

坎合技术与航空模锻液压机

Can Joint Technology and Aero Die Forging Hydraulic Press

清华大学机械工程学院 颜永年 刘长勇 张磊 曾攀 林峰 张人佶 卢青萍



颜永年

清华大学机械工程学院博士生导师。从事材料成形工艺与设备研究工作,主要为重型金属成形装备(如用于航空和国防工业的板料成形、挤压和体积模锻)和快速成形设备的研发。获国家科技进步二等奖2项,三等奖1项,发表论文290余篇(SCI检索29篇),编著图书9册。

航空工业的进步与重型模锻液压机的发展密不可分。二战期间,德国在重型模锻液压机技术上的进步为德国的飞机提供了大型的整体模锻件,大大提高了其战机性能。受此启示,此后美国、俄罗斯和法国相继发展了重型航空用模锻液压机。迄今为止,全球已建成投产的300MN以上的重型模锻液压机共18台。其中美国7台,最大吨位为450MN;俄

通过预应力钢丝缠绕技术,以坎合连接的方式将其组合为一个整体,从而替代整体铸锻结构。这种技术思路的产生,充分体现了“以小博大”的特点,是具有创新性的重型液压机设计方法。

罗斯6台,最大吨位为750MN;法国2台,最大吨位为650MN,还有于2006年投产的一台400MN液压机;此外,英国、澳大利亚和中国各1台,吨位均在300MN左右。

航空工业的发展离不开重型模锻液压机是不争的事实,我国仅有的一台300MN铝合金模锻液压机早已不能满足现代航空工业的发展需求。早在2002年,中国工程院成立了以两院院士师昌绪先生为组长的咨询

研究组,对我国建造8万t模锻液压机进行调研。研究认为我国现阶段启动建设8万t模锻液压机大型装备项目,对航空、舰船、航天、兵器、核工业等行业十分必要且完全可行。在我国要发展自主的航空工业,独立研制并制造大飞机的大背景下,中国二重和西安阎良航空产业基地分别立项了8万t和4万t航空模锻液压机项目,为我国飞机制造业提供优质的大型整体航空模锻件。

