

國外化工用透平壓縮機 發展概況

第四分冊 製造、運行與維護

上海科學技術情報研究所

国外化工用透平压缩机发展概况

第四分册 制造、运行与维护

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海市印刷三厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 3 字数: 67,000

1975年11月第1版 1975年11月第1次印刷

印数: 1—4,500

代号: 151634·257 定价: 0.40 元

(只限国内发行)

毛主席语录

深挖洞，广积粮，不称霸。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

洋为中用。

坚持政治挂帅，加强党的领导，大搞群众运动，实行两参一改三结合，大搞技术革新和技术革命。

前 言

在毛主席革命路线指引下，举国上下，各条战线都出现了欣欣向荣的跃进景象。化学工业战线亦不例外。

化学工业战线的广大工人、干部和科技人员，根据毛主席的教导，大干快上，在研制和掌握新工艺、新技术、新设备、新材料方面取得了不少进展，符合我国特点的社会主义化学工业体系正在充实和完善，具有先进水平的化工企业和设备正在建设和投产。我们一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

透平压缩机是化工的关键设备之一，它和往复式压缩机相比，具有速度高、尺寸小、调节性能好、占地少、投资省、操作费用低、维修简便、运转平稳等优点，即使效率也有可能超过往复式压缩机。因此，近二十年来，各国都相竞把透平压缩机的应用领域扩展到化工各个部门，用于压缩各种不同的气体。随着化工设备的大容量化，透平压缩机的终压已经发展到了目前往复式压缩机所能达到的水平，且在低压缩比下越来越多地采用轴流式压缩机。显然，透平压缩机有着十分宽广的发展前途。

在我国化工行业，也十分注意采用透平压缩机，研制、生产和使用透平压缩机的单位越来越多。为了配合这方面的需要，我们会同上海机电一局情报站、上海鼓风机厂、上海压缩机厂、上海第一冷冻机厂、上海汽轮机厂，上海化工机修总厂、大隆机器厂、上海化工学院、上海机械学院、上海交通大学、上海化工研究院等单位，收集、翻译、编写了《国外化工用透平压缩机发展概况》一书。本书共分四个分册：第一分册——综述；第二分册——设计与计算；第三分册——结构与试验；第四分册——制造、运行与维护。在工作过程中，我们还得到了全国压缩机行业华东地区情报网、南京压缩机厂、南京化工学院、通用机械研究所等单位的支持，表示感谢。

由于时间仓促，水平有限，缺点错误恐难避免，希望读者批评指正。

目 录

前言

第一章 概述	(1)
一、透平压缩机的适用范围.....	(1)
二、透平压缩机的特性与限制.....	(2)
三、透平压缩机的控制.....	(4)
参考文献	
第二章 透平压缩机制造工艺进展	(5)
一、缸体.....	(5)
二、叶轮和轴.....	(5)
三、装配.....	(19)
参考文献	
第三章 透平压缩机运行进展	(20)
一、试运转.....	(23)
二、起动前准备工作.....	(24)
三、起动.....	(25)
四、负荷运行.....	(26)
五、停车.....	(27)
六、流量调节.....	(28)
七、噪音和振动.....	(28)
参考文献	
第四章 透平压缩机维护进展	(31)
一、维护.....	(33)
二、腐蚀和污染.....	(34)
三、事故.....	(36)
四、安全措施.....	(38)
参考文献	

第一章 概 述

随着透平压缩机技术的发展,不仅在化学生产过程中,而且在其他工业生产过程中,凡是需要对气体升压、重复循环的,都可广泛使用透平压缩机,首先是离心式压缩机。

但是,在按图施工后投入工艺运转时,常常会发生事故,这是因为制造厂对设备不熟,造成设计错误;然而多数情况是因为工艺运转时所需要的性能与透平压缩机的特性配合不当。例如在设计时,离心压缩机的性能特性往往在压力流量曲线图上,用一条曲线来表示。而在可变速度、可调叶片时,也由一条曲线引伸出数条曲线,因此在实际运转中,象压缩机设计方法那样的点是没有的,从而产生偏差。这种偏差,在单级压缩机情况下是较易发现的;但多级压缩机因影响因素较多,难于查明原因,会给生产带来损失。

一、透平压缩机的适用范围

目前离心式压缩机的适用范围大致为^[1,2]:

最小流量	250~350 米 ³ /小时 (排出状态)
最大流量	300,000~450,000 米 ³ /小时(吸入状态)
最大出口压力	400~500 公斤/厘米 ²
最大叶轮数	平均 9~10 个
出口允许温度	180~200°C
最大压差	平均 70~90 公斤/厘米 ²
转速	3,000~25,000 转/分
所需动力	300~100,000 马力
单缸压缩比	12~20

但在具体应用时,需作经济方面的比较。在气量小的情况下,尚需考虑到因压缩机效率急剧下降所造成的不经济情况。从处理气量和最高排出气量的关系来看,倘压缩机具有可能的条件,则应用下列数值是一个简便方法:

$$\frac{\text{标准状态的气量(标米}^3\text{/小时)}}{\text{最高排出压力(公斤/厘米}^2\text{)}} \geq 300.$$

压力高低本身与机种选择关系并不大,但如压力高,泄漏损失也随之增加。此种损失,有时占压缩机工作动力的 30%。此外,须特别注意在高压运转时,平衡受到破坏或发生故障的时候。

一个叶轮的最高压力比为 2.1 左右。叶轮产生的压头及压力比,是与气体分子量大小成正比的。通常一个叶轮产生的压头是 8,000~14,000 呎磅/磅左右。假设当压头为 10,000 呎磅/磅,分子量为 42 时,气体的压缩比为 1.5 左右。相反,当分子量为 5 时,气体的压缩比只有 1.05 左右,但由于一级压缩比较高时,叶轮进口容积与出口容积之比也要增大,因而叶轮运转范围变窄,同时叶轮的合适通道设计变得困难,所以在此情况下,需对叶轮所产生的压头作适当的调节,取出适当的压缩比范围。

