

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.04.004

径向锻锤参数对叶片毛坯成型质量影响

龙朋¹, 吕彦明¹, 赵尊立²

(1. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;
2. 陕西山阳纵横矿业有限公司, 陕西 山阳 726400)

摘要:针对径向锻造锤头型面参数对叶片毛坯成型质量影响显著情况,借助有限元分析软件 Simufact. Forming 的径向锻造和微观组织演变模拟模块,对叶片毛坯在3类型面曲率半径不同的锤头作用下的径向锻造成型过程进行仿真分析;借助 MATLAB 工具采用最小区域圆法对锻后毛坯截面圆度定量评价,获悉径向锻造过程中锤头型面曲率半径对叶片毛坯成型质量的影响规律。结果表明:在锤头整个锻造区域内,圆度误差呈“M”型变化趋势;采用径向锻造方法锻造圆柱形毛坯时,锤头型面曲率半径应略大于目标工件半径;宜采用轴向多次小进给量锻造。锤头型面曲率半径越小,毛坯整形区晶粒尺寸分布越均匀,平锻锤头对预成型区晶粒细化效果显著。研究结果对叶片毛坯径向锻造批量化生产提供有价值的参考。

关键词:径向锻造;叶片毛坯;锻锤参数;最小区域圆法;晶粒尺寸

中图分类号: TG315.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2017)04-0017-06

Influence of Parameters of Radial Forging Hammer on Forming Quality of Blade Blank

LONG Peng¹, LÜ Yanming¹, ZHAO Zunli²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China;
2. Shanyang Zongheng Mining Co., Ltd., Shanyang, Shanxi 726400, China)

Abstract: Aiming at the significant effects of the parameters of radial forging hammer face on the forming quality of blade blanks, with the help of finite element analysis software Simufact. Forming of the radial forging and micro-structure evolution simulation module, the effects of blade roughness on hammerhead with different radius of curvature and the curvature radius of the hammer face during the radial forging process were studied. The influence of the curvature radius on the forming quality of the rough blank was analyzed. The results showed that the circularity error was like "M" in the whole forging zone of the hammer, and the radius of curvature of the hammer surface should be slightly larger than the radius of the target when forging the cylindrical blank by the radial forging method. Small feed forging would be better. The smaller the radius of curvature of the hammer face, the more uniform the grain size distribution in the blank area, and the bigger the effects of the flat forging hammer on grain refinement in the preforming zone. The results provided valuable references for radial forging batch production.

Keywords: radial forging; blade blank; hammer parameters; minimum area circle method; grain size

叶片是压气机的主要零件,数量多,形状和载荷情况比较复杂,同时尺寸相差悬殊。与其他的零件相比较,叶片有其自身的形状特点和性能要求。叶片的主要制造工艺过程分为毛坯制造和机械加工两大阶段^[1]。叶片制坯常用平锻机聚集制坯,也有用挤压制

坯方式,文中采用数控径向锻造机来生产压气机叶片坯料。

对于叶片来说,叶片毛坯的质量直接影响着叶片终锻和机加工成品的质量,对叶片成品的合格率起着决定性的作用。本文中的径向锻造过程是典型的三维

收稿日期:2016-11-20;修回日期:2017-02-10

第一作者简介:龙朋(1992),男,湖南衡阳人,硕士,主要研究方向为模具 CAD/CAM。E-mail:528175131@qq.com

大变形问题,因坯料在机械手的作用下同时作轴向送进与轴向旋转进给,理论分析比较复杂困难,因而采用 Simufact. Forming 有限元分析软件的径向锻造模块对叶片毛坯径向锻造过程进行分析。叶片毛坯在径向锻锤锻打下,工件处于3向压应力状态,能够弥补原材料本身存在的缝隙缺陷。在径向锻造过程中,径向锻锤参数对叶片毛坯的成形尺寸精度和质量有着直接的影响。卫建军等^[2]借助数值模拟研究了锻锤结构对车轴端部缺陷影响。周旭东等^[3]借助模拟仿真分析了径向锻锤数目对台阶轴的锻透性和生产率的影响。

