

Zr 基非晶合金精密直齿轮超塑性成形试验研究*

张志豪 刘新华 谢建新

(北京科技大学材料科学与工程学院 北京 100083)

摘要:具有多种优异性能的大块非晶合金是近年来材料领域的重要研究成果之一。由于非晶合金在过冷区域表现出良好的超塑性性能,因而有望通过塑性加工的方法来获得非晶质的复杂结构精细零部件。以直径为 5 mm 的 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ 非晶合金棒材为试验材料,采用自行设计的专用真空炉和精密模锻装置,对带轮毂的精密直齿轮(节圆直径 6 mm,齿数 24,模数 0.25 mm)进行了超塑性成形试验。分析对比了上芯杆直接冲孔成形、下芯杆直接冲孔成形和两阶段冲孔成形三种不同工艺的成形结果。结果表明,在其他工艺参数相同的条件下,两阶段成形工艺比其余两种工艺具有更低的成形压力和较小的内孔偏心率。选用两阶段成形工艺和合理的模具结构,制备出了具有良好尺寸精度和表面粗糙度的精密齿轮。经 X 射线衍射分析表明,所成形的齿轮没有发生明显晶化现象,从而较好地保持了大块非晶合金材料的各种优异性能。

关键词:大块非晶合金 超塑性 精密直齿轮

中图分类号: TG306

0 前言

齿轮精密锻造成形作为一种少无切削加工的新工艺,其最终目的是采用锻造成形获得完整的齿形,而齿面不需要后续加工,或仅留少许精加工余量。目前用于直齿圆柱齿轮精密锻造成形的方法主要有两种^[1]:一是齿面导向型,即要求上模和下模(凸模和凹模)之间采用齿面导向;另一种是平冲头墩挤型,即上模采用平冲头。这两种工艺各有其优缺点,如平冲头墩挤法在相同的锻压载荷时充齿能力不如齿面导向法,但却减少了模具制造难度和工艺成本。多年来,国内外许多学者对直齿圆柱齿轮精密锻造成形工艺进行了研究,并取得许多成果,如采用分流法^[2]、浮动模法^[3]、下芯头可换镶块法^[1]、热精锻与推挤联合成形法^[4]等,其主要目的是降低锻压成形力和增强齿形充填效果。尽管如此,可大规模应用于工业生产的精密锻造成形工艺尚不够成熟。另一方面,超塑性成形具有成形压力低,材料流动、充型性能好的特点。因此,在现有齿轮精密锻造成形工艺研究成果的基础上,选用具有低流动应力并能满足齿轮高力学性能要求的新材料,开展精密零部件超塑性成形研究是十分有意义的。

大块非晶合金是近年来材料研究领域的最新成果之一。它具有高强度、优异的耐蚀性能、高的冲

击断裂能、低的热膨胀系数和高硬度等比各种传统材料更为优异的物理、化学和力学性能^[5]。用大块非晶合金成形精密齿轮可以获得比常规材料更优异的使用性能。同时,在一定的应变速率条件下,处于过冷区域(即玻璃转变温度和晶化开始温度之间)的温度范围的大块非晶合金呈现出应变速率敏感指数 $m=1$ 的牛顿粘性流体状态,且流动应力很低,是理想的超塑性材料^[6-8],且大块非晶合金材料由于其内部不存在传统金属材料的晶界、相界面、位错等缺陷,从而有着良好的各向同性和微成形性,这对获得轮廓清晰的细小精密齿形十分有利。此外,大块非晶合金较低的超塑性成形温度(如 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 的超塑性成形温度在 400 左右),在模具材料的选用、减少对模具的热冲击、提高模具的使用寿命等方面更具优势。

然而,大块非晶合金在过冷区域长时间保温会发生晶化现象,直接导致其常温力学性能的显著下降^[9]。因此,超塑性成形工艺方案的设计既要保证充型所需要的足够时间,还必须确保整个成形过程在“可加工时间”^[10]内完成,以减少或避免晶化现象的发生。

1 成形工艺

前期的研究结果^[10]表明, $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 大块非晶合金的过冷温度区域为 362.6 ~ 437.4,在过冷温度区域其应变速率敏感系数接近 1。过冷温度区域内 Zr 基大块非晶合金的流动应力随温度的提高和应变速率的降低而显著降低,但在

* 国家 863 计划(2003AA305600)和国家杰出青年科学基金(50125415)资助项目。20040315 收到初稿,20040930 收到修改稿

过冷区域内长时间保温所造成的晶化现象又使流动应力增加。较理想的超塑性成形条件为温度 $380 \sim 395$ ，应变速率 $5.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。当应变速率为 $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，温度为 395 时，其可成形时间达到 1000 s ，最大流动应力小于 70 MPa 。为了验证上述温度、应变速率范围内超塑性成形的可行性，选择大块非晶合金齿轮成形的温度为 390 ，充型时应变速率约为 $1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 左右进行了试验。同时，为了防止超塑性成形过程中非晶合金的显著氧化，成形在真空条件下进行，真空度控制在 $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以下。

