

钛合金热成形模具

Thermoforming Mold for Titanium Alloy

中航工业北京航空制造工程研究所 李鹏亮 张 志

[摘要] 由于钛合金在力学性能上具有屈强比高、弹性模量小等特点,成形上表现为变形范围窄、易开裂、回弹大和尺寸精度难于保证。为克服上述钛合金成形难点,一般需将其加热到较高的温度进行成形。本文重点讨论了钛合金热成形模具的材料选择及设计,并提出了热成形模具标准化是未来的重点发展方向。

关键词: 钛合金 热成形模具

[ABSTRACT] Since the titanium alloy having a high yield ratio, a low elastic modulus and other characteristics on the mechanical properties, it causes narrow deformation range, easily cracking, large springback and difficulty to ensure dimension accuracy. To overcome the above difficulties, it is generally necessary for titanium alloy forming to be heated to a high temperature. the titanium alloy thermoforming mold material selection and design are focused on. It is also proposed that the standardization of thermoforming mold is the future development tendency.

Keywords: Titanium alloy Thermoforming mold

热成形一般是指将金属材料加热至再结晶温度以上,利用金属材料在高温下塑性提高、变形抗力降低的特点制造零件的一种压力加工技术。本文仅就关于钛合金钣金零件成形所用模具进行简要探讨。

由于钛合金具有比强度高、耐腐蚀等特点,广泛应用于航空、航天、化工、船舶和医疗等领域。特别是近年来航空、航天领域对钛合金钣金零件的需求显著增加,因此对成形模具的需求也呈明显的上升趋势。钛合金在力学性能上具有屈强比高、弹性模量小等特点,反映在成形上为变形范围窄、易开裂、回弹大和尺寸精度难于保证。为克服上述钛合金成形难点,一般需将其加热到较高的温度进行成形。由于这种在高温下工作的特点,所使用的成形模具比常温状态下使用的模具具有其特殊性(图1)。

1 热成形模具材料的选择

对于钛合金而言,热成形模具绝大部分使用温度介于600~750℃之间,少部分工作温度接近800℃。因此要保证成形模具在如此高的温度长期工作,选择适合的

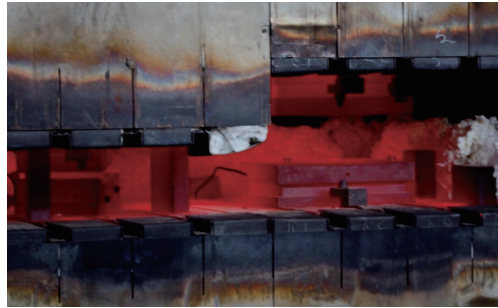


图1 热成形模具工作示意图

Fig.1 Working diagram of thermoforming mold

模具材料至关重要,应着重考虑如下5点因素。

1.1 模具材料须具备良好的抗高温氧化性能

制造模具的金属材料在高温条件下暴露于大气环境中,其表面会很快与空气中的氧产生反应而形成氧化膜。为稳定地进行钛板成形,要求模具表面形成的氧化膜致密坚固以阻止模具材料的进一步氧化。如形成的氧化膜疏松,随时间延长氧化膜会逐渐增厚,黑色金属在高温状态下氧化现象更为明显。当氧化膜达到一定厚度时将从基体上脱落。通常状态下氧化物的硬度高于金属本身和钛材的硬度,因此氧化膜脱落后形成的片状或粒状残渣对成形的零件及成形模具表面会造成损伤,同时改变模具型面尺寸,影响成形零件的尺寸和形状。因此选择具有良好抗高温氧化能力的材料是制作热成形模具的先决条件。

1.2 模具材料应具备较高的相变温度

一般而言,金属材料均具有热胀冷缩的物理特征。在加热状态下其实际几何尺寸要大于常温状态下的尺寸。因此热成形模具在高温条件下工作时,处于一种膨胀状态,理论上冷却后会恢复到原来加工时的尺寸,但实际情况并非如此。由于受热膨胀产生的热应力作用金属材料会产生一定变形,经有限次热循环后,这种由于热应力产生的变形会有部分残存下来,造成模具宏观几何尺寸增大,这种现象称为金属的生长性。当金属在相变点以上温度反复加热时这种现象更加明显,其结果将对成形零件的尺寸精度产生不良影响。因此选择具有较高相变温度的材料制作模具,有利于提高模具的尺寸稳定性,保证成形零件的尺寸精度。依据钛合金热成形模具的工作温度,通常模具材料的相变点应大于