径向锻造机工作时,锤头每锻打一次,工件转动一定角度,锤头在工件留下的锤痕互相错移一个角度^[4]。由于采用多锤锻打,叶片毛坯截面是接近圆形的多边形,多边形的边数就是毛坯某一截面的锤痕数,锤痕数越多,越接近圆形,外表面越光滑,工件表面质量越高,锻锤直接接触毛坯外表面,随着锻打对毛坯外表面整形,因此,锻锤的各项参数直接影响毛坯成型后的精度和质量。笔者通过数值模拟,着重就径向锻造锤头参数对叶片毛坯成型精度和质量的影响进行了研究分析,给企业生产提供参考。

1 叶片毛坯径向锻造变形过程分析

工件在径向锻造时,毛坯受到3向不均匀压应力,2个方向压缩变形,1个方向伸长变形,工件的变形主要发生在过渡区和锻造区^[5]。径向锻造是累积的螺旋式小塑性区域式变形,工件每一次锻打,都存在4个位于子午面上的轴对称塑性变形区域,每个子午面上的塑性变形区域如图1所示。最开始是 $\triangle abc$ 小锥体,随着径向压入量增加,旋转体塑性变形区域由子午面向垂直于锤面的横断面扩展,使得小锥体变成了较大的 $\triangle ABC$ 弧面锥体。可用A的位置即锻打结束时的径向深度,表示塑性区的大小。A的位置与锤头径向压入量以及锤头参数有关,其中图1中的 $\Delta L > 0.03d, r \approx 0.25d, R = (0.30 \sim 0.35)d$ 。

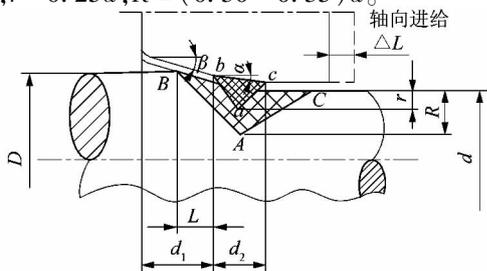


图1 径向锻造变形过程示意图
Figure 1 Schematic diagram of radial forging deformation process

棒料四锤头径向锻造属轴对称模型,设其形状函数 $r(x)$ 和 $R(x)$ 满足几何边界条件和速度边界条件。 $r(x)$ 根据几何关系来确定, $R(x)$ 由满足边界条件的函数设定, $R(x)$ 的表达式为:

$$R(x) = \sqrt{(R_0^2 - R_1^2)(1 - \frac{x}{L})^2 + R_1^2} \quad (1)$$

式中: R_0 为毛坯半径; R_1 为出口侧自由面圆弧半径; r_1 是出口半径; r_2 是进口半径; $L = (r_1 - r_2) / \tan \alpha$ 是变形区域的投影; $r(x) = r_1 - x \tan \alpha$ 。

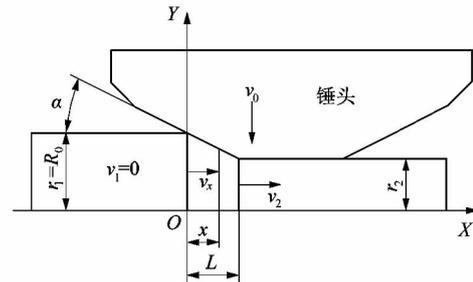


图2 径向锻造成型解析模型
Figure 2 Radial forging forming analytic model

2 径向锻锤形状和参数确定

2.1 径向锻锤锤头形状选取

径向锻造锤头按照工作型面通常可以划分为:平面、凹圆柱面以及V型面3种类型,除此之外考虑到其中的两两结合,这一类统称为万能锤头。锤头的型面主要是由整形面和预成型面构成^[6]。锤头的主要结构参数包括锤头厚度、锤头工作型面形状和尺寸以及锤头楔角。笔者主要研究锤头工作型面参数对叶片毛坯成型质量的影响,着重研究锤头型面曲率半径和叶片毛坯成型质量的关系。图3中(a)是平锤头即锤头型面曲率半径趋于无穷大;(b)为圆弧锤头I,即锤头型面曲率半径大于目标工件截面曲率半径;(c)为圆弧锤头II,即锤头型面曲率半径等于目标工件截面曲率半径。通过建立有限元仿真分析模型,分析比较3类不同参数的锤头对叶片毛坯径向锻造锻后成型质量的影响,以便确定最优的锻造参数,获取质量优良的径向锻造锻后毛坯。由于锤头型面曲率半径小于目标工件曲率半径时会出现锤头啃料现象,容易产生轴向折叠,工件工艺适应性差,所以本文不考虑此种情况。

