



# 涡轮叶片枞树形榫头 强度计算

国防工业出版社

# 涡轮叶片枞树形榫头

## 强度计算

A. H. 格鲁宾 著

张 斌 徐方有 译

张宁光 汪有前 校

国防工业出版社

1975

## 内 容 简 介

本书较详细地论述了涡轮叶片与涡轮盘之间联接结构——枞树形榫头在高温高负荷工作条件下的强度计算。作者以变分方程为基础,研究了榫头在弹性、弹-塑性变形情况下以及在稳定蠕变和不稳定蠕变情况下力和基本应力的求解方法。此外,关于榫齿齿距公差对各齿负荷分配的影响;关于榫头产生塑性变形和蠕变时对各齿负荷分配的影响;关于应力集中的计算以及在榫齿弹-塑性变形情况下安全系数的确定等,也都作了细致的研究。

本书可供航空发动机设计人员、强度计算人员和航空院校有关专业师生参考。

Расчет на прочность елочного

замка лопаток турбин

А. Н. Грубин

Издательство «Машиностроение» Ленинград 1970

\*

### 涡轮叶片枞树形榫头 强度计算

А. Н. 格鲁宾 著

张 斌 徐方有 译

张宁光 汪有前 校

\*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 7 146千字

1975年10月第一版 1975年10月第一次印刷 印数: 0,001—3,100册

统一书号: 15034·1427 定价: 0.74元

# 目 录

译者序	3
前 言	9
引 言	11
第一章 榫头变形初期的基本应力状态	17
§1 作用在榫头构元上的力	17
§2 齿在变形初期的基本应力状态和变形状态	21
§3 变形初期叶根体和轮盘凸块体的基本应力状态 和变形状态	45
§4 变形初期力和基本应力的确定	53
§5 变形初期基本应力状态的计算和同试验数据的比较	65
第二章 榫头蠕变阶段的基本应力状态	91
§6 稳定蠕变阶段力和基本应力的确定	91
§7 稳定蠕变范围内的基本应力状态计算	111
§8 不稳定蠕变阶段力和基本应力的确定	136
第三章 榫头所有工作阶段的应力集中	157
§9 一般概念	157
§10 拉力作用下的应力集中	161
§11 榫齿弯曲时的应力集中	181
§12 有关应力集中的计算	195
第四章 榫头验算方法	209
§13 纯弹性变形和弹塑性变形阶段榫齿基本 应力状态的计算	209
§14 蠕变变形阶段榫齿基本应力状态的计算	212
§15 榫头在所有工作阶段应力集中区的计算	216

# 涡轮叶片枞树形榫头

## 强度计算

A. H. 格鲁宾 著

张 斌 徐方有 译

张宁光 汪有前 校

国防工业出版社

1975

## 内 容 简 介

本书较详细地论述了涡轮叶片与涡轮盘之间联接结构——枞树形榫头在高温高负荷工作条件下的强度计算。作者以变分方程为基础,研究了榫头在弹性、弹-塑性变形情况下以及在稳定蠕变和不稳定蠕变情况下力和基本应力的求解方法。此外,关于榫齿齿距公差对各齿负荷分配的影响;关于榫头产生塑性变形和蠕变时对各齿负荷分配的影响;关于应力集中的计算以及在榫齿弹-塑性变形情况下安全系数的确定等,也都作了细致的研究。

本书可供航空发动机设计人员、强度计算人员和航空院校有关专业师生参考。

Расчет на прочность елочного

замка лопаток турбин

А. Н. Грубин

Издательство «Машиностроение» Ленинград 1970

\*

## 涡轮叶片枞树形榫头 强度计算

А. Н. 格鲁宾 著

张 斌 徐方有 译

张宁光 汪有前 校

\*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 7 146千字

1975年10月第一版 1975年10月第一次印刷 印数: 0,001—3,100册

统一书号: 15034·1427 定价: 0.74元

## 译者序

目前广泛应用的一种涡轮叶片与涡轮盘的联接结构——“枞树形”榫头在高温高负荷工作条件下的强度计算，提出了越来越迫切的要求。然而，现有的关于枞树形榫头静强度的计算方法，尚不能满足生产实践和理论计算的需要，无法解释和解决生产和使用中出现的各种现象和问题。例如：榫齿齿距公差对各齿负荷分配的影响；榫头产生塑性变形和蠕变时对各齿负荷分配的影响；应力集中的计算以及在榫齿-塑性变形情况下安全系数的确定等。

