

高速锤上叶轮闭式精锻

李成功

一、 研究方案的选择

涡轮压气机叶轮的材料为40CrNiMoA, 工作条件苛刻, 额定转速47000转/分, 超载疲劳试验时要求转速达到65000转/分, 工作温度约为230℃, 出口气压4.2公斤/厘米², 叶轮外形复杂, 19条薄而高的肋呈放射状等分, 单条肋双向变截面, 最薄处仅1.2毫米, 直径为200毫米, 投影面积约为300厘米², 研制成功的叶轮精锻件见图1。该零件采用机械加工方法制造是很复杂的, 而且由于在机械加工中锻造流线被切断, 对零件的使用性能,

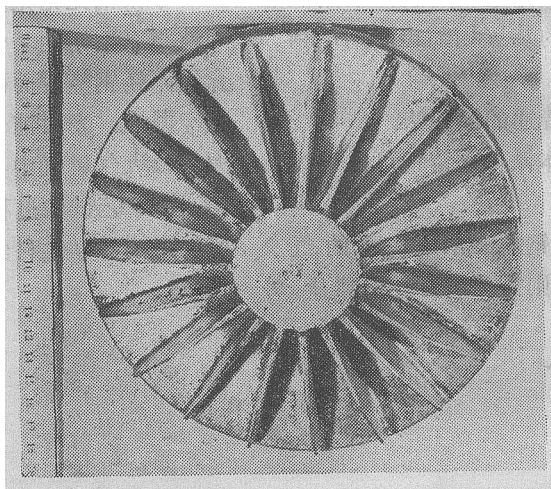


图 1 高速锤锻造的叶轮精锻件

如疲劳性能和抗应力腐蚀性能等, 具有明显的不利影响, 因此机械加工方案被排除在外。至于锻压工艺方案, 则由于零件几何外形及尺寸的特征, 在一般锻压设备上难以成形, 故采用高速锤精锻工艺方案。主要锻压设备的模具充填性能如表1所示。

表 1 主要锻压设备的模具充填性能

锻件特征尺寸	锻 压 设 备 类 型		
	高 速 锤	螺 旋 模 锻 锤 压 力 机	曲 柄 压 力 机
最小壁厚, 毫米	1.5	2.0	3.0~4.0
最小肋厚, 毫米	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~4.0
最小辐板厚, 毫米	1.0	1.5~2.0	2~3
最小圆角半径, 毫米	0~1.0	2~3	3~5

高速锤叶轮闭式精锻工艺方案的主要工艺路线及技术指标如下:

1. 40CrNiMoA 坯料用液化石油气(或工业煤气)在马弗炉中不完全燃烧保护加热;
2. 高速锤上闭式精锻,采用预应力压配组合套筒模座结构,模具型腔采用精密电火花加工,叶肋两侧及辐板内壁留抛光或化铣余量,其余为加工面;
3. 精锻件冶金质量按临时技术条件检验;
4. 叶轮精锻件经热处理后试加工定型,然后进入地面试车考验。

二、工艺试验

叶轮精锻工艺试验分别在16吨米及25吨米高速锤上进行。40CrNiMoA毛坯加热要严格控制氧化和脱碳,鉴于试验和试制批量很小,我们采用了液化石油气(或工业煤气)在马弗炉中不完全燃烧以进行保护加热的方案,具体装置见图2。选用的空气与液化石油气的配比为 $K=3.8; 4.9; 9.6; 13.5$ 。测试结果表明当 $K=4.9$ 时效果良好。

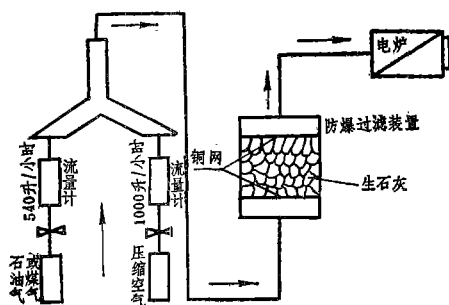


图2 叶轮精锻保护加热装置示意图

40CrNiMoA的加热温度分别选用1100℃、1150℃、1200℃、1220℃等温度进行试验,试验表明1150℃以下加热时,保护效果好,但变形抗力偏高。1200℃以上加热时,变形抗力较低,但晶粒粗大,氧化及脱碳增加。因此建议采用的加热规范为1150~1200℃加热,保温30~60分钟。