成形齿轮的零件如图 1 所示。设计成形模具时考虑了 Zr 基大块非晶合金的热膨胀系数、弹性模量及零件尺寸精度要求等影响因素。采用实心坯料墩挤精锻成形，对不同的工艺方案进行了对比。所用坯料为 $\phi 5 \text{ mm}$ 直径的 $\text{Zr}_{41.25}\text{Ti}_{13.75}\text{Cu}_{12.5}\text{Ni}_{10}\text{Be}_{22.5}$ 大块非晶合金棒材。齿形角 $\alpha = 20^\circ$ ，齿数 $z = 24$ ，模数 $m = 0.25 \text{ mm}$ 。

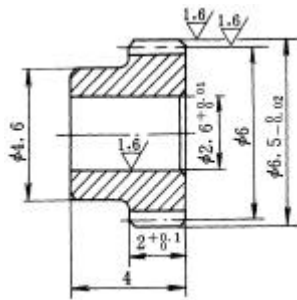


图 1 齿轮零件图

成形工艺方案如图 2 所示，共 3 种。方案 a 采用上芯杆成孔一步成形的的方法；方案 b 采用下芯杆成孔一步成形的的方法，即将芯杆置于下模，挤压垫片为空心管状，以便承受冲孔料头；方案 c 采用两阶段冲孔成形方法，即先用带短芯杆的压头充型，再用带长芯杆的压头冲孔。

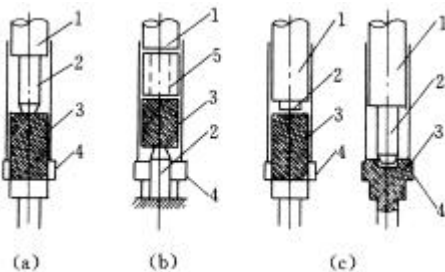


图 2 不同成形工艺方案示意图

1. 压头 2. 芯杆 3. 坯料 4. 齿轮模具 5. 管形垫片

2 成形装置

齿轮超塑性成形装置示意图如图 3 所示，主要

由真空炉、可更换的一体式或组合式压头(图 3 所示为组合式压头，由带芯杆的内压头、外压头、滑块和连接座构成)、模具和顶出机构三部分组成。真空炉的极限真空度为 $3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ，采用电阻加热方式，最高温度 800 ，可充氮气或氩气形成保护气氛。压头部分可以更换，对于成形方案 a 和 b，采用整体式平压头(参见图 2b)或带长芯杆的压头(参见图 2a)一次成形；对于成形方案 c，则采用如图 3 所示的组合压头机构实现两阶段冲孔连续成形：即坯料和模具在真空炉中加热到预定温度；在外加压力的作用下，内压头和外压头通过滑块的联结作用同步向下运动，使坯料充填型腔，完成第一步成形——充型；然后滑块滑入联结座中，外压头与联结座联结，带芯杆的内压头单独继续向下运动，成形内孔，完成第二步成形——冲孔，其成形过程的主要特点是充型和冲孔两次动作在真空炉内连续完成。成形结束卸载后，由顶出机构直接将成形件从模具的模腔内顶出。

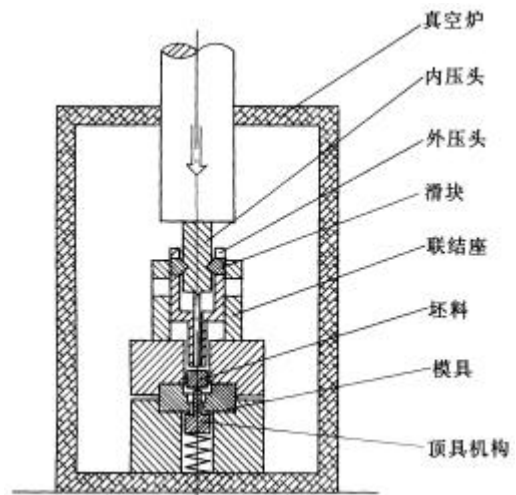


图 3 超塑性成形装置示意图

3 成形结果与分析

采用方案 a 时，芯杆和压头一起向下运动，芯杆穿过非晶坯料，坯料墩粗成鼓形直到和模具的内表面接触，由于穿孔力比较小，此时坯料的变形量不足以充满型腔。当压头和坯料的上表面接触后，压力迅速上升，一部分是由于继续充型阻力，另一部分是由于残余在挤压筒中的坯料与挤压筒内壁的摩擦力引起，还有一部分是芯杆与坯料的摩擦力。试验结果表明，在应变速率约为 $1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，最大载荷达到 15 kN 时，齿形部基本上尚未充型，轮毂下角部尚未完全充满。此时的载荷—行程曲线与下述的采用方案 b 时的相似(参见图 4)。

