

整体叶盘等温成形的计算机模拟与分析

吴瑞恒^{1,2}, 庞克昌¹, 徐祖耀², 阮雪榆²

(1. 宝钢股份公司 特殊钢分公司, 上海 200940; 2. 上海交通大学, 上海 200030)

摘要:在 DEFORM 3D 有限元分析软件平台上,对高压压气机整体叶盘的锻压成形过程进行了模拟与分析。通过应用正确的计算模型及对模拟结果的仔细分析,认为坯料设计成中间薄、外缘厚的形状较好,并给出了最优尺寸;模拟的结果还对锻压过程中可能产生的缺陷和部位进行了预测,对实际锻造起到很好的指导作用。

关键词:整体叶盘;等温成形;计算机模拟;缺陷预测

中图分类号: TG31, TP31 **文献标识码:** B **文章编号:** 1008-0716(2005)05-0047-03

Computer Simulation and Analysis of the Isothermal Formation of Vane-integrated Disk

WU Rui-heng^{1,2} PANG Ke-chang¹ XU Zu-yao² RUAN Xue-yu²

(1. Special Steel Branch, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200940, China;

2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The formation of vane-integrated disk used in high-pressure compressor of turbine engine is simulated and analyzed with the finite element method (FEM) on the platform of software DEFORM 3D. With proper computer models and careful analysis of the simulated result, the blank is modified as the shape of being thin in the middle and thick in circumference, and the optimum size is given. Moreover, according to the simulation results, probable defects during the formation and their positions are predicted and suggestions are presented, which plays an active role of guidance for practical forging.

Key Words: vane-integrated disk, isothermal forming, computer simulation, defect prediction

1 前言

叶盘是涡轮发动机和压气机中最重要的零部件之一。传统的制作方法是盘体和叶片分别成形,然后再整合在一起。这种方法制作工序繁多,更重要的是叶盘整体性能较差。改进的方法是对盘体和叶片整体成形,这样可以提高叶盘的整体性能^[1,2]。这种整体叶盘用传统的锻压方法制作很困难,而且需要大吨位的成形设备^[2]。最近,宝钢特殊钢分公司用等温锻造的方法成功地制造出整体叶盘,所用的吨位比传统锻造低很多^[3]。在进行实物锻压之前,公司用有限元方法在计算机上对整体叶盘的成形过程进行了三维仿真模拟,并根据计算结果对坯料的设计进行了修改,对

实际生产起到了很重要的指导作用。对照实际成形的锻件,计算机模拟的结果以及对坯料设计的分析与修改是比较准确的。

2 整体叶盘计算机模拟模型的建立

2.1 几何模型

整体叶盘的最大直径处达 660 mm,该零件叶片的轴线以及上下端线与盘体的中心轴不相交,叶片呈非对称分布。因此,锻件模拟时的几何模型不能简化。但是,借助于 DEFORM 强大的计算能力和 DELL 工作站高速的运行速度,我们有能力对如此大的锻件直接建模并进行复杂的计算,可以不对其进行简化(如图 1 所示)。

2.2 材料模型

整体叶盘所用材料为 TC17。高温应力/应变曲线由西北工业大学测定。选用的部分应力/应

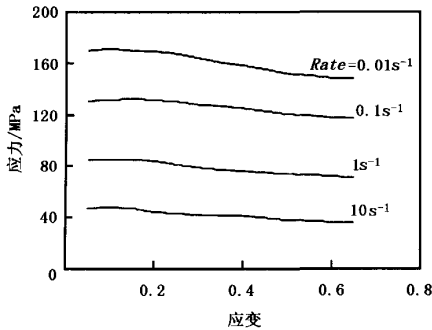
吴瑞恒 高工 1973 年生 2002 年毕业于上海交通大学 现从事塑性成形的计算机模拟研究工作 电话 26032565