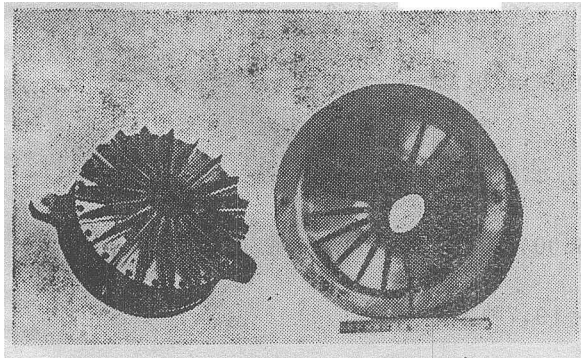


图3 叶轮凹模及电火花加工用电极

叶轮模具采用整体凹模结构,材料为4Cr5W2VSi,型腔部分采用精密电火花加工,加工用电极及凹模见图3。模具加工后经测量叶肋厚度波动为0.02毫米,叶肋分度波动为10',表面光洁度达▽6。叶轮凹模外用预应力组合套筒箍紧,模座结构及其在设备上的安装情况见图4。

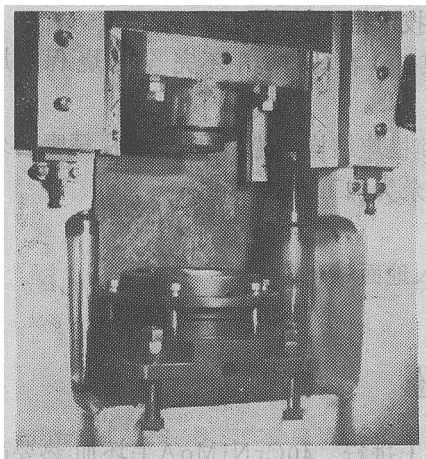


图 4 高速锤上精锻模座装置

试验过程中发现坯料的几何形状及尺寸对成形能量及质量有显著影响。模具预热温度约在 300°C 时较好, 模具润滑选用二硫化钼加蓖麻油效果良好。模具底部 $\phi 1.2$ 毫米孔易堵塞, 应设法改进。总之, 工艺试验表明, 在正确选择设备及打击能量、合理设计模具及坯料、采用良好保护加热措施及相应的加热规范以及选用适当的模具预热及润滑条件下, 叶轮是可以精锻成功的。

三、试验结果讨论

1. 打击能量的估算及设备吨位的选择

高速锤虽然和一般冲击式锻压设备一样同属于能量限定设备, 但与一般模锻锤相比它的抗过载能力是较差的, 因为它不像模锻锤那样具有庞大的砧座和基础来吸收过剩能量, 它的过剩能量要由设备本身的弹性变形来吸收。因此在高速锤上进行模锻, 特别是闭式无毛边模锻时, 对于工件所需能量的估算及设备吨位的选择具有十分重要的意义。如果选择不当, 要么由于能量不足而使锻件无法成形, 要么由于能量过剩而导致模具和设备的破坏, 从而造成严重后果。通过叶轮精锻试验, 我们认为采用计算和逐级试锻相结合的方法是可行的。

根据锻件特征, 按经验公式^[1]分别进行辐板部分锻粗及叶肋部分挤压的能量及变形力计算, 结果如下:

1) 叶轮辐板部分锻粗能量及变形力计算

(1) $E_0 = aa_i V \delta_{cp}^{\eta}$, 查有关图表数据, 代入得:

$$\text{能量 } E_0 = 2570 \times 0.7 \times 1.1 \times 1.2 \times 1.3 \times 440 \times 0.68^{1.14} = 9.4 \text{ 吨米}$$

