

引文格式: 蔡高参, 符巨博, 张东星, 等. 热等静压技术在钨合金领域的应用研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(23/24): 14-20.  
CAI Gaocan, FU Jubo, ZHANG Dongxing, et al. Application of hot isostatic pressing technology in tungsten alloy[J].  
Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23/24): 14-20.

# 热等静压技术在钨合金领域的应用研究进展\*

蔡高参<sup>1</sup>, 符巨博<sup>1</sup>, 张东星<sup>2</sup>, 胡彪<sup>1</sup>, 辛艳喜<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学, 杭州 310018;

2. 电子科技大学(深圳)高等研究院, 深圳 518110)

[摘要] 钨合金由于其良好的综合性能, 在航空、航天、军工和电子等领域有着广泛的应用, 其综合性能的提升同时也会促进相关领域的发展, 而热等静压技术对改善钨合金性能起到了关键的作用。介绍了热等静压技术在钨合金领域的应用, 如利用热等静压对钨合金进行强化和扩散连接, 以及钨合金热等静压数值模拟。同时指出热等静压技术在钨合金领域应用的问题及发展趋势。

关键词: 钨合金; 热等静压; 钨合金强化; 扩散连接; 数值模拟

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.014



蔡高参

特聘副教授, 博士, 主要研究方向为精密成形制造、粉末冶金、3D 打印工艺技术及装备研发。

热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)技术是一项可实现粉末颗粒快速致密化的成形工艺。该技术通过向密闭容器内施加高温高压, 使得容器内的粉末颗粒快速致密化。热等静压工艺克服了冷等静压及粉末冶金工艺的缺点, 相比于冷等静压工艺, 热等静压工艺所需要的压力更低, 而相比于粉末冶金工艺, 热等静压工艺所需要的温度更低<sup>[1]</sup>。热等静压设备主要包括: 压力容器、升温装置、气体存储及输送系统、动力供给及控制系统, 任何热等静压装备都以压力容器作为主体结构。当进行热等静压加工时, 容器内主要利用对流和辐射进行传热, 低温时以气体对流为主, 高温时则以辐射传热为主<sup>[2]</sup>。热等静压工艺能够明显提高铸件致

密化程度以及提升合金性能, 除此之外, 热等静压技术能够加工一些成形难度大且质量要求高的材料或零件。目前热等静压技术已经广泛用于航空、航天、电子、化工和冶金等行业, 用于生产高质量产品和制备新型材料, 如高熔点难熔金属、陶瓷、宇航材料等<sup>[3-5]</sup>。

钨及其合金具有许多优异的特点, 如密度大、耐高温、易导热、热膨胀系数小以及耐腐蚀等, 因此, 钨及其合金在航空、航天、国防军工及电子等领域得到了大范围的应用<sup>[6]</sup>。如 W-Ni-Cu 系钨合金由于其非磁性而被广泛用作陀螺仪的外缘转子材料<sup>[7]</sup>; 高密度钨合金可用于飞机上的配重和减震材料、穿甲弹弹芯和子母弹、防 X 射线屏蔽材料、手机上的

\* 基金项目: 中国博士后基金(2018M642482); 浙江省自然科学基金(LQ18E050010)。

高密度合金振子、电热敏粗砧块和电极材料等<sup>[8]</sup>；相比于贫铀穿甲弹，利用W-Ni-Fe高比重合金制造的穿甲弹具有易提炼、无污染等优点，比贫铀穿甲弹具有更广阔的应用前景<sup>[9]</sup>；钨铍合金可用于航空航天温度测量和搅拌摩擦焊接应用<sup>[10]</sup>。除此之外，钨合金还可用于制备未来聚变反应堆等离子组件<sup>[11-15]</sup>。通过粉末烧结或者熔渗法制备的W-Cu合金，其相对密度一般为96%~98%，通过热等静压处理之后，其相对密度得到提高，并且能够拥有更良好的力学性能及电学性能。吕大铭等<sup>[16]</sup>在1000~1050℃、100MPa压力下对钨铜合金进行2h热等静压处理后，其相对密度达到99.4%，抗弯强度提高了31%，电导率也从31.6MS/m提高到34.6MS/m。Xiao等<sup>[17]</sup>采用不同的制备工艺制备W-ZrO<sub>2</sub>合金并进行对比，发现热等静压工艺与传统烧结、垂直烧结和热模锻工艺相比，可以制备出具有更高显微硬度和耐磨性的W-ZrO<sub>2</sub>合金。由此可看出热等静压技术对改善与提高钨合金的性能是有益的。本文对热等静压强化技术制备钨合金、热等静压扩散连接以及热等静压数值模拟分析3个方面进行阐述。

