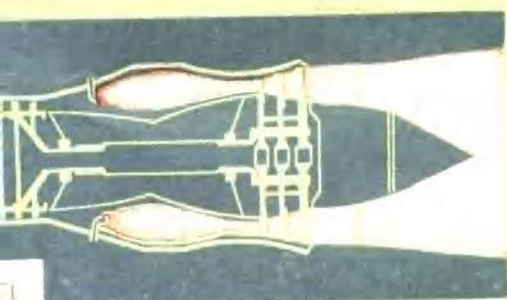


# 涡轮机高温零件温度场专题文集

## 第四集

涡轮机冷却的热试验研究



国防工业出版社

## 内 容 简 介

“涡轮机高温零件温度场专题文集”共分四集，本书是第四集。前三集是介绍对转子和叶片温度场所进行的理论分析研究。这一集是综合燃气轮机冷却方面的热试验方法和研究成果。书中包括下列四个部分：（1）叶片放热的各种边界条件（第二～五篇）；（2）叶片材料热物性参数的测试（第六～七篇）；（3）测温技术（第八～十一篇）；（4）叶片冷却效果热试验（第十二～十四篇）。

本书可供动力、航空、船舶、火箭、核动力和其它工程技术领域的科研人员以及有关企业部门的设计人员使用，亦可供动力机械、工程热物理和热力工程专业大学生及研究生参考。

### 涡轮机高温零件温度场专题文集

#### 第 四 集

涡轮机冷却的热试验研究

王补宣 葛绍岩 葛永乐 等编著

\*

国防工业出版社出版

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  $1/32$  印张 12  $3/4$  279千字

1984年1月第一版 1984年1月第一次印刷 印数：001—950册

统一书号：15034·2525 定价：1.35元

## 前 言

目前,燃气轮机已在航空、舰船、交通运输工程中和油田电站中得到广泛的应用。为了进一步提高燃气涡轮的经济性(降低耗油率和减少比重量),最有效的措施是提高燃气涡轮的进口燃气温度。例如:舰用燃气轮机的初温在1953~1968年间平均每年增加 $10^{\circ}\text{C}$ ,在1968~1972年间平均每年增加 $25^{\circ}\text{C}$ 。目前舰用燃气轮机的初温已超过 $1100^{\circ}\text{C}$ ,而航空燃气轮机的初温已超过 $1300^{\circ}\text{C}$ 。并且从目前的发展趋势来看,燃气初温还在不断地提高。这样可以使得带余热利用的燃气轮机的热效率达到60%左右。

在这样的高温下,为了保证燃气轮机的可靠工作,必须研究高温零件的温度场,这是目前国内外燃气轮机科研工作者共同关心的一个重要研究课题。它对燃气轮机的发展具有极其重要的意义。我们从六十年代起便开始从事燃气轮机高温零件温度场方面的研究工作。二十多年来在这方面做了一些理论计算和试验研究工作,一些研究成果已直接应用在国内航空、舰船和陆用燃气轮机中,在国内外各种期刊上发表了几十篇学术论文。为了全面系统地总结我国在燃气轮机高温零件温度场方面的实际工作经验和研究成果,我们编著了“涡轮机高温零件温度场专题文集”第一~四集。本书前三集着重于理论分析计算,而在这一集中则以热试验为主,全面地介绍国内各研究部门在叶片冷却方面的试验研究成果。

---

书中第一篇是综合性述评文章。第二~五篇是介绍叶片冷却时的各种放热边界条件,它包括:对流、气膜、冲击和发散冷却等。第六~七篇是介绍叶片材料热物性参数的二种比较先进的测试方法。第八~十一篇重点介绍现代测温的四种方法。第十二~十四篇提供空气冷却、蒸汽冷却和水冷却等三种冷却叶片冷却效果的热试验数据。因此,本书一方面为前三集的理论计算方法提供可靠的边界条件和热物性参数;另一方面可以从大量实验数据中证实前三集理论方法的正确性。

本书是在王补宣教授和葛绍岩研究员的指导下,由葛永乐同志组织二十多位作者集体编写的。书中各篇文章分别由直接从事该科研工作的同志执笔,然后由葛永乐同志统一整理并经修改、汇编而成。

