

文章编号: 1004 - 0609(2004) 07 - 1059 - 09

材料超塑性研究的现状与发展^①

丁 桦¹, 张凯锋²

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 对 20 世纪 90 年代以来国内外超塑性的研究工作进行了介绍和评述。主要介绍了新的超塑材料的开发及超塑性的应用, 概述了国内外超塑性研究的最新进展, 并对超塑性研究的热点问题进行了评述, 重点评述了用超塑成型方法制作大型铝合金汽车零件、用分子动力学模拟超塑变形中的晶界滑动、新材料和纳米材料的超塑性开发及超塑微成型的研究等国内外超塑性研究的新进展。展望了超塑性的发展趋势, 指出应开发材料的低温或高速超塑性, 重视超塑性流动过程的理论研究, 进一步拓展超塑性的应用领域。

关键词: 组织超塑性; 相变超塑性; 超塑成形/扩散焊接

中图分类号: TG 111.7

文献标识码: A

Current status and developments in superplastic studies of materials

DING Hua¹, ZHANG Kaifeng²

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University,
Shenyang 110004, China;
2. School of Materials Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The major research work in the field of superplasticity of materials since 1990s in the last century has been introduced and commented. The developments of new superplastic materials, transformation superplasticity and applications of superplastic forming are introduced, the newest progresses are summarized and the subjects with common interests are discussed. The main new developments in the field of superplasticity such as the manufacture of large scale aluminium parts in automobiles, simulation of grain boundary sliding by molecular dynamics, developments of new and nanoscale materials and superplastic microforming are all emphasized. The developing trends of superplasticity are forecasted and it is clarified that the future work should be carried out in the aspects of developing low temperature and high speed superplasticity, investigating superplastic flow theoretically and enlarging the application of superplastic forming.

Key words: microstructural superplasticity; transformation superplasticity; superplastic forming/diffusion bonding

半个多世纪以来, 科学工作者们在材料的超塑性机理、冶金学、力学特性和应用技术等方面开展了广泛的研究。超塑性研究从观察某些金属及合金的超塑性现象开始, 进而深入研究其力学性能和变形机理, 直到应用研究, 已走过了漫长的岁月。在

现代科学技术飞速发展的 21 世纪, 超塑性的研究是否还有生命力, 超塑性理论研究如何深入、应用前景如何, 是超塑性研究者们及其它材料工作者密切关注的问题。本文着重对 20 世纪 90 年代以来国内外超塑性的主要研究工作进行了介绍和评述, 并

① 收稿日期: 2003 - 10 - 10; 修订日期: 2004 - 03 - 18

作者简介: 丁 桦(1958 -), 女, 教授, 博士。

通讯作者: 丁 桦, 教授; 电话: 024 - 83687746; E-mail: hding@263.net

结合近期召开的国际先进材料超塑性会议对超塑性研究的热点进行了分析。

1 材料的组织超塑性

对材料超塑性的研究工作以组织超塑性为主。除一般的金属和合金的超塑性研究之外,近十年来超塑性研究的一个重要特点是对新材料如金属基复合材料、金属间化合物及陶瓷材料的研究显得尤为重要。

1.1 金属及金属基复合材料的超塑性

在金属及金属基复合材料的超塑性中,以铝合金、镁合金和钛合金的研究最为活跃。在 20 世纪六七十年代,铝合金的超塑性研究达到了高潮。近年来,在铝合金的超塑性的研究方面仍有许多工作,包括超塑变形力学行为、变形过程中的组织演变、变形机制、电脉冲和电场对材料超塑性的影响等^[1-6]。

许多研究者对铝基复合材料的超塑性进行了研究。部分铝基复合材料的超塑变形条件和超塑性性能指标列于表 1。

表 1 铝基复合材料的超塑变形条件和超塑性性能

Table 1 Superplastic deformation condition and superplastic properties of Al composites