在几级连续压缩的情况下,要根据容许出口温度及每个壳体的容许压差来定。每个壳体分为两个间隔,所谓组合式是在壳体的适当部位把气体旁路进行冷却,然后再进行压缩。

冷冻用的压缩机,由于进口温度一般较低,因而其压缩比应取得比常温时高。在冷冻系列的热平衡设计过程中,要求根据各种温度压力水平而定,其中在决定压力水平

时,要对每个叶轮的压缩比有一个大体的了解,这样考虑设计方案才能符合实际。然而,由于多种压力和温度的变动,会影响到其他各级,所以设计时还必须考虑到整体。

二、透平压缩机的特性与限制

透平压缩机的特性是多方面的,大体由导叶、叶轮、扩压器的组成情况决定。但实践证明,透平压缩机也受到种种限制。如果知道了它在机械和热力学方面的限制,以及为适应这些限制所采取的措施,就能很好地、经济地把压缩机用于生产过程^[3]。

1. 压力与流量

一台具有水平剖分面的压缩机,其压力限制大部分取决于连接剖分面的螺栓应力。当超过某一压力时,为维持紧密连接所需的螺栓就要多得不可想象。垂直剖分面的设计,就其性质而言能够承受相当高的压力。这时成为主要关键的是轴封,而非机壳的连接。设计人员最关心的是需加压缩的流量。压缩机的重要考虑之点是,提高机壳的设计压力,而费用增加不多。

因而如果要在低压、大流量或高压、小流量之间作出选择时,后者一般将是最经济的。

2. 进排气温度

最低的温度限制,实际上是没有的。离心压缩机的进气温度,可以低至 -260°F 。如采用低温合金,其额外费用相当少,而低温的收益却很大,即功率消耗低,单一气缸中的压缩比高,气体流量较大。

至于高温,目前实际最高温度是 450°F 。它在很大程度上取决于铝质迷宫的密封能力。

气体温度较高,意味着功率消耗较大,并且材料费用较贵。适用于 450°F 以上的离心压缩机也是有的,但由于它们的特性,价格要高得多。为此,必须使用较贵重的材

料和复杂的密封设计。

3. 转速

压缩机的转速由流量来决定。多数制造厂按机壳尺寸有许多种标准叶轮直径。在一个特定机壳尺寸中,叶轮直径是可以变化的。通常,用于最大流量的最大叶轮决定最高转速,即最大叶轮中的应力将达到许可的极限值。就工厂设计人员而言,转速的主要因素,在于选择与压缩机转速相同的原动机。一般,在原动机与压缩机之间应避免采用增速器或减速器。

通常,压缩机可根据最高转速和最少叶轮数来选择。如增加叶轮数,可降低转速。根据惯例,转速与叶轮数的平方根成反比。在用汽轮机传动时,应采用汽轮机的最佳转速,而非压缩机的最少叶轮数。应当承认,降低转速将需要较大的叶轮,这又可能甚至需要一个较大的机壳尺寸,从而转速有较大的降低,但也增大了费用。对设计人员来说,重要的是要知道所选择的转速是可以变化的,通常是减慢。

4. 升压的限制

离心压缩机的最重要方面,还是在于单个气缸中可能达到的最大升压。为了在单个气缸中得到最大的升压,采用的级数应尽量多,运行的转速应尽量高。然而一些设计方面的考虑,会影响压缩机所能容纳的最多级数。为此应选用尽可能宽的轴承跨度,以提供尽量多的地位;而且仍然具有充分的转子刚性,以防止临界转速的影响。但这方面也颇有局限性,如刚性所需的轴径显然不能大于最小叶轮的轴孔,同样,轴承也不能大于允许的轴承设计极限。复杂的润滑与密封系统,会占用轴承间的有效位置。高压所需的厚壁机壳,会进一步限制级的位置。生产过程中向压缩机加气,可能需要一个或几个空白级。联轴节的重量,会减少可能安排的级数。

临界转速限制了级数,从而又降低了可

能达到的升压。新型离心式压缩机，是典型的柔性轴机械，必须运转在一阶与二阶临界转速之间。美国石油学会规定一阶临界转速不大于正常运行转速的 60%，而二阶临界转速至少为最大运行转速的 120%。

轴承跨度、转子重量和联轴节重量都影响着临界转速。在一台两端有轴伸传动的压缩机上，转子两端各有一只大的联轴节，而临界转速会严重限制可能安排的级数。

5. 温度降低

温度控制的一个很好例子是冷冻。排气压力取决于冷凝压力。吸气压力是由冷却器的温度决定的。制冷剂的分子量是个定值，然而可借制冷剂与被压缩气体的混合来降低温度。例如普遍在一个氨制冷系统中，把液体制冷剂喷射不同的级，以大大降低级间温度。压缩机方面节省的费用，足足抵过喷射系统所增加的费用。

其他制冷系统利用在中间压力下混合较冷的气体。在最后一个叶轮里有较大的流量，可大大改善循环效率。另外的做法是，把气体通过冷却器，使压缩后的气体得到中间冷却，这样既可降低压头，又降低马力。在使用多气缸、低分子量的压缩机时，在两个气缸间冷却可能是上算的。一般利用冷却水或大气来进行中间冷却，这样可获较高的过程压力和反应压力。