## 热等静压在强化制备钨合金领域的应用

### 1 热等静压参数对钨合金性能的影响

热等静压参数会直接对粉末成形结果产生影响，选择合理的参数进行粉末成形能够显著提高成形件的致密性。因此，目前在该领域内的研究也大多集中在如何选择正确的工艺参数上。汤金芝等<sup>[18]</sup>对于82W-Ni-Cu(I)、82W-Ni-Cu(II)与82W-Ni-Cu-Ag 3组钨合金试样在150MPa压力下分别于1120℃和1020℃进行性能测试，发现通过热等静压工艺处理后，3组合金表面微裂

纹缺陷尺寸与孔隙减少，合金密度分别提高0.498%、2.889%和0.676%，拉伸强度分别提高2.613%、8.191%和3.279%。同时发现，坯件的组分、性能直接影响热等静压工艺参数。在相同的热等静压工艺参数下，原密度、拉伸强度低的坯件，性能变化速率更明显。

郎利辉等<sup>[19]</sup>为了对比不同热等静压工艺参数对不同材料强化效果的影响，选取了两种不同的93W-Ni-Fe材料，分别为烧结棒材和粉末材料，在进行热等静压加工之后通过拉伸试验得到了各种方案下材料的力学性能，从中发现温度和压力的改变都会影响材料强度、断面收缩率和延伸率，并且呈正比关系，除此之外，还发现温度对材料的强化影响更大。

### 2 热等静压技术在强化制备钨合金方面的应用

热等静压工艺能够明显提高铸件的致密化程度，提升合金的性能，适用于钨合金等高熔点材料。通过热等静压技术能够更好地强化钨合金，得到晶粒更小的钨晶粒，使其具有更好的性能。Martinez等<sup>[15]</sup>通过机械合金化和随后的热等静压固结，获得了含有La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的超细晶高密度W-Ti和W-V合金，这些合金拥有更高的弯曲强度和断裂韧性。刘国辉等<sup>[20]</sup>利用热等静压技术对90W-Ni-Fe复合粉末进行处理，得到了粒度小于5μm、相对密度达99.82%的钨合金材料。研究认为热等静压工艺可以获得较高密度的材料，避免材料内部的钨颗粒在烧结过程中长大，因此能够得到晶粒细小的钨合金材料。通过电镜对材料内部金相组织进行观察，发现材料内部钨晶粒没有长大，没有明显缺陷，并且晶粒大小基本小于5μm。其金相组织如图1所示<sup>[20]</sup>。除此之外，研究人员还发现相对于常规钨合金，通过热等静压技术制备的细晶钨合金拥有更优的动态力学性能。

先进的聚变反应堆的实现依赖于转向器面向等离子体材料的改进，而钨的韧性是这些改进的关键。为了制备出符合条件的钨合金，Noto等<sup>[14]</sup>采用机械合金化和热等静压相结合的新工艺研制了分散强化W-Ti合金，这种合金拥有更高的韧性，除此之外，还对新型DS-W-Ti合金的微观组织及纳米强化颗粒的形成机理进行了研究。Veleva等<sup>[21]</sup>通过热等静压技术和热锻技术制备了W-2Y钨合金复合材料，对比发现，热等静压所制备的合金材料由20~500nm的小晶粒组成，并且其布氏硬度高于由热锻制备的钨合金材料。Xiao等<sup>[22]</sup>为制备具有较高抗拉和抗压强度的纳米氧化物颗粒弥散强化钨合金，结合分子水平的液-液掺杂技术和热等静压技术，得到了颗粒尺寸小于200nm的Zr(Y)O<sub>2</sub>颗粒，并与钨颗粒结合良好，这种小尺寸颗粒有助于钨晶粒的细化，提升钨合金的性能。通过对钨合金进行单轴拉伸试验，得到钨合金在室温(27℃)下的最高抗拉强度和抗压强度分别为906MPa和1445MPa，这个数值高于大多数文献所报道的数值。通过改变Zr(Y)O<sub>2</sub>的质量分数(0~0.75%)，发现了钨合金的抗拉强度和断裂应变均有所降低。王健宁等<sup>[23]</sup>为了研究铜对90W-Ni-Fe-Cu合金微观组织和力学性能的影响，利用热等静压技术制备了拥有不同铜

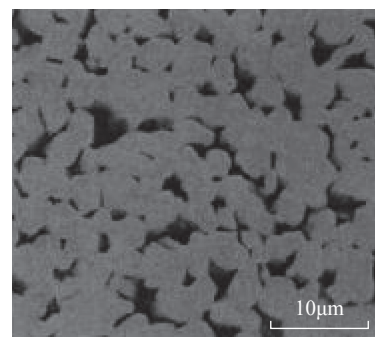


图1 热等静压制备细晶钨合金相组织  
Fig.1 Microstructure of fine grain tungsten alloy prepared by hot isostatic pressing