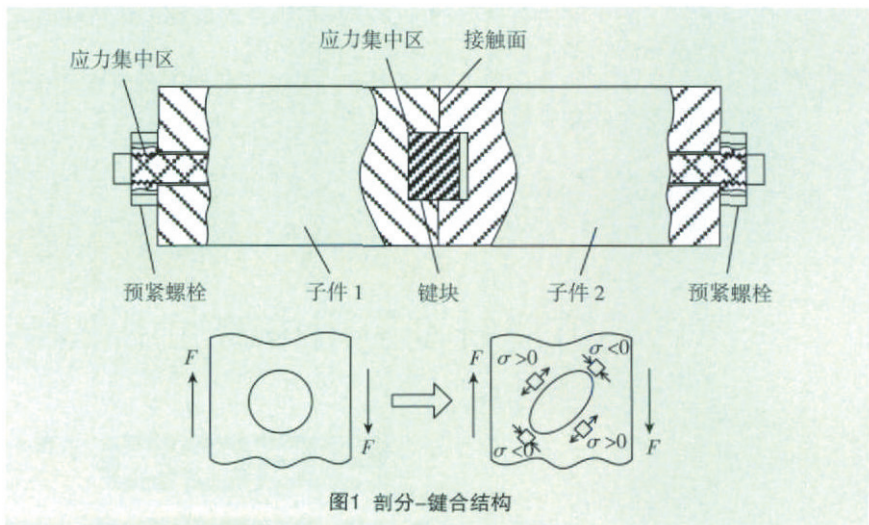


图1 剖分-键合结构

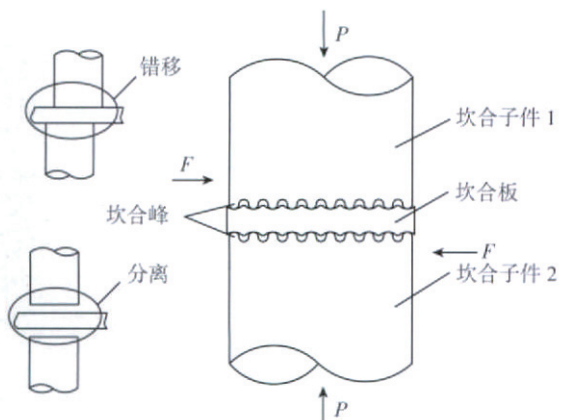


图2 剖分-坎合结构

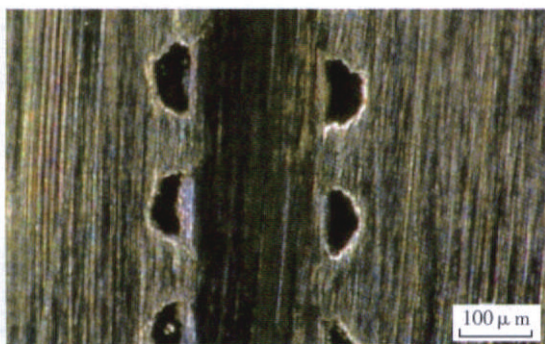


图3 多峰坎合嵌入式结构照片

然而重型模锻液压机的设计与制造面临着巨大的困难和风险,其加工、制造和运输的难度都处于极限状态,且投资巨大,周期长。为解决上述问题,对重型液压机结构设计的研究与改进从来没有停止过。最早的重型模锻液压机普遍采用传统的“三梁四柱”结构,且机架为非预应力框架,这种结构的典型代表是俄罗斯的750MN模锻液压机,由于其承载结构缺乏预应力保护,材料许用力仅为40~60MPa,从而导致结构的尺寸和重量极为庞大,总重达到了26000t,且大量采用重型铸件和锻件,加工制造难度大,疲劳性能不高。20世纪70年代,出现了粗螺栓预紧结构,这种结构采用少量的粗螺栓对承载机架施加预紧力,材料的许用应力得以提高至100~150MPa,疲劳性能也有所提高。由于大型预应力粗螺栓制造的难度大,且许用应力不宜太高,此后又出现了细螺栓预紧结

构,用多根细螺栓替代少量的粗螺栓施加预紧力,从而使许用应力提高至150~200MPa。即便如此,重型液压机的设计仍然面临巨大的困难和风险。预应力钢丝缠绕技术和剖分-坎合技术的发展极大地解决了这个问题,其基本思路为将重型承载结构——尺寸和重量庞大,传统手段难以加工的重型零件,剖分为多个子件,从而降低制造难度和风险,方便运输;然后通过预应力钢丝缠绕技术,以坎合连接的方式将其组合为一个整体,从而替代整体铸锻结构。这种技术思路的产生,充分体现了“以小博大”的特点,是具有创新性的重型液压机设计方法。

2006年以来,清华大学在重型液压机的设计上突破传统思维,采用预应力钢丝缠绕技术和坎合技术先后设计了多台300MN以上的重型液压机,其中包括已经投产的世界上最大的360MN/150MN钢管垂直挤压机组,在建的400MN航空精密模锻液压机和昆山300MN核电锻件液压机。本文以航空工业为背景,介绍了坎合技术在航空模锻液压机上的应用。

剖分-键合与剖分-坎合

1 剖分-键合结构

在坎合技术出现以前,子件组合均采用键与键孔配合的方式来防止子件之间的错移以及承受剪应力,子件通过螺栓组合为一个整体。

这种结构最为严重的问题为键孔的应力集中,在承受剪应力时,由于键孔变形而使键孔周围出现剪应力集中,使得裂纹易于萌生和扩展,高度键合的结构在实践中证明是不可靠的。上海20世纪60年代120MN自由锻液压机的下横梁自重540t,曾设计为剖分-键合结构,但最终这种方法改为电渣焊结构。图1是剖分-键合结构示意图。