例如在用制冷系统来再生氨的、装备有离心压缩机的合成氨厂，只要稍增加制冷能量就可减少合成气的压缩设备，同时把功率负荷从合成气压缩机转移到制冷压缩机方面。

把原料气冷却后，排气压力即可提高，但气缸数目和马力保持不变。氨合成塔的压力将有升高，但在较高压力下，氨的转化率增加，从而降低了再循环量，减少了氨制冷再生系统。然而制冷系统必须顾及附加的冷却需要，因此氨制冷系统的净增加，要比附加冷却负荷要小些。

又如在许多工厂中，由于气体的聚合问题，原料气压缩机受到低排气温度的限制，如乙烯、乙炔和丁二烯原料气压缩机，其排气温度不允许超过 200~250°F。总的压缩比是高的，一般至少需要三个中间冷却点。气缸具有中间冷却气体的设施。

一个组列一般包括 2~3 个气缸，每个气缸具有中间冷却用的外部喷咀。每一级压缩的压头是低的。如果不存在排气温度的限制，每级可能得到更多的压头和压缩。单个气缸上不可能提供额外的冷却点，因无法提供外部喷咀所需的轴向地位，但有可能增加叶轮。气体冷却可解决压缩机的安装费用，但效果不一。如在制冷系统中有充裕的低压工作蒸汽可资利用；或把气体和液体直接接触冷却，使只用喷咀的冷却器价格不致昂贵；或把制冷负荷和现有的制冷系统结合起来，冷却气体的效果是很好的。

6. 过程压力的变化

吸气与排气压力的变化，也会使压缩机的安装费用有所不同。在六十年代初期，离心式压缩机只用在低压、低效率的氨合成气压缩时；而小规模甲醇工厂中采用低压法后也能使用离心式压缩机。这些最新发展，显示了廉价的压缩机装置的重要性。

从压缩机制造厂角度看，理想的是被压缩气体的压力水平，应是能保证把最大流量、最大压力和最大压头能量用在一个或几个缸上。

7. 改变气体克分子量和借增加克分子量来减小压头

用离心式压缩机压缩低克分子量的气体，特别是氢和氢混合物，这在氨和甲醇生产厂以及在高压制氢和炼油过程中已经很普遍。压缩时由于分子量小，压缩比大，结果需要高的压头，特别是来自氢气厂的氢气出了问题时，因为接近纯净的氢混合物，其克分子量大约为 2.5。压缩比为 10 时，这在氢裂解原料气方面是相当普遍的，且与中间冷

却点的数目有关,约相当于1,000,000 呎的压头。在这种用途方面,根据每个缸的最高压头是160,000 呎,就需要至少六个缸。由于流量通常很小,理所当然地广泛选用了活塞式压缩机。

但当工厂规模变大,采用离心压缩机就变得经济上合理的了。为使离心式压缩机用得经济合理,就必须降低压头和减少缸数,其途径是把被压缩气体和一种重分子量气体混合起来,以增加气体的克分子量。如用于炼油厂的纯氢的压缩,可通过喷射烃(例如丙烷)来增加克子分量,或者在压缩后洗去不必要的气体来达到目的。

8. 压缩机的传动设备

压缩机装置费用的一半,用于传动设备。电动机和燃气轮机的转速灵活性较小,汽轮机则有较大的转速灵活性。在考虑汽轮机时,最重要的是高效率以及其与压缩机转速的啮合。齿轮箱不单耗费资金,造成机械损失,而且影响整个传动系统的可靠性。对于马力很大的机组,高速齿轮在技术上是不可行的。

对现代的高压力、小流量、大马力的离心式压缩机来说,越来越难于配到直接传动的冷凝式汽轮机了。最后一排叶片是关键项目之一。冷凝量越大,叶片就越大,叶片中的应力也越高。汽轮机设计人员曾试图通过两排叶片来排汽,并缩短叶片,来增加汽轮机的冷凝能力。这种汽轮机称之为双流、排汽汽轮机。甚至已制造了三流的机组,可是这种设计增加了汽轮机的轴向长度,且使增加出气口更为困难。高速压缩机最好采用背压汽轮机,但是低压蒸汽量无法得以经常利用。汽轮机能量的有效利用,将会减少这些问题。

三、透平压缩机的控制

关于透平压缩机的控制,根据具体目的,务必注意下列几点^[4,5,6]:

第一、控制一定的风压。对于流量的变化,通过保持一定的进口压力或出口压力来控制。根据压缩机运转过程中需要的条件,来保持一定的进口压力和出口压力。一般说来,如反应和分解等过程在吸入端进行,大多要有一定的进口压力;而过程在吸出端进行,要使出口压力保持一定。对风压也要作适当控制。

第二,控制一定的风量。不管压力如何,要保持一定的风量。

第三,调整风量比率。风量控制,要与其他条件按比例地进行,也就是说能保证锅炉自动调节燃烧情况。

第四,调整风压比率。为使压缩机的吸入量和排出量保持稳定,并为了防止喘振,应控制进口和出口压力的比例假设值。

第五,采用喘振防止装置。为不使压缩机在压力和流量等运转条件发生变化时产生喘振,安设了喘振防止装置。控制装置的操作方式很多,大体包括积分操作、比例操作、比例十积分操作三种,根据控制条件来选择。此外,控制方式还有机械式、油压式、空气式和电气式四种。有关特性如下:

种 类	调整范围 (%)	动力量	设备费	控制性能及稳定性
出口阀调节	100~75	很差	便宜	范围大时不好
进口阀调节	100~70	比出口阀还差	便宜	范围大时不好
可变导叶	100~70	用100—80%最好	略高	不能使用脏气体在叶轮多的情况下,效果减弱
转速变化	100~65	用70%以下最好	高	很好
旁路送风	100~0	全损	旁路时要装冷却器	无关系