含量的 90W-Ni-Fe-Cu 合金,通过 SEM 试验对钨合金微观组织进行观察,发现钨合金微观组织均致密无孔洞,并且测出合金样品的相对密度均在 98% 以上,样品的 SEM 图像如图 2 所示。由此说明热等静压技术能够提高钨合金的致密度,有效强化钨合金,改善钨合金的综合性能。

综上所述,热等静压工艺能够有效细化钨合金颗粒,提高粉末的致密性,从而有效改善钨合金的综合性能;在进行热等静压成形过程中,精确地控制成形压力及成形温度等成形参数能够获得质量更高的成形件,大大降低成本。目前的研究都集中在成形参数的选择及利用热等静压技术制备高性能材料等方面,在压力和温度等参数对热等静压工艺的作用机理以及热等静压过程中材料内部的变化等方面仍没有系统性的研究,所以研究热等静压工艺过程中成形参数的作用机制对了解热等静压的致密机理以及发展热等静压工艺具有重要意义。

### 热等静压在钨合金扩散连接领域的应用

热等静压扩散连接是固相扩散连接的一种,连接过程中不发生材料的熔化,因此可以将两种熔点相差很大的材料连接起来<sup>[24]</sup>。由于温度和压力的作用,材料表面的原子相互扩散,在界面处产生了局部变形,从而实现材料在固态下连接到一起<sup>[25]</sup>。

热等静压扩散连接工艺的扩散程度与工艺参数密切相关,如温度、压力、保温时间等,其中,温度对扩散程度影响最大。相对于传统的焊接工艺,热等静压扩散连接不仅能够保证接头的结合强度,在连接过程中还能保持接头微观结构完整,从而避免在连接过程中产生微裂纹<sup>[26]</sup>。在进行热等静压扩散连接之后,可以对接头进行力学性能测试及微观组织观察,从而判断连接之后的接头是否满足预期效果。在利用热等静压技术进行扩散连接时,应考虑到接头两端材料是否能够直接进行连接,对

于某些难以直接采用扩散方法连接的材料,如 W 合金和 Cu 合金连接,必须选择合适的过渡材料作为中间层,而过渡材料必须能和接头两端的材料形成良好的结合。Sal 等<sup>[27]</sup>研究了 W-10Cr-0.5Y 和 P91 的热等静压连接过程,分别在 700℃ 和 980℃ 温度下,使用 50μm 厚的 Cu 作为中间层,结果发现,在 700℃、100MPa、1h 条件下,在两个界面之间生成了连续的接头,并且在 P91/Cu 界面上观察到一个薄的氧化层,此外 Cu/W 合金界面处的相互溶解度极小,接头较弱,显微组织分析与接头的力学性能基本一致,接头的抗剪强度仅为 69MPa;在 140MPa、980℃、3h 条件下,获得了高金属连续性的无氧化物接头,此时抗剪强度显著提高,达到 354MPa,但是在这个温度下,P91 的组织改变了,需要通过回火才能恢复初始性能,在经过热处理后,剪切强度降至 174MPa,然而在回火和未回火条件下,高剪切强度值和观察到的断裂机制揭示了接头拥有高黏附性能。Liu 等<sup>[28]</sup>采用热等静压扩散连接方法,将 93W-4.9Ni-2.1Fe 合金与 30CrMnSiNi2A 钢的圆套筒连接,通过场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 金相分析发现,接头界面扩散区由 W/钢扩散层和 Ni-Fe/钢扩散层组成;通过拉伸试验对接头进行力学测定,得到接头的抗拉强度为 310.5MPa,伸长率为 8.6%;此外,通过对接头的微观组织研究发现,断裂主要发生在界面附近的 W-Ni-Fe 侧,并且断裂被确定为钨晶粒中的初始裂纹;而钢基体通过产生塑性变形来释放残余应力,使得接头不容易发生断裂行为,说明通过热等静压扩散连接技术成形的接头具有良好的连接性能。