变曲线如图2所示。

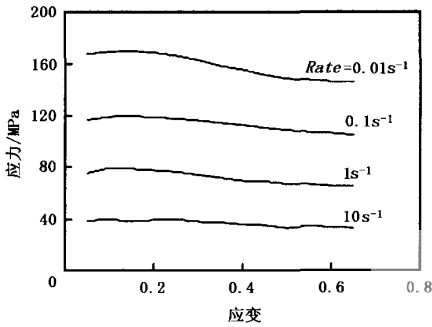


图1 整体叶盘锻件的几何模型

Fig. 1 A geometrical model of a vane-integrated disk forging



(a) 变形温度905°C



(b) 变形温度945°C

图2 锻件材料高温流变应力曲线

Fig. 2 Flow stresses of forgings at deformation temperature

计算所用的有限元程序是 DEFORM 3D。该有限元程序不要求一定对应力/应变曲线进行公式化,它可以用(线性或对数)插值的方法从已知变形条件下的流变应力计算特定变形条件下的应力值,这大大简化了对材料模型的准备工作,同时也提高了对实际生产模拟的精度。

2.3 模具与锻件的摩擦因数

模具与锻件的摩擦因数是一个很难直接测量的实验参数,且与很多因素有关^[4,5]。为了得到与实际生产相近的数据,我们用不同的摩擦因数

模拟锻饼过程;然后用模拟得到的锻饼形状与实际锻件进行对照,可以得到生产可用的摩擦因数。

2.4 温度场的处理

锻造工艺为等温锻造。成形过程中模具温度为950°C,与锻件的温差较小,而且由于采取了隔热措施,锻件和模具的热量损失都很少。因此,计算中简化了温度场模型,认为变形过程中模具和锻件的温度始终保持不变。

3 坯料的设计与修改

整体叶盘模锻的坯料,初次设计的剖面图如图3(a)所示,中间孔兼起定位作用。从模拟的结果来看,坯料的内缘部分金属向中心流动而外缘部分的金属向外流动(如图4)。对于初次设计的坯料情况,中间孔很快被坯料内缘的金属充满,此后所有金属均被迫向外流动。因为模具的台阶严重阻碍了金属向外流动,因此模具承受的压力急剧增加(如图5(b)中虚线所示)。由于压机的加载能力有限(特钢分公司压机的最大加载能力为30 000 kN),因此在这种情况下,即使延长随后的保压时间,也很难把坯料锻压成预定的形状和尺寸(图5(a)中的虚线未达到锻件成形所需行程)。

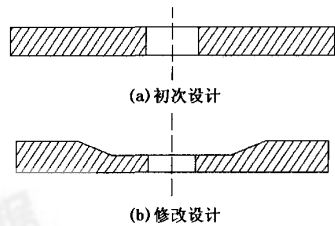


图3 整体叶盘模锻坯料形状图

Fig. 3 Blank drawing of the vane-integrated disk for forging

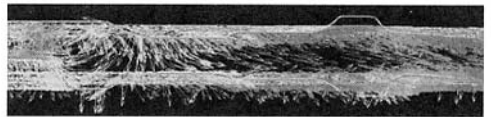


图4 锻件纵向截面金属流向及速度分布

Fig. 4 Metal flow direction and velocity distribution in a longitudinal section of a forging

另一方面,叶型部分的金属,变形时大量沿径向向外流动,而不是预想的那样沿轴向流动去填充模具叶型空腔(如图6),给叶型部分的填充带来一定的困难。因此,为保证模具叶型部分能够