参 考 文 献

- (1) 化学装置 1973年3月号30~36页
- (2) 透平压缩机械 1974年1期56页
- (3) Hydrocarbon Processing 1971年12月96~100页
- (4) Hydrocarbon Processing 1973年1月77~80页
- (5) Hydrocarbon Processing 1971年10月69页
- (6) Power 1972年1月52~53页

第二章 透平压缩机制造工艺发展

就国外来看,透平压缩机的生产特点,概括起来是“三化一试验”。以瑞士 BST 公司为例,透平压缩机的叶轮、叶片、扩压器、轴承、密封、润滑系统以及冷却系统等,都是标准化的。这样可使产品的生产过程合理化,并使产品组合化。由于采用“三化”的设计、制造和装配,产品的生产周期大大缩短,提高了产量,降低了成本。在试验研究方面也进行了大量工作,对离心式叶轮基本级、轴流式压缩机的叶片型线系列以及高压密封等都进行了这方面工作,为高效率、高压头级的设计和安全运行提供了可靠依据^[1]。由于国外比较注重于“三化一试验”,近年来在制造工艺方面有了较大改变,出现了一些新工艺和新方法。

一、缸 体

离心式和轴流式压缩机的缸体,主要采用铸造方法来制造。但是,高压离心式压缩机的外缸体,由于承受压力较高,一般采用锻造法制造。目前又发展出一种焊接缸体,适用于排气压力在 72 公斤/厘米² 的离心式压缩机和压比小于 6 的低压比轴流式压缩机^[2]。

对于较大型的缸体水平分面,大多采用高精度龙门铣床加工。如瑞士 BST 公司用于这种目的的铣床,其工作台面的特点是宽而短,为 3,200×4,000 毫米,机床精度为 0.01 毫米。对于排气压力低于 15 公斤/厘米² 的空气或近似空气的气体压缩机,其水平分面经龙门铣床精加工后,可不必再进行刮研。但对于排气压力高于 15 公斤/厘米² 的水平分面,用龙门铣床上附带的磨头进行磨

削。缸体内孔与内圆的加工,采用数控铣镗床或车镗床进行,而铣镗床的工作台是可以回转的。美国克拉克公司的大型铣镗床,其水平移动距离为 14 米,垂直移动距离为 5 米。对于轴流式或大型离心式压缩机的内孔加工,应在大型立车上进行。日本三菱重工广岛造船所的龙门铣床,其规格为:长 7.0 米,阔 1.76 米,高 1.4 米。

由于系列化,缸体的木模也可制成组合式,由多个标准段所组成的木模来并接成缸体木模,所以由此铸造成的缸体也是整体形的。

二、叶 轮 和 轴

各种压缩机最佳叶轮的制造方法,要考虑到许多因素如气体性质、温度、压力、流量和设备用途、运转条件等。关于各种制造方法的材质、用途和特点,列于第六页表内。^[3]

1. 铆接结构叶轮

由铆钉或由叶片自身上切削出的铆钉,将叶片与前后盘铆接在一起,这种结构的叶轮称作铆接结构叶轮,应用范围极广,优点主要有:

第一,从以往实际使用经验看,具有很高的可靠性;

第二,根据铆钉部分的设计,能适应高周速;

第三,与其他制造方法相比,成本较低。

铆接操作时,已能采用进口铆接机进行边转边铆的无声操作。

2. 铸造叶轮

所用材质主要有不锈钢和铝合金钢。优点主要有:

类 别	材 质	用 途	特 点
铆接结构	铬钼镍系合金钢 不锈钢	一般工业用压缩机(空气、氮气、氧气) 一般工业用、化学装置用压缩机(腐蚀性气体压缩机等)	1. 用得最广 2. 易制造 3. 经济合算
铸 造 法	不锈钢	凝水侵蚀成问题的压缩机, 腐蚀性气体压缩机等	1. 适用于耐腐蚀、高强度、高周速 2. 可随意选择叶轮形状
	铝合金钢	空气压缩机、低温气体压缩机, 冷冻机等	1. 一般经济的 2. 低温下机械性能优越 3. 重量轻 4. 可随意选择叶轮形状
焊 接 法	铬钼镍系合金钢	一般工业用、化学装置用压缩机(空气、氧气、氮气压缩机等)	1. 普遍性 2. 适用于高强度、高周速 3. 可随意选择叶轮形状
	镍铬弥散硬化钢	凝水侵蚀成问题的压缩机, 腐蚀性气体用的压缩机, 一般工业用和化学装置用压缩机, 高温气体压缩机等	1. 耐蚀、耐高温氧化性和高温强度高 2. 强度高, 适于高周速 3. 可随意选择叶轮形状
	9% 镍 钢	低温气体压缩机, 极低温用压缩机等	1. 低温下机械性能优越 2. 可随意选择叶轮形状
	铬钼系低合金钢	化学装置用、公害处理装置用、应力腐蚀性气体用压缩机(含有硫化氢及其化合物气体的压缩机等)	1. 可耐应力腐蚀 2. 可随意选择叶轮形状
锻 造 法	铝合金	低温气体压缩机, 极低温气体压缩机, 空气压缩机等	1. 普通、经济 2. 精度高, 适用于高周速 3. 重量轻 4. 在低温下机械性能优越
特殊加工法	钎焊铬钼镍系高合金钢、不锈钢	一般工业用、化学装置用的高压压缩机等	1. 精度高 2. 适用于高周速、高压
	电加工	一般工业用、化学装置用的高压压缩机, 特殊气体压缩机等	1. 耐腐蚀, 高温强度高, 高温耐氧化, 低温韧性好, 耐应力腐蚀 2. 精度高, 适用于耐高温、高压 3. 可随意选择叶轮形状

