

蜂窝式密封及 汽轮机相关节能技术的研究与应用

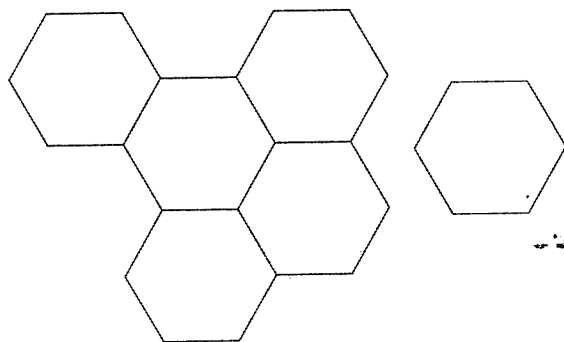
主编 张延峰 王绍民
审稿 范文献



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

蜂窝式密封及 汽轮机相关节能技术的研究与应用

主编 张延峰 王绍民
审稿 范文献



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书首次全面、系统地阐述了汽轮机上采用的蜂窝式密封技术,介绍了蜂窝式密封技术的原理和节能计算,以及它在国内典型电厂的应用情况,还介绍了其他汽封。

本书还介绍了针对国产引进型 300、600MW 汽轮机的一些节能降耗的技术和产品,包括波形板簧、防止汽流激振的措施、汽缸中分面漏汽的对策、轴封系统、凝汽器在线清扫机器人、汽轮机排汽通道的改造、阀门的修复、轴颈的修复、叶片防水蚀的喷涂保护等。

本书内容实用,能够帮助电力生产和管理人员掌握近期汽轮机改造方面的新技术,本书也可作为各层次热能动力类专业教学的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

蜂窝式密封及汽轮机相关节能技术的研究与应用/张延峰,王绍民主编. —北京:中国电力出版社,2007

ISBN 978-7-5083-5895-6

I. 蜂... II. ①张... ②王... III. 蒸汽透平-蜂窝结构-密封-节能 IV. TK263

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 100954 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 7 印张 143 千字

印数 0001—4000 册 定价 13.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

2007年3月全国人大胜利召开,会上党中央、国务院发出“节能减排”的号召,节能减排成为一项事关国计民生的百年大计、被国际社会广泛关注的政治任务;我国正式拉开了“加快节能环保技术进步,积极推进以节能减排为主要目标的设备更新和技术改造”的序幕。正是在这种形势下,爱迪电力技术集团组织电力技术领域的著名专家学者,在长期试验研究和大量应用跟踪研究的基础上,编写了本书。

蜂窝式密封作为流体密封领域的先进技术起源于20世纪90年代初期的美国,科学家们在研究解决航天飞机的液体燃料涡轮泵的密封问题时,研究出来此种新型密封技术。经过不断的完善,终于成为当今世界上最先进的密封技术之一,并开始广泛应用于航空航天领域。

爱迪电力技术集团在初步掌握国际上蜂窝式密封技术发展动向的基础上,于1995年5月组织研发队伍,投资研究将这一技术如何应用于汽轮机的密封上,来解决传统梳齿式密封技术存在的弊端,以推动汽轮机组效率和安全性能的提高。经过十多年的研究开发,终于形成了中国的汽轮机用专利技术产品——FW蜂窝式密封。2004年经上海市科委评审确定为当年的上海市A级高新技术成果转化项目并实现了产业化。

经过集团公司12年的试验研究和应用研究,蜂窝式密封技术不断被业界更多的同仁认识和接受。该技术产品不仅在上百家电厂已经运行机组上推广应用,而且也被包括哈尔滨汽轮机厂有限公司、上海汽轮机厂有限公司在内的大型汽轮机厂认可,并陆续在新机组上由局部采用到整机采用。在国产引进型300MW机组上整机应用的实践表明:这一先进技术的全面推广,每年仅300MW系列机组就可以取得近百亿元的经济效益。

为最大程度地做到节能降耗,爱迪电力技术集团会同业界的专家学者对国产引进型300、600MW机组的实际运行状况进行诊断研究,针对现存的普遍性缺陷,相继研究、开发了一系列相关节能技术和产品作为机组技术改造的菜单(对相关技术及产品书中均有介绍),供电厂广泛选择,以便进行配套改造。

该书全面地介绍蜂窝式密封技术的诞生、发展历程,密封机理、封严规律,材料特点,技术规范,生产加工、安装调试和应用效果。

为确保本书的科学性和实用性,特邀下列专家、学者作为顾问,为本书的编写提供意见,在此向他们表示感谢,他们是:

叶荣学 东北电力学院教授

王明家 华能南京电厂原总工程师

朱小令 西安热工研究院教授级高工

何立东 清华大学博士后，中国化工大学教授

李国军 铁岭电厂副总经理

全书由张延峰、王绍民编写，范文献审阅，在编写过程中褚兴全、王喆、钱志新做了大量的整理工作。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2007年5月

目 录

前言

第一章 蜂窝式密封技术	1
第一节 传统梳齿式汽封	1
第二节 蜂窝式密封	2
第三节 蜂窝式密封的性能研究	15
第四节 蜂窝式密封的节能计算	23
第五节 蜂窝式密封的应用情况	24
第六节 汽轮机组综合治理整体技术方案	38
第七节 其他密封简介	42
第二章 相关节能技术及产品	44
第一节 波形板簧	44
第二节 防止汽流激振的措施	45
第三节 汽缸中分面漏汽的原因分析及对策	64
第四节 轴封系统	71
第五节 凝汽器在线自动清洗机器人	78
第六节 汽轮机排汽通道的改造	80
第七节 阀门的修复	84
第八节 轴颈的精修技术	86
第九节 叶片防水蚀的喷涂保护	88
附录 A 蜂窝汽封和铁素体汽封试验报告	90
附录 B 水平检索报告	97
附录 C 300MW 汽轮机组热力计算	102