被充满,坯料的外缘厚度应足够大。

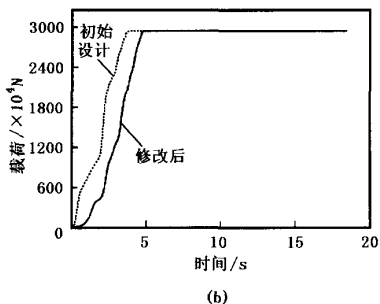
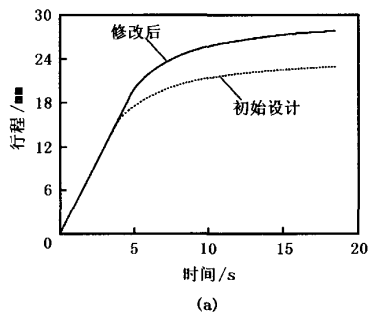


图5 不同坯料成形过程的时间—行程 (a)与时间—载荷(b)曲线

Fig.5 Curves of stroke versus time (a) and load versus time (b) during the formation of different blanks

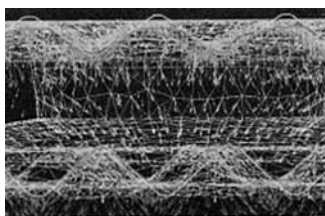


图6 叶型部分金属的流动方向图

Fig.6 Some metal flow directions in vane section of forgings

经以上对模拟结果的分析得知,应该减少坯料内缘的金属量,以避免中心孔被充满而使锻件继续变形所需的压力超过压机的最大载荷。另外,为了保证模具叶型部分能够被充满,应该加厚坯料外缘的厚度。所以,修改后的坯料形状设计如图3(b)所示。坯料经修改后,计算后的时间—行程曲线和时间—载荷曲线如图5中的实线所示。这样的载荷情况就可以在30 000 kN压机上实现,使锻件变形成预定的尺寸所需的保压时间也不会很长。

4 锻件的充满情况与缺陷预测

图7所示为坯料经修改后,压机达到预定行程时,锻件与上、下模具的距离值,它反映了锻件在模具型腔内的填充情况。从图中可以看出,锻件在最大载荷为30 000 kN的条件下,能够充满模具的各个部位,达到设计的锻件尺寸(图中锻件外圆部分金属已经流出模具型腔)。因此,可以在30 000 kN压机上进行TC17整体叶盘的锻压成形。

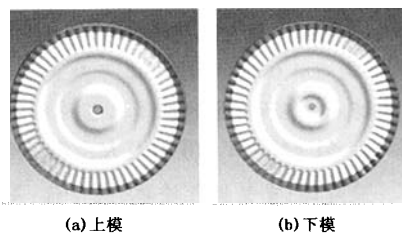


图7 变形结束后锻件表面与上、下模的距离
Fig.7 Distance between the forging surfaces and the upper die (a) and the lower die (b) after deformation

图8所示为成形过程中某时刻的锻件轮辐外缘金属的变形情况。从图中可看出,金属在下模腔中最先填充的是轮辐外缘的最外端,且填充速度要比内部快。这样,在轮辐外缘的最外端就形成了多肉的现象,在此部位可能形成金属的折叠。但从其后的发展以及最终成形的锻件来看,没有金属折叠的现象,原因是此处的金属此后被充向模具叶型的凹槽处,因此避免了与内部相邻流动金属的折叠。但无论如何,在实际锻造中,这个部位也应该是一个值得关注的地方。在锻件的其它部位,没有发现可能产生折叠的地方。



图8 锻件轮辐外缘可能产生折叠的部位
Fig.8 Probable foldings at the outer fringe of the forging spoke

从实际锻造的结果来看,这个部位确实没有折叠缺陷,其它部位也没有任何缺陷,整个锻件都达到了设计的尺寸标准。图9是实际锻件,与计算机模拟的结果吻合得很好。

(下转第54页)