第一, 因可制成一体, 则减少加工量, 从而降低成本;

第二, 能制成任意形状;

第三, 因铝合金重量轻, 可减少整个压缩机的重量。

不锈钢铸造叶轮, 可使用于腐蚀性气体介质, 适用于较高的周速。铸造过程中的造型、浇铸、热处理等方面, 要进行严格的质量检验。对于成品, 要作下列检验: 对各叶轮的本体试片进行材料分析和机械性能试验; 进行X射线检验、磁力探伤或萤光探伤试验。

铝合金铸造叶轮, 多半用在低温气体压缩机和冷冻机上。这些铸件的设计强度相当高。对需要特别强度或高尺寸精度的叶轮, 要按“高质量铸件”特殊方法制作, 即对使用的材料成分、造型、浇铸、热处理等铸造过程进行认真的质量检查。

3. 焊接叶轮

焊接叶轮的优点如下:

第一, 强度高, 适用于高周速;

第二, 焊接的可靠性高;

第三, 可制成任意形状。

铬钼镍系合金钢叶轮, 是焊接叶轮中用

得最普遍的一种形式。镍铬弥散硬化钢叶轮，用于腐蚀性气体介质，适于高周速。弥散硬化钢由固溶处理和时效处理析出二次相，是种高强度材料。9% 镍钢叶轮，适用于极低温气体介质，例如制作低温气箱，但要防止带磁问题。特别是由于材料的低温脆性决定于冷却速度，所以要进行退火，以消除内应力。铬钼系低合金钢叶轮，适用于易引起应力腐蚀破裂的气体介质，特别是在用气体含有硫化氢及其化合物的情况下。为防止应力腐蚀破裂，需使用屈服强度小于63公斤/毫米²、洛氏硬度22以下的材料。另一方面，由于机械所需的屈服强度尽可能接近63公斤/毫米²，为满足焊接结构的条件，必须严格检验焊接、预热、后热和热处理的条件。

4. 锻造叶轮

因为铝合金在极低温下的机械性能是优越的，所以锻造铝合金叶轮适用于低温和极低温气体。而且因其材质轻，所以可减轻压缩机整体重量，适合于悬臂式单级压缩机。又因为周速高，压比大，多半用于压缩机的首级。

5. 特殊加工的叶轮

特殊加工包括多种方法，例如钎焊、电解、电蚀、精密铸造等。

钎焊是指在由盖盘上车削出的叶片与后盘之间夹放特殊焊料，用真空炉加热至超过焊料熔化温度进行焊接，其特点如下：强度高，适于高周速；精度高；可制造宽度很窄（2~3毫米）的叶轮，可适用于高压压缩机。虽然钎焊是在真空热处理炉内于 10^{-4} 毫米汞柱真空状态下进行的，但要考虑熔化状态的性质和钎焊部位需要的强度、叶轮的材质和使用条件等，应采用特殊焊料。钎焊的强度虽然在焊料熔点附近不变化，但如果用特殊的焊料能够得到80公斤/毫米²以上的连接强度，务必严格控制钎焊时的温度。

又如电解加工，是在整体锻造的毛坯件中，插入电极，用电清理出叶轮的流道。该

法优点如下：可用于特别高的温度，能加工硬质特殊钢叶轮；能严格控制用于特殊气体的材料性质；精度很高；能最大限度地利用材料自身的强度；有极高的可靠性等。因为离心式压缩机的叶轮形状复杂，加工深度深，对于电极的形状和循环绝缘液的供给方法要特别注意。

下面就叶轮和轴的制造工艺最近进展情况叙述如下。

1. 材料

制造叶轮用的材料很多，这里介绍的是近来引人注目的铸造合金^[4]和钛合金^[5]。

国外有许多种用于高温负荷长期操作的透平压缩机零件的耐热铸造合金。对于特别受压的铸造零件（透平叶轮、叶片等），这些材料都是主要以镍为基础的不均质复杂合金。之所以能达到规定强度，主要是由于结构中存在Ni₃(Al,Ti)型金属间化合物，Me₂₃C₆、Me₇C₃、M'e_nMe_n“C型碳化物，以及固溶体的相应合金化。它们在较宽的温度范围内强度很高，但价格较高。苏联有几种较经济的铸造耐热材料，如ЭИ415Л、ЭИ572Л、ЭИ787Л、ЭИ893Л钢（合金），广泛用于制造转子、转盘及叶片。

研究表明，ЭИ415Л钢和ЭИ893合金的化学成分保持在标准规定的范围以内，而ЭИ572Л钢含有较多的镍。ЭИ787Л合金除含镍较多外还加有钼。它们的化学成分见第八页。

国外试验证明，真空对各种钢和合金的机械性能和特殊使用性能有着很好的作用。真空冶炼可防止生成氧化物和氮化物膜，而精炼金属可除去溶解气体、非金属夹杂物以及对合金强度性能不利的易蒸发杂质。真空冶炼能大大改善用钛和铝合金化的合金液流动性，这样浇注温度可比空气中浇注时降低50~150°C，且可保证铸件质量。