(2) $Q_{max}^0 = 1.3aa_i F_k \eta \delta_{cp}^{\eta-1}$, 查有关图表数据, 代入得:

$$\text{变形力 } Q_{max}^0 = 1.3 \times 2570 \times 1.2 \times 305 \times 1.4 \times 0.68^{1.14-1} = 1243 \text{ 吨力}$$

2) 叶轮叶肋部分挤压能量及变形力计算

(1) $A = bb_i \frac{V_k}{\xi} (1 + \frac{m_k}{M} \alpha)$, 查有关图表数据, 代入得:

$$\text{挤压能量 } A = 5500 \times 0.7 \times 0.9 \times 1.2 \times 1.3 \times 1.3$$

$$\times \frac{142}{1} \times (1 + \frac{1.1}{1500} \times 40) = 10.3 \text{ 吨米}$$

(2) $Q_{max}^B = 1.3aa_i F_k \eta \delta_{cp}^{\eta-1}$, 查有关图表数据, 代入得:

$$\text{挤压变形力 } Q_{max}^B = 1.3 \times 5500 \times 1.28 \times 281 = 2571 \text{ 吨力}$$

3) 总能量 $E = E_0 + A = 9.4 + 10.3 = 19.7$ 吨米

最大打击力 $P_{max} = Q_{max}^B = 2571$ 吨力

以上计算结果与实际试验结果较为接近, 实际叶轮精锻打击能量约为20吨米, 设备额定打击力为2500吨力。故40CrNiMoA叶轮精锻选用25吨米高速锤是合适的。

2. 坯料几何形状及尺寸对叶轮充填成形的影响

叶轮精锻成形的关键是叶肋的挤压充填, 这19条叶肋虽然带有双向自然斜度, 但肋的高宽比很大, $h:w=19:1$ 。由于肋顶宽度只有1.2毫米(最小), 在挤压成形中冷却快, 流动阻力很大。根据有关资料报导^[2], 肋宽最小可为1.5毫米, 最大高宽比为23:1(但此时肋宽应 ≥ 6.35 毫米), 一般说来, 薄肋($w=2\sim 5$ 毫米)和大的高宽比(8:1 \sim 23:1)同时搭配在一起仅限于铝合金锻件。叶轮叶肋的高宽比搭配及其最小厚度均已超出上述建议值。鉴于高速锤成形薄壁高肋零件时具有良好的金属流动充填性能, 我们仍然获得了叶肋充满的叶轮精锻件。

我们针对叶轮的几何形状特点, 设计了五种类型的坯料进行试验, 并分别进行了不同直径、高度和圆弧的试验。试验结果表明, 中间圆柱带两头平锥体的异形坯料成形效果最好, 此时精锻成形所需能量最小, 叶肋可完全充满。我们还在 $\phi 120\sim 180$ 毫米的范围内试验了坯料直径的影响, 试验结果表明, 当坯料直径为 $\phi 120\sim 140$ 毫米($D_0/D=0.6\sim 0.7$)时, 效果较好。

3. 保护加热的效果

保护加热的目的是防氧化和防脱碳, 液化石油气(主要含丙烷 C_3H_8)与空气混合完全燃烧时之反应式为 $C_3H_8+5O_2+19N_2\rightarrow 3CO_2+4H_2O+19N_2$, 即当石油气与空气之比为1:24时为完全燃烧, 当不完全燃烧系数为0.3 \sim 0.5时即能达到保护加热之目的。完全燃烧时火焰介质成分为: CO_2 、 H_2O 、 SO_2 、 N_2 及少量 O_2 ; 不完全燃烧时火焰介质成分为: CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_mH_n 、 H_2S 等。在高温下, 不仅 O_2 要使钢氧化, 就是 H_2O 和 CO_2 也要使钢氧化, 因此, 无氧化加热时, 要求使游离 O_2 减少至零, 介质成分应为: CO 、 CO_2 、 H_2 和 H_2O , 并要求在 $1000^\circ C$ 时, $CO/CO_2\geq 3$, $H_2/H_2O\geq 1.63$; 在 $1200^\circ C$ 时 $CO/CO_2\geq 3.35$, $H_2/H_2O\geq 1.35$ 。