热等静压扩散连接工艺能够实现钨合金与高性能材料的连接,但目前关于钨合金热等静压扩散连接领域的研究集中在工艺参数对接头组

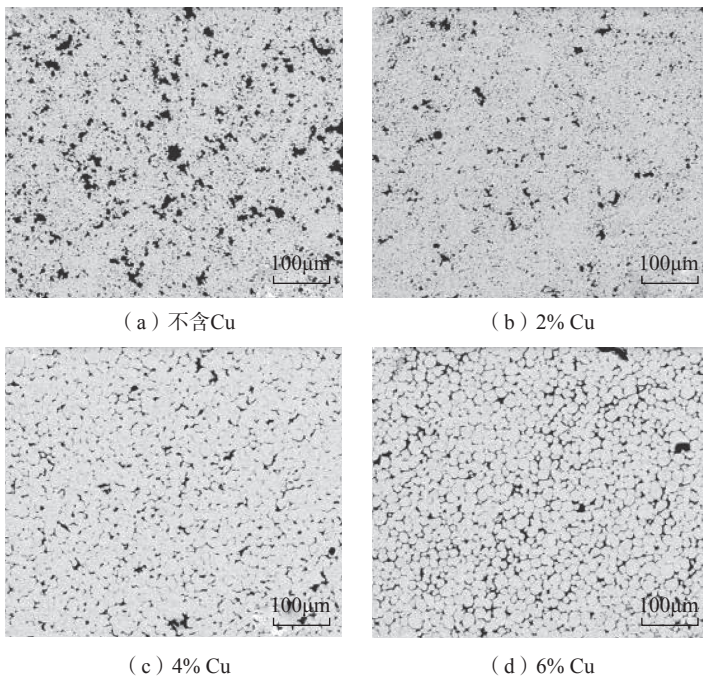


图 2 不同铜含量钨合金热等静压后的 SEM 像

Fig.2 SEM images of tungsten alloys with different copper contents after hot isostatic pressing

织的性能影响和连接之后接头的性能强度测试方面。关于热等静压扩散连接系统性的理论研究还有待进一步发展,如在接头处材料各元素的扩散机理分析、判断接头母材是否能够直接进行扩散连接及中间层材料的选择等方面仍没有系统性的理论。除此之外,现有的热等静压设备及运行成本较高,导致此方面的研究及生产单位较少。

### 热等静压数值模拟

热等静压过程是非常复杂的非线性力学过程。在热等静压过程中,材料的力学性质实时变化,粉末体会发生大的密度变化,粉末与模具、粉末与粉末之间的接触处于动态变化中,因此难以对成形过程进行数学解析求解<sup>[29]</sup>。在目前的实际生产中,若想确定模具尺寸,需要进行反复试验,这种方法存在着许多缺点,如坯料的质量得不到保证,模具设计周期长,成品尺寸精度差,成品密度不均以及人力物力消耗大等<sup>[30]</sup>。为了摆脱这些缺点,可以采用有限元软件对热等静压过程进行模拟,快速且有效地分析出质量缺陷的原因,从而节约产品试制和试验成本和时间,并且对模具和工艺参数进行优化改进。

在热等静压过程中,大量不同粒径的粉末颗粒组成了多孔体,其中每一颗粒均可视为一个致密体,从而可以利用传统的塑形理论进行表述。在热等静压数值模拟研究中,使用正确的屈服准则对粉末的热等静压过程进行描述是最重要的。目前学术界所提出的屈服准则中,Shima屈服准则被广泛使用。对于多孔体,Shima屈服准则能够提升模拟的准确性,其表达式为:

$$F = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + \left( \frac{\sigma_m}{f} \right)^2 \right\}^{0.5} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别表示 3 个主应力;  $f$  表示等静压力分量  $\sigma_m$  对多孔体屈服的影响程度,是多孔体密度  $\rho$  与材料基体  $\rho_0$  之比,即相对密度  $R=\rho/\rho_0$  相关的函数。除了 Shima 屈服准则, Kuhn 屈服准则也被用来对粉末的热等静压过程进行描述。Kuhn 屈服准则是对经典粉体塑性理论的延续推导,其表达式如下<sup>[31]</sup>:

$$\sigma_s = [3J_2' - (1+2\nu)J_2]^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_s$  为粉末体的屈服应力;  $\nu$  为泊松比;  $J_2'$  为应力偏量第二不变量;  $J_2$  为应力第二不变量。上述所提到的两种屈服准则目前嵌于有限元模拟软件并可用于热等静压过程的模拟。其中 MSC.Marc 有限元模拟软件内嵌了 Shima 屈服模型,而 DEFORM 有限元模拟软件则内嵌了 Kuhn 屈服模型。相对于 Kuhn 模型, Shima 模型在学术界的应用更为广泛,在粉末等静压模拟中更加权威,因此粉末压制工艺过程通常会采用

MSC.Marc 软件进行模拟分析。

郎利辉等<sup>[31]</sup>为研究钨合金粉末热等静压的致密化行为,采用 MSC.Marc 中的 Shima 模型针对 93W-4.45Ni-2.2Fe-0.3Co-0.05Mn 穿甲弹常用材料的热等静压成形过程进行模拟研究,试验的保温温度为 1400℃,保压压力为 140MPa,保压时间为 9000s,加载曲线如图 3 所示。