对这些材料进行了热处理，并作了短时间断裂试验，所得结果见第九页。

钢(合金)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Al	W	Mo	Nb	V	Fe			
												S	P	B	
不大于															
20Х3МВФЛ (ЭИ415Л)	0.16~0.24	0.17~0.37	0.25~0.50	2.80~3.30	—	—	—	0.30~0.50	0.35~0.55	—	0.60~0.85	基础	0.025	0.03	—
3Х19Н9МВБТЛ (ЭИ572Л)	0.28~0.35	≤0.8	0.8~1.5	18.0~20.0	8.0~10.0	0.20~0.50	—	1.00~1.50	1.00~1.50	0.20~0.50	—	基础	0.025	0.03	—
ЭИ572НЛ	0.28~0.35	≤0.8	0.8~1.5	18.0~20.0	11.0~12.0	0.20~0.50	—	1.00~1.50	1.00~1.50	0.20~0.50	—	基础	0.025	0.03	—
ХН35ВТЮЛ (ЭИ787Л)	≤0.08	≤0.6	≤0.6	14.0~16.0	33.0~37.0	2.40~3.20	0.70~1.40	2.80~3.50	—	—	—	基础	0.02	0.03	0.02
ЭИ787НЛ	≤0.08	≤0.6	≤0.6	14.0~16.0	38.0~42.0	2.40~3.20	0.70~1.40	2.80~3.50	—	—	—	基础	0.02	0.03	0.02
ЭИ787НМЛ	≤0.08	≤0.6	≤0.6	14.0~16.0	38.0~42.0	2.40~3.20	0.70~1.40	2.80~3.50	2.0~4.0	—	—	基础	0.02	0.03	0.02
ЭИ863Л	≤0.08	≤0.5	≤0.5	15.0~17.0	基础	2.2~1.6	1.2~2.6	9.0~10.0	3.5~4.5	—	—	3.0	0.02	0.03	0.02

钢(合金)	热 处 理 规 范	短时试 验温度 (°C)	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ	ψ	$\alpha_H \cdot 10^{-1}$	布氏硬度
			МПа		%		МДж/м²	
ЭИ415Л	950~960°C 退火, 1,040~ 1,050°C 淬火, 油冷, 680°C 回火	20	600~900	800~1000	4~14	25~60	3~10	223~262
		450	700~800	750~850	3~10	20~60	4~12	—
		525	500~700	550~750	8~15	29~40	4~12	—
		550	450~570	490~570	10~16	30~50	6~12	—
ЭИ572Л	1,170~1,180°C 奥氏体化, 水冷, 750°C 时效 15 小时, 空冷	20	330~470	600~770	12~23	14~34	3~5.5	185~241
		560	200~280	440~490	13~23	17~35	4.5~7.5	—
		600	200~260	400~500	12~19	19~35	5.5~9.0	—
ЭИ572НЛ	同 上	20	350~370	620~690	8~15	11~20	3~4	166~187
		500	230~270	450~570	6~17	10~18	4.5~5.5	—
		600	230~250	400~520	7~16	10~22	5.0~7.0	—
		650	230~250	390~450	13~15	10~31	6.0	—
ЭИ787Л	1,050~1,100°C 奥氏体化, 风冷, 780~830°C 时效 16 小时, 空冷	20	540~780	660~890	3.2~8.0	4~14	3.2~6.8	277~302
		650	560~820	660~890	3.2~5.0	4~11	3.0~5.0	—
		700	560~880	670~900	3.2~5.0	4~11	3.0~4.0	—
		750	520~770	610~840	3.2~4.6	4~8	—	—
ЭИ787НЛ	同 上	20	620~670	780~830	7~8	6~9	3.2~4.0	286~311
		700	680~720	720~810	5~7	8~9	3.0~4.0	—
ЭИ787НМЛ	同 上	20	780~820	850~1000	3.5~4	4.5~8	—	286~340
		650	790	800~950	3.5~6	5~10	—	—
		700	730~790	800~940	3~5	10	—	—
		750	710~780	790~850	5~8	7~10	—	—
		800	590~630	640~680	5~8	8~14	—	—
		850	350~400	370~430	3~4	6~11	—	—
ЭИ893Л	1,160~1,180°C 奥氏体化, 风冷, 800°C 时效 12 小时, 空冷	20	600~720	650~800	4~10	6~14	3.5~9.5	241~302
		700	520~600	580~660	4~9	6~20	3~9	—
		755	530~630	610~720	4~12	10~20	3.0~9.5	—
		800	480~540	520~600	4~12	9~22	5.0~10.0	—

* Л——铸造合金, НЛ——含 Ni 量较高的铸造合金, НМЛ——含 Ni、Mo 量较高的铸造合金

研究表明, 上述合金可用作铸造透平压缩机整体叶轮和其他零件, 且在下列温度下可长期工作: ЭИ415Л—525°C, ЭИ572НЛ—

650°C, ЭИ787НЛ—750°C, ЭИ787НМЛ—800°C, ЭИ893Л—800°C。

苏联喀山压缩机厂采用两种钛合金来制

造压缩机叶轮，即用 AT—6 制造 ATKA—545—5000 透平压缩机叶轮，用 BT3—2 制造硫化氢压缩机的叶轮。这两种合金的机械性能已列入相应的技术规范。

曾对 AT—6 制成的叶轮，在氨工质、负荷状态下，以下列转速分四个阶段作叶轮强度试验：10,000, 18,000, 21,200 转/分，之后在 22,750 转/分时发生叶轮破坏。试验表明，叶轮破坏由叶片的变形开始，铆钉从铆钉孔脱出，引起主盘和轮盖分离。为此，要保证这种叶轮可靠工作，安全系数应考虑为 1.52。

但是由于钛合金所具有的高强度和低导热率，对其进行机械加工有一定困难，务必正确地选择与最佳切削状况相适应的切削工具的材料及几何形状，这样才能有效地采用钛合金。

该厂制造钛合金叶轮的工艺过程如下：车加工（叶轮的粗车和精车），铣（在主盘上形成叶片），在主盘和轮盖的铆接处钻铆钉孔并铆接（用铆钉来联结主盘和轮盖）。机械加工叶轮时，为适应高强度的钛合金，需大量、不断冷却被加工的零件。在车削、铣和钻时，用 50% 乳胶液或 10% 的硫化乳胶液作为润滑冷却液。在粗车、精车和搪削时，采用由合金钢 P9K5 或 P9K10 制成的、前角为 $8\sim 12^\circ$ 、后角为 $8\sim 10^\circ$ 的刀具，切削的进给速度为每转 0.2 毫米。铣叶轮的铣刀采用合金钢 P9K5 制成，刀具不用镶片，几何形状特点为有小前角 ($0\sim 5^\circ$)，此时铣刀的切削速度为 12~15 米/分。之后，叶轮在钻床上按钻模以手动进给钻孔，而铆接在特种电动铆钉机上进行。