2.2 径向锻锤锤头参数确定

2.2.1 锤头厚度参数确定

锤头厚度是根据锻件最小打击直径来确定的,根据已知的最小打击直径,可根据以下公式计算锤头厚度:

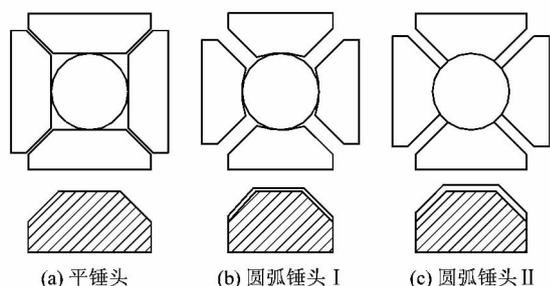


图3 径向锻造锤头分类

Figure 3 Radial forging hammer classification

$$h = c - \frac{d_{\min}}{2} \quad (2)$$

式中: h 为锻锤厚度; c 为固定锤头基面到坯料中心的最小距离; d_{\min} 为最小打击直径。

2.2.2 锤头型面参数确定

径向锻造锤头型面主要由整形面和预成型面组成,如图4所示。对于圆弧锤头型面来说,主要是确定圆锥段长度以及圆锥角、整形段长度以及曲率半径。锤头进口圆锥角 α 与目标锻件的角度相同,锤头尾部的倾斜角度 β 不大于摩擦角,热锻时为 $8^\circ \sim 12^\circ$,冷锻时大于 8° ,本次研究属于热锻, β 角取 10° , α 角通过计算取 21° 。预成型段的长度与锤头总体长度相关,整形段的长度与锻造参数有关,主要影响因素是变形程度,可根据生产经验进行设计。为了避免锻造时产生折叠,整形段与预成型段之间连接需要圆角过渡,过渡圆角半径可以通过锻件进口端直径来确定。具体计算如下所示:

$$\left. \begin{aligned} L_y &= 0.6L_c; \\ L_z &= 0.8d(\delta \leq 25\%); \\ L_z &= (1 \sim 1.2)d(\delta > 25\%); \\ R_g &= (0.6 \sim 0.8)d_0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: L_y 为预成型段长度, L_c 为锤头长度, L_z 为整形段长度, d 为锻件出口直径, δ 为压缩变形程度, R_g 为整形段与预成型段过渡圆角半径, d_0 为锻件进口端直径。

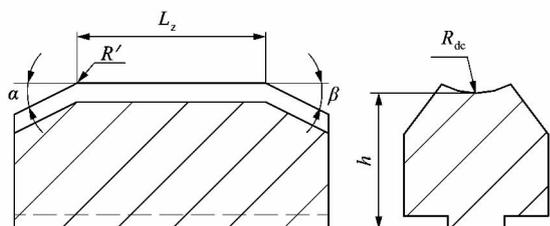


图4 锤头型面部分结构参数

Figure 4 Structural parameters of hammer face part

本次研究过程中,由于仅探究锤头型面曲率半径 R_{dc} 对锻造成型的影响,所以锤头整体长度未严格依照计算公式计算,为简化分析,避免其他因素干扰,根据毛坯理论尺寸,取锤头总长为250 mm。

