

火箭发动机涡轮泵高速齿轮的制造

薛培中

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 火箭发动机涡轮泵高速齿轮, 要求可靠性高。涡轮泵齿轮的制造工艺必须使齿轮具有高的强度和韧性, 无潜在缺陷、因加工引起的内应力低、加工表面质量好、尺寸与形状精度高等特性。

涡轮泵齿轮制造的最重要工序为精磨齿。文中对磨齿的工艺基准、磨齿裕量、磨齿用量和防止齿面烧伤等问题做了分析, 并提出了相应的最佳结果。

关键词: 涡轮泵; 高速齿轮; 制造

1 前言

用于液体燃料火箭发动机上的航天动力齿轮, 在设计和制造中首要的问题是保证获得使用可靠性高。涡轮泵齿轮在航天动力齿轮中又居于最重要的地位^[1]。

涡轮泵齿轮带动液体燃料泵和助燃剂泵, 为火箭发动机输送燃料和助燃剂。

涡轮泵齿轮具有特殊严格的使用要求^[2]。

① 齿轮的转速很高, 从6000rpm到40000rpm 线速度能达到152m/s;

② 齿轮在0.3秒之内线速度可以从零达到127m/s, 具有高的冲击加速度;

③ 齿轮工作区域的环境温度变化很大, 可以从零下200℃到240℃。

④ 由于齿轮箱要进入高空, 必须具有最小体积和重量, 齿轮箱每公斤重量传递动力 (55~140) 马力。

表1列出的是美国几种液体火箭发动机涡轮泵齿轮的设计参数^[1]

美国著名齿轮学者 D. W. Dundley 在1966年 ASME 年会报告中曾说: “在美国只有极少的齿轮制造厂家有制造这种齿轮的能力和经验”。

本文仅就氢氧发动机涡轮泵高速齿轮制造中的主要工艺问题做一概要的论述。

2 涡轮泵齿轮的技术要求

涡轮机驱动着同轴的液氢泵, 同时也通过齿轮传动驱动液氧泵做同向而不同速的运转 (见图1)。液氢泵的转速为40000rpm, 液氧泵转速为20000rpm。

齿轮的参数见表2。

表1

火箭型号	转速 rpm	线速 m/s	传动比	模数	压力角	精度等级 (相当我 国标准)
Atlas	38085	102	3.75	2.12	25°	4级
Titan	22800	83.5	2.82	2.12	20°	4级
Agna	24800	88.5	1.72	1.59	20°	4级
Centaur (RL-10)	30000	80	2.5	1.82	22.5°	4级

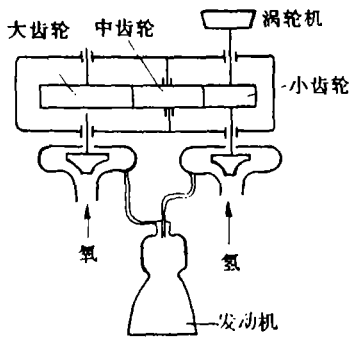


图1 涡轮泵齿轮传动

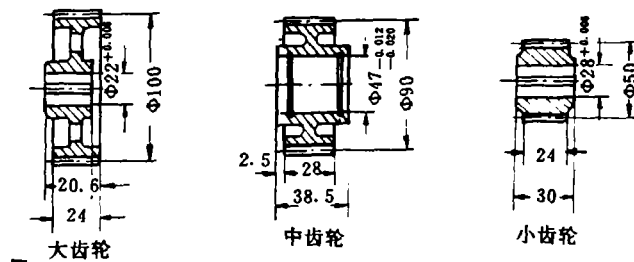


图2 齿轮简图

表2 齿轮参数

参数项目	大齿轮	中齿轮	小齿轮
模数	2	2	2
齿数	50	45	25
压力角	20°	20°	20°
螺旋角	0°	0°	0°
变位系数	0	0	0

齿轮的结构和外形尺寸简图见图2。

齿轮的材料采用镍铬钢，齿面氮化处理，氮化层深0.3~0.5，表面硬度 $Rc\ 56\sim61$ ，心部硬度 $Rc\ 29\sim33$ 。

齿面的润滑是往齿面上喷涂的 PPS 固体润滑膜。齿轮箱内充有3~5个大气压力的30°~40°K 的低温氢气。

齿轮的精度等级为 JB179-60 4级，De 侧隙，其精度检验项目和公差数值见表3。

表3 齿轮检验项目及公差数值 (mm)