通过 MSC.Marc 有限元模拟软件,对钨合金粉末的热等静压致密化过程进行分析,其中数值模拟模型如图 4 所示<sup>[31]</sup>。

在有限元模拟过程中,为了分析包套不同位置的等效 Cauchy 应力大小和演化规律,选取了 3 个位置节点,对热等静压过程进行观察分析,结果如图 5 所示<sup>[31]</sup>,其中每个增量步长为 1.5s。将热等静压过程分为加载阶段、保温保压阶段及卸载阶段。由于温度传递滞后于压力作用,包套产生了较高的应力,所以 3 个位

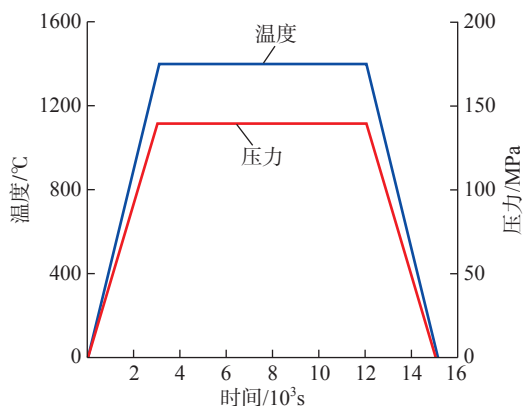


图 3 热等静压模拟加载曲线

Fig.3 Simulation loading curve of hot isostatic pressure

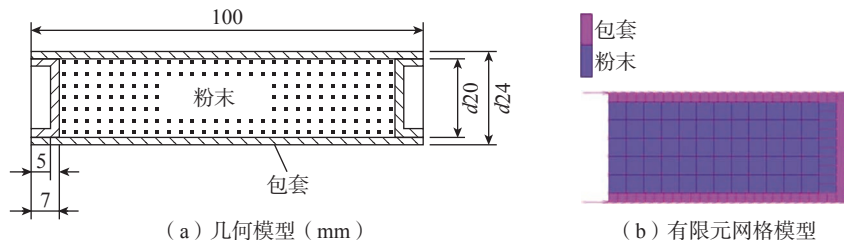


图 4 钨合金粉末热等静压数值模拟棒件包套与粉末模型

Fig.4 Numerical simulation of hot isostatic pressing of tungsten alloy powder rod sheath and powder model

置节点的应力均在加载阶段明显增加了。在保温保压阶段,由于温度和压力都很稳定,所以3个位置节点的应力均保持在80MPa以下。由于温度的下降产生了热应力,所以3个位置节点在卸载阶段的等效应力值均快速上升。通过对不同位置节点的应力变化进行分析,根据应力变化的特点,可以对包套进行进一步的设计及优化。

为了使结果更令人信服,在进行有限元模拟分析之后,通过试验对结果进行了验证,其试验实物如图6所示<sup>[31]</sup>。对比有限元模拟结果及试验结果,得到径向周长最高相对误差为5.6%,轴向相对误差为1.62%,致密度平均相对误差为1.4%。可见利用Shima模型对零件的变形进行预测能够得到精确的结果。

陈海鹏等<sup>[32]</sup>利用DEFORM-2D有限元软件中的Kuhn模型对钨铜混合粉在包套密封条件下的热等静压工艺过程进行了有限元模拟,分析了坯料在该过程的致密化规律,其有限元模型如图7所示(mm)。通过交叉试验法对参数方案进行优化,得到了最优的参数方案为950℃/110MPa/2h,并选用此方案进行模拟分析,最后得到的坯料整体的相对密度可达96%以上。在此方案下,模拟和试验结果的相对密度最大误差为1.27%,平均误差约为0.2%。除此之外,还得出结论:坯料的致密化过程是先边缘后中心。此结论和姚松等<sup>[33]</sup>得出的结论是一致的。以典型圆柱件成形为例,采用MSC.MARC软件,选取了Shima模型嵌入钛合金材料模型对热等静压过程进行数值模拟,从而得出结论:粉末体的热等静压是一个先向外膨胀再向中心收缩,最终达到全致密的过程,致密度分布均匀。

对热等静压过程进行有限元模拟,不仅能够减少模具的设计周期,还能对成形参数进行优化,而不需要进行反复的试验确定最优方案,节省

了人力、物力和时间。目前许多学者利用Shima模型及Kuhn模型对钨合金热等静压过程进行模拟,将所模拟出来的结果与试验结果进行对比,发现模拟结果和试验结果没有太大的误差,但是相对来说,利用Shima模型能够比较准确地描述钨合金热等静压过程,并应用于实践当中。但是鉴于粉末热等静压致密化机制的复杂性,能准确描述热等静压过程的数学模型也必然较为复杂。比如目前通过使用Shima模型能够获得更