3 锻锤参数对毛坯成型质量影响

本次研究根据目标工件尺寸要求,选取直径为51 mm,长度为145 mm的100Gr6_hs圆钢作为原材料,建立有限元仿真模型,叶片毛坯锻后理论尺寸如图5所示。径向锻造仿真时,3类锤头选取的锻造参数相同:摩擦因数为0.3,锻造起始温度为 1080°C ,都采用1个道次,径向进给分为3次,一次进给为5 mm,打击次数为30次。为了避免其他因素的干扰,3类锤头径向锻造过程中轴向不进给,夹头每次击打旋转角度为 18° ,锤头打击频率为每分钟700次,机械手送进速度为160 mm/s。采用4锤头拉打径向锻造方式,3类锤头径向锻造数值仿真模型如图6所示,从左至右依次为平锤头(曲率半径趋于无穷大),型面曲率半径为25.5 mm的圆弧锤头以及型面曲率半径为18.0 mm的圆弧锤头。

叶片毛坯的成型质量主要包括尺寸精度,有无孔隙缺陷,是否锻透以及晶粒细化和端面缺陷等情况^[7]。对不同曲率半径整形面的锤头锻后毛坯截面圆度以及晶粒细化情况进行研究,以便给实际生产提供参考。

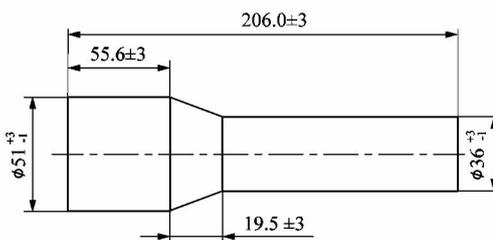


图5 叶片毛坯锻后理论结构尺寸

Figure 5 Theoretical structure size of blade blank after forging

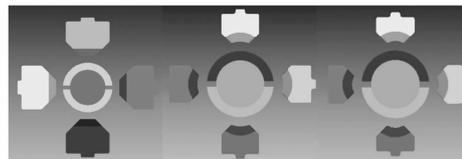


图6 3类锤头仿真模型建立

Figure 6 Three types of hammer simulation model

3.1 离散点拟合圆圆度评价

离散点拟合圆圆度评价方法多样,主要包括最小

区域圆法、最小外接圆法、最大内接圆法以及最小二乘圆法^[8-9]。文中采用最小区域圆评定方法,对锻后毛坯截面离散点进行圆度评价分析。最小区域圆法解析示意如图7所示,根据图7建立最小区域圆评定法的目标函数 $F(x,y)$ 。图中 O_1 为最小区域圆的圆心,坐标为 (x,y) ,零件实际轮廓由测得点集 $P_j(x_j, y_j) (j = 1, 2, 3, \dots, m)$ 构成,目标函数计算如下:

$$F(x,y) = R_{\max} - R_{\min} = \sqrt{(x_{\max} - x)^2 + (y_{\max} - y)^2} - \sqrt{(x_{\min} - x)^2 + (y_{\min} - y)^2} \quad (4)$$

利用函数求得 $F(x,y)$ 最小值,点集 P_j 到最小区域圆圆心坐标距离最大与最小值差值为 $f = R_{\max} - R_{\min}$, 此为最小区域圆度误差大小。为便于数据处理,笔者将最小区域圆算法编写为 MATLAB 应用程序。

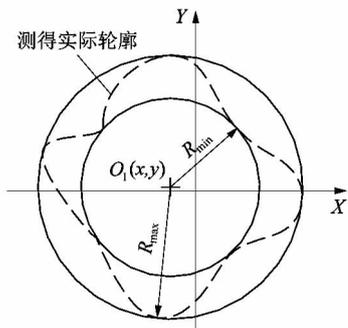


图7 最小区域圆评定圆度
Figure 7 Minimum area roundness assessment roundness

3.2 锻锤参数对毛坯成型圆度误差影响

径向锻造锤头不同的接触型面曲率半径,对叶片毛坯的成型质量影响是截然不同的,本次主要研究3种不同型面曲率半径的锤头对叶片毛坯成型质量的影响。图8为叶片毛坯研究选取截面的位置,总共选取8个截面进行研究。