检验项目 (代号)		大齿轮	中齿轮	小齿轮
周节累积误差	δt_z	0.016	0.016	0.010
出圆径向跳动	δe_r	0.012	0.012	0.0075
齿形误差	δJ	0.0045	0.0045	0.004
齿向误差	δB_z	0.0085	(修形)	(修形)
公法线长度		$n=6$	$n=5$	$n=3$
		$L_s=33.693$	$L_s=27.649$	$L=15.235$
		657	613	201

3 涡轮泵齿轮的制造工艺过程

涡轮泵齿轮的制造工艺过程,比其它的高速动力齿轮要求更为严格,涡轮泵齿轮的制造工艺过程着重满足以下四点要求:①使齿轮的材质得到最高的强度和韧性;②轮齿和轮体内部不得有潜在的缺陷;③控制各工序的加工用量以减小其加工引起的内应力;④获得好的表面质量,高的加工尺寸和形状精度。

以氧泵轴上的大齿轮为例,其工艺过程包括如下的23道工序:

1. 锻坯:终锻为镦粗;2. 正火:硬度达 $Hc\ 29\sim 33$;3. 粗车;4. 超声检查:零件内部不得有发状裂纹;5. 钳工:划线、钻孔;6. 插:粗插键槽;7. 时效;8. 半精车;9. 滚齿:用磨前滚刀滚齿,公法线留磨齿裕量0.3;10. 粗磨:粗磨内孔、端面、外圆;11. 粗磨齿;12. 磁力探伤:检查粗加工后的齿坯,不得有裂纹;13. 钳工:轮齿周边用细锉刀倒角, $R\ 0.5\sim 0.8$;14. 氮化:齿面 $HRC\ 56\sim 61$;15. 精磨:精磨内孔、端面、外圆;16. 精插键槽:保证双键的尺寸和对称性;17. 精磨齿;18. 齿面烧伤检查:用放大方法观察齿面或用硝酸腐蚀法检查齿面;19. 检验:检验齿的各项精度及光洁度;20. 修角:用油石修齿的顶刃, $R\ 0.3\sim 0.5$;21. 动平衡;22. 喷砂:齿面及轮辐处喷砂;23. 喷涂干膜:齿面喷涂 PPS 干膜。

在涡轮泵齿轮的加工工艺过程中,有几个要点需予以重视,它对于保证齿轮的使用质量起着很大的作用,是保证齿轮可靠性的基础。

3.1 探伤检查

在粗车之后进行超声探伤检查,以发现材质内部的冶金和锻造造成的缺陷;在粗磨齿之后再进行一次磁力探伤,检查在粗加工中可能引起的表面裂纹;在粗磨齿之后还要进行齿面烧伤检查,因为任何潜在的缺陷都可能导致严重的后果。

3.2 轮齿的制造过程

轮齿为齿轮最重要部位,动力传递主要是由轮齿的交替啮合进行的。齿轮的失效也通常发生在轮齿上。

①预滚齿:在圆坯上滚切出轮齿,用磨前滚刀使齿深和齿根圆角半径达到设计要求,齿厚留有磨齿裕量。

②粗磨齿:滚齿的精度和光洁度都是不高的,为了在齿面氮化处理
后精磨齿时齿面的氮化层磨去最少和保持整周齿面上硬度的均匀,在
氮化之前必须进行粗磨齿。

③倒角和修角:轮齿的周边和顶刃要进行倒角和修角,倒角是在
氮化之前进行,用细锉刀手工倒角 $R0.5\sim0.8$ 、 $\nabla 5$,倒钝棱角防止氮
化处理中尖角处的脆化剥落,精磨齿后用油石对齿的顶刃修角 $R0.3\sim$
 0.5 、 $\nabla 7$,可以减少动力传递中齿顶处的应力集中。倒角和修角情况见
图3。