加准确的模拟结果,但仍需要对其进行更加深入的研究,并准确确定模型中的参数,对于不同的多孔体,其屈服函数的具体形式也会有所不同。因此,建立更加全面和准确描述致密化过程的数学模型是数值模拟的前提和基础,也是未来热等静压领域的研究方向之一<sup>[34]</sup>。

## 结论

本文对热等静压技术在钨合金制备、强化等领域的相关应用及成果

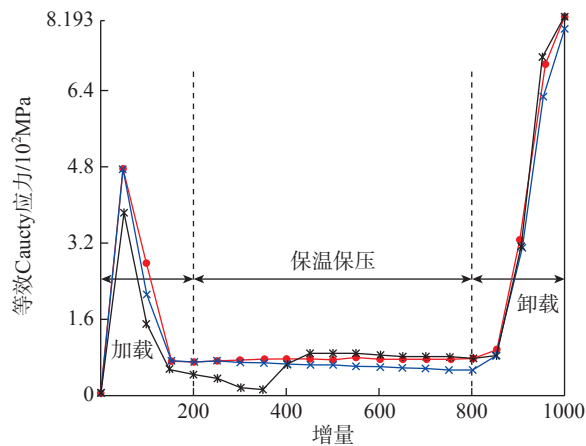


图5 不同位置的等效Cauchy应力演变过程

Fig.5 Equivalent Cauchy stress evolution at different positions

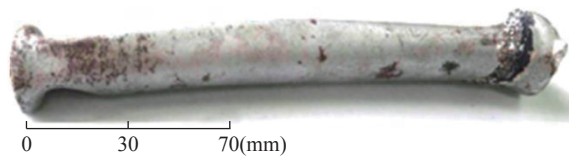
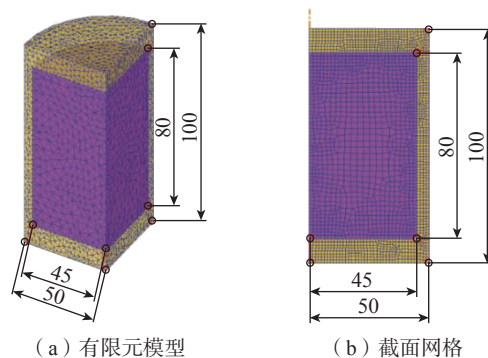


图6 钨合金粉末热等静压后实物图

Fig.6 Physical picture of tungsten alloy powder after hot isostatic pressing



(a) 有限元模型 (b) 截面网格

图7 钨铜合金粉的热等静压有限元模型

Fig.7 Hot isostatic pressing finite element model of tungsten copper alloy powder

进行了论述,说明热等静压技术工艺能够有效地对钨合金的性能进行改善。然而,目前热等静压技术在钨合金领域的应用仍存在一些不足,如钨合金扩散连接领域缺乏系统性研究以及缺少能够准确描述粉末致密化过程的数学模型等。因此,未来还需进一步加强其基础性理论研究,借助有限元模拟等现代手段,从宏观及微观方面对热等静压的致密化机理进行更加全面的解读。先进的热等静压设备是研究热等静压技术的基石,所以对热等静压设备进行创新研究是重中之重。为了满足制造大型零件及降低生产时间及生产成本等需求,未来热等静压设备应满足更多的要求,如操作智能化、设备大型化、功能多样化等。总之,热等静压技术在钨合金领域的应用发展十分广阔,其独特的优势将会使其在未来发挥更大的作用。