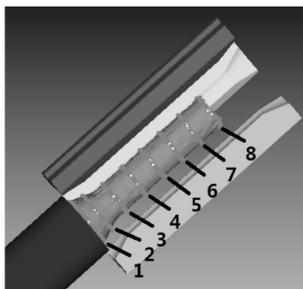


图8 叶片毛坯截面选取位置
Figure 8 Section location of blade blank

叶片毛坯经过4锤头拉打锻造之后,径向尺寸压

缩,轴向拔长,将毛坯截面坐标数据经过 MATLAB 最小区域圆评价算法程序处理后,得到3类锤头各截面圆度误差分析数据,如表1所示。将数据绘制成折线图如图9所示。从图中可以看出锤头型面为圆弧类型时,锻后的毛坯圆度误差整体要比平锤头要小,最大误差为1.79 mm,可知锻造圆柱形毛坯时,为了保证锻后毛坯圆度,应选用圆弧型面锤头。原始棒料经过径向锻造后,3类锤头锻造区圆度变化都呈“M”型变化趋势,可以看出在锻坯中部成型区域圆度误差比两端要小,成型质量较两端要好,所以锻造时最好采用轴向多次小进给量锻造。从折线图9可知,同为圆弧锤头,曲率半径等于目标工件半径时,在预成型段,圆度误差较平锤头和大曲率半径要小;在整形段,圆度误差要比大曲率半径大。由于毛坯的成型质量主要看整形段的质量,所以锻造时锤头型面曲率半径应比目标工件半径稍大。

表1 锻坯成型各截面圆度误差
Table 1 Forging forming roundness error of cross-section mm

截面号	平锤头	圆弧锤头 ($R_{dc} = 25.5$)	圆弧锤头 ($R_{dc} = 18.0$)
1	1.230 6	1.159 0	0.917 3
2	2.112 3	1.790 1	1.440 2
3	1.971 6	1.735 0	1.708 8
4	1.495 0	0.912 2	1.488 5
5	1.857 4	0.880 3	1.210 4
6	2.001 2	1.109 9	1.748 6
7	2.054 8	0.678 0	1.231 9
8	1.270 2	0.640 9	1.213 1

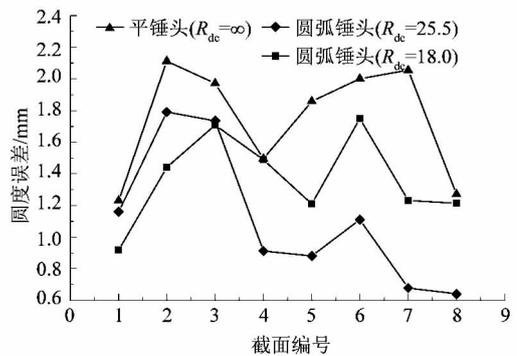


图9 锻锤锻后各截面圆度评价比较
Figure 9 Comparison of roundness on sections after forging

3.3 锻锤参数对毛坯成型尺寸精度影响分析

叶片毛坯径向锻造过程其实际是圆柱棒料径向镦粗,轴向拔长的热成型过程。对于叶片毛坯而言,锻后

毛坯尺寸的保证是非常重要的,针对3类锤头的1~8号截面模拟仿真结果离散点坐标数据,利用MATLAB工具编写最小二乘拟合圆程序,截面离散点坐标经过程序拟合处理后,得到拟合圆半径值如表2所示,绘制成折线图如图10所示。1~2号截面位于预成型段,3~8号截面位于整形段,根据图10可知,整形段处,平锤头锻后半径较圆弧锤头锻后半径要大,整形段的锻后半径大小随着锻锤型面曲率半径的增大而增大。整形段理论锻坯半径为18 mm,由表2可知,平锤头锻后半径整体比较接近理论半径,误差较圆弧锤头要小,3类锤头整形段锻后半径基本位于公差带范围内。从折线图可知,3类锤头在预成型段和整形段圆角过渡处锻后半径差异最小,并且圆角过渡处的半径最小,可以适当对圆角参数进行修正,改善圆角过渡处的凹陷。

表2 锻坯成型各截面半径尺寸

Table 2 Forging forming radius size of cross-section mm

截面号	平锤头	圆弧锤头($R_{dc}=25.5$)	圆弧锤头($R_{dc}=18.0$)
1	25.206 8	25.254 9	25.196 8
2	21.882 6	21.686 8	21.380 8
3	17.599 0	17.626 0	17.522 0
4	17.977 2	17.757 3	17.551 5
5	18.075 1	17.729 5	17.563 3
6	18.066 3	17.724 4	17.426 5
7	17.962 3	17.775 6	17.544 4
8	18.157 8	17.923 3	17.591 7