Chapter 1

第一章

蜂窝式密封技术

第一节 传统梳齿式汽封

汽轮机汽封主要指通流部分中的隔板内汽封、叶顶汽封，以及汽缸端部的轴端汽封。这些传统技术模式的汽封通常称为梳齿式汽封，如图 1-1 所示。理论上，汽封圈上的汽封齿数越多，漏汽经过每个汽封齿间隙时的压降越小，漏汽越少。汽封齿尖对着转子表面，由于组成每道汽封圈的各弧段都因外圆上有弹簧片而具有退让性，所以能选择较小的汽封齿漏汽间隙（因为减小了漏汽面积），这就是梳齿式汽封能减小漏汽的一种通常的解释。

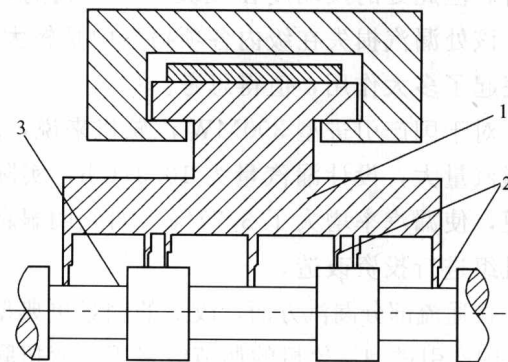


图 1-1 传统梳齿式迷宫汽封

1—静止密封环；2—密封齿；3—轴上密封凸台

传统梳齿式汽封用在转子跨度较小的小型汽轮机上，汽封齿的最大安装半径间隙约为 0.5mm；在大型汽轮机上，压力级中的最大安装半径间隙约为 0.8mm，调节级中的最大安装间隙为 1.6~2.0mm。

由于传统梳齿式是由汽封圈车出的，故汽封齿较厚，达 0.4~1mm。如此厚的齿一旦与转子发生摩擦，对转子的损害是相当严重的，也会引起机组更强烈地振动。因此，为安全起见，检修时经常将这些间隙进一步放大，以牺牲经济效益作为代价。

由于各密封腔室沿圆周漏汽量的不均匀性（由结构模式决定），就为汽流激振的产生创造了条件，尤其是对于高温高压机组，高压部分产生汽流激振的几率很大。

以国产引进型 300MW 机组为例。中国电机工程学会和西安热工研究院于 2003 年 11 月召开了第四届全国火力发电技术学术年会，会上涉及国产引进型 300MW 汽轮机的典型文章有：

- (1) 朱小令等的《国产引进型 300MW 汽轮机降耗措施研究》。
- (2) 倪定的《国产引进型 300MW 汽轮机组汽机优化进程和高中压缸改造的可行性评估》。
- (3) 王栩等的《国产引进汽轮机组设备及系统优化改进》。
- (4) 郑建淘的《国产引进型 300MW 汽轮机组实际运行煤耗高的原因分析》。

近几年来,针对国产引进型 300MW 汽轮机的降能耗改造已达到相当深入的地步,组织实施单位采用菜单的方式列出的改造项目多达几十项,让用户确认。

根据 1999 年前全国同类型 22 台机组的调查统计,国产引进型 300MW 汽轮机高压缸综合效率比设计值平均降低 7.5%。对于国产引进型 300MW 汽轮机的全面改造,各制造厂尚没有完善的方案,其中主要问题之一就是汽封方面(没有既安全可靠而又具有显著经济性能的先进密封技术是其中的重要原因)。

在汽轮机的级中,约 1/3 的损失来自漏汽损失;而动叶顶部漏汽损失则占其中的绝大部分。对该问题的解决,至今仍很不理想。

对于传统梳齿式汽封,由于结构所限,在漏汽的过程中设置的齿数较少,汽封漏汽量较大是不可避免的。鉴于受动叶顶部宽度的限制,一般叶顶汽封只能设置两道汽封齿。但此处的反动度在该级中是最大的,其漏汽间隙也比隔板内汽封处的大,因此,该处漏汽损失在级内各项损失中是较大的。面对较大的漏汽间隙,这种叶顶汽封到底起了多大作用,值得思考。

对于国产引进型 300MW 汽轮机来说,高压缸夹层漏向中压缸第 1 级动叶入口处的漏汽量大,设计漏汽量为 10.37t/h,实际漏汽量为 42.60t/h,相对于再热蒸汽量来说,使漏汽率增大了 3.77%。如此明显的漏汽损失若得不到有效的控制,就不能对机组进行投资改造。

在通流部分漏汽方面,改造的困难更典型地表现在调节级上。为了提高调节级的效率,国产引进型汽轮机的调节级采用了弯扭联合成型、曲线子午面叶型的措施。可以看到,为了挖掘该级效率上的潜力,科技人员已付出了不懈的努力,但该级叶顶的漏汽间隙达 2.5mm,漏汽面积达到了 8721.8mm²,相当于内径为 106mm 的管道。在调节级旁路了这么粗的管道,却拿不出有效的改造措施,致使调节级的效率明显低于设计值。