2. 焊接

目前在离心式压缩机制造中占优势的钢制叶轮结构还局限于铆接结构。应用最广的是 U 形或 Z 形的圆弧叶片，它与盖盘和后盘铆在一起。再有利用带有铆钉的叶片与前盖铆接，可以改善流动情况，这样可使叶轮流

道中没有铆钉头。另外从后盘铣出叶片也达到同样的效果。这种结构要求有相当厚的叶片，因为同样还需要用铆钉连接，而铆钉孔要通过叶片和前后盖^[1]。

上述这种叶轮形状的制造费用虽然不很高，却不能实现流体力学技术上的要求。这种传统的叶轮形状，采用一个圆弧叶片，而象在增压器叶轮中那样，用一个前置轮来改善进口状况。采用空间弯曲的叶片，要求叶轮结构能在广泛范围内改变其流道形状，而不致花费很多的制造费用。解决与此有关的技术问题，可利用焊接叶轮来达到。

西德的通用电器公司和德马克公司在这方面做了不少工作^[1]。如有一叶轮，其盖盘和后盘由 St60-11 钢制成，叶片由 St50 钢制成，外径为 400 毫米，出口叶轮宽度为 12.5 毫米。在叶片与后盘焊上以后，通过在盖盘上铣出的槽，将叶片与盖盘焊上。焊接时的预热温度为 300°C ，焊条为 KbXs。后盘的焊接翘曲最大为 0.35 毫米，而盖盘的最大翘曲达 1.1 毫米。要注意叶轮在焊接后应在 650°C 下退火，以消除应力。焊接和退火都没有用特殊设备。

如考虑到叶轮的盖盘制造费用昂贵，可把叶片焊接在后盘上，而盖盘则作为自由转动的环装在轮上。为防止盖盘飞起，在其外圆周上如象刺刀插销闭锁机一样，将叶片末端做成鼻形，而在盖盘上铣出相应的槽。放上盖盘后加以转动，使之与叶片卡紧，以防在圆周方向移动。由钢和铝制成的盖盘，经超速试验后证明它不够紧固。

另有一叶轮，直径为 490 毫米，材质为调质钢。盖盘和后盘由 30CrNiMo8N 钢制成，而叶片由 37MnSi5 制成。叶片和后盖用双面角焊在整个长度上进行焊接，而盖盘仅在进口和出口处与叶片焊接。这种圆周速度达 300 米/秒的焊接叶轮，经超速经验证明是安全可靠的。

美国有公司对 24 吋管线用气体离心压

缩机的叶轮也采用了焊接结构^[7]。该公司在不改变基本设计情况下用焊接方法制造叶轮，这样可使压缩机操作更大的容量和具有更高的出口压力。所用材质为 SAE4340 钢。

盖盘和轮盘均由开式锻模锻造。该锻件可略微改变其外形而允许有附加余量，可补偿机械加工时预期产生的变形。通过分析，一般较适宜的焊条有四种，其化学成分为：

成 分		I			I			II			IV		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
碳	0.41	0.30	0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.30	0.27	0.27	0.21	0.22	0.20
锰	0.76	0.55	0.62	0.56	0.50	0.59	0.56	0.80	0.77	0.65	0.80	0.68	0.65
磷	0.012	0.016	—	—	0.011	—	—	0.020	—	—	0.025	—	—
硫	0.015	0.019	—	—	0.002	—	—	0.020	—	—	0.025	—	—
硅	0.32	0.65	—	—	0.70	—	—	0.3	—	—	0.28	—	—
镍	1.83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.55	0.61	0.69
铬	0.80	1.25	1.31	1.24	1.25	1.30	1.22	1.00	0.96	0.92	0.50	0.50	0.51
钼	0.26	0.50	0.48	0.53	0.50	0.48	0.47	—	—	—	0.20	0.20	0.20
钒	—	0.25	0.23	0.24	0.25	0.25	0.22	0.20	0.18	0.18	—	—	—

A——名义焊条成分；

B——用1%氧与99%氩混合的焊接金属成分；

C——用5%氧与95%氩混合的焊接金属成分。

试验表明，对于连接设计，最好的办法是采用能铸造的耐熔材料，用它可精确地模拟成叶片的形状，并精确形成理想的根部焊道的轮廓。该公司采用专门焊接设备来焊接不大好靠近的区域。在把盖盘和叶片焊好之后，用标准的双坡口满焊把叶片和轮盘再焊在一起。叶片要预先作出 45° 的斜面，两侧深度约为 $\frac{3}{32}$ 吋，中心处要留出 $\frac{1}{16}$ 吋的台。

焊接方法的选择，一般都是根据假定这一方法所用的设备能改装且足以达到不易接近的焊区，还要保证完美而均匀的焊接。

这方面包括有埋弧焊、金属弧焊，保护气体金属弧焊，改装的保护气体金属弧焊等。

埋弧焊在焊咀受空间限制及需附加焊药时，就不能采用。一般不用钨电极的保护气体金属弧焊接。该法可用于一切平焊及用在叶片端部的某些区域，这也是由于焊接难以接近或者盲区而受到空间限制的缘故。