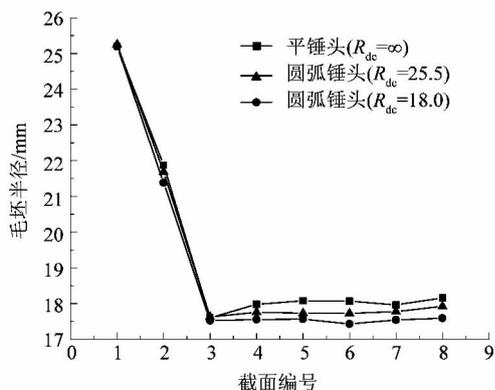


图10 锻锤锻后各截面半径尺寸比较

Figure 10 Comparison of hammer forging cross-section radius after forging

叶片毛坯径向锻后质量除了半径尺寸之外,整形段是否发生弯曲也是需要评定的要素。图11是叶片毛坯3类锤头锻后1~8号截面圆心在空间坐标平面的落点分布。从图11可以看出,3类锤头锻后毛坯轴

线在X方向上误差为0.34 mm到-0.51 mm,偏差范围不超过1.00 mm,在Y方向上误差为0.16 mm到-0.48 mm,偏差范围不超过1.00 mm,能够满足生产偏差要求。平锤头锻后,截面中心在XOY平面落点分布较为分散,毛坯截面中心较圆弧锤头偏差要大;型面曲率半径为25.5 mm的锤头锻后毛坯截面中心落点较为集中,偏差最小,锻后毛坯弯曲程度最小。

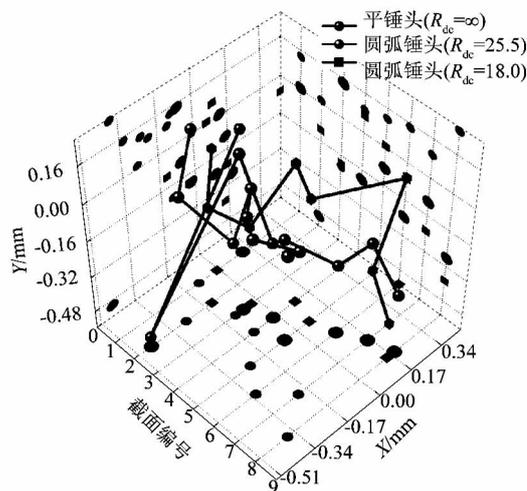


图11 毛坯截面锻后圆心平面落点分布

Figure 11 Distribution of drop point in circle center of blade blank after forging

3.4 锻锤参数对毛坯成型晶粒细化影响

叶片毛坯在高温径向锻造过程中,发生多种微观组织的变化,文中主要针对锻造过程中晶粒细化情况进行研究。锻件的晶粒尺寸变化决定了锻件机械性能,从而进一步决定锻件的内部质量^[10]。许多学者建立微观组织演变模型,通过有限元模拟仿真预测微观组织演变,以及锻件的机械性能。笔者借助有限元仿真软件 Simufact. Forming 中径向锻造模块以及后处理微观组织演变数学模型对3类锤头径向锻后叶片毛坯晶粒尺寸变化进行研究。毛坯材料初始晶粒尺寸为200 μm,经过径向高温锻造后,选取叶片毛坯预成型段以及整形段中心位置晶粒尺寸进行研究,在中心线上选取200个坐标点,得到其晶粒尺寸演变趋势如图12所示,图13是锻后叶片毛坯中心线截取位置。

结合图12和图13可以看出,在径向锻造预成型段区域,锤头型面曲率半径越大,晶粒尺寸细化效果更显著。从曲线起始位置可知,锤头型面曲率半径越小对机械手夹持区域晶粒尺寸影响效果越小。随着曲率半径的减小,锻后毛坯整形段晶粒尺寸分布越均匀,成形区域质量更高。同时,从曲线图中可知,叶片毛坯自