850℃。

1.3 模具材料应具有高的热疲劳性能

热成形模具在工作中经常受到较大的热冲击作用。成形一个零件的时间一般小于 30min,对于绝大部分零件成形时间可能短至 5min 以内。因此频繁地装卸零件是热成形工作的一个特点。如此频繁地装卸零件,必然伴随频繁的炉门开闭。因此会使模具经常处于急冷急热的交替变化中,其表面与内部温差可达数十摄氏度,从而在模具表面产生较大的拉压应力循环。这种反复交替的应力循环会很快在金属模具表面形成热疲劳裂纹,缩短模具的使用寿命。可见制造模具的材料具有较高的抗热疲劳能力对热成形模具至关重要。

1.4 取材方便,成本低廉

热成形模具材料不仅应当具备上述良好的物理化学性能,同时还应具备取材方便价格低廉的特性。从 20 世纪 60 年代至今坚持这一选材标准一直是我国制造热成形模具的一条基本原则,在市场条件下更是这样。在 20 世纪 60~70 年代国家经济力量薄弱,处于外国封锁时期,只能根据国内资源特点选择材料。如国外广泛采用的高镍、高铬耐热材料,具备优良的综合高温力学性能,非常适合制造热成形模具。但由于价格昂贵、我国镍铬资源短缺、同时加工困难,国内很少采用这些材料制造热成形模具,多采用含锰、钨、钼的合金材料。而普遍采用耐高温铸铁,如中硅钼、中硅铝耐热铸铁。随着改革开放的不断深入,国内的工业现代化水平已经有了较大提高,特别是近年来加工工艺技术的普遍提高,在模具制造业已无难题可言,加工成本也相对降低,加之材料的市场化、国际化的趋势不断增强,为热成形模具材料的选择提供了更广阔空间。20 世纪 90 年代以前,常用的耐热铸铁价格不到不锈钢价格的 1/3,加工也更容易。进入 21 世纪后,特别是近几年,两种材料的采购价格已非常接近。但两种材料相较,在使用性能上高镍、高铬不锈钢更优于耐热铸铁。从目前的实际看,随着钛合金零件的生产量加大,耐热铸铁材料制造的模具由于表面氧化现象导致的零件压伤明显高于用不锈钢制造的模具。此外,在常温下耐热铸铁脆性更大,不耐搬运和储存。同时可修性差,即很难用焊接等方法修复模具因服役产生的裂纹、压伤等缺陷。而耐热合金制造模具则没有这些弊端,非常便于维修。因此就当前生产现状,选用高镍、高铬的材料制造热成形模具,虽比用耐热铸铁成本稍高,但更有利于零件的规模化生产,综合成本会更低。目前常用的钛合金热成形模具材料如表 1 所示。

1.5 加工方便

热成形模具材料除了应具备上述几点要求,同时还应满足加工方便的要求。因为在模具生产中加工成本

表1 常用钛合金热成形模具材料^[1]

材料名称	相变温度 /℃	最高使用温度 /℃	平均线膨胀系数 $\alpha / (10^{-6} \text{m} \cdot \text{C}^{-1})$
中硅铝球墨铸铁	>946	900	14.6
中硅钼球墨铸铁 I	>850	750	13.0
中硅钼球墨铸铁 II	>850	800	12.0
中硅钼铬球墨铸铁	>900	820	13.7
中硅球墨铸铁 I	>890	800	11.3
中硅球墨铸铁 II	>910	750	14.0
高硅球墨铸铁	>950	900	13.9
不锈钢	>1000	750~800	18

占有相当大的比重。特别是高镍高铬的耐热合金除本身材料贵重外,机械加工十分困难,对刀具要求高,较一般的模具材料要耗费更多的时间,制造一套模具的成本很高。对一般要求成形温度不高,批量小的零件应尽量避免选用。