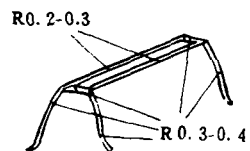


图3 轮齿倒角

④精磨齿区域:精磨齿面时要
保证两侧齿面的磨量要均称,最重
要的是不能磨到齿根和齿根圆角
处。图4表示出齿面磨削区域一定
要大于工作区域。用特制的突头磨
前滚刀滚齿时,齿根具有凹下的圆角
图4 (b),磨齿时可避免砂轮磨到圆
角处;而用直齿廓滚刀滚出的齿形,
磨齿后齿根部留有一小台阶图4

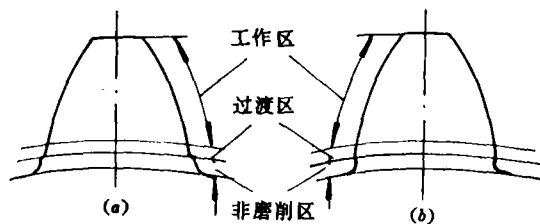


图4 齿面磨削区域

(a),台阶的尖角对轮齿强度是不利的,应尽量减小。但砂轮不可磨到齿底和圆角处,否则将对
轮齿强度有明显的降低。

3.3 喷砂

齿根、轮辐的内角处,易出现应力集中,喷砂处理可以改善表面加工粗糙度的缺陷,并
在金属表面形成负的残余应力,通常可提高轮齿的寿命(1.3~4)倍^[3]。涡轮泵齿轮,为使齿
面喷涂的干膜牢固,在精磨齿之后,齿面也进行喷砂,喷砂后齿面光洁度降低一级,精度无
明显变化,仍保持原精度等级。

4 精磨齿和修形

精磨齿和修形,是在齿轮氮化之后进行,它是涡轮泵齿轮最终的也是最重要的一个工序。
通过此工序以获得最终使用轮齿的齿距、齿形和齿向的精度,齿面光洁度和齿厚尺寸。

4.1 工艺基准和磨齿裕量

精磨齿的工艺基准为齿轮的孔和台肩端面,在精磨内孔时要控制其与齿圈的偏心量 \leq
0.01,过大的偏心会使齿面的氮化层过多的被磨掉,且一周齿面的硬度不均匀。精磨齿裕量要
尽量的小,齿轮在氮化后公法线尺寸通常要增大0.02左右,最理想的精磨齿裕量为0.03~
0.05。

4.2 磨削用量与齿面烧伤

磨齿用量对齿轮的质量有密切的关系,为了更有效的校正掉齿坯的原有误差和为防止磨
齿时齿面出现烧伤,必须采用较小的磨齿用量。精磨齿时每次的径向进给量为0.005,走刀量
为0.8mm/工件每转。

偏心过大的齿坯在磨齿时将会引起齿面烧伤^[4]。采用单晶氧化铝砂轮和专用的磨削冷却

油，都可以有效的防止烧伤的产生。

4.3 修形

轮齿的修形包括齿形修缘和齿向修形。齿形修缘主要考虑轮齿承载后的弹性变形和相啮合齿轮轮体温差所引起的基节尺寸差，当轮齿的载荷和传动速比都不大时，齿形修缘量将很小，在磨齿时只控制齿顶和齿根下凹（如图5），这样的齿形既能得到大的重叠系数，同时也可得到平稳的传动。

齿向修形是为了补偿齿轮箱体温度场的分布不均匀引起的齿轮中心线的歪斜。发动机试验时齿面出现的“偏一端接触”，整个齿宽上只有一端接触，致使齿面上的润滑膜很快磨掉产生胶合失效。修形后的齿面，在工作时接触段增大提高了齿轮的寿命。图6为齿向修形的设计形状与实测曲线。

齿向修形量和形状是以计算数值为参考，通过多次试验之后而确定的。小齿轮的修形量为0.020，中齿轮为0.012，大齿轮不修形。小齿轮和中齿轮的直线段 $C = (3 \sim 5) \text{ mm}$ 。

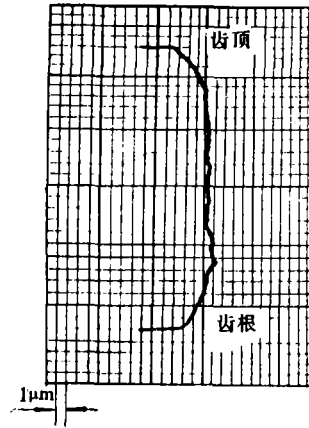


图5 齿形曲线

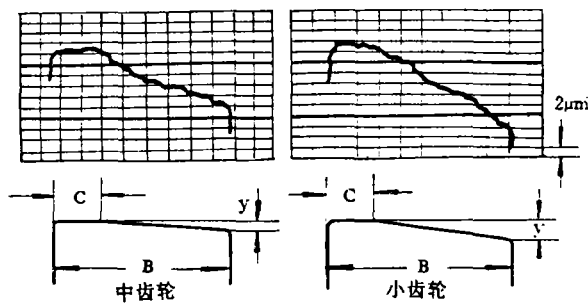


图6 齿向修形的设计形状与实测曲线

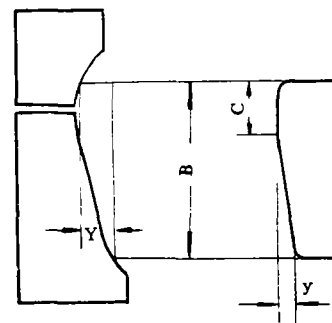


图7 修形靠板

齿向修形在磨齿机上是用修形靠板来实现的，靠板的倾斜量按下式来计算：

$$Y = \frac{100 \cdot y}{1.3 \cdot \sin \alpha}$$

式中：Y—靠板倾斜量；y—齿向修形量； α —齿轮压力角。

为得到完整的齿向形状，保证齿面在全部工作过程中能均匀接触，在最终磨齿时，使用两块靠板的组合（图7），可得到两端倒坡、齿向有一直线段和修形段的满意修形结果。

5 结 语

1. 涡轮泵齿轮比较其它用途的高速齿轮, 在制造上要求更为严格, 每一工序、操作上的疏忽和错误都可能造成齿轮使用中的过早失效。为此, 在严格制造操作的同时, 还必须随之以细致认真的检验, 有效地控制齿轮的质量。

2. 依照设计的要求和经过试验证明, 所规定的涡轮泵齿轮制造工艺和磨齿方法是完整可行的, 齿轮的寿命都达到预定的指标, 火箭多次发射成功, 可说明涡轮泵齿轮的制造可靠性是高的。

参 考 文 献

- [1] Liquid Rocket Engine Turbopump Gears, NASA Space Vehicle Design Criteria (Chemical Propulsion) NASA SP-8100, March 1974
- [2] M. A. Nartman, Gear For Outer Space, Machinery 65, No. 12, 1959
- [3] J. C. Straub, Shot Peening In Gear Design, 1964, AGMA, 109, 13
- [4] 丁渝生, 磨齿裂纹齿廓在齿轮上的分布部位与磨齿前齿轮误差的关系, 齿轮误差理论及测试技术学术讨论会 1980
- [5] D. W. Dudley, Successes And Failures In Space Gearing, SAE-ASME Air Transport and space meeting April, 1964

Manufacturing of High Speed Gears for Rocket Engine Turbine Pump

Xue Peizhong

(The Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academy of Sciences, Changchun 130021)

Abstract

It is necessary to have high reliability for high speed gears in rocket engine. By special manufacturing technologies gears must be made with high strength and toughness, no latent defects, low residual stresses issued from machining procedure, good surface quality, high machining precision on both size and shape etc.

The precision grinding of teeth is the most important process in manufacturing gears for turbine pump. For teeth grinding the technology base, allowance, parameters and preventing teeth surface from burning are analyzed and optimum conditions are given in this paper.

Key words: Turbine pump, High speed gear, Manufacturing