鉴于上述情况，我们遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，译出了这本书。诚然，学习外国东西的目的，是为了更好地研究和发展我国自己的东西。

本书以变分方程为基础，研究了榫头在弹性、弹-塑性变形情况下以及在稳定蠕变和不稳定蠕变情况下力和基本应力的求解方法，并导出了解应力集中问题的计算公式。为研究涡轮叶片榫头静强度提供了一个较为完整的思考方法。但是，书中应用了烦杂的数学推导和复杂的计算公式，尽管作者以图表形式列出了大量中间计算结果，对应用者来说，仍然存在着繁琐的数学计算。当然，这一困难，对于广泛使用电子计算机的今天来说，已不成为什么太大的问题了。

本书采用分割问题研究法，即将齿和叶根体（轮盘凸块体）分开；基本应力状态与应力集中分开；研究应力集中又

将拉伸引起的与弯曲引起的分开，而后将其相互影响再加以综合。

全书共分四章十五节：

在第一章 § 1~ § 5 中研究了棒头变形初期基本应力状态和变形状态的计算，这是本书最主要的基础部分。在研究齿的基本应力和变形状态时将齿分为有负荷和无负荷二段，应用无因次应力分量分别研究，并根据第三强度理论来确定法向应力强度和判定塑性变形的发生。书中阐述的分析齿的基本应力状态的一般方法不能用于应力集中计算。之所以如此，是因为所采用的应力函数近似算法不能反映该情况下这些分量的急剧变化。

在研究叶根体（轮盘凸块体）的基本应力状态和变形状态时，采用了一系列工程上所容许的简化，从而使计算公式大大简化。

在确定变形初期的力和基本应力时，考虑了齿的装配间隙和因叶片、轮盘线膨胀系数不同对力在各齿分配的影响，以及变形对力分配的影响。计算结果与试验结果比较后证明：计算值能较好地与试验值相吻合，误差仅在 5.8~4.8% 之间（应力集中区除外）。

在第二章 § 6~ § 8 中研究了稳定蠕变和不稳定蠕变阶段棒头的基本应力状态。从流变理论出发，应用剪应力强度  $T$  和剪切变形速度强度  $H^n$  存在幂次函数的关系，在计入齿的非刚性固接的附加挠曲速度的影响和线膨胀系数不同和装配间隙的影响的条件下，对于叶根蠕变可略去和不可略去的两种情况都作了分析，建立了计算公式，列举了计算例子。显然，当叶片不稳定蠕变阶段的时间与叶片寿命相比足够长的

话，务必要采用不稳定蠕变的算法——一般方程或简化后的方程进行计算。在该算法中主要地是增加了时间函数。

在第三章 § 9~ § 12中研究了齿和叶根体（轮盘凸块体）过渡区域的应力集中，分别建立了拉伸和弯曲的弹性变形、弹-塑性变形和蠕变变形状态下的应力集中计算式。列举了计算实例。