### 参考文献

- [1] 马富康. 等静压技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- MA Fukang. Isostatic pressing technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.
- [2] 林小辉, 李来平, 李斌, 等. 热等静压在稀有难熔金属产品制备中的应用[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(3): 63-67.
- LIN Xiaohui, LI Laiping, LI Bin, et al. Application of hot isostatic pressing in preparation of rare and refractory metal products[J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(3): 63-67.
- [3] 张义文. 热等静压技术新进展[J]. 粉末冶金工业, 2009, 19(4): 32-40.
- ZHANG Yiwen. Development in HIP technology[J]. Powder Metallurgy Industry, 2009, 19(4): 32-40.
- [4] 郭荫芳. 热等静压技术的新进展——HIP'99 国际会议情况简介[J]. 硬质合金, 2000, 17(2): 115-119.
- WU Yinfang. The new progress of hot isostatic pressing technology-Brief introduction of HIP'99 international conference[J]. Cemented Carbide, 2000, 17(2): 115-119.
- [5] 尚文静. 热等静压(HIP)技术和设备的发展及应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2010, 31(1): 18-21.
- SHANG Wenjing. Development and application of hot isostatic pressing (HIP) technology and equipments[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2010, 31(1): 18-21.
- [6] 李鹏. 高密度钨合金研究现状与发展趋势[J]. 稀有金属与硬质合金, 2004, 32(3): 32-35.
- LI Peng. Present research and future development of high-density tungsten alloys[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2004, 32(3): 32-35.
- [7] 詹志洪. 热等静压技术和设备的应用与发展[J]. 中国钨业, 2005, 20(1): 46-49.
- ZHAN Zhihong. Application and development of hot isostatic pressing technology and equipment[J]. China Tungsten Industry, 2005, 20(1): 46-49.
- [8] 赵慕岳, 范景莲, 王伏生. 我国钨基高密度合金的发展现状与展望[J]. 中国钨业, 1999(1/2): 39-44.
- ZHAO Muyue, FAN Jinglian, WANG Fusheng. Development status and prospect of tungsten based high density alloys in China[J]. China Tungsten Industry, 1999(1/2): 39-44.
- [9] 郎利辉, 张东星, 布国亮, 等. 钨基合金的预强化和后期强化技术[J]. 锻压技术, 2012, 37(4): 1-7.
- LANG Lihui, ZHANG Dongxing, BU Guoliang, et al. Pre-strengthening and post-strengthening technology of tungsten-base alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2012, 37(4): 1-7.
- [10] LEONHARDT T. Properties of tungsten-rhenium and tungsten-rhenium with hafnium carbide[J]. JOM, 2009, 61(7): 68-71.
- [11] SAVOINI B, MARTÍNEZ J, MUÑOZ A, et al. Microstructure and temperature dependence of the microhardness of W-4V-1La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and W-4Ti-1La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 442(1-3): S229-S232.
- [12] MUÑOZ A, SAVOINI B, TEJADO E, et al. Microstructural and mechanical characteristics of W-2Ti and W-1TiC processed by hot isostatic pressing[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 455(1-3): 306-310.
- [13] MUÑOZ A, MONGE MA, SAVOINI B, et al. La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reinforced W and W-V alloys produced by hot isostatic pressing[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 417(1-3): 508-511.
- [14] NOTO H, HISHINUMA Y, MUROGAT, et al. Formation mechanism of nano-strengthening particles in dispersion strengthened W-Ti alloys[J]. Plasma and Fusion Research, 2020, 15: 1205021.
- [15] MARTÍNEZ J, SAVOINI B, MONGE M A, et al. Development of oxide dispersion strengthened W alloys produced by hot isostatic pressing[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(9-11): 2534-2537.
- [16] 吕大铭, 唐安清. 钨铜材料的热等静压致密化和扩散焊接[C]//第八届全国难熔金属学术交流会论文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994: 83-86.
- LÜ Daming, TANG Anqing. Hot isostatic pressing densification and diffusion welding of tungsten copper materials[C]//Proceedings of the 8th National Academic Exchange on Refractory Metals. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1994: 83-86.
- [17] XIAO F N, MIAO Q, WEI S Z, et al. Microstructure and mechanical properties of W-ZrO<sub>2</sub> alloys by different preparation techniques[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 774: 210-221.
- [18] 汤金芝, 王伏生. HIP 技术对钨合金材料性能的影响[J]. 湖南冶金, 2001, 29(3): 21-24.
- TANG Jinzhi, WANG Fusheng. Effect of hip on improvement of physicommechanical properties[J]. Hunan Metallurgy, 2001, 29(3): 21-24.
- [19] 郎利辉, 续秋玉, 张东星, 等. 钨合金粉末和烧结材料的热等静压工艺技术[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(4): 1-6.
- LANG Lihui, XU Qiuyu, ZHANG Dongxing, et al. Hot isostatic pressing of W-Ni-Fe heavy alloy powder and sintered material[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(4): 1-6.
- [20] 刘国辉, 王玲, 刘桂荣, 等. 热等静压方法制备细晶钨合金及其动态力学性能研究[J]. 粉末冶金技术, 2013, 31(1): 40-42, 52.
- LIU Guohui, WANG Ling, LIU Guirong, et al. Dynamic mechanics properties of fine-grain tungsten heavy alloy by HIP[J]. Powder Metallurgy Technology, 2013, 31(1): 40-42, 52.
- [21] VELEVA L, SCHAEUBLIN R, BATTABYAL M, et al. Investigation of microstructure and mechanical properties of W-Y and W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials fabricated by powder metallurgy method[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015, 50: 210-216.
- [22] XIAO F N, BARRIERE T, CHENG G, et al. Extremely uniform nanosized oxide particles dispersion strengthened tungsten alloy with high tensile and compressive strengths fabricated involving liquid-liquid method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 878:

160335.

[23] 王健宁, 蔡青山, 朱文谭, 等. 铜对热等静压钨合金微观组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1717-1725.

WANG Jianning, CAI Qingshan, ZHU Wentan, et al. Effects of Cu on structure and properties of HIPed 90W-Ni-Fe-Cu tungsten heavy alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1717-1725.