Composite (volume fraction, %)	$t/^\circ\text{C}$	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	m	$\delta_{\max}/\%$	Ref.
20Si ₃ N ₄ p/ 6061Al	545	10^{-1}		450	7
10SiC _p / 2024Al	515	5×10^{-4}	0.4	685	8
20Si ₃ N ₄ w/ Al-Zr-Mg	545	2×10^{-1}	0.4	230	9
20Si ₃ N ₄ p/ 5052Al	545	1	0.3	700	10
15SiC _p / IN9021	550	5	0.5	610	11
17.8SiC _p / 2124Al	490	8.3×10^{-2}	0.41	425	12
20Si ₃ N ₄ p/ 2124Al	515	4×10^{-2}		840	13

$\dot{\epsilon}$ is strain rate; m is strain rate sensitivity exponent.

对于镁合金超塑性的研究早在 20 世纪 60 年代就已开始。近年来,出于拓宽镁合金应用范围的要求,对镁合金超塑性的研究已成为一个热点,所研究的合金包括 Mg-Zr-Zr 系, Mg-Al-Zn 系, Mg-Li 系合金等^[14-20]。由于在较低的温度下实现超塑性可节省能源,防止材料发生氧化,材料的低温超塑性日益受到人们的重视。而镁合金高温下易氧化,使其在低温下获得超塑性尤为重要。

与铝基复合材料相同,镁基复合材料也可获得高应变速率超塑性。且研究表明,镁基复合材料在高应变速率下更有希望获得较好的超塑性性能。镁基复合材料的处理方法、超塑变形条件及超塑性性能指标可参考文献^[20-22]。

钛合金可以分为 α 、 $\alpha+\beta$ 和 β 三大类,其中 $\alpha+\beta$ 双相合金从加工温度来看,是最适合于超塑性控制的,所以超塑性的研究与开发也大都以 $\alpha+\beta$ 双相合金为中心进行,特别是 Ti-6Al-4V 合金的超塑成形在航空航天领域已得到了广泛的应用。近年来关于 Ti-6Al-4V 合金超塑变形过程中的组织演变、变形机制方面仍有许多研究工作进行^[23-25]。

大部分的钛合金通过组织控制都能呈现超塑性,但普通钛合金的最佳超塑温度很高,如 Ti-6Al-4V 在 900~950 $^\circ\text{C}$ 和 10^{-4}s^{-1} 的低应变速率下呈现最佳超塑性。近年来的研究工作主要围绕使钛合金的超塑变形在更低的温度下进行,并开发新的钛合金的和超塑预处理工艺^[25-28]。

近年来,在 Zn 合金及复合材料^[29]、镍合金^[30-32]及铜合金^[33]的超塑性研究方面也有一些工作。

除有色金属与合金之外,有关钢的超塑性的研究也一直在进行中,包括高碳钢、合金钢和双相不锈钢等^[34-36]。2003 年 7 月在西班牙马德里举办的 THERMEC'2003 先进材料制备与成形国际会议上,虽然未设超塑性专题,但仍有 4 篇关于钢的超塑性方面的文章,而且涉及新的制备方法,包括用喷射成型方法制备超高碳钢超塑材料等^[37]。

1.2 金属间化合物的超塑性

金属间化合物具有高的比强度,良好的抗氧化性和抗高温蠕变性能,是很有潜力的航空航天结构材料。20 世纪 80 年代以来,国内外出现了金属间化合物材料研究开发的热潮。由于金属间化合物的室温塑性一般较差,不能满足零件成形的需要,超塑变形为其成形提供了可能性,许多研究者对金属间化合物的超塑性进行了研究。大多数金属间化合物是双相或多相,即由金属间化合物或固溶体与有序金属间化合物组成。表 2 列出了部分双相及多相金属间化合物的超塑变形条件和超塑性性能指标。

由于单相合金在高温时容易长大,一般来说,单相细晶材料难以获得良好的超塑性。但一些单相金属间化合物如 Ni₃Al, Ni₃Si, Co₃Ti, TiAl 以及 FeAl 在一定条件下可呈现超塑性^[46]。其中, Fe₃Al 和 FeAl 属于大晶粒超塑性,这些材料的晶粒尺寸