我们采用40CrNiMoA圆柱试样试烧, 对液化石油气和空气的配比量进行了试验, 试样表面氧化轻微, 增重一般在0.1%左右, 防氧化效果良好。图5自左至右分别为 $K=4.9$; 9.6; 13.5和在全空气中于 $1150^\circ C$ 加热保温30分钟后的试样外观。

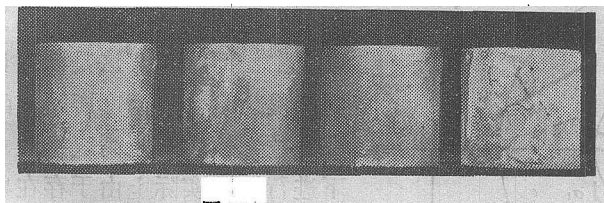


图5 不同液气配比下加热后的试样外观

我们采取了金相法、硬度法及真空直读光谱法等三种方法进行脱碳检查。首先检查了精锻件叶肋截面, 因为叶肋两侧基本无加工余量, 又是整个叶轮的关键承力部位。金相检查表面层中未见纯铁素体的脱碳层或半脱碳层存在。在Z323硬度计上对叶肋截面作硬度检查同样证实了这一点, 硬度检查结果见表2。上述金相及硬度检查均说明叶肋部分不存在

脱碳。用E950真空直读光谱分析仪对保护加热后的圆柱状试样逐层分析的结果表明，当液化石油气浓度偏小时（如K=13.6），表面存在脱碳层，深度在0.6毫米之内。

表 2 40CrNiMoA叶轮叶肋断面硬度分布

离叶肋侧表面距离, 毫米	0.11	0.42	1.06	1.5 (中心)
Hv3kg 公斤/毫米 ²	312	310	314	305

4. 模具的结构及强度

高速锤上闭式精锻采用的是整体凹模外加预应力组合套筒结构。我们按照材料力学中关于厚壁圆筒拉美公式^[3]及有关资料的经验数据^[4]进行了强度验算，结果见表3。

$$\sigma_t = \frac{\gamma_1^2 P_1 - \gamma_2^2 P_2}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2} + \frac{(P_1 - P_2) \gamma_1^2 \gamma_2^2}{\gamma^2 (\gamma_2^2 - \gamma_1^2)} ;$$

$$\sigma_r = \frac{\gamma_1^2 P_1 - \gamma_2^2 P_2}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2} - \frac{(P_1 - P_2) \gamma_1^2 \gamma_2^2}{\gamma^2 (\gamma_2^2 - \gamma_1^2)} .$$

当模锻变形力控制在2500吨左右时，模具内层所受合成应力为11808公斤/厘米²，低于材料许用应力。中套的合成应力达14056公斤/厘米²，接近材料许用应力。外套的合成

表 3 预应力组合套筒及模具的应力计算数据

模锻压力 公斤/厘米 ²	外中套压配力 P ₁		中内套压配力 P ₂		压配总和			模锻变形力 P _i		压配及模锻力总和		
	σ_r	σ_t	σ_r	σ_t	σ_r	σ_t	$\sigma_t - \sigma_r$	σ_t	σ_r	σ_r	σ_t	$\sigma_t - \sigma_r$
外套内层 $\gamma_i = 16.5$ 厘米	-854	3090	-785	2840	-1639	2840	7569	-112	6102	-3351	12032	15383
中套内层 $\gamma_i = 13$ 厘米	0	-4420	-1930	3990	-1930	-430	1500	-4083	8473	-6013	8043	14056
模具内层 $\gamma_i = 10$ 厘米	0	0	0	-9440	0	-9440	-9440	-8429	12819	-8429	3379	11805