生产出来超大型高温合金涡轮盘,组织、性能及探伤等全部满足重型燃气轮机的技术标准要求。

(3)超大型高温合金涡轮盘的研制成功,使

我国的大型高温合金钢锭冶炼和大型涡轮盘锻造技术水平前进了一大步,为我国的重型燃机的发展打下坚实的基础。

表 3 GH2674 合金超大型涡轮盘力学性能

Table 3 Mechanical properties of the extra - large turbines disk of GH2674 alloy

锻件	炉号	部位	室温 σ_b / MPa	室温 $\sigma_{0.2}$ / MPa	室温 δ / %	室温 ψ / %	A_k / J	持久温度 / ℃	应力 / MPa	时间 / h	硬度压痕直径 / mm
一级盘 $\phi 2118$	440-0053	轮缘	1 050	785	24.0	36.5	96	550	670	>101	3.44
		轮毂	1 060	760	25.0	41.5	80	550	670	>101	3.52
二级盘 $\phi 2038$	440-0072	轮缘	1 080	740	25.0	42.5	86	550	670	>101	3.60
		轮毂	1 030	750	24.0	36.0	94	550	670	>101	3.52
前挂盘 $\phi 1916$	440-0073	轮缘	1 090	730	28.0	43.5	143	550	670	>101	3.44
		轮毂	1 030	765	25.5	36.5	130	550	670	>101	3.52
三级盘 $\phi 1948$	440-0082	轮缘	1 020	710	26.5	33.5	65	550	670	>101	3.44
		轮毂	1 070	730	26.0	38.5	98	550	670	>101	3.48
四级盘 $\phi 1848$	440-0014	轮缘	1 010	735	27.0	41.5	100	550	670	>101	3.52
		轮毂	1 000	725	26.5	45	92	550	670	>101	3.52
标 准		轮缘	≥ 930	≥ 610	≥ 16	≥ 20	≥ 39	550	670	≥ 100	3.30
	轮毂	≥ 830	≥ 610	≥ 8	≥ 10					≥ 100	~3.70

参 考 文 献

- 1 朱 颀. 燃气轮机的发展前景及技术应用. 安徽电力职工大学学报, 2003, 8(1): 1~5.
- 2 陆定原. 燃气轮机发电设备的现状和前景. 发电设备, 1995, (21): 2~6.
- 3 陆锡才. 高温合金电渣重熔锭表面缺陷的分析. 特殊钢, 2002, 23(4): 54~55.

- 4 陈希春, 冯 涛, 傅 杰等. 电渣冶金的最新进展. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 62~67.
- 5 荀柏秋, 李 琦, 赵乌恩. 高温材料在燃气轮机中的应用和发展. 热能动力工程, 2004, 19(5): 447~449.

编辑 任 燕

(收稿日期: 2005-03-23)

(上接第 49 页)



图 9 锻件实物

Fig.9 A factual forging

5 结 语

通过应用正确的计算模型以及对模拟结果的准确分析,对整体叶盘锻件的锻造过程提出以下建议:

(1)锻坯不应是饼状,而应该为中间薄、外缘厚的形状;

(2)坯料外缘的厚度应足够大,以确保模具叶型部位能够被充满;

(3)锻件轮辐外缘可能会产生折叠,可以考虑适当放大圆角。

这些建议在设计 and 实际生产阶段都被采纳,并得到了预想的结果,节省了大量的实物试制试验。

致谢:感谢西北工业大学材料科学与工程学院周义刚教授、俞汉青教授和舒滢博士在材料高温应力/应变曲线测定方面的帮助。

参 考 文 献

- 1 庞克昌. 航空锻件精化的重要途径——等温锻造技术. 金属学报, 2002, 38(增刊): 356~359.
- 2 刘家富. 整体叶盘结构及制造工艺. 航空科学技术, 1998, (6): 21~23.
- 3 广鸣. “等温锻造”走向产业化. 上海工业, 2002, (3): 23.
- 4 姚若浩. 金属压力加工中的摩擦与润滑. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- 5 Thiebaut C. Evaluation of the friction factor of a molybdenum workpiece during upsetting tests at different temperatures. Journal of Materials processing Technology, 1998, 77: 240~244.

编辑 马凯利

(收稿日期: 2005-06-23)