为 100~ 350 μm ^[47]。

表 2 双相及多相金属间化合物的超塑性能

Table 2 Superplastic properties of multi-phase intermetallics

Composition (mole fraction, %)	<i>t</i> / °C	$\dot{\epsilon}$ / s ⁻¹	<i>m</i>	δ_{max} / %	Ref.
Ti-24Al-11Nb	980	5×10^{-5}		810	38
Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo	960	1.5×10^{-3}	0.76	1240	39
Ti-24Al-14Nb-3V-0.5Mo	960	8×10^{-4}	0.7	1129	40
Ti-46.7Al-2.2Cr	1100	5×10^{-4}	0.77	340	41
Ti-33Al-3Cr	1075	8×10^{-5}		517	42
Ni-25Al-25Cr	900	2.2×10^{-4}	0.5	480	43
Ni-95Ti-3.1V-2Mo	1080	8×10^{-3}	0.5	710	44
Ni-30Fe-Y	980	1.64×10^{-4}	0.52	467	45

许多金属间化合物在超塑变形前的组织形态与一般理想的超塑金属材料即等轴细晶组织不同, 一些研究者用 SEM, TEM 和 EBSD 等手段研究了各种类型的金属间化合物超塑变形中的组织变化^[47-49]。这些非理想超塑材料的出现体现了超塑性组织的多样性。

2 材料的相变超塑性

大多数合金都可以通过一定的处理形成细小的晶粒组织, 因此目前大量的研究工作均针对材料的组织超塑性。然而, 在有些情况下, 组织超塑性不容易获得。如: 1) 陶瓷和一些难以生成细小晶粒的化合物; 2) 易生成大面积空洞的金属基复合材料; 3) 某些铸锭或粉末冶金经近终形成型后, 无法进行形变热处理; 4) 某些晶粒经细化后无法再进行粗化的金属。在这些情况下, 内应力可成为一种成型技术, 因此近年来它又重新受到人们的关注^[50]。

相变超塑性是材料受到外载荷作用, 并在其相变点上、下施以循环温度, 而使材料获得的一种不同于寻常塑性的能力。相变超塑性勿须经过预处理, 也不需要细晶化, 而需要有两种稳定晶型, 并在一定温度下能发生相互转变。

相变超塑性又称为内应力超塑性。产生内应力的方法很多。一些有固态转变的合金, 在转变温度附近进行热循环, 可产生热应力; 有些纯金属多晶体和单相合金, 由于热膨胀系数的各向异性, 通过热循环也可以产生内应力; 有些复合材料, 由于组

元的热膨胀系数不同, 通过热循环也可以产生内应力。一些研究者对 Zn^[51], Fe^[52], Ti 及 Ti 基复合材料^[53]、Al 基复合材料^[54] 以及金属间化合物^[55] 等材料中的相变超塑性进行了研究。

Zwigl 和 Dunand 在钛合金中研究了一种新的方法来获得内应力超塑性^[56]。与热化学处理 (Thermochemical processing, TCP) 相似, 该过程以氢作为暂时性合金元素; 而与内应力超塑性相似, 变形机制是基于外应力和内应力的叠加。这种方法用渗氢—除氢过程中产生的内应力来加速钛的变形, 即用氢诱发内应力。实验材料为纯钛, 试验温度分别为 805 和 860 °C (相变温度为 882 °C)。1 个氢循环由渗氢和除氢两部分组成, 在 805 和 860 °C 时的最大氢含量分别为 18.3% 和 14.3%。图 1 示出了 Ti-H 相图及该研究中渗氢后相的变化。