采用方案 b 时的载荷—行程曲线如图 4 所示。在成形初期，坯料在被墩粗的同时下置芯杆对其冲孔，此时载荷比较小；当坯料被墩粗并与挤压筒内壁接触，由于摩擦力的影响而使载荷增加；当坯料进入轮毂模腔时，为克服轮毂模内壁摩擦力以及充型流动阻力而使载荷迅速增大。试验表明，当应变速率约为 $1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、最大载荷达到 12.8 kN 时，齿型下部和轮毂部分仍没有完全充满。

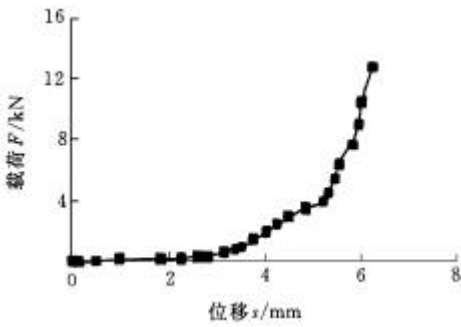


图 4 方案 b 载荷—行程曲线

采用方案 a 和 b 时，减小压头速度，可以使应变速率相应降低，从而提高充型效果。但过低的应变速率，将延长加工时间，造成晶化比例的增加，不利于保持合金的非晶性能。

方案 c 为两阶段冲孔成形法，其载荷—行程曲线如图 5 所示。在第一阶段，利用带短芯杆的压头适当加压，使金属初步充填齿形和轮毂部位，同时初步形成部分内孔；第二阶段利用带长芯杆的压头形成内孔，同时促进金属的径向流动，进一步充填齿型和轮毂下角。如图 5 所示，第一阶段的最大成形载荷为 12.8 kN，第二阶段的最大载荷为 7.6 kN。

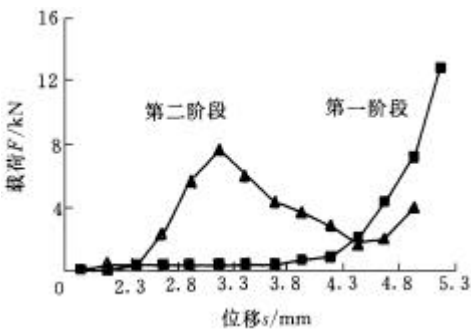


图 5 方案 c 载荷—行程曲线

方案 c 如分两个阶段单独完成，势必增加非晶坯料在高温区的停留时间，从而导致非晶坯料的明显弛豫甚至出现晶化现象；同时由于需要更换芯杆，也增加了工艺操作步骤。为此，设计了如图 3 所示的组合压头，可在成形过程中自动更换芯杆长度，使第一阶段充型结束后，直接进入第二阶

段的长芯杆冲孔，从而节省了工艺时间并简化操作步骤。

采用方案 c 的成形结果如图 6 和图 7 所示，可见齿形和轮毂充填良好、轮廓清晰，内孔偏心率达到了公差要求。

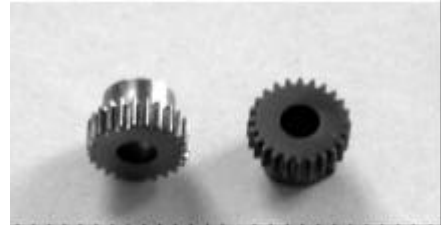
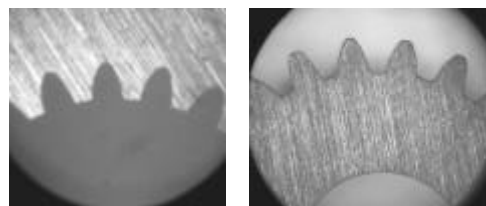


图 6 超塑性模锻成形齿轮外形图



(a)

(b)

图 7 局部放大的模具齿形和锻件齿形

图 8 比较了大块非晶合金坯料与成形齿轮件的 X 射线衍射分析情况。由图 8 可知，成形后的齿轮件基本保持了原有的非晶结构，没有发生明显的晶化行为，从而可以保证非晶合金所具有的各种优异性能。