2 剖分-坎合结构

所谓剖分-坎合结构(见图2),是将子件剖分面上进行坎合化处理,加工成多峰结构,并在子件之间加较软的中间垫板(坎合板),通过强大的预应力场,使剖分面上的多峰结构与坎合板之间形成不可逆的多峰嵌入式结构(见图3),这种结构通过不可逆的塑性变形实现,从而增加子件剖分面上的抗剪能力。通过试验测试证明,坎合连接能够达到的抗剪系数(坎合系数)比摩擦系数高出很多,可以达到0.6以上(见图4),足以满足工程上对于抗剪能力的要求。

剖分-坎合技术与400MN航空模锻液压机

400MN航空模锻液压机是为我国航空工业生产大型、关键锻件的关键设备,其设计达到国际先进水平。

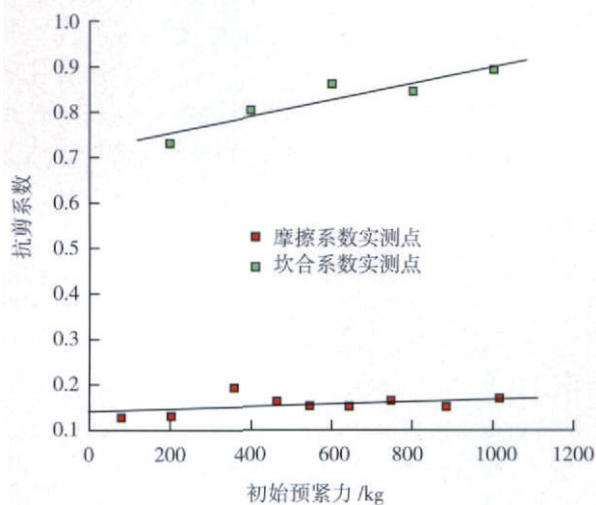


图4 坎合系数与摩擦系数比较

该压机采用 60MPa 泵直接传动液压系统,压制速度达到 60mm/s,采用 8 缸同步平衡系统,实时调节活动横梁的水平精度,设计偏心距为 200mm,在承受较大偏载时仍然可保证零部件的成形精度,为实现精密模锻提供了保证。

机架是重型液压机中最为重要的结构部件,是巨大能量聚集、传递和释放的载体,其设计的强度、刚度以及可靠性极为重要。400MN 航空

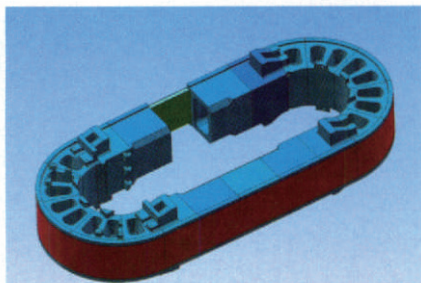


图5 400MN航空模锻压机剖分-坎合机架

模锻液压机的机架采用拱形梁+垫梁的方式,拱梁和立柱分别被剖分为 5 个子件,整个机架共 20 个子件,单件的重量均在 80t 以下,大大减小了单件的重量和制造难度(见图 5)。各个子件之间的剖分面通过坎合化处理提高其坎合系数,通过钢丝施加强大的预应力场将 20 个子件缠绕成为一个预应力承载框架,该机架的重量为 1400t 左右,若采用传统制造方法,难度极大。采用“以小搏大”的预应力剖分-坎合技术是制造该类重型承载机架的有效技术路线。

在我国首台预应力钢丝缠绕剖分-坎合压机——360MN 垂直挤压机中,仅对拱梁进行了剖分-坎合,且仅分为 3 个子件,子件之间采用滚花处理形成坎合的多峰结构,其处理方法见图 6。而立柱则采用分段铸造,然后焊接为一个整体。这种结构相对传统的“三梁四柱”式压机,在制造难度上已经大大降低,然而由于立柱为焊接整体结构,其重量仍然在 200t 以上。