2 热成形模具设计

热成形模具设计应综合考虑零件的生产数量、成形零件的复杂程度、质量要求等因素。在此基础上选择模具材料和加工方法、热成形的具体工艺及实施工艺的设备条件等。但最主要的是透彻分析具体零件的几何形状、制定恰当的成形技术方案,如零件是否仅是纯粹的弯曲、拉深、翻边或局部成形等基本成形特征,还是包含上述某几种基本成形特征的复合形式。在对具体零件充分了解并确定技术方案后才能进行详细的模具设计。

2.1 模具结构设计

进行详细模具设计应首先确定模具结构。热成形模具结构一般应包括其与成形设备的连接固定方式、上下模的对合定位方式、毛料在模具上的定位方式、零件成形后如何卸取方式、为便于测量温度设置的电偶孔及为搬运方便设置的起吊方式等。对一些框梁类零件可能还需设置侧压结构。

(1) 模具与设备的连接固定方式。

现在国内普遍使用的热成形机床大多具备金属加热平台,上、下加热平台均开有供安装模具用的 T 形槽。因此热成形模具与设备的连接固定方式基本以压板螺钉为主,在模具上应制出供压板螺钉锁紧的安装台阶或凹槽。台阶或凹槽与加热平台的距离尺寸视模具大小、重量而定,一般不超过 40mm,对于中小型模具而言 20mm 即可满足工作要求。台阶或凹槽深度介于 10~30mm 之间为宜。常见的连接形式如图 2 所示。

(2) 模具的对合与导向。

热成形模一般均由上、下(或凸、凹)模组成。上、下模具有一对偶合型面。模具工作时往往是借助成形机

床上平台上下运动实现开合动作。模具偶合型面具有自导向作用,所以模具一般不需设置导向装置。对于部分零件由于其本身的不对称性,成形时会产生一定的侧向力,还需要设置必要的导向装置。但实践表明在高温下导向装置并不十分可靠,特别是用螺钉与模具联结的导向板结构很容易损坏,因此对于成形时会产生较大侧向力的异形零件,建议从设计模具型面入手,合理预留工艺边,尽量使模具偶合型面能尽量消除合模时产生的侧向力。

(3) 模具型面的确定。

模具结构确定之后应进行模具型面的确定。模具型面的确定包括型面在模具中的位置、为获得全尺寸零件而预设的工艺余量和尺寸精度等。模具型面在模具上的位置应尽量以模具中心对称,和有利于成形时由于毛料受力不平衡而产生的力矩和尽量小,即使成形时产生的侧向力最小,以保持成形过程中零件维持在平稳状态。如此对模具本身、成形机床均具有保护作用,亦对零件的成形质量有益。

(4) 毛料在模具上的定位。

零件成形时涉及到毛料在模具上的安放问题,要求毛料放到模具上后应能平稳地保持在所需位置,不能自由移动。此问题的解决与常规成形类似,大多采用模具上设置定位销,毛料预设定位孔,或模具上设置挡料销、块的办法。具有挡料销、卸料块的模具如图3所示。

成形时零件的投影面积一般会缩小,因此预留工艺余量是必须的。一般常规成形工艺余量愈小愈好,一方面可提高材料的利用率,另一方面亦可减少后续的加工量。如能做到无余量成形,将对提高生产效率,降低成本具有显著效果。对热成形零件而言预留的工艺余量大小并非愈小愈好。由于在高温状态下有诸多影响因素,即使模具上有相应的定位装置,成形时毛料窜动亦在所难免。因毛料偏移而报废零件的事情常有发生。由于钛材价格昂贵,生产中应尽量避免这种由于毛料窜动而报废零件的事故。解决措施除设置可靠的毛料定位装置外,即是适当加大工艺余量。当然工艺余量也不是愈大愈好,根据经验余量以 10~20mm 为宜。

(5) 诸如模具的起吊装置等基本可沿用常规成形模具设置吊装孔等方

式。上、下模均应设置电偶孔,电偶孔的位置原则上愈接近型面愈好,愈能正确反映零件的实际成形温度。其大小没有严格限制,直径 6mm 深 50mm 左右基本能满足要求。由于在高温状态零件成形后很软,很容易在卸取时变形。因此热成形件的卸取至关重要,需要在模具上设置取件槽。并通过取件槽起翘零件的余量处。带有顶料装置的设备也可通过顶料装置卸出零件。