由此可见,对机组节能降耗的技术改造有其必要性,但却没有全面而可靠的改造手段。

第二节 蜂窝式密封

一、蜂窝式密封技术综述

在转动式涡轮机械中,工质在静子和转子之间的间隙中泄漏得越少,该设备的效率越高。因此,对应转子的外圆部分,各静子部分都相应设置了与转子表面形式相配的静子密封环。

蜂窝式密封就是在密封环内圆表面钎焊上蜂窝带。蜂窝带的网孔像蜜蜂的窝一样,是由无数正六边形芯格组成的网状物。

蜂窝式密封技术就是这种密封的设计、制造、实验、安装及计算等方面的总称。蜂窝式密封已成为当今世界上密封技术领域中最先进的一种。20 世纪 90 年代初期,美国科学家在改进航天飞机液体燃料涡轮泵的密封问题时,研究出了密封效果较好的

蜂窝状的密封结构。以 Childs 为代表的美国科学家对蜂窝式密封的材料、结构优化及加工工艺进行了大量试验研究,形成了新一代先进的密封技术。

蜂窝式密封技术很快在美国航空航天领域得到应用,美国的 F16 战斗机、U2 型飞机及航天飞机也普遍采用了这一密封技术。

随后,蜂窝式密封技术在美国汽轮机行业也开始推广应用,如美国西屋公司在近几年出口中国的 300、350、600 及 650MW 核电站机组上局部采用了此项技术(通常用在低压缸末几级动叶片顶部)。

二、蜂窝式密封在我国的研究过程

蜂窝式密封技术首先被中国飞机制造业采用,我国歼 7、歼 8 战斗机上就采用了蜂窝式密封技术。而首先将该项技术运用在我国汽轮机组上是“爱迪电力”的发明,开创了我国在汽轮机组上应用蜂窝式密封的先河。

1995 年,爱迪电力集团开始立题研发,用了 8 年时间对蜂窝式密封的密封机理、密封规律、密封效果、几何形状的优化、破坏机理及生产加工工艺几方面进行了全面深入的研究试验,积累了较为丰富的经验。

在掌握了大量研究知识的基础上,1999 年 11 月 22 日,当时的牡丹江爱迪电力技术有限公司申报专利,2000 年 10 月 7 日获得专利权。专利名称为新型汽轮机机组级间密封及轴封装置,专利号为 ZL99 2 54365 7。

“爱迪电力”科研人员在自行研制的 0~10000r/min 模拟试验机上进行了大量的性能试验和破坏试验的基础上,2002 年由爱迪电力技术集团的子公司上海丹迪电力技术有限公司开始实施产业化,并步入工业应用的历史进程。从此,在我国火电机组上打开了大规模应用新一代密封技术的新篇章。

2003 年,爱迪电力科研人员又与哈尔滨汽轮机厂设计研究中心共同在爱迪电力的模拟机上重新作了破坏性对比试验,目的是提供蜂窝式密封安全、可靠使用的确切证据,以使其得到广泛推广。

三、蜂窝式密封产业化的里程碑

2004 年,上海市科委组织专家对 FW 蜂窝式密封技术成果进行了评审鉴定,根据上海市科技情报所(国家一级科研情报机构)的“水平检索报告”和部分用户应用效果的证明,确认为当年上海市 A 级高新技术成果转化项目,从此蜂窝式密封作为我国汽轮机组新一代密封技术,开始了大规模产业化发展阶段。

四、蜂窝式密封的结构种类以及在汽轮机中的应用部位

根据密封部位转子表面的不同形式,通常将 FW 蜂窝式密封做成四种结构模式,以适应通流部分转子不同部位的形式。四种常用结构模式为:

- (1) 迷宫式蜂窝密封(图 1-2):常用在轴端和隔板。
- (2) 等高式蜂窝密封(图 1-3):常用在低压轴端。
- (3) 蜂窝式叶顶密封(图 1-4):常用在低压动叶顶部。
- (4) 蜂窝式叶顶密封(图 1-5):常用在高中压缸叶顶及隔板汽封处。

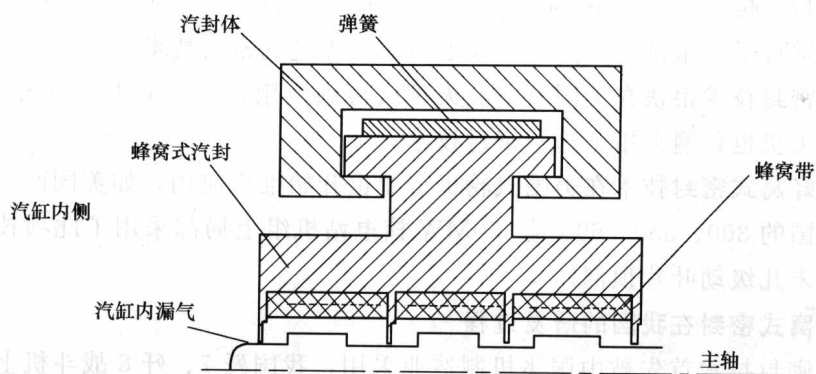


图 1-2 迷宫式蜂窝汽封

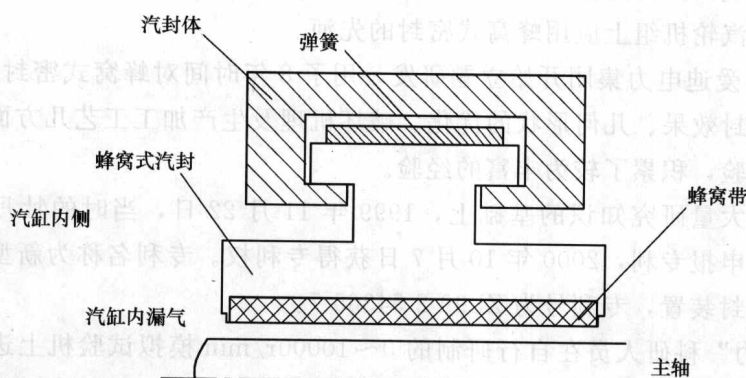


图 1-3 等高式蜂窝密封

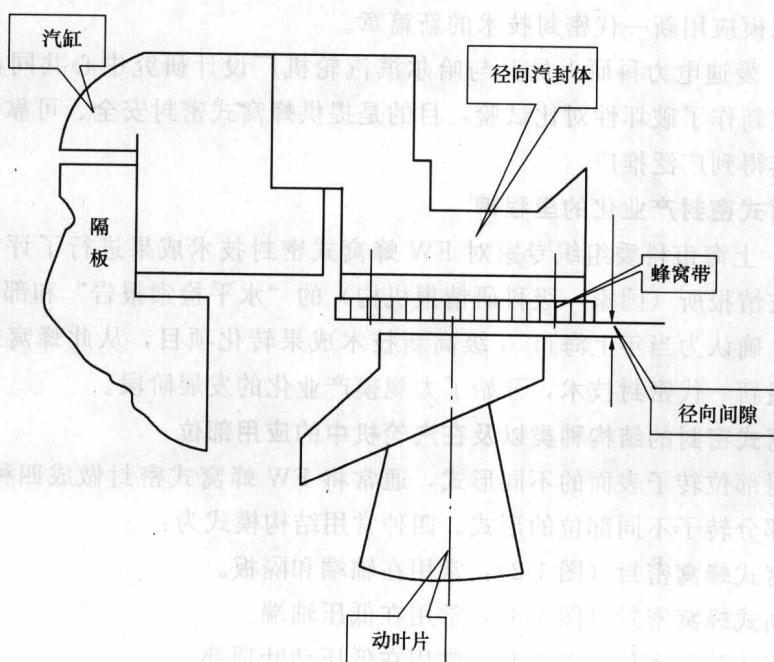


图 1-4 蜂窝式叶顶汽封

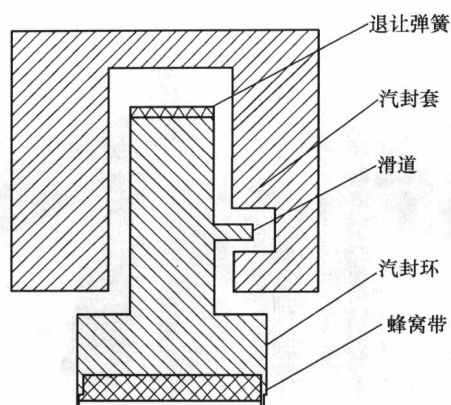


图 1-5 侧立滑道蜂窝汽封

1. 迷宫式蜂窝汽封

迷宫式蜂窝汽封的结构示意图如图 1-2 所示，通常应用在汽轮机组的高中压缸的轴端及隔板内密封部位，图 1-6~图 1-12 所示为各种类型汽轮机组的轴端或隔板内汽封。

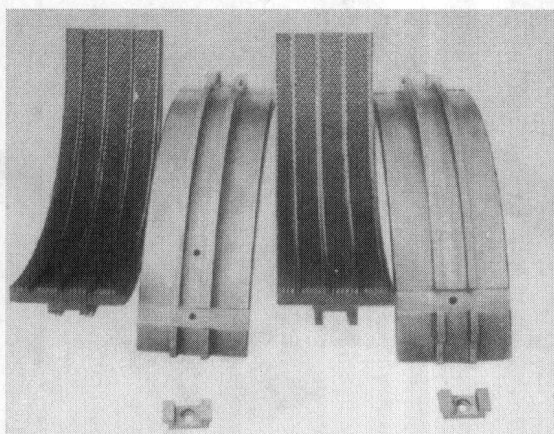


图 1-6 迷宫式蜂窝汽封形式 I

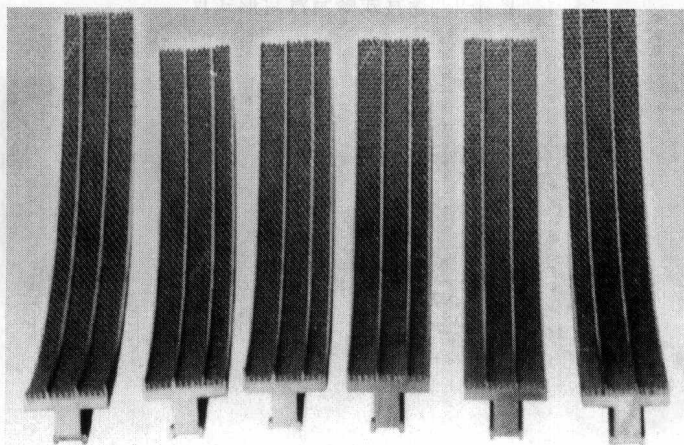


图 1-7 迷宫式蜂窝汽封形式 II

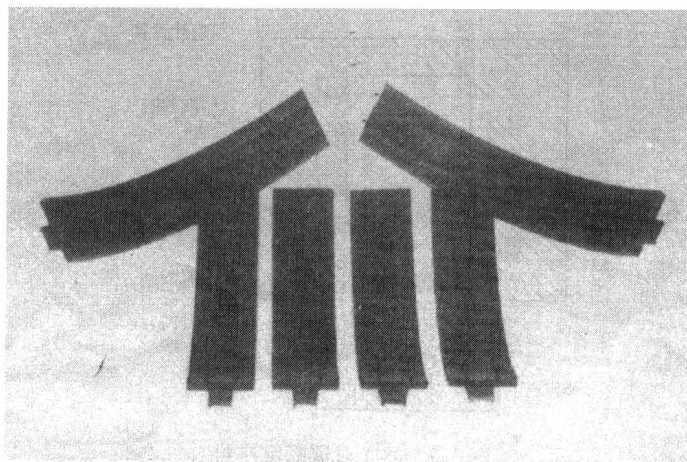


图 1-8 迷宫式蜂窝汽封形式Ⅲ

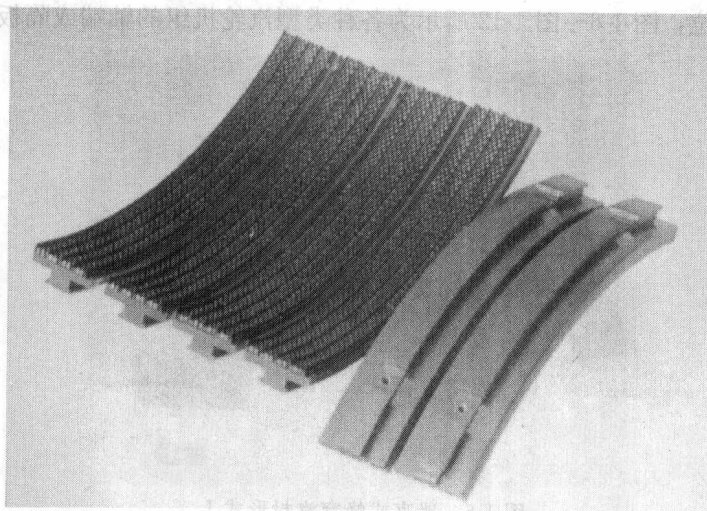


图 1-9 迷宫式蜂窝汽封形式Ⅳ

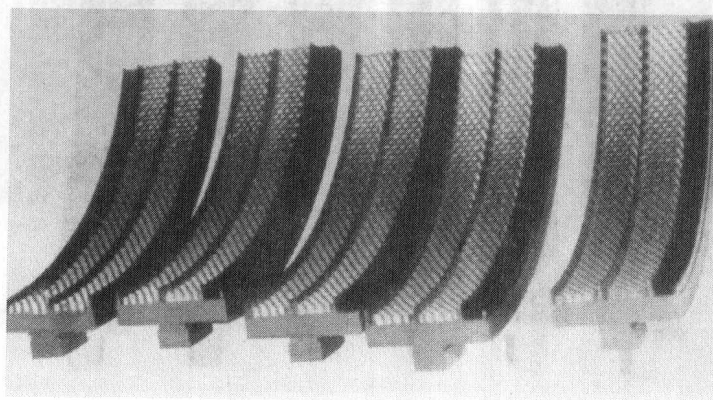


图 1-10 迷宫式蜂窝汽封形式Ⅴ

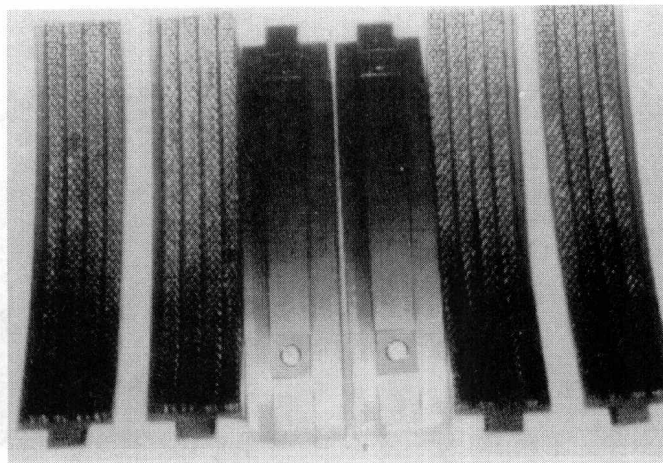


图 1-11 迷宫式蜂窝汽封形式 VI

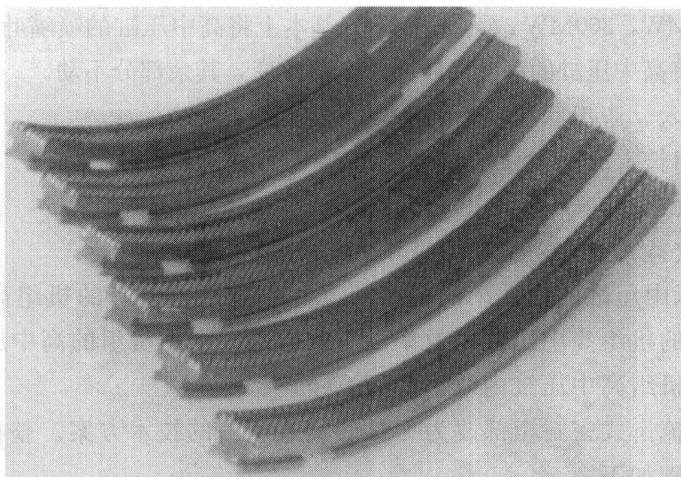


图 1-12 迷宫式蜂窝汽封形式 VII

2. 等高蜂窝式汽封

等高蜂窝式汽封的结构如图 1-3 所示，通常应用在汽轮机组低压轴端密封部位，如图 1-13 所示。

3. 蜂窝式叶顶汽封

蜂窝式叶顶汽封的结构如图 1-4 所示，通常应用在汽轮机组低压缸的动叶顶部的密封部位，如图 1-14 所示。

4. 整机改造与通流改造技术方案 的比较

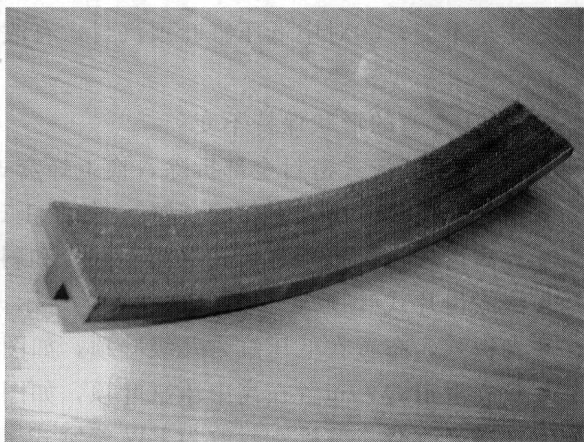


图 1-13 等高蜂窝式汽封形式

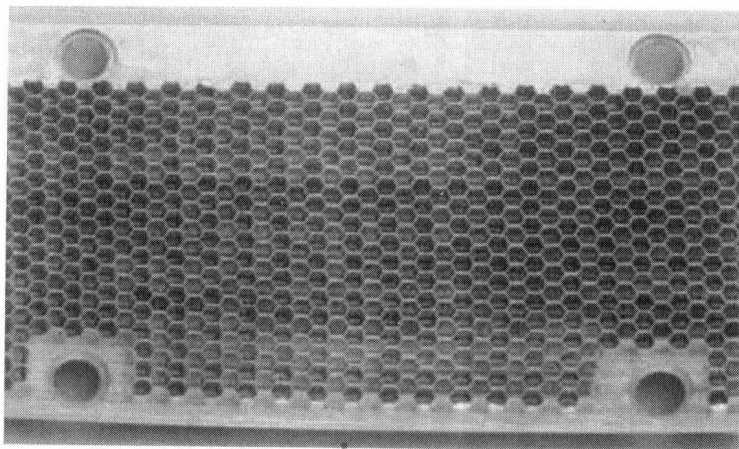


图 1-14 核电 650MW 汽轮机低压蜂窝式叶顶汽封

(1) 近年来掀起了通流改造的活动, 将 100MW 改为 110MW, 125MW 改为 135MW, 200MW 改为 220MW, 300MW 改为 330MW; 基本上将高中压缸的喷嘴叶片改型, 其余部分保留不动; 或将高中压缸的静叶动叶叶形全都改变, 其余部分不动。

就改造的投入、产出状况来看, 有以下特点:

- 1) 改造周期长: 2~6 个月。
- 2) 投资较大: 2000 万~6000 万元。
- 3) 改造的收益: 有功功率比原来增大 10%。

4) 但是高压中压缸的内效率的提高状况并不理想: ①有的机组高中压缸内效率略有改善; ②有的机组高中压缸内效率没有改善; ③个别机组的高中压缸内效率有显著提高; ④有的机组高中压缸内效率反而下降。

(2) 整机将梳齿式密封全部改为 FW 蜂窝式密封的技术方案。整机密封改为 FW 蜂窝式密封的原则如下:

- 1) 转子的形状保持, 不作任何改变 (这是很重要的工艺环节)。
- 2) 原来的汽封套 (汽封体) 基本不变: ①对轴端汽封, 完全不变; ②对隔板内汽封, 完全不变; ③对中低压缸叶顶汽封, 有改变 (视结构模式而定, 有的变, 有的不变)。
- 3) 退让弹簧的形状保持不变。
- 4) 将原来梳齿式密封全部拆除, 换上蜂窝式密封, 将不可调汽封改为可调式。
 - 迷宫式汽封 (高低齿相间布置), 如图 1-15 所示。
 - 等高齿式汽封包括直齿式 (图 1-16) 和斜齿式 (图 1-17)。
 - 镶嵌齿片式叶顶汽封如图 1-18 (a) 所示。
 - 光板式, 布置在低压缸末几级叶顶, 如图 1-19 (a) 所示。
 - 侧立滑道式, 布置在高中压缸叶顶, 如图 1-20 (a) 所示。

(3) 通流改造与整机密封改为 FW 蜂窝式密封比较。整机改造梳齿式密封为 FW 蜂窝式密封取得以下安全经济效益:

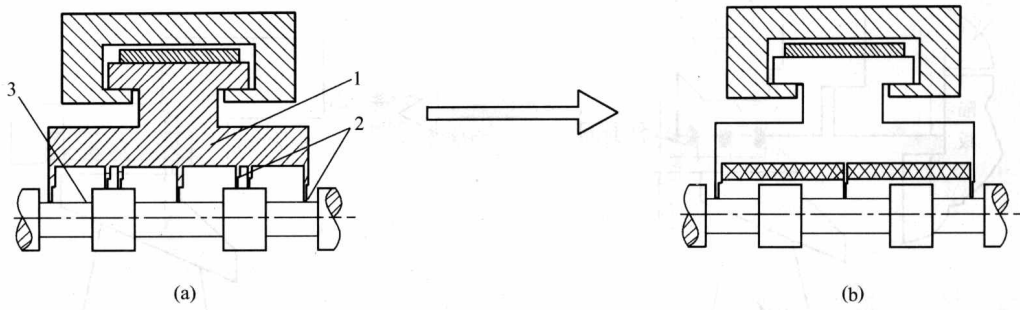


图 1-15 梳齿式汽封改为迷宫式蜂窝汽封

(a) 梳齿式汽封；(b) 迷宫式蜂窝汽封

1—静止密封环；2—密封齿；3—轴上密封凸台

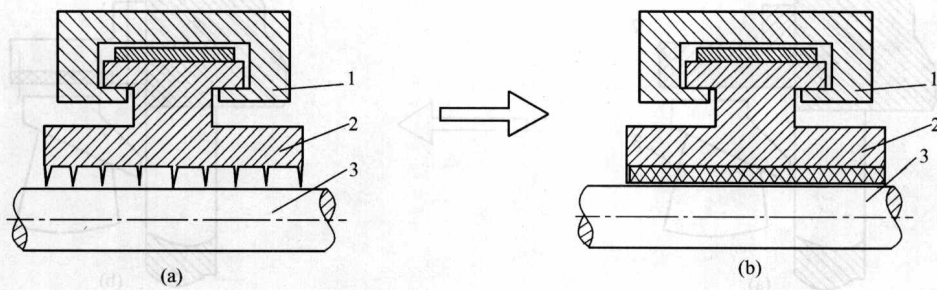


图 1-16 直齿式等高汽封改为等高蜂窝式汽封

(a) 直齿式等高汽封；(b) 等高蜂窝式汽封

1—汽封套；2—汽封环；3—轴

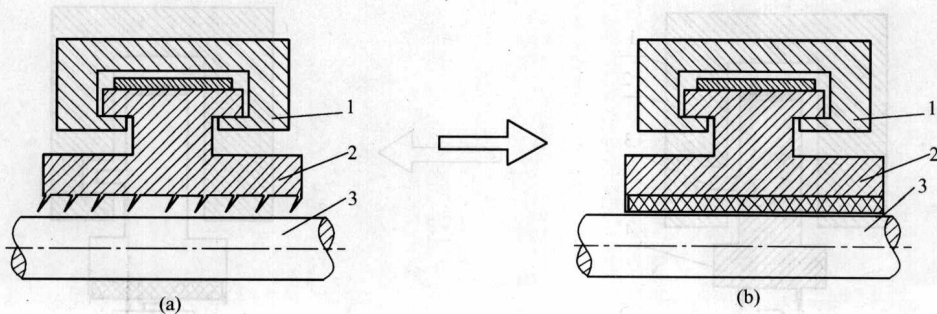


图 1-17 斜齿式等高汽封改为等高蜂窝式汽封

(a) 斜齿式等高汽封；(b) 等高蜂窝式汽封

1—汽封套；2—斜齿式汽封环；3—轴

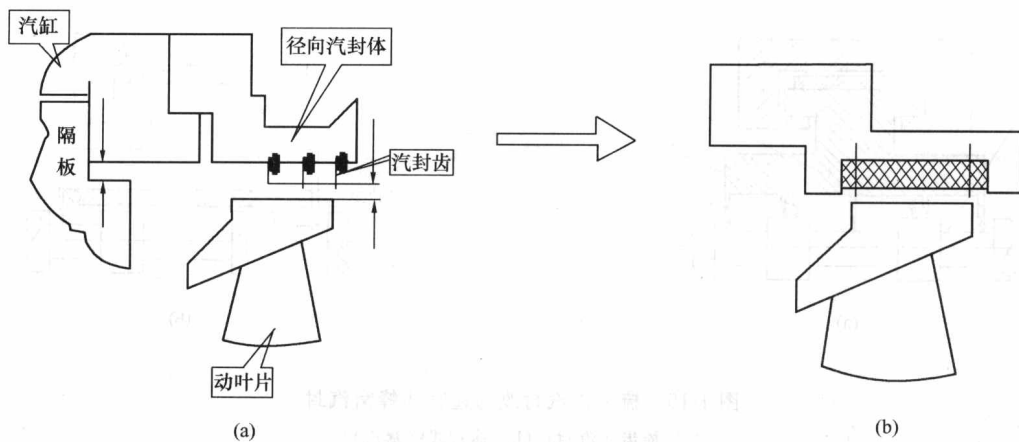


图 1-18 镶嵌齿片式叶顶汽封改为蜂窝式叶顶汽封

(a) 镶嵌齿片式叶顶汽封；(b) 蜂窝式叶顶汽封

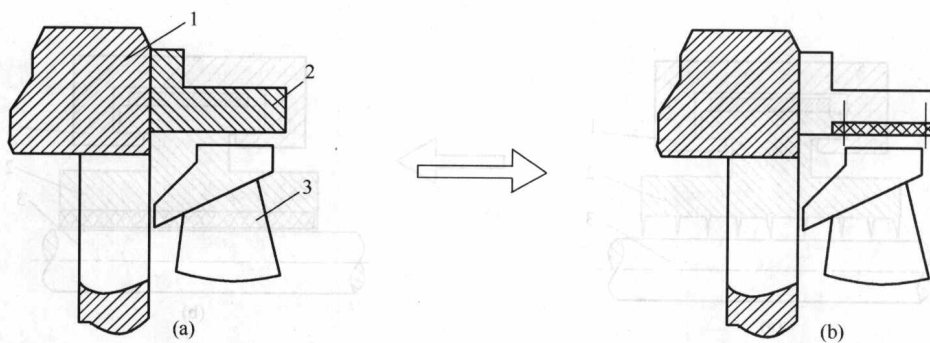


图 1-19 光板式叶顶汽封改为蜂窝式叶顶汽封

(a) 光板式叶顶汽封；(b) 蜂窝式叶顶汽封

1—隔板；2—汽封体；3—动叶片

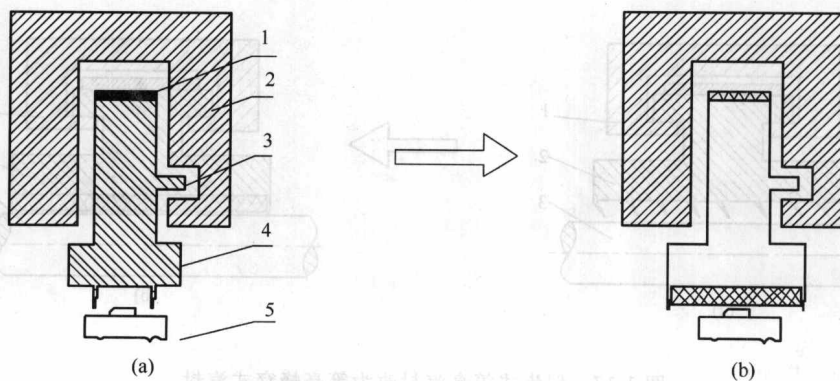


图 1-20 侧立滑道梳齿式叶顶汽封改为侧立滑道蜂窝式叶顶汽封

(a) 侧立滑道梳齿式叶顶汽封；(b) 侧立滑道蜂窝式叶顶汽封

1—弹簧；2—汽封套；3—滑销；4—汽封环；5—动叶片

1) 汽轮机内效率可以提高。冲动式汽轮机可以提高 1.2% 左右, 反冲动式 300MW 国产引进型机组可以提高 1.8% 左右。

2) 轴端汽封供汽量减少 50% 以上。

3) 真空严密度显著提高, 并长期保持。

4) 凝汽器真空得到有效改善。

5) 有效防止气流激振的发生。

6) FW 蜂窝式密封的使用寿命远大于一个大修周期。

结论: 欲取得相同的安全经济效益增量, 就投入、产出相比, 整机改造梳齿式密封为蜂窝式密封是最佳方案。其投资仅为通流改造的 1/10; 而且工期短, 在正常大修中即可完成, 几乎没有改造工作量。

五、蜂窝式密封的加工工艺流程

1. 蜂窝式密封的加工工艺流程 (对轴端及隔板内汽封而言)

迷宫式蜂窝汽封和等高式蜂窝汽封的生产流水线工艺过程通常是比较复杂的。而只有形成一整套完备的工艺标准, 才可能生产出高质量的产品。经过多年的研究开发和试验, 形成了一套完整的蜂窝式密封技术产品的生产工艺流程。

汽封环体毛坯锻造→一次热处理→机械粗加工→二次热处理→机械精加工→真空钎焊→变形校正→细加工整环 (按可调汽封的设计)→切割→包装。

2. 大直径蜂窝式叶顶汽封的加工工艺流程

一般低压缸叶顶的尺寸比较大, 当然加工难度也较大。

选择合适的板材→切割→粗处理→粗加工→热处理→精加工→真空钎焊蜂窝带→整形→包装。

3. 蜂窝式密封的关键生产工艺——真空钎焊

蜂窝带与母体金属环是通过真空钎焊工艺焊接在一起的。真空钎焊工艺的设备是真空钎焊炉, 如图 1-21 所示。密封环体与蜂窝带经过精密而严格的工艺紧密、均匀地贴在一起, 由专用工具放入钎焊炉中, 按照事先编制好的焊接工艺程序, 由计算机控制进行抽真空。当炉内真空达到要求后, 均匀缓慢升温直到 1050℃, 在此温度下, 保持规定的时间后再缓慢均匀降温, 直到达到规定的温度才能开炉门。最后将已钎焊好的蜂窝式密封取出。

蜂窝带与母体金属环是在 1050℃ 的高温下熔焊在一起的, 它是两种金属分子原子的结合。蜂窝带是钎入母体中的, 所以很牢固, 不会脱开。

真空钎焊也称光滑无渣焊接。在蜂窝带与母体金属环接触的一端事先放置了很薄的纸状焊料。纸状焊料是蜂窝带生产线上贴上去的。纸状焊料也是由专业生产厂生产的, 是与蜂窝带的物理化学性能匹配选择的。

成品焊成后无任何残渣, 全部焊料被熔焊到了焊接面, 故称光滑无渣焊接。

4. 蜂窝带的材质选择

用于汽轮机组上的蜂窝带是镍基耐高温合金, 英文名为 Hastelloy-X, 汉文译名