为进一步降低制造难度,在经过

充分论证,尤其是通过精确的数值计算之后,(对立柱剖分-坎合后的机架进行有限元分析,对各种可能的状态,包括中心载荷、前后偏载、左右偏载等进行计算),发现在坎合系数为 0.3 时,将拱梁和立柱分别剖分为 5 个子件,在强大的预应力场作用下,压机工作时不会发生剖分面上的错移和分开,剖分-坎合的机架与整体机架具有相同的变形协调性。偏载时,即使完全通过立柱导向承受侧推力,坎合面仍然保持足够的抗剪能力。360MN 挤压机的实践和充分的理论分析为我国 400MN 航空模锻压机的设计提供了科学的依据,重型承载机架的设计发展出了一条全新的技术路线。

对于剖分-坎合技术的认识和应用是一个在理论和实践中不断深化的过程,迄今为止,坎合技术已经在重型机架、重型活动横梁等液压机的大型部件中获得应用。

400MN 航空模锻液压机的 1:10 模型试验

400MN 航空模锻压机是世界上首台单缸 400MN 液压机,首次将立柱分为 5 个子件并采用坎合连接,主缸采用预应力钢丝缠绕的液压缸,通过理论分析和数值计算证明这种技术方案是可行的。而模型试验则是验证其可靠性的最根本保证,通过自行设计的加载泵站对主缸和机架进行加载试验,分析其位移及应力应变场,根据相似原理推测其实物的位移及应力应变场分布。模型试验见

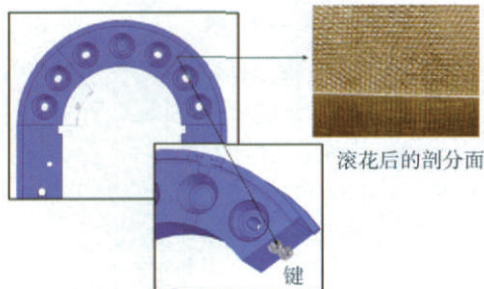


图6 我国360MN垂直挤压机的拱梁坎合

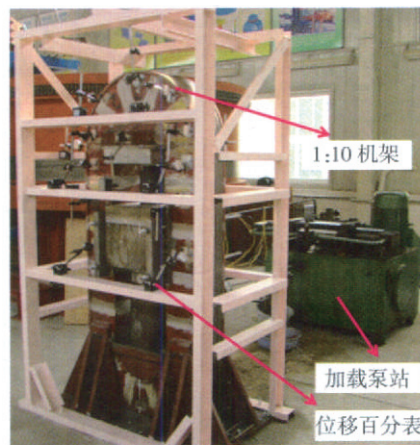


图7 1:10机架模型试验

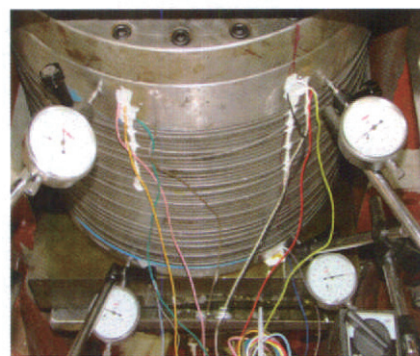


图8 1:10主缸模型试验

图 7 和图 8。试验证明,预应力剖分-坎合结构在 400MN 航空模锻压机上的应用是可靠的。

结束语

本文以航空工业为背景,阐述了重型模锻压机与航空工业的关系,并针对传统的重型压机设计所存在的困难,介绍了清华大学发明的预应力剖分-坎合技术,阐述了其内涵及其在我国最新的 400MN 航空模锻压机上的应用。实践证明,预应力剖分-坎合技术是一条可行的具有创新性的重型装备制造技术路线,很好地解决了重型装备设计中的问题,降低了制造难度和风险,提高了设备的可靠性,是对重型装备行业的重要贡献,同时必将大大推进我国航空模锻件整体锻造的水平。

(责编 岩石)