本书手稿在写成后,曾得到上海交通大学沈维道副教授和王盛平讲师的详细审阅,711所丛日盛工程师作了文字加工和修改。711所沈岳瑞副所长、熊琳总工程师、李玉斌主任、磨庆涛主任等同志对本书的出版给予大力支持和热情关怀。作者在此谨致以衷心地感谢。

由于我们才疏学浅,经验不足,书中错误之处在所难免,我们恳切希望读者提出批评指正。

作 者

# 目 录

|        |                         |    |
|--------|-------------------------|----|
| 第一篇    | 燃气轮机冷却叶片的研究与发展 .....    | 1  |
| § 1-1  | 引言 .....                | 1  |
| § 1-2  | 冷却叶片的应用概况 .....         | 3  |
| § 1-3  | 冷却叶片的发展 .....           | 7  |
| § 1-4  | 气膜冷却和发散冷却的冷却效果 .....    | 11 |
| § 1-5  | 冷却叶片的研究方法 .....         | 17 |
| § 1-6  | 几点看法 .....              | 20 |
| 第二篇    | 燃气涡轮叶片放热的试验研究 .....     | 23 |
|        | 符号表 .....               | 23 |
| § 2-1  | 引言 .....                | 25 |
| § 2-2  | 试验方法简述 .....            | 26 |
| § 2-3  | 叶片在设计工况下的放热系数 .....     | 31 |
| § 2-4  | 叶片的放热与损失的关系 .....       | 41 |
| § 2-5  | 叶栅的放热系数与气流转折角的关系 .....  | 43 |
| § 2-6  | 叶栅的放热系数与相对节距的关系 .....   | 44 |
| § 2-7  | 叶片放热系数与其工况参数的关系 .....   | 46 |
| § 2-8  | 动试验与静试验结果的比较 .....      | 50 |
| § 2-9  | 不同作者所推荐的放热准则公式的比较 ..... | 51 |
| § 2-10 | 小结 .....                | 53 |
|        | 参考文献 .....              | 54 |
| 第三篇    | 涡轮叶片气膜冷却的基础实验研究 .....   | 57 |
| § 3-1  | 引言 .....                | 57 |
| § 3-2  | 气膜冷却的物理模型与基本方程 .....    | 59 |
| § 3-3  | 气膜冷却有效温比的测定 .....       | 62 |

|       |                                       |     |
|-------|---------------------------------------|-----|
| § 3-4 | 气膜冷却换热系数的实验研究 .....                   | 78  |
| § 3-5 | 气膜冷却流场紊流强度的测定 .....                   | 96  |
|       | 参考文献 .....                            | 105 |
| 第四篇   | 涡轮叶片冲击冷却的模拟试验研究 .....                 | 108 |
|       | 符号表 .....                             | 108 |
| § 4-1 | 引言 .....                              | 110 |
| § 4-2 | 实验装置与步骤 .....                         | 112 |
| § 4-3 | 实验数据的整理 .....                         | 115 |
| § 4-4 | 实验结果和分析 .....                         | 118 |
| § 4-5 | 本文公式(4-21)与文献[6]及[11]中公式的比较 .....     | 130 |
| § 4-6 | 结论 .....                              | 133 |
|       | 参考文献 .....                            | 134 |
|       | 附录 .....                              | 135 |
| 第五篇   | 涡轮叶片发散冷却的试验研究 .....                   | 139 |
|       | 符号表 .....                             | 139 |
| § 5-1 | 引言 .....                              | 140 |
| § 5-2 | 发散冷却机理介绍 .....                        | 141 |
| § 5-3 | 发散冷却叶片在研制中的主要问题 .....                 | 142 |
| § 5-4 | 试验手段介绍 .....                          | 146 |
| § 5-5 | 试验结果及数据分析 .....                       | 155 |
| § 5-6 | 发散冷却叶片的焊接工艺问题 .....                   | 176 |
| § 5-7 | 蒙皮的堵塞及氧化 .....                        | 183 |
| § 5-8 | 结束语 .....                             | 184 |
|       | 参考文献 .....                            | 184 |
| 第六篇   | 计算机、激光和红外技术在叶片材料热物性<br>测试中的应用研究 ..... | 185 |
| § 6-1 | 引言 .....                              | 185 |
| § 6-2 | 激光脉冲法的物理模型及原理 .....                   | 186 |
| § 6-3 | 测试装置概述 .....                          | 192 |
| § 6-4 | 计算机运控系统简介 .....                       | 195 |

|       |                                     |     |
|-------|-------------------------------------|-----|
| § 6-5 | 测试中若干传热问题的研究·····                   | 197 |
| § 6-6 | 标准样品的实验结果·····                      | 201 |
| § 6-7 | 叶片材料的实验结果·····                      | 204 |
| § 6-8 | 误差分析·····                           | 208 |
| § 6-9 | 结论·····                             | 211 |
|       | 附录·····                             | 211 |
|       | 参考文献·····                           | 214 |
| 第七篇   | 同时测定热绝缘材料 $\alpha$ 和 $\lambda$ 的常功率 |     |
|       | 平面热源法 ·····                         | 216 |
| § 7-1 | 引言·····                             | 216 |
| § 7-2 | 测试原理和装置简述·····                      | 218 |
| § 7-3 | 测试方法和技术·····                        | 221 |
| § 7-4 | 测试误差的控制·····                        | 226 |
| § 7-5 | 结束语·····                            | 232 |
|       | 参考文献·····                           | 234 |
| 第八篇   | 燃气轮机壁面温度快速测定方法的研究 ·····             | 235 |
| § 8-1 | 引言·····                             | 235 |
| § 8-2 | 高速测温装置简述·····                       | 235 |
| § 8-3 | 实验结果·····                           | 241 |
| § 8-4 | 误差估计·····                           | 243 |
|       | 参考文献·····                           | 244 |
| 第九篇   | 红外照相法图示表面温度分布的测量技术 ·····            | 245 |
| § 9-1 | 概述·····                             | 245 |
| § 9-2 | 测量原理及摄影、判读程序·····                   | 246 |
| § 9-3 | 测量仪表与试验件·····                       | 253 |
| § 9-4 | 红外测温系统的测量精确度试验·····                 | 254 |
| § 9-5 | 试验结果的讨论·····                        | 261 |
| § 9-6 | 一组热影相的判读和分析·····                    | 262 |
| § 9-7 | 结论·····                             | 265 |
|       | 参考文献·····                           | 266 |

|        |                                       |     |
|--------|---------------------------------------|-----|
| 第十篇    | 旋转零件温度的无线电遥测 .....                    | 267 |
| § 10-1 | 引言 .....                              | 267 |
| § 10-2 | 温度遥测的基本原理 .....                       | 267 |
| § 10-3 | 无线电温度遥测技术的应用实例 .....                  | 279 |
| § 10-4 | 误差分析 .....                            | 282 |
| § 10-5 | 结束语 .....                             | 285 |
| 第十一篇   | 激光全息摄影在非接触测温中的应用 .....                | 287 |
| § 11-1 | 引言 .....                              | 287 |
| § 11-2 | 理论基础 .....                            | 288 |
| § 11-3 | 涡轮喷气发动机主燃烧室出口边缘处的<br>两次曝光全息图的光路 ..... | 291 |
| § 11-4 | 实验装置简介 .....                          | 292 |
| § 11-5 | 全息图制取 .....                           | 294 |
| § 11-6 | 双曝光全息图的三种取得方法 .....                   | 295 |
| § 11-7 | 部分全息图反拍照片 .....                       | 298 |
| § 11-8 | 对火焰温度场进行定量计算 .....                    | 301 |
| § 11-9 | 应用于温度测量的实例 .....                      | 308 |
|        | 参考文献 .....                            | 310 |
| 第十二篇   | 高温涡轮气冷叶片冷却效果的试验研究 .....               | 311 |
|        | 符号表 .....                             | 311 |
| § 12-1 | 引言 .....                              | 313 |
| § 12-2 | 试验设备及测试技术 .....                       | 314 |
| § 12-3 | 试验方法及数据整理 .....                       | 320 |
| § 12-4 | 定性对比试验 .....                          | 321 |
| § 12-5 | 建立冷却效果数学表达式的定量试验 .....                | 335 |
| § 12-6 | 低温低压代替高温高压的试验方法 .....                 | 349 |
|        | 参考文献 .....                            | 356 |
| 第十三篇   | 燃气轮机叶片蒸汽冷却的试验研究 .....                 | 358 |
| § 13-1 | 引言 .....                              | 358 |

|        |                          |     |
|--------|--------------------------|-----|
| § 13-2 | 燃气轮机叶片蒸汽内冷却的试验研究方法 ..... | 360 |
| § 13-3 | 试验装置 .....               | 366 |
| § 13-4 | 测量系统 .....               | 370 |
| § 13-5 | 试验结果 .....               | 371 |
| § 13-6 | 结论 .....                 | 384 |
|        | 参考文献 .....               | 385 |
| 第十四篇   | 辐流式水冷试验性燃气涡轮 .....       | 386 |
| § 14-1 | 引言 .....                 | 386 |
| § 14-2 | 试验性燃气涡轮的结构形式 .....       | 387 |
| § 14-3 | 水路系统和测量系统 .....          | 391 |
| § 14-4 | 试验结果 .....               | 393 |
| § 14-5 | 问题和结论 .....              | 396 |

---

# 第一篇 燃气轮机冷却叶片的研究与发展

李 平、葛永乐

## § 1-1 引 言

燃气轮机具有结构紧凑,重量轻等很明显的优点,是其它原动机所无法比拟的,人们曾认为它是一种有效的原动机。然而燃气轮机在地面上的推广使用,为何迄今尚未真正达到呢?究其原因当然很多,有空气动力学上的问题,也有燃料上的问题(如蒸馏燃料的价格贵,残渣燃料有腐蚀问题),另外还有寿命和可靠性上的一些问题。这些问题得不到妥善解决时,燃气轮机的初温不能提高,这就大大限制了燃气轮机潜在能力的充分发挥。由于燃气轮机经济性的提高,主要取决于燃气初温的高低和适当压比的匹配(参看图1-1)。当然也有排气余热的利用问题,它可以提高燃气轮机的经济性,但是机组要复杂了。从燃气轮机的循环分析来看,真正影响燃气轮机发展的,还是能否有效地并可靠地提高燃气的初温问题。就简单循环而论,燃气初温从 $650^{\circ}\text{C}$ 提高到 $1200^{\circ}\text{C}$ ,循环效率可从18%提高到33%,无疑,提高燃气初温可提高燃气轮机的经济性。从图1-1中也可以看出,提高初温也可提高单位空气量的作功能力,使机组的结构更为紧凑,这对航空发动

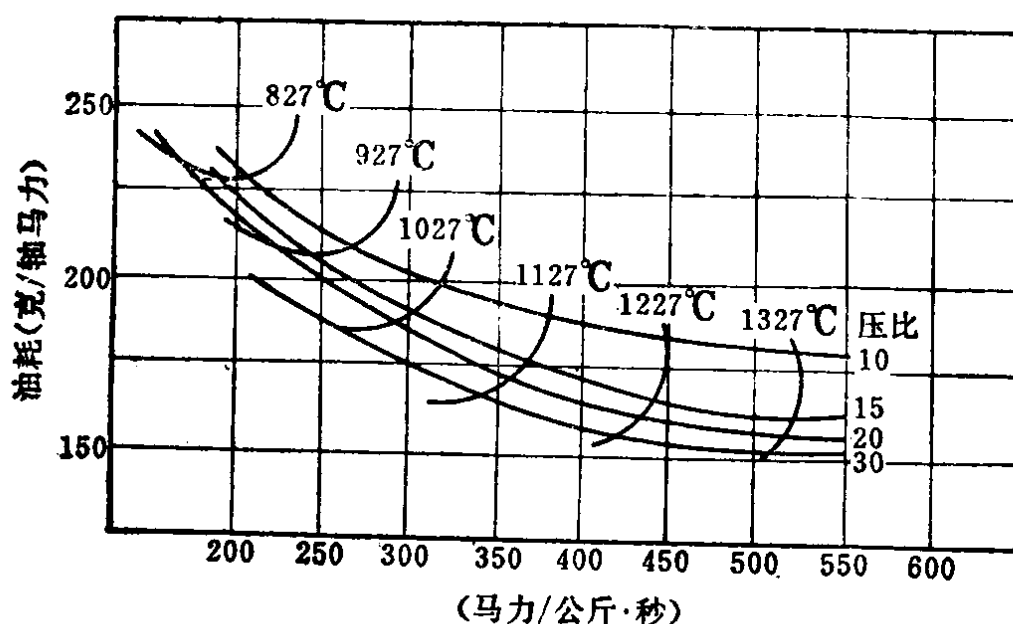


图1-1 提高初温对循环经济性和比功的影响

机来说，是一个很突出的优点，所以航空发动机的设计，近几年来总是尽量设法提高初温以减轻重量和增加推力。

在航空上，为了改善发动机的经济性和增加推力，各国都投入了大量人力和财力，以研究可靠的办法来提高初温。它的研究成果，部分是由于在高温合金上冶炼出某些耐高温的高强合金材料。可是根据近几年的发展情况来看，冶金上的研究对促进初温的提高，实际上的进展是很有限的。据报导，航空发动机近几年其初温之所以能够提高，主要是涡轮动叶和导叶采用了先进的冷却技术，它使叶片能在超过其本身软化温度下运行。这一惊人的研究成果使航空发动机取得了巨大的进展。

又据资料报导，花在冷却叶片上的研究成本费比花在研究高温合金上的要低，而获得的成果却要大得多。这也是冷却叶片的研究能获得重视并能迅速发展的一个原因。冷却叶片能发展的另一个原因是与工艺上的成就分不开的。为了满

足冷却效果上的需要，现代精密铸造技术能铸出具有 170 多个微型小孔的气膜冷却叶片，这使提高冷却效果，设计出高冷效，高寿命的冷却叶片有了可能。

## § 1-2 冷却叶片的应用概况

冷却叶片虽然早在1945年就应用在航空发动机上，但是当时由于对冷却叶片的认识不够充分，试验研究也很有限，收到的冷却效果不大。冷却叶片在航空上真正有效地大量采用还是60年代以后的事。在冷却叶片的研究中，首先要克服的困难是冷却效果和冷却叶片长期使用中的可靠性两者之间的矛盾问题。这个问题目前还不能完全从理论上得到解决，只有花很大的经济代价，不断进行冷效试验和热疲劳试验，从实践的数据积累中得来。在试验研究的开始阶段，对冷却叶片的试验，曾单纯地追求冷却效果，而忽略了冷却通道的合理分布，没有充分应用传热学的知识，没有对冷却方式的合理性进行认真的分析。所以初期设计的冷却叶片，冷却效果不高，合理性更差。如径向对流冷却叶片，在叶片的进排气边缘，即叶片的受热敏感区，应该加强冷却的地方，由于壁板很薄，无法布置冷却孔，只能靠导热进行冷却。这就使得叶片应该加强冷却的区域反而没有得到充分的冷却，这种冷却使叶片横截面上的温度分布很不均匀，在叶片的薄弱区更容易产生热应力，对叶片不利。为了改善这种不合理性，后来在叶片的进、排气边，增加冲击冷却和气膜冷却，相对地改善了径向孔冷却的不合理性。此外，从叶片的受热情况来看，径向对流冷却也是不够合理的，因为，从沿叶高的实测温度分布得知，叶片中段温度较高，靠近叶端处则较低。所

以合理的冷气流动方向，不应当是径向流动，而应当是弦向流动。这时，冷却空气也可以更合理地分配。为了更进一步增强冷却效果，在叶片的内壁应当设计弦向肋，以增加有效冷却面积。对径向对流冷却的认识，是经试验分析不断积累起来的，今天看起来很简单，但是却花了很大的经济代价的。

图1-2表示了近二十几年的航空发动机初温提高的情况。在图中标出了某些合金所能承受的最高温度。在合金温限线以上的发动机，是靠采用了冷却叶片而提高了初温。

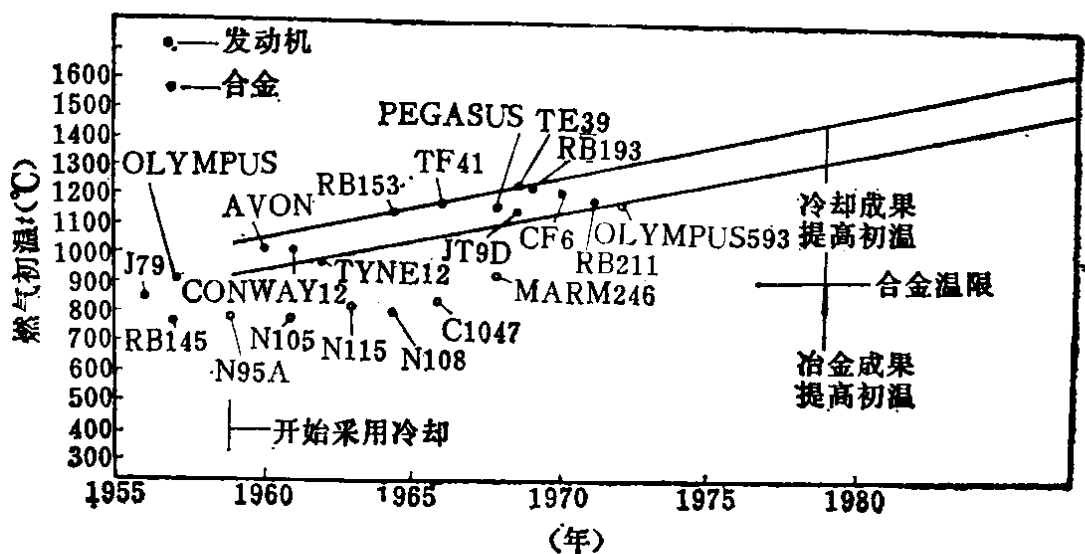


图1-2 航空发动机燃气初温的提高

世界各国为了提高初温，都是在两方面进行努力，在60年代以前主要目标是放在发展耐高温合金的研究上。在30年代的时候，采用合金结构钢制造叶片。这时叶片的承温能力在 $550^{\circ}\text{C}$ 以下。40年代初，发展了镍铬不锈钢制造叶片，这时燃气的初温提高到 $650^{\circ}\text{C}$ 。40年代以后，发展了“尼木尼”合金，燃气初温也只能提高到 $720^{\circ}\text{C}$ 左右。50年代以后一直到现在，发展了多种镍基和钴基耐热合金，这种合金的不断

改进，形成了很多不同的合金牌号，使燃气初温不断得到提高。现在使用的高温耐热合金，承受最高温度可达 $950\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 。在这段时间里，耐热合金的发展速度，大约每年提高 $10^{\circ}\text{C}$ 左右。而且研究成本非常昂贵，要进一步提高耐热合金的承温能力，可能困难很大。

60年代以后，各国发动机制造厂集中精力作开发冷却叶片的研究，以提高燃气初温。这方面的研究成果是非常显著的。从图 1-2 中可以看出，在60年代以前生产的航空发动机，初温的提高主要靠选用先进的耐热合金来实现。那时发动机的初温大约在 $920^{\circ}\text{C}$ 左右。60年代以后，开始采用冷却叶片，那时生产的达因发动机和康维发动机，其燃气初温已提高到 $930\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 。65年后的航空发动机，如斯贝发动机，采用了对流加冲击冷却，在叶片排气边采用了局部气膜冷却，燃气初温提高到 $1130^{\circ}\text{C}$ 。70年代后的航空发动机，主要采用弦向流动对流冷却，另外加冲击冷却和气膜冷却，使燃气初温提高到 $1200^{\circ}\text{C}$ 以上。最近全气膜冷却叶片的采用，使燃气初温提高到 $1350^{\circ}\text{C}$ 以上。显然，采用冷却技术来提高燃气初温比通过研究合金来提高初温的速度要大得多。

冷却技术的发展是和叶片的制造工艺紧密相关的。用微型陶瓷型芯精密铸造的叶片，气膜孔可在 $\phi 0.5$ 毫米以下。所以全气膜冷却叶片的微细小孔可以直接由精密铸造一次铸成。如用 MAR-M-509材料作的叶片，表面加渗铬铝保护层，它承受初温的能力，象奇迹一样，是在金属本身软化温度以上运行，且安全可靠，不致损坏。这是冷却叶片的、很惊人的研究成果。现在这种叶片已被应用在 JT9D<sub>7</sub>发动机上。下面是这种叶片的试验结果。

气膜冷却叶片与不冷却叶片的试验结果比较

| 名 称     | 普通叶片  | 气膜冷却叶片 |
|---------|-------|--------|
| 燃气进气温度  | 1000℃ | 1343℃  |
| 叶片进气边壁温 | 950℃  | 950℃   |
| 叶片排气边壁温 | 925℃  | 875℃   |

从表中的试验结果可以看出，气膜冷却叶片的有效性可使燃气初温提高到1350℃以上。其壁面感受的温度比不冷却叶片在1000℃燃气中的壁温要低。这是冷却研究的成果，也是精密铸造技术发展的成果。

航空冷却叶片研究的成功，大大激发了重型燃气轮机制造厂采用冷却叶片的兴趣。人们普遍认识到，陆用燃气轮机可以采用冷却技术来提高燃气初温，既可提高机组的经济性而又不降低机组的可靠性和不增加维修成本。这是近几年来人们很感兴趣问题的一个方向，特别是能源危机以来，要节省能源，要有效地利用化学燃料，就迫切需要改善燃气轮机的热效率，以提高其经济性。因此，研究叶片的冷却来发挥燃气轮机的潜在能力，使其在动力装置中更具有生命力，是一个很有实际意义的研究课题。

工业燃气轮机的冷却叶片，不能直接采用航空上的研究成果，必须根据自己的使用条件加以改进。首先一点，陆用和船用燃气轮机的进气是用靠近地面和海面的、受污染的大气，而不像航空发动机那样，吸进的是清洁的空气。这就提出要设法防止冷却通道的堵塞问题。其次是，工业用燃气轮机必须防止高温气流所含硫、钠等碱土金属对叶片壁面的腐蚀。这是陆用和船用燃气轮机为了提高寿命和可靠性必须解决的两个问题。目前设计出的工业燃气轮机其初温已达

1065°C, 其寿命可达十万小时。

### § 1-3 冷却叶片的发展

燃气轮机叶片的冷却方式可以设计成多种多样。实际上, 在燃气轮机生产的初期, 就已设想出各种冷却方式, 如空气冷却、水冷、蒸汽冷却、液态金属冷却和喷水冷却。但是, 由于当时技术上的原因和结构设计上的困难, 只有空气冷却叶片得到了发展和应用, 其他几种冷却技术只停留在试验阶段。空气冷却技术, 虽然理论论述很多, 而实际应用也只有航空工程上的一条途径。在航空工程上, 曾对冷却叶片进行了系统的研究, 如在结构强度上, 要考核冷却叶片的热疲劳和热应力, 以保证其具有安全可靠。在试验研究工作中, 要解决冷效和冷气的合理分配问题。在工艺上, 要提高加工精度, 以满足冷却叶片的设计要求。要解决好这些问题, 必须投入大量资金, 使得冷却叶片的制造成本变得非常昂贵。

在气冷叶片的发展初期, 对其设想的措施是非常简单的, 认为只要把冷气通入叶根或叶片内部的空腔就能冷却叶片, 这是很自然的直觉观念。实际上, 冷却叶片的机理并非那么简单。最初采用的空心冷却叶片, 其耗气量很大而冷却效果却很差, 迫使设计人员必须予以改进。初步的改进设想是用径向孔或径向缝隙通气冷却。后来根据试验的逐步深入, 对叶片表面的温度分布进行了详细测量, 并对冷气的流动情况作了仔细的分析, 逐步弄清楚冷气的径向流动对叶片壁面降温不利的影响。为了改善这种不利影响, 提出了更为有效的冲击冷却和局部气膜冷却, 冷气的流动方向由径向改为弦向, 提高了冷却效果, 改善了叶片壁面的温度分布, 使燃气初温

得到了更大的提高。冷却技术的每一步改进，其研究成果的进一步收效，更促进了冷却技术的发展。此外，精密浇铸技术和各种电加工技术的发展，使在冷却叶片壁面上加工出直径 $\phi 0.025\sim 0.3$ 毫米的微细小孔成为可能。这种先进的工艺技术大大帮助了气膜冷却技术的成长。

气膜冷却技术的最先进方式是发散冷却。这种冷却方式已在宇航器上应用。它是用多孔性材料制造叶型蒙皮，再焊在骨架上。对这种叶片的设计研究已有二十多年历史，它虽然现在尚未在机组上应用，但有很大希望能成为未来的燃气轮机叶片。现在已在逐步解决丝材的选择、缠绕、轧制、烧结、以及透气性试验、抗氧性试验和焊接的技术问题。这种叶片一旦成为实用产品，将可大大提高燃气轮机的初温。

图 1-3 上示出了四种形式冷却叶片提高初温的情况。这

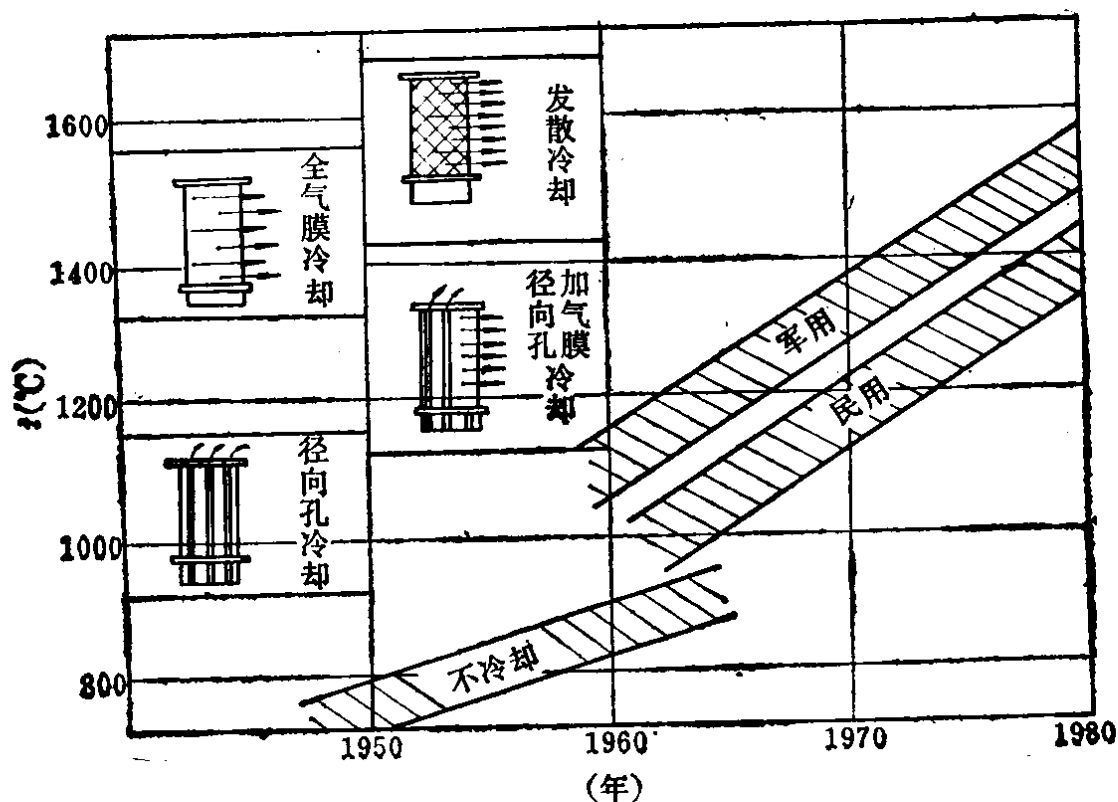


图1-3 各种冷却方式提高初温的能力