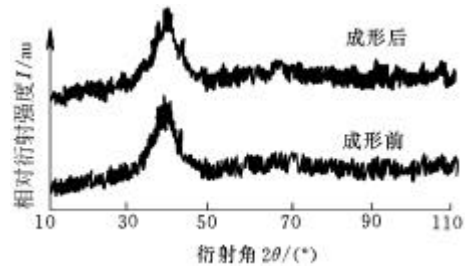


图 8 Zr 基非晶合金超塑性成形前后 X 射线衍射结果

4 结论

(1) 试验确认在温度 395 、应变速率约为 $1.33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的条件下， $\text{Zr}_{41.25}\text{Ti}_{13.75}\text{Cu}_{12.5}\text{Ni}_{10}\text{Be}_{22.5}$ 大块非晶合金具有较小的流动应力，适合超塑性成形。

(2) 以 $\text{Zr}_{41.25}\text{Ti}_{13.75}\text{Cu}_{12.5}\text{Ni}_{10}\text{Be}_{22.5}$ 大块非晶合金为材料，采用两阶段冲孔成形工艺方案，可以在较小的载荷下获得充型效果良好、轮廓清晰的精密带轮毂直齿圆柱齿轮。

(3) 在上述工艺条件下所获得的 Zr 基非晶合金

齿轮, 经 X 射线衍射分析, 证明没有发生明显晶化现象, 较好地保持了大块非晶合金坯料所具有的优异性能。

参 考 文 献

- 1 Choi J C, Choi Y. Precision forging of spur gears with inside relief. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39(10): 1 575 ~ 1 588
- 2 滕宏春, 任先玉, 曾宪文, 等. 直齿轮分流挤压精密成形试验研究. *农业机械学报*, 2001, 32(1): 99 ~ 101
- 3 Dean T A. The net-shape forming of gears. *Materials and Design*, 2002, 21(4): 271 ~ 278
- 4 田福祥, 林化春. 直齿圆柱齿轮热精锻—冷推挤精密成形研究. *锻压机械*, 1997(6): 26 ~ 28
- 5 谢建新, 周成, 张志豪. 非晶合金精细零部件的超塑性成形技术. *材料导报*, 2003, 17(2): 8 ~ 11
- 6 Wang Q, Blandin J J, Suery M. High temperature deformation of a fully amorphous and partially crystallized bulk metallic glass. *Ann. Chim. Sci. Mat.*, 2002, 27(5): 19 ~ 24
- 7 Nieh T G, Sehu C, Wadsworth J, et al. Strain rate-dependent deformation in bulk metallic glasses. *Intermetallics*, 2002, 10(11, 12): 1 177 ~ 1 182
- 8 Johnson W L, Lu J, Demetriou M D. Deformation and flow in bulk metallic glasses and deeply undercooled glass forming liquids a self consistent dynamic free volume model. *Intermetallics*, 2002, 10(11, 12): 1 039 ~ 1 046
- 9 Doglione R, Spriano S, Battezzati L. Static mechanical characterization of a bulk amorphous and nanocrystalline $Zr_{40}Ti_{14}Ni_{11}Cu_{10}Be_{25}$ alloy. *Nanostructured Materials*, 8(4): 447 ~ 456
- 10 张志豪, 刘新华, 周成, 等. Zr 基大块非晶合金的超塑性成形性能. *中国有色金属学报*, 2004, 14(7): 1 073 ~ 1 077

SUPER-PLASTIC DIE FORGING OF FINE PRECISION SPUR GEAR OF Zr-BASED BULK METALLIC GLASS

Zhang Zhihao Liu Xinhua Xie Jianxin
(School of Materials Science and Engineering,
University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083)

Abstract : Bulk metallic glass (BMG) is one of the important research results of material science in recent years, which has many excellent properties compared with other metallic engineering materials. Because of the excellent super-plasticity in super-cooled liquid region of BMG, it is very hopeful to fabricate precision amorphous metallic parts with complicated configuration through plastic working processes. Using $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ bulk metallic glass rods of 5 mm diameter, fine spur gear with boss (pitch diameter 6 mm, number of gear teeth 24, modulus 0.25 mm) is fabricated with super-plastic die-forging method under vacuum condition. The forming results of different processes such as hole-forming by upper-mandrel, hole-forming by bottom-mandrel and two-stage forming are analyzed. The results show that the two-stage hole-forming process has lower forming pressure and decentralization level of inner hole. The fine spur gear with good size-precision and surface-roughness is obtained through two-stage hole-forming process scheme and reasonable die structure design. XRD shows that the fabricated parts have no obvious crystallization, the excellent properties of as-cast $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ bulk metallic glass being kept.

Key words : Bulk metallic glass Super-plasticity

Precision spur gear

作者简介: 张志豪, 男, 1970 年出生, 博士研究生。研究方向为 Zr 基大块非晶合金超塑性成形技术。

E-mail : jxxie@mater.ustb.edu.cn