在第四章 § 13~ § 15中介绍了以上各种计算的具体计算步骤及书中各图表的应用。

在翻译过程中我们对原书中的部分错误作了修改。

由于时间和水平有限，虽经校阅，仍会有许多错误之处，恳切地希望读者提出批评指正。

本书供航空发动机设计人员和强度计算人员参考，也可供航空院校有关专业的师生和从事航空研究的力学工作者参考。



# 目 录

译者序	3
前 言	9
引 言	11
第一章 榫头变形初期的基本应力状态	17
§1 作用在榫头构元上的力	17
§2 齿在变形初期的基本应力状态和变形状态	21
§3 变形初期叶根体和轮盘凸块体的基本应力状态 和变形状态	45
§4 变形初期力和基本应力的确定	53
§5 变形初期基本应力状态的计算和同试验数据的比较	65
第二章 榫头蠕变阶段的基本应力状态	91
§6 稳定蠕变阶段力和基本应力的确定	91
§7 稳定蠕变范围内的基本应力状态计算	111
§8 不稳定蠕变阶段力和基本应力的确定	136
第三章 榫头所有工作阶段的应力集中	157
§9 一般概念	157
§10 拉力作用下的应力集中	161
§11 榫齿弯曲时的应力集中	181
§12 有关应力集中的计算	195
第四章 榫头验算方法	209
§13 纯弹性变形和弹塑性变形阶段榫齿基本 应力状态的计算	209
§14 蠕变变形阶段榫齿基本应力状态的计算	212
§15 榫头在所有工作阶段应力集中区的计算	216



## 前 言

涡轮叶片和轮盘间有各种联接结构，目前应用最多的是所谓枞树形榫头。这种榫头是一种静不定结构，它开始在弹性或弹塑变形条件下工作，而后当温度足够高时便在轮盘金属蠕变条件下工作，有时则在叶片金属蠕变条件下工作。在逐渐地转入稳定状态的已知时间过程中，蠕变具有不稳定性。

榫头处在下列力素作用下：

1. 叶片离心力；
2. 转子旋转平面内和轴向平面内燃气力力矩；
3. 叶片横截面重心对轮盘半径错移产生的叶片质量离心力力矩；
4. 燃气流不均匀致使叶片振动产生的交变力矩；

显然，作榫头静强度计算时需要考虑的仅仅是前三个因素，只是在作疲劳强度计算时才考虑所有四个因素。

本书只研究静强度计算。

作静强度计算时，燃气力和离心力作用所致的弯曲，一般可以忽略，这是因为这些力素对榫头应力状态影响不大。

如果榫头的负荷和榫头的温度不是固定的，则按所谓当量负荷和当量温度进行计算，此负荷及温度可借试验方法或按耶·伊·鲁萨诺夫（Е.И.Русапов）1957年提出的理论方法确定。

当金属尚未蠕变时，也就是相对地在不高的温度下，计算归结为确定塑性变形下的极限负荷和对应的安全系数。

由于高温工作条件下的金属机械性能不断下降，蠕变阶段的静强度计算就具有决定性的意义。与此计算相比较，弹性和弹塑性变形阶段（涡轮工作初期）的计算就只起着从属的作用，尽管它是完全必须的。这所以必须是因为这两种计算是彼此紧密关联着的，蠕变阶段的计算是以涡轮工作初期计算所得的数据作为原始数据。

目前已有一系列分析枞树形榫头应力状态的理论和试验方面文献，但尚缺乏综合性的研究。本书则具有这种性质。

尽管作了一系列简化假设，但提供给读者的计算方法仍是十分复杂的。为了使设计人员有可能利用这些分析结果，按一系列通用方法就选定的对参数总合结果有影响的各种参数值，在电子计算机上进行了大量计算，并且将这些计算结果以图表形式表示出来。此外，还列举了部分计算例子。

## 引 言

早在1951年，格·恩·别列沃兹奇可夫（Г.Н.Перевозчиков）就从理论上和试验（光学方法）上研究了在叶片离心力作用下的纯弹性变形期间力在榫头各齿的分配和榫头各部分的应力分布问题，这时把叶片离心力看成集中力。作者是基于这样的假设来分析力在各齿的分配问题的，即力沿着叶根和轮盘凸块高度的变化符合连续规律；此外，当假设力从一个齿到另一个齿为跳跃式变化时，则给出了求解力的所谓不连续法。

作者没有考虑叶根齿和轮盘凸块齿之间的摩擦力，也没有考虑因所谓“温度横压力”，也就是叶片和轮盘材料线胀系数不同而产生的力的不均匀分配，没有透彻分析齿距误差对力在各齿分配的影响。齿的应力借助勃·格·加列尔金（Б.Г.Галеркин）法<sup>[4]</sup>求解，此时负荷被认为是沿齿的整个上表面分布着。当然这在实际上并不存在。没有考虑那样一个事实，即由于每个齿是长度极短的梁致使圣维南（Сен-Венан）原理失效。没有考虑齿的“结合”弹性和齿底的应力集中。

1951年符·窝·切伊特里宁（В.О.Цейтлинский）用与格·恩·别列沃兹奇可夫法相类似的不连续法分析了力在各齿的分配，他考虑了“温度横压力”和透彻分析了齿距对力在各齿分配的影响。但是齿上负荷被认为是集中力一事在实

实际上是不存在的。此外，分析齿的应力状态时应用的初等材料力学方法也不符合平衡方程、边界条件和变形一致方程式。

在耶·格·格卢哈列夫 (Е.Г.Глухарев) 的著作〔7、8〕中，采用了力沿榫头高度连续分布规律，并考虑了因叶片和轮盘材料线胀系数不同而带来的温度变形，分析研究了力在各齿的分布和齿弹性变形条件下的柔度。

在阿·斯·列依金 (А.С.Лейкин) 的著作〔15〕中分析地解决了与耶·格·格卢哈列夫相同的一些问题。但他用的是另一种方法，而且不限于叶根受拉伸的情况，包括了弯曲情况。

在阿·斯·列依金的另一著作〔16〕中研究了与叶片型面部分影响相关联的枞树形榫头应力不均匀分布问题。该著作指出了那样一个事实，即在拉伸和弯曲时叶片型面部分的影响主要反映在标志榫头杆承载能力的应力的分布上 (其最大值会增大 1.5~2.0 倍或更大)。而在较小的程度上反映在与接触构元——齿的反作用力有关的应力上。

齿的基本应力 (没有考虑应力集中效应) 对枞树形榫头强度的影响远大于叶根体和轮盘凸块体的基本应力。看来，榫齿至叶根体和轮盘凸块体过渡区的应力集中效应与标志叶根承载能力大小的应力不均匀分布关系不大 (见图 1)。这些设想在很大程度上将证实在以后分析中作出的关于叶根和轮盘凸块体中轴向应力均匀分布的假设是可行的。

在阿·斯·列依金的著作〔17〕中，研究了叶片在离心力场静拉伸条件下作一阶型弯曲振动时力在枞树形榫头各齿的分布。这个问题是基于阿·符·维尔霍夫斯基 (А.В.

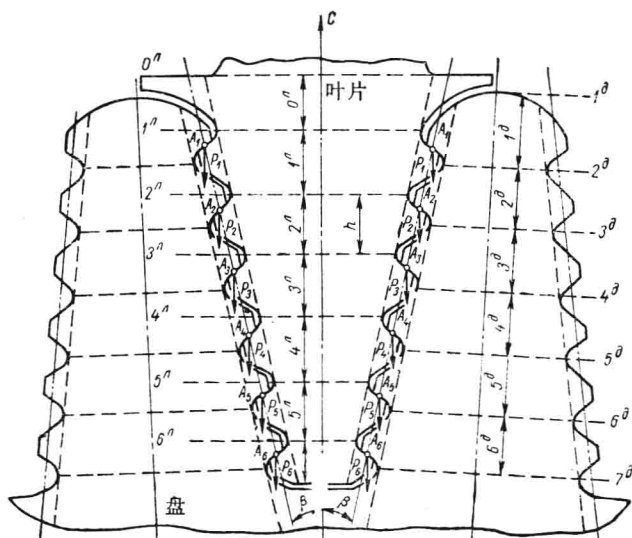


图1 涡轮叶片枞树形榫头

Верховский) 的圆柱截面假设得到近似解决的<sup>(1)</sup>。

在同一作者的著作〔18〕中，列出了一些从疲劳强度观点出发，合理地选择枞树形榫头结构参数的建议。

在勃·普·索科洛夫 (Б. П. Соколов) 的著作〔32、33〕和齐·格·姆斯塔芬 (Ч. Г. Мустафин) 的著作〔20、22、33〕中作了求枞树形榫头蠕变时期力在各齿分配的尝试。这一问题的解决基于利用小变形的《应力—变形》图的左边直线部分。这种方法有着下述前提条件，即在“整个使用期间实际零件的工作区限制在允许变形内，对涡轮工作叶片和轮盘而言为 0.1~0.2% (叶根连接计算中以 100000 小时左右为长期工作寿命)”。但是这里完全没有考虑那样一个事实，即枞