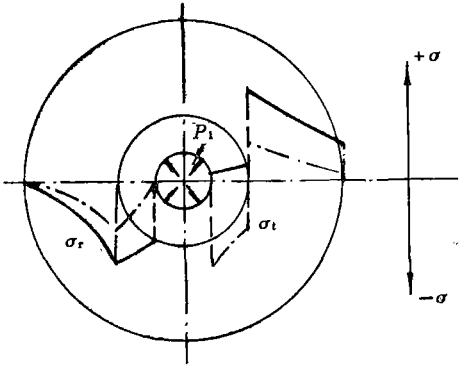


图 6 双层预应力组合套筒在存在内压力作用下的理论应力分布

应力达15383公斤/厘米²，略高于材料的许用应力，说明外套壁厚取得偏小，但在实际使用中并未发生任何问题，这是因为计算中没有考虑凹模内圈及组合套筒高度所造成的影响，整个计算是在假设凹模内圈全高度上受相等工作内压的条件下进行的，实际上由于存在导向段等部分，凹模内圈的高度大于工件及坯料的高度，故它所受的实际应力比计算值要低。凹模和组合套筒压配后在有工作内压条件下的理论应力分布见图6。

5. 关于叶轮精锻件的冶金质量

高速锤叶轮精锻件用原材料为 $\phi 180 \sim 220$ 毫米的40CrNiMoA棒材，叶轮低倍流线清晰，存在树枝状痕迹，见图7。高倍组织为回火索氏体（热处理制度： $850 \pm 10^\circ\text{C}$ 油淬， $580 \pm 10^\circ\text{C}$ 回火），由于高速变形剧烈，组织纤细，图8为其光学显微组织照片及电镜显微组织照片。