保护金属弧焊，大多选用AWSE—00018

焊条。特种长度的焊条，弯成叶片的曲线形状和涂上焊药以后，一并用在这一操作中。该法虽可获得一般合格的焊接，但焊道太大，表面粗糙，飞溅太多而不能采用。

关于消极电极的保护气体金属弧焊接，务必选择电子控制的直流稳电势电源和焊丝驱动装置。最适宜的是滴入型工艺，可克服滴状过渡和雾状过渡时的缺点。此外还有两个特殊焊把，用来把叶片、盖盘焊到轮盘上，施焊处均须盲焊。

在焊接试验时，以最佳物理性能选择焊料。用上表中的焊料时，I、II和IV在焊接中均发现纵向裂纹，且往往在焊接快结束的焊处。经化学分析判明，出现热短裂纹的原因是由于含有较大数量的硫和磷。后来选择的两种焊丝，其硫和磷的含量极低，结果未发现裂纹。

用改装的机械焊把将叶片焊到盖盘上时，其焊接变量为：焊丝直径 0.045 吋，电压 21~23 伏，电流 230 安培，与工件的接触

管距离 9/16 吋, 行速 13 吋/分, 保护气体流量 50 呎³/小时。用特殊焊把将叶片—盖盘组件焊到轮盘上时, 其焊接变量为: 焊丝直径 0.045 吋, 电压 22.5~23 伏, 电流 230~240 安培, 与工件的接触管距离 1/4 吋, 行速 13 吋/分, 保护气体流量 50 呎³/小时。

日本日立制作所对离心式压缩机的叶轮制造, 普遍采用焊接工艺^[8]。当叶轮出口宽度较大时, 叶片单独弯制, 然后分别与轮盘、轮盖焊接。与叶轮出口宽度较小时, 叶片则在轮盘上铣制而成, 然后再与轮盖焊接。目前焊接叶轮最小出口宽度为 6 毫米。对于出口宽度小于 6 毫米的叶轮的加工, 则采用电火花加工。为防止焊接变形, 焊接时轮盘和轮盖的毛坯厚度都很大, 焊后再作加工。在焊接工艺方面, 采用手工电弧焊, 叶片焊缝处预先开坡口。焊接叶轮的最高使用圆周速度已达 350 米/秒。

日立制作所川崎厂的叶轮焊接工艺如下: 叶片焊缝部位开坡口, 坡口长度取决于转速。转速高的叶轮, 开口坡口长, 转速低的坡口短, 甚至可以不开坡口。叶片外周 5 毫米的突台用于轮盖定位。叶轮毛坯厚度为 25 毫米, 焊后叶轮出口处轮盘、轮盖厚度加工成 4 毫米。焊接次序为对角焊式, 将焊条由叶轮出口处延伸进流道内, 由里向外焊, 一般一道焊缝走一道即可。焊前要预热到 250~360°C, 焊接时边焊边加热。焊后为了消除应力, 要作热处理, 即加热到 650°C 保温 3 小时。焊接之后, 要用手提式风动工具修磨叶轮各处圆角, 使焊缝处保持 5~10°。焊后检查包括焊缝表面着色检查 (用渗透液检查表面有无裂纹)、磁粉探伤、X 射线检查。

3. 钎焊

钎焊叶轮适用于叶轮出口宽度很窄的场合, 是高压离心式压缩机小流量级叶轮制造的主要工艺方法之一。钎焊连接具有与本体金属同样的强度, 它与焊接相比对缺陷的敏

感性较小, 且有较大的疲劳强度。

苏联压缩机研究所曾研究了钎焊的离心压缩机叶轮, 获得了满意的结果^[10]。试验表明, 钎焊可使盖盘内表面与主盘的全部叶片牢固地联在一起, 没有缝隙, 而且主盘上的叶片可以是任何高度和任意曲率半径与出口角。钎焊叶轮的应力分布是均匀的。

所选钎焊叶轮是由 X15H9D 钢制成的, 强化热处理后的强度极限为 130 公斤/毫米², 冲击韧性为 8 公斤米/厘米²。钎焊用的焊料为 ПЖК—1000, 其强度极限为 110 公斤/毫米², 冲击韧性为 8 公斤米/厘米²。全相检查焊肉时未发现有气孔、未焊透、裂纹和其他缺陷。

叶轮采用 300~460 毫米的直径和不同型式的流道。盖盘和主盘是由奥氏体毛坯车出的半成品。在主盘上铣出叶片。叶轮内表面加工到 9 级光洁度。叶轮零件经清洗和脱脂后, 在叶片上涂 0.1~0.2 毫米厚的 ПЖК—1000 焊料, 将叶轮用定心夹具夹紧, 然后装进真空炉。

钎焊在剩余压力为 1×10^{-4} 毫米汞柱的真空中和温度为 1,250°C 时进行。为防止轮盘过大的热变形, 对叶轮要缓慢加热, 并且在焊接过程中要用仪表控制和进行观察。叶轮焊完后在真空中冷却。

焊接叶轮在 -50°C 冷处理, 并在 +350°C 热处理, 从而可以保证叶轮表面的光洁度和本体及熔接部分的机械性能。经热处理的叶轮精车外表面后, 进行平衡和超速试验。

在 БРД—500 超速试验装置上, 对直径为 360 毫米、出口宽度为 17 毫米的钎焊叶轮进行了试验。试验从 15,000 转/分开始, 然后每增加 1,000 转测量一次尺寸, 每次试验 5 分钟, 停车后再作测量, 并检查焊缝。测量结果表明, 在转速为 23,000 转/分, 即圆周速度为 432 米/秒时, 钎焊叶轮出现残余变形。不同转速下钎焊叶轮试验前后的主要尺寸如下: