型发动机的螺栓冷镦成形过程的分析与研究, 采取改善冷镦前材料的状态, 并利用有限元软件 Deform 3D 模拟螺栓成形过程, 优化模具设计, 提高了产品质量和合格率。

关键词: 冷镦; 紧固件; 球化退火; 数值模拟; 多工位冷镦成形机

中图分类号: TG316.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2012)03-0022-05

Simulation Using Deform 3D and Production Practice on Cold Heading Process of Aviation Bolts

LIU Bang-ping, CHEN Qu-ping, YAN Guo-rong, YUAN Kai

(China National South Aviation Corporation Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Through analyzing and researching the cold heading process of bolts for a engine, some measures of heat treatment were given, meanwhile using Deform 3D to simulate the cold heading process of bolts, optimization measures were also taken to the cold heading mold. Thus the problems in the production process were effectively solved, with higher product quality and qualified rate.

Key words: cold heading; fastener; spheroidizing annealing; numerical simulation; multi-stage cold header

冷镦工艺是一种金属压力加工工艺。它是利用金属在外力作用下所产生的塑性变形, 并借助于模具, 使金属体积作重新分布及转移, 形成所需要的零件或毛坯的加工方法。基本工艺过程为: 盘料/棒料→切断→成形(镦锻、缩径复合过程)→冲切(→搓丝)等。某螺栓加工过程如图 1 所示。螺钉、螺栓、螺母等紧固件产品的生产 80% 以上采用冷镦工艺^[1]。作为紧固件加工的首选工艺, 它具有生产率高, 材料利用率高, 表面质量和内在综合性能好、金属流线连贯合理等优点。这样提高了产品强度, 特别是产品力学性能优良, 对于机加工零件, 一般提高

10% 左右, 有的甚至提高 20%^[1]。



图 1 某螺栓冷镦加工过程

Fig.1 Cold heading process of a bolt

收稿日期: 2011-12-05

作者简介: 刘帮平(1982—), 男, 湖北咸宁人, 工程师, 主要研究方向为塑性成形和计算机辅助设计。

1 提出问题

某六角头螺栓冷锻的合格率一直很低,只有 20%~30%,冷锻弯曲、折叠、裂纹、错位、缺肉等现象经常发生,且比例相当高。

2 分析问题

零件原材料为调质高强度钢 40CrNiMoA,规格为 $\phi 9.5$ mm,标准为 GJB 1951—94,硬度为 170~269HB(实测硬度值为 230~260HB)。冷顶锻试验合格,尺寸精度符合 GB 905—82 的 10 级标准,冷锻后的毛坯形状基本尺寸要求如图 2 所示。先试锻了 18 件,只有 2 个螺栓合格,发现问题主要是在粗锻时坯料纵向弯曲或有小台阶,精锻后头部出现折叠和裂纹,缺陷如图 3—图 5 所示。

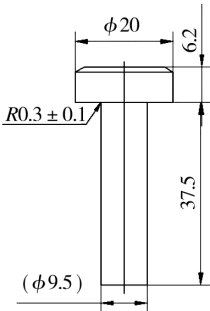


图 2 冷锻零件
Fig. 2 The cold heading part



图 3 粗锻台阶/纵向弯曲
Fig. 3 Step/bend flaw in the first upsetting

锻锻比 S 是指锻锻材料锻锻部分的长度与材料直径的比值,用于确定锻锻过程中技术上的难易



图 4 精锻后的折叠
Fig. 4 Fold in the last upsetting

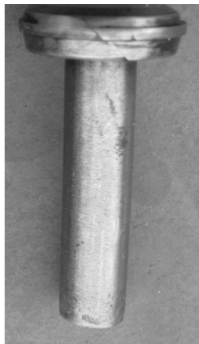


图 5 精锻后的折叠/裂纹
Fig. 5 Fold/crack in the last upsetting

程度。锻锻比愈小加工愈容易,锻锻比较大时,在制定工艺时就应该适当增加锻锻次数。一般锻锻比 S 与锻锻次数的关系见表 1。当冷锻变形程度 ϵ (锻锻

表 1 锻锻比与锻锻次数的关系

Table 1 The relation table of upset ratio and upset times			
S	≤ 2.25	$2.25 \sim 4.5$	$4.5 \sim 6$
锻锻次数	1	2	3

部分长度压缩量与锻锻部分长度的比值)超过金属材料本身许可变形程度时,工件就会出现裂纹。通过计算,此零件的锻锻比 $S=3$,冷锻变形程度 $\epsilon \approx 78.2\%$ 。一般材料长径比达到 3 时,锻粗就容易产生双鼓形,大于 3 后,就容易产生类似于压杆失稳的纵向弯曲。加之坯料切断面不可能完全平整,这样粗锻时坯料就受到一个垂直于轴线的分量力的干扰,加剧了纵向弯曲趋势^[2]。螺栓头部产生裂纹/折叠,是由于粗锻时的弯曲,再加上变形量过大(大大超过了冷顶锻检测中 50%压缩量下无缺陷的要求),坯料局部接近或超过材料许用变形程度而导致的。在

现有设备条件下,为了验证分析的正确性,采取了2个措施:有限元模拟螺栓粗、精镦过程,分析材料变形情况,优化模具设计;进行球化退火,使材料组织均匀细小,降低硬度,提高材料塑性变形能力。

3 解决问题

3.1 球化退火

当材料化学成分一定时,金相组织就是决定塑性优劣的关键性因素,一般粗大片状珠光体不利于冷镦成形,而细小的球状珠光体可显著地提高钢材塑性变形的能力^[1]。

《中国航空材料手册》中提到40CrNiMoA冷变形塑性较差,手册中只有退火参数,没有球化退火数据,而此材料供应状态就是冷拉退火状态。如何通过热处理制度使材料组织均匀化、硬度降低、塑性提高就成了关键。通过反复试验,摸索出一种采用9道温度段,循环加热冷却的热处理制度。同时采用真空炉,随炉冷到一定温度后充氩冷却,防止材料氧化。试验结果表明,材料组织均匀化且是细小的球状珠光体,硬度降至160~190HB,材料没有氧化层。

3.2 有限元模拟

在模具设计阶段,有限元数值模拟可以分析材料的流动规律,预测是否产生缺陷,从而检验模具形状与尺寸设计的合理性,优化模具设计和其它工艺参数。

首先依据工艺要求的实际尺寸,在Pro/E 3.0中对坯料、粗镦模、精镦模、冷镦阴模造型,保存为.stl格式(由于只分析材料成形,故模具外观形状可简化,坯料是指经切断模切断后的部分);然后导入Deform 3D中,在模拟过程中,为了减少计算量,假设模具为刚体,在冷镦过程中不发生变形。坯料为40CrNiMoA(相当于软件材料库中的美国牌号4340),并参照《中国航空材料手册》完善相关材料数据^[3],采用刚塑性材料本构关系。设置各变形模拟参数,依零件冷镦成形过程先后进行粗镦和精镦模拟,模拟结果与零件实际冷镦过程的结果对比如图6—图9所示。

从以上对比可以确定:正是由于粗镦模型腔角



图6 模拟粗镦结果

Fig. 6 The result of simulation in the first upsetting



图7 实际粗镦结果

Fig. 7 The result of production in the first upsetting



图8 模拟精镦结果

Fig. 8 The result of simulation in the last upsetting

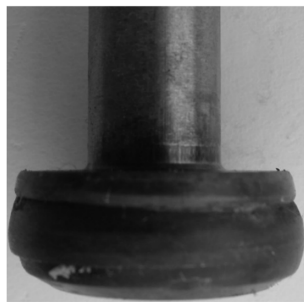


图9 实际精镦结果

Fig. 9 The result of production in the last upsetting

度太小导致粗镦后产生台阶,进而在精镦时,材料无法合理有效流动而使零件整圈折叠。为了消除这个缺陷,就必须采取加大锥角的措施。粗镦模原设计上型腔角度为 $7^{\circ}52'$,现设置 10° , 12° , 14° 和 16° 等 4 种情况进行模拟对比,结果如图 10 所示。

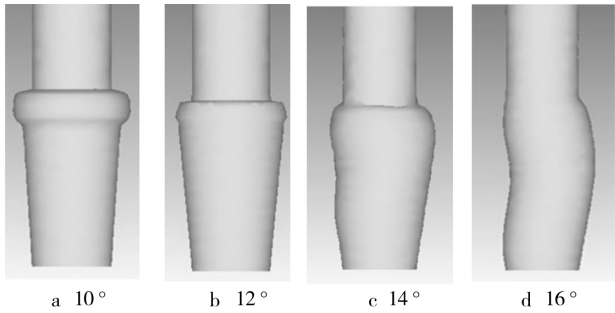


图 10 4 种型腔锥角时的粗镦模拟结果

Fig. 10 The results of simulation in the first upsetting using four cavity cone angles

从图 10 可知,随着角度的增大,变形台阶逐渐减弱直至消除,但角度的增大,会导致型腔对坯料的定位导向作用减弱,坯料纵向弯曲的趋势越来越强。当粗镦后坯料产生台阶时,精镦模拟结果如图 8 所示;发生弯曲时,精镦模拟结果如图 11 所示。精镦过程中,图 11 中箭头标记部位会随着阴、阳模合模产生折叠,弯曲程度越大,缺陷越明显,甚至当弯曲太大时还可能产生裂纹。这与零件精镦后的折叠缺陷(如图 12 所示)相吻合。

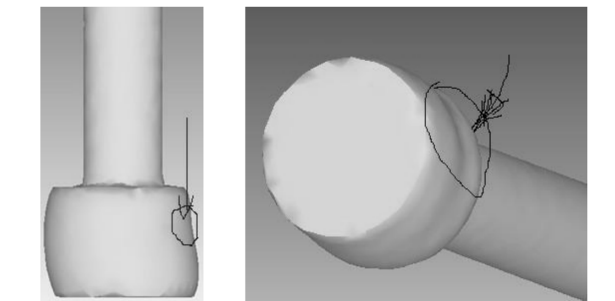


图 11 精镦成形

Fig. 11 The result in the last upsetting

为了粗镦尽可能有较大的变形量并消除台阶,又同时避免金属纤维纵向弯曲,于是选择 13° 再次模拟。粗镦结果如图 13 所示,台阶消除,也没有明显的弯曲现象。精镦结果如图 14 所示,变形均匀,型腔填充饱满,因而,最终确定粗镦模型腔角度为 $13^{\circ}\pm 10'$ 。



图 12 精镦折叠

Fig. 12 Fold in the last upsetting



图 13 13° 粗镦模拟结果

Fig. 13 The result of simulation in the first upsetting with the cone angle of 13°

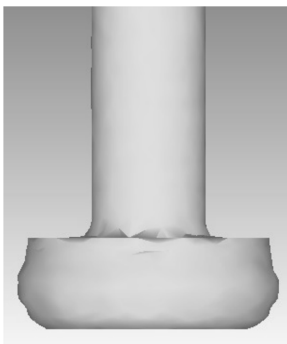


图 14 13° 精镦模拟结果

Fig. 14 The result of simulation in the last upsetting with the cone angle of 13°

4 生产验证

先用 6 根长 1~1.2 m 的 40CrNiMoA 棒料作试验先锋批,球化退火后硬度降到了 180HB。粗镦模型腔锥角为 $13^{\circ}\pm 10'$,其余尺寸根据设备及零件体积情况作了适当调整,而精镦模及阴模只是拔模

斜角等稍稍加大。试验粗、精镦结果如图 15—图 17 所示。粗镦后台阶消失,但有点弯曲(由于弯曲较小,精镦时坯料在变形过程中能扩展开,从而弥补了此缺陷),这应该是坯料切断面不平造成的。检查切断后的坯料,发现端面不平整,类似于图 18 所示工件的表面。通过调整切断模和剪刀模之间的间隙及其相互位置,切端面质量有所改善(如图 19 所示)。试冷镦近 100 件,经检验,零件尺寸,表面质量均符合工艺要求。



图 15 粗镦

Fig. 15 The result of the first upsetting

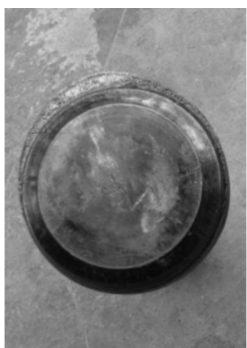


图 16 精镦(顶面)

Fig. 16 The result of the last upsetting (top face)

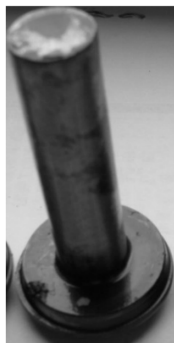


图 17 精镦结果(侧面)

Fig. 17 The result of the last upsetting(profile)



图 18 调整前的切断面

Fig. 18 The section before adjustment

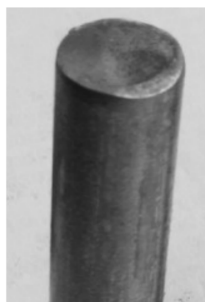
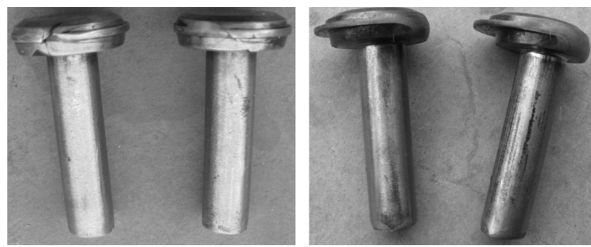


图 19 调整后的切断面

Fig. 19 The section after adjustment

后续 2 批此零件均按上述方法:先将材料球化退火,然后采用修理过的新模具冷镦,冷镦合格率提高至 100%,并且发现即使模具错位 0.8~1.0 mm 时,零件也没有出现球化退火前的缺陷,如图 20 所示。



a 退火前

b 退火后

图 20 退火前后的对比

Fig. 20 Contrast figure before and after annealing

在材料为 40CrNiMoA 的零件冷镦成功的启示下,又对用于另一型号发动机的材料为 GH2132 的 4 个零件粗、精镦成形过程进行有限元模拟,修正了模具设计的一些小缺陷,解决成形问题。通过对一批 GH2132 材料进行退火降低硬度,改善组织和提高塑性,使这 4 个零件冷镦合格率从原来的 50%~70% 提高到 100%。

(下转第 46 页)

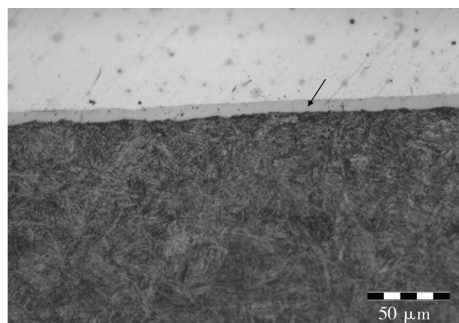


图5 电阻热丝加热

Fig. 5 The resistance hot wire heating

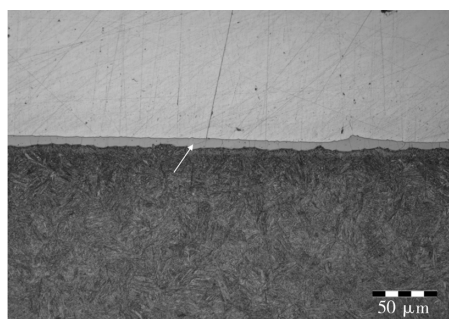


图6 电弧热丝加热

Fig. 6 Arc hot wire heating

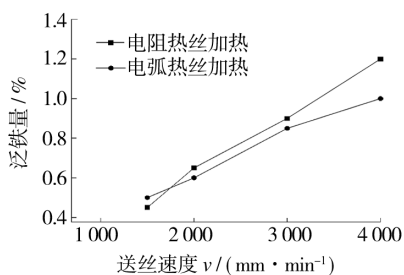


图7 送丝速度与泛铁量的对比

Fig. 7 Contrast between wire feeding speed and extensive iron content

的泛铁量为 0.5%~1.0%。在相同送丝速度下,两者泛铁量数值接近,为 0.05%~0.2%。

5 结语

1) 采用电弧热丝加热,只需较小的热丝电流即可有效预热焊丝,其热丝电流在 50 A 时,与电阻热丝电流 400 A 相当,特别适用于低电阻率材料的 TIG 焊接。

2) 在焊接相同基体、相同送丝速度条件下,电弧对焊丝预热所需焊接线能量比电阻节省 87%。

3) 无论采用电阻加热焊丝还是采用电弧加热焊丝,其对堆焊层铜合金中的泛铁量影响相当。只要焊接工艺配置合理,两者均可在较高的焊接速度下获得较大的熔敷率,降低堆焊层中金属的泛铁量。

参考文献:

- [1] 胡特生. 电弧焊[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [2] 李志宇,白孝良. 热丝钨极氩弧焊管机设备及工艺的研究[J]. 焊接技术,1992(4):15-20.
- [3] 李亚江,王娟. 特种焊接技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [4] 吕世雄,孙清洁,范阳阳,等. 电弧热丝 TIG 焊工艺特点分析[J]. 焊接,2007(10):41-43.
- [5] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

(上接第 26 页)

5 结语

通过对材料为 40CrNiMoA 和 GH2132 紧固件冷镦工艺的研究,可以得出以下结论。

1) 冷镦原材料状态对冷镦成形有重要的作用。对于 40CrNiMoA 和 GH2132,在冷镦前进行合适的球化退火/退火热处理,对冷镦成形非常有利。

2) 利用有限元软件 Deform3D 可以准确模拟分析冷镦成形过程,为冷镦模的优化设计提供有价

值的参考信息。

参考文献:

- [1] 李莎. 冷镦钢与钢的冷镦性能评价[D]. 唐山:河北理工大学,2006.
- [2] 单祖辉. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1999:294-301.
- [3] 中国航空材料编委会. 中国航空材料手册 R1.0[M/CD]. 西安:西安赛人数字技术有限公司,2004.