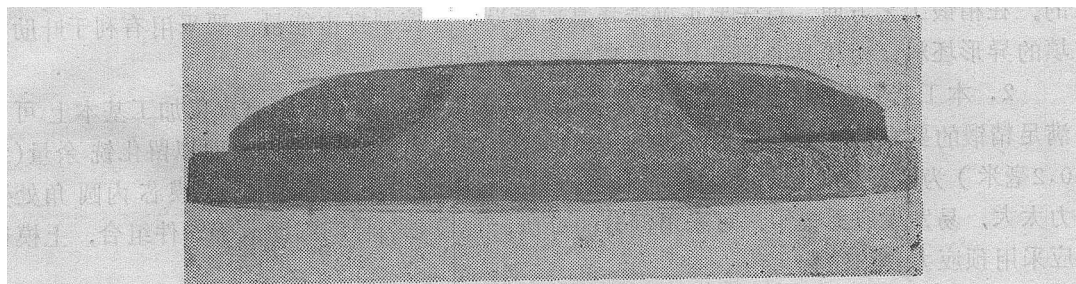


图7 40CrNiMoA高速锤精锻叶轮的低倍组织

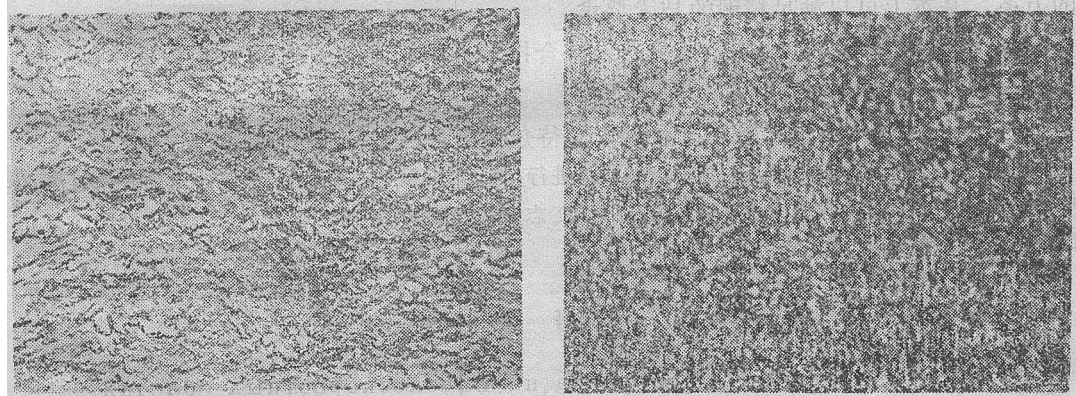


图8 40CrNiMoA高速锤精锻叶轮的显微组织

叶轮常规机械性能按HB5024-77规定进行测试，分别按径向及弦向取样，测试结果见表4。

表4 40CrNiMoA精锻叶轮的机械性能

试 样	σ_b 公斤/毫米 ²	δ %	ψ %	a_k 公斤·米/厘米 ²	$H_{5/750/30}$	
径向室温拉伸	109.6 100.2	19.6 17.1	66.0 61.2	—	—	
弦向室温拉伸	108.6 109.6	18.3 18.4	62.1 65.0	—	—	
径向室温冲击及硬度	—	—	—	11.9 11.8	331 326	321 325
弦向室温冲击及硬度	—	—	—	11.5 11.7	323 323	323 323
HB5024-77 规定数据	100 110	12 12	55 50	10 8	3.30~3.35 3.15~3.40	

从测试结果看, 高速锤精锻叶轮的机械性能符合HB5024-77规定的指标, 且径向和弦向性能无明显差异, 性能比较均匀。

四、初步结论

1. 涡轮压气机叶轮高速锤闭式精锻工艺方案在小批量试制和生产的条件下是可行的。在精锻工艺方面, 首先要正确选择高速锤设备并控制打击能量, 要采用有利于叶肋充填的异形坯料, 对模具的润滑及预热要给予充分的保证。

2. 本工艺方案的关键问题是模具的精度、强度和寿命。精密电火花加工基本上可以满足精锻的要求, 考虑到模具存在磨损等问题, 叶肋两侧及辐板内表面以留化铣余量(约0.2毫米)为宜。整体凹模外加预应力组合套筒的结构是基本成功的, 但模芯内圆角处受力太大, 易发生应力集中, 可采用剖分的办法, 使模芯与导向圆筒改为二件组合, 上模也应采用预应力套筒结构。

3. 40CrNiMoA坯料用液化石油气或城市煤气在马弗炉中进行不完全燃烧保护加热的方案, 基本上可以满足精锻的技术要求。

4. 叶轮精锻件的冶金质量检验结果符合技术条件的要求, 但应逐步创造条件, 使原材料向真空冶炼方向过渡。

5. 精锻件的热处理、试加工及试车, 待条件具备后进一步完成。

附记: 本工作系六二一所与一三四厂按协议进行并得到三〇三五厂的协作支持。参加研究工作的主要成员尚有六二一所费舜明、尹维城, 一三四厂汪志良、汪顺康、何景余及三〇三五厂史家骏、陈仁泰同志, 谨此一并致谢。

参 考 文 献

(1) Ю.П.Согришин, Штамповка на Высокоскоростных молотах, Машиностроение, 1978.

(2) S.A.Sheridan, Forging Design Handbook, ASM, 1972.

(3) S. Timoshenko, Mechanics of Materials, VNRC, 1972.

(4) T. Altan, Forging Equipment, Materials and Practices, MCIC-HB-03, 1973.



F100发动机涡轮叶片柱晶取向验收标准

F100发动机1,2级涡轮叶片系定向凝固铸造而成的, 材料为PWA1422 (即MAR-M200+Hf)。按技术条件规定, 该叶片在低倍腐蚀后的晶粒状况应符合如下标准:

柱晶必须是直的、平行的。从结晶起始区通过叶片的锁板、叶身, 一直延伸到叶冠。其尺寸不应有急剧变化。

柱晶对叶片主轴的偏离度不得大于 15° ;

两个柱晶之间的夹角不得大于 20° ;

与叶片进、排气边相交的柱晶 (又称露头晶粒), 其交角不得大于 10° 。

陈荣章摘自 AD-AO 77270