由端锻后的晶粒尺寸是整个工件中最小的。3类锤头径向锻后叶片毛坯整形段区域晶粒尺寸大小十分接近,没有显著性的大小差异,锤头型面的曲率半径大小对叶片毛坯锻后整形段区域晶粒尺寸影响不大,可以忽略不计。

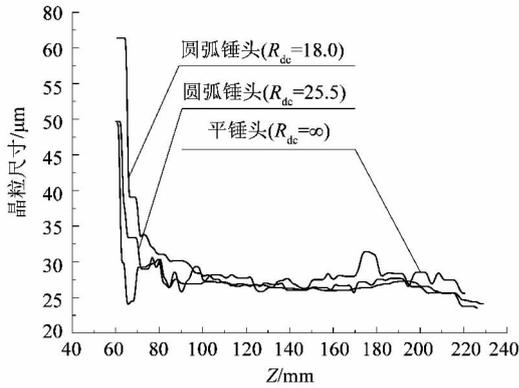


图 12 径向锻后毛坯中心位置晶粒尺寸
Figure 12 Grain size at center of blank after radial forging

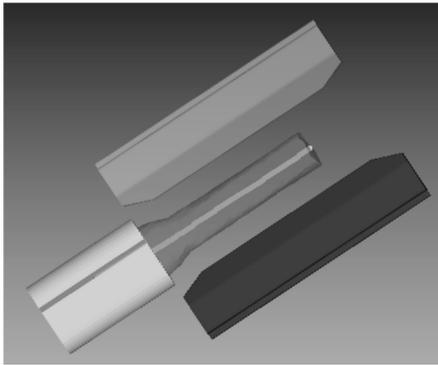


图 13 叶片毛坯中心线截取位置
Figure 13 Blade blank center line intercept position

4 结论

笔者借助于 Simufact. Forming 模拟仿真分析软件—径向锻造以及微观组织演变模块,针对径向锻造

锤头参数对叶片毛坯成型质量影响进行了探索和研究,得到以下结论:

- 1) 径向锻造锤头型面曲率半径对叶片毛坯锻后圆度有着显著的影响,随着曲率半径增大,叶片毛坯锻后圆度误差也跟着增大。
- 2) 在锤头锻造区域,圆度误差呈“M”型变化趋势,毛坯与锤头中间接触区域成型质量较两端要高,采用轴向多次小进给量可以提高锻后叶片毛坯质量。
- 3) 径向锻造锤头设计时,为了获取高质量的锻后叶片毛坯,应使型面曲率半径适当大于目标工件半径尺寸,平锤头不适合锻造圆柱形毛坯。
- 4) 随着锤头型面曲率半径的减小,毛坯整形段晶粒尺寸分布得越均匀,成形区域质量越高。
- 5) 径向锻造预成型区域的晶粒尺寸随着锤头型面曲率半径的增大,晶粒细化效果更显著。

参考文献:

- [1] 张国新. 汽轮机叶片锻坯优化设计[J]. 锻压技术, 2008, 33(4): 19-21.
- [2] 卫建军, 刘建生. 径向锻造锤头结构对车轴成形的影响分析[J]. 太原科技大学学报, 2008, 29(4): 313-316.
- [3] 周旭东, 刘香茹. 台阶轴径向锻造锤头数对锻透性和生产率的影响[J]. 锻压技术, 2011, 36(4): 26-29.
- [4] 高斌. 身管径向锻造成形仿真分析与残余应力测试研究[D]. 太原: 中北大学, 2016: 2-5.
- [5] 贾斗余. 精锻机锻造锻透性及相关工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015: 5-8.
- [6] 杜诗文, 孙瑞环, 李永堂. 圆弧砧结构尺寸对列车车轴成形质量影响[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(6): 26-31.
- [7] 于海波, 李男帅. 工艺条件对径向锻造中圆坯端部的影响[J]. 一重技术, 2016(3): 61-64.
- [8] 方沁林. 圆度误差评定的算法研究与软件设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 6-7.
- [9] 黄建龙, 秦建华, 吕汝金, 等. 圆度误差最小区域法数学模型的建立及其测量方法[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(2): 40-42.
- [10] 董晓彬. 径向锻打身管的微观性能研究及晶体塑性有限元模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 51-53.