(6) 为模具加工方便或节省模具材料合理安排模具结构是很重要的一项工作。如,有一些零件深宽比可能较大,加工刀具可能无法达到要求加工位置,被迫选择诸如电解等高成本的加工方式。遇到如此问题大部分可通过更改模具设计结构加以解决。可将模具设计成分体式,使每一个组成部分便于加工,然后再拼装到一起。如图4所示为一机翼蒙皮的成形模凹模。由于型腔深宽比较大,刀具不能达到型腔底部,将模具分成 1、2 两部分分别加工的实例。该模具也可沿中心线分成左右两部分加工。有时为节省模具材料也可将模具结构分成多部分加工。如对于一些拉深件,凸模部分尺寸较小,要求的与加热平台连接部分尺寸较大,就可采用分体式结构设计,如图5所示。

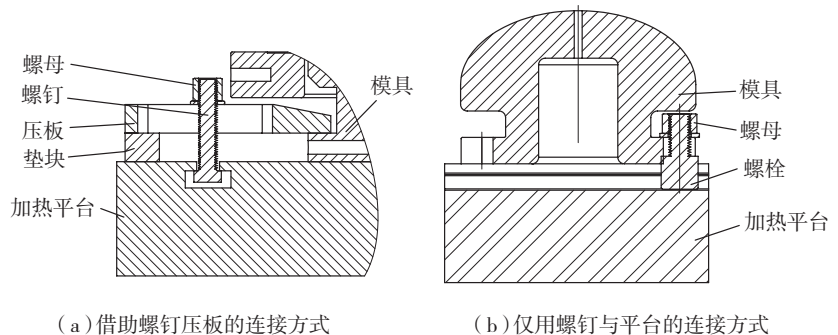


图2 模具与加热平台的连接形式示意图
Fig.2 Joining diagram of mold and heating table

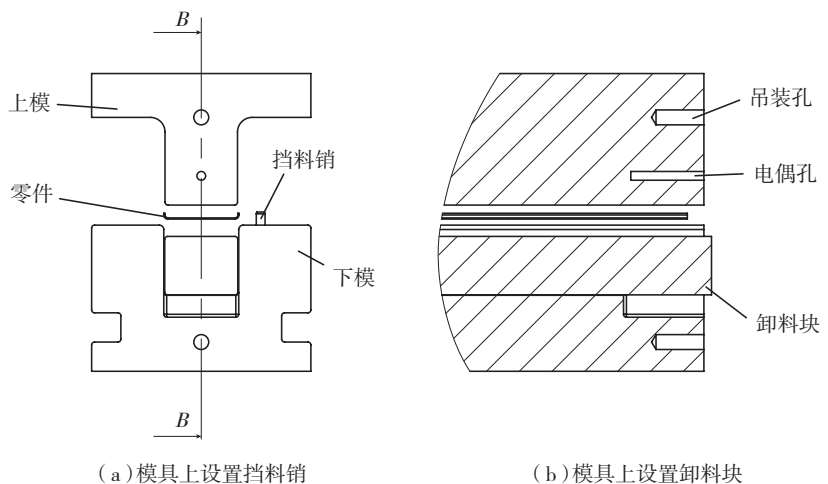


图3 具有挡料销、卸料块的模具示意图
Fig.3 Mold with stop pin and tripper

总之,热成形模具必须依据零件的特点和必要的通用性要求进行结构设计,以满足零件生产需要、同时必须以降低成本,便于加工为目标。

2.2 模具型面尺寸精度

模具型面尺寸精度是由具体零件的设计精度要求决定的,由模具制造加工工艺保证的。就现代加工技术水平而言,保证设计人员要求的加工精度能力绰绰有余。而设计要求精度则需设计人员依据零件的设计精度要求和选定的模具材料、零件材料以及成形温度计算而定。模具型面尺寸计算一般依据如下公式^[2]计算:

$$L_{cm} = L_{cj} (1-D)$$

式中, L_{cm} 为常温下模具型面尺寸; L_{cj} 为常温下零件要求尺寸; D 为放缩系数。常用模具材料放缩系数见表2。

但由于工程计算的近似性,由理论公式计算的结果仍需依据工程经验进行一定调整。由于热成形模具经常在600℃以上温度工作,因此给出的尺寸精度不宜过严。在如此高的温度,由于材料的热变形足以破坏模具制造的高精度,使要求的高精度成为一种成本浪费。故建议设计给出的加工精度公差带可大于0.1mm。高于此精度的加工要求对于热成形模具基本没有任何实际意义。需要指出的是,在模具上设置的销、孔等具有对合、定位、导向作用的结构配合精度更不宜过高,应适当加大配合间隙。在实践中由于上述结构配合精度要求过高,在加热状态下,上下模具卡死的现象时有发生,严重时甚至可能造成整套模具报废。

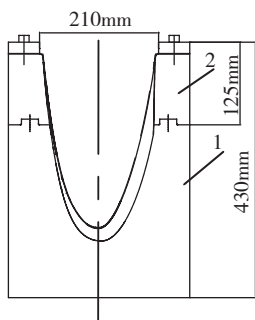


图4 大深宽比型腔分体式结构
Fig.4 Divided structure of large high-aspect ratio cavity

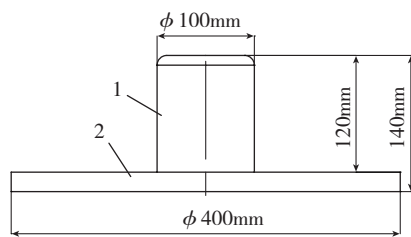


图5 为节省材料采取的分体式结构
Fig.5 Divided structure for saving material

表2 常用模具材料不同工作温度下的放缩系数

零件材料		TA1、TC1、TC2					TC3、TC4			
工作温度/℃		400	500	550	600	650	600	650	700	750
模具材料	不锈钢	0.0035	0.0044	0.0050	0.0055	0.0060	0.0053	0.0049	0.0057	0.0061
	中硅铝球墨铸铁	0.0019	0.0025	0.0028	0.0031	0.0033	0.0025	0.0026	0.0028	—

3 结束语

总之,未来热成形模具用量会越来越大,如何设计制造相关的热成形模具应是业界着重研究探讨的工程技术问题。随着技术的不断进步,专用热成形机床的不断改进,对模具的要求亦会不断变化。为提高工作效率,降低生产成本,热成形模具标准化应作为今后探讨的重要课题。

参考文献

- [1] 理有亲,林兆荣,陈春奎,等. 钛板冲压成形技术. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [2] 中国机械工程学会锻压学会. 锻压手册. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 张东初,裴旭明. 加工工艺对表面粗糙度及疲劳寿命的影响. 中国机械工程, 2003, 14(16): 1374-1377.
- [4] Jawahir I S, Brinksmeier E, M' Saoubi R, et al. Surface integrity in material removal processes: recent advances. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2011, 60: 603-626.
- [5] Sun J, Guo Y B. A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 4036-4042.
- [6] Albrahim G A, Haron C H C, Ghani J A, et al. The effect of dry machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V ELI. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(1): 121-127.
- [7] Elmagrabi N, Hassan C C, Jaharah A, et al. High speed milling of Ti-6Al-4V using coated carbide tools. European Journal of Scientific Research, 2008, 22(2): 153-162.
- [8] Mantle A L, Aspinwall D K. Surface integrity of a high-speed milled gamma titanium aluminide. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 118(1-3): 143-150.
- [9] Che-Haron C H, Jawaid A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166: 188-192.
- [10] Che-Haron C H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118: 231-237.
- [11] Rao B. Modeling and analysis of high speed machining of aerospace alloys [D]. Indiana: Purdue University, 2004.
- [12] 史兴宽,杨巧凤,蔡伟,等. 钛合金 TC4 高速铣削表面完整性研究. 航空制造技术, 2001(1): 30-31, 36.
- [13] 杜随更,吕超,任军学,等. 钛合金高速铣削表面形貌及表层组织研究. 航空学报, 2008, 29(16): 1710-1715.
- [14] 杨振朝,张定华,姚倡锋,等. TC11 钛合金插铣加工铣削力影响参数的灵敏度分析. 航空学报, 2009, 3(9): 1776-1781.

(责编 三丰)

(上接第 93 页)

(责编 亦非)