[24] 徐进, 王铁军, 车洪艳, 等. 热等静压扩散连接技术研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2014, 24(3): 61-65.

XU Jin, WANG Tiejun, CHE Hongyan, et al. Research progress of HIP diffusion bonding[J]. Powder Metallurgy Industry, 2014, 24(3): 61-65.

[25] 周武平, 车洪艳, 刘国辉, 等. 热等静压扩散连接技术的研究及应用[C]//2012年第二届中国粉末冶金产业发展论坛论文集. 上海: 粉末冶金产业技术创新战略联盟, 2012: 65-70.

ZHOU Wuping, CHE Hongyan, LIU Guohui, et al. Research and application of hot isostatic pressure diffusion connection technology[C]//2012 Section 2 China Powder Metallurgy Industry Development Forum Proceedings. Shanghai: Powder Metallurgy Industry Technology Innovation Strategic Alliance, 2012: 65-70.

[26] POURANVARI M. Diffusion brazing of a nicked based superalloy part 1—Solidification behavior[J]. Association of Metallurgical Engineers

of Serbia, 2012, 16(4): 241-247.

[27] SAL E, DE PRADO J, SÁNCHEZ M, et al. Joining of self-passivating W-Cr-Y alloy to ferritic-martensitic steel by hot isostatic pressing[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, 170: 112499.

[28] LIU W S, SHENG Q Q, MA Y Z, et al. Interfacial microstructures, residual stress and mechanical analysis of hot isostatic pressing diffusion bonded joint of 93W-4.9Ni-2.1Fe alloy and 30CrMnSiNi2A steel[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 156: 111602.

[29] 郎利辉, 布国亮, 薛勇, 等. 钛合金热等静压模拟本构关键参数确定及工艺优化[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(4): 34-38.

LANG Lihui, BU Guoliang, XUE Yong, et al. Determine key parameters of simulation constitutive and process optimization for titanium alloy (Ti-6Al-4V) hot isostatic pressing[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(4): 34-38.

[30] NOHARA A, NAKAGAWA T, SOH T, et al. Numerical simulation of the densification behaviour of metal powder during hot isostatic pressing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1988, 25(1): 213-225.

[31] 郎利辉, 续秋玉, 张东星, 等. 钨合金粉末的热等静压数值模拟及验证[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(6): 839-846.

LANG Lihui, XU Qiuyu, ZHANG

Dongxing, et al. Numerical simulation and verification of tungsten alloy powders during hot isostatic pressing[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2014, 19(6): 839-846.

[32] 陈海鹏, 王发展. 钨铜合金粉热等静压致密化过程的有限元模拟[J]. 机械工程材料, 2017, 41(6): 69-74, 98.

CHEN Haipeng, WANG Fazhan. Finite element simulation of hot isostatic pressing densification process for W-Cu alloy powder[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(6): 69-74, 98.

[33] 姚松, 郎利辉, 布国亮, 等. 基于Ti-6Al-4V的热等静压与温压成形数值模拟对比研究[J]. 锻压技术, 2013, 38(3): 156-160.

YAO Song, LANG Lihui, BU Guoliang, et al. Comparison of numerical simulation between hot isostatic pressing and warm compaction on Ti-6Al-4V[J]. Forging & Stamping Technology, 2013, 38(3): 156-160.

[34] 瞿宗宏, 刘建涛. 热等静压近净成形数值模拟的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(5): 59-67.

QU Zonghong, LIU Jiantao. The research progress of near net shaping hot isostatic pressing simulation[J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(5): 59-67.

## Application of Hot Isostatic Pressing Technology in Tungsten Alloy

CAI Gaocan<sup>1</sup>, FU Jubo<sup>1</sup>, ZHANG Dongxing<sup>2</sup>, HU Biao<sup>1</sup>, XIN Yanxi<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Shenzhen Institute for Advanced Study, University of Electronic Science and Technology of China, Shenzhen 518110, China)

**[ABSTRACT]** Tungsten alloy has been widely used in aerospace, military and electronic fields due to its good comprehensive performance. The improvement of comprehensive performance of tungsten alloy will also promote the development of these fields, and the hot isostatic pressing technology plays a key role in improving the performance of tungsten alloy. This paper introduces the application of hot isostatic pressing technology in the field of tungsten alloy, such as strengthening tungsten alloy by hot isostatic pressing, diffusion bonding of tungsten alloy by hot isostatic pressing and numerical simulation of hot isostatic pressing for tungsten alloy. Some problems and development trend of hot isostatic pressing technology in tungsten alloy field are also pointed out.

**Keywords:** Tungsten alloy; Hot isostatic pressing (HIP); Strengthening of tungsten alloy; Diffusion bonding; Numerical simulation

(责编 大漠)