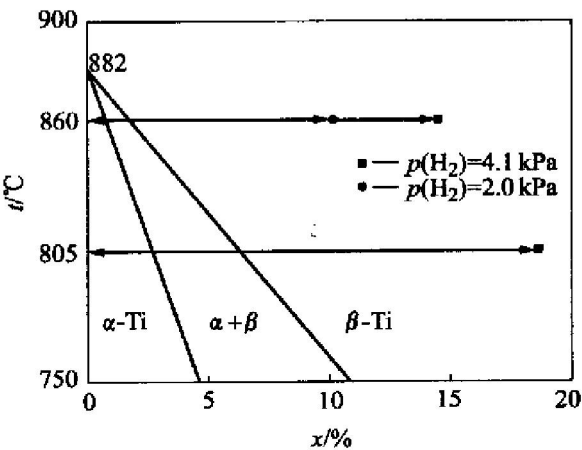


图 1 Ti-H 相图及渗氢后相的变化

Fig. 1 Ti-H phase diagram and phase change after hydrogenation

在整个循环中, 有 4 种应变: 由于渗氢引起的晶格膨胀应变; 在相变中由于体积错配引起的晶格转变应变; 与内部错配无关的塑性应变; 由内部错配造成的塑性应变。与一般的依赖于热循环的内应力超塑性不同, 此种新方法可在恒温下进行, 只是化学成分发生可逆变化。塑性应变增量在每个氢循环后累积, 变形增量与外加应力成正比。变形温度、循环频率、最大氢含量和氢气流动速率通过它们对氢扩散动力学的影响改变应变增量。

3 超塑成形及应用

3.1 超塑成形

迄今为止, 超塑成形已经在许多方面得到了应

用,如超塑性板材气胀成形、等温锻造、超塑挤压及差温拉伸等。超塑成形技术(SPF)的应用范围已经发展到锌铝合金、铝合金、钛合金、铜合金、镁合金、镍基合金以及黑色金属材料,现又扩展到陶瓷材料、复合材料、金属间化合物等。超塑成形作为一种新的材料成形技术,具有成形压力小,模具寿命高,可一次精密成形等优点。成形件质量好,不存在由于硬化引起的回弹导致的零件成形后的变形问题,故零件尺寸稳定,对钛合金等零件更能显示其优点。利用材料的超塑性可以加工普通方法难以加工的零件,在航空航天、建筑、交通、电子等方面的应用获得越来越广泛的应用,尤其在航空航天领域已成为不可或缺的加工手段。美国 Superform 公司和英国 Superform Metals LTD 公司在铝合金、钛合金超塑成形方面,不论是产品的数量还是品种都是最多的,在超塑成形技术方面居世界前列。目前钛合金超塑成形工艺已广泛用于制造导弹外壳,推进剂储箱,整流罩、球形气瓶、波纹板及发动机部件等。

近十年来,日本在超塑成形工业研究方面取得了长足的进展。日本超塑成形的工业应用虽然比欧洲国家和美国要晚,但却有其特色。日本最大的两家公司 Mitsubishi 重工业公司和 Kawasaki 重工业公司最先展开了超塑成形的研究,并第一批研制了 SPF 专用设备。日本还有一些其它的公司,进行钛合金、双相不锈钢和铝合金的超塑成形,用超塑性方法成批生产大型客机的内部零件、轿车和公共汽车零件及厨房用品等^[57]。

我国的研究者从 20 世纪 70 年代初开始着手超塑性的研究工作,距今已有 30 多年的历史。在这段时间里,国内许多学校和科研院所对超塑成形进行了研究。钛合金超塑产品已在航空、航天、仪表、电子、轻工、机械和铁道等各个工业部门得到有效的应用。如国内已锻出了带有密排轴向叶片的钛合金涡轮盘和没有焊缝的整体钛合金高压球罐,使生产率提高几十倍到二百倍,成本降低到原有成本的 1/8~1/10。另外钛合金超塑产品包括航天工业中的卫星部件、导弹外壳、推进剂贮箱、整流罩、球形气瓶、圆形容器、波纹板、各种梁和框结构以及发动机部件和火箭气瓶等^[58]。但我国的超塑性应用和国外的成批量商品化生产还有一定的差距。

在民用产品方面,北京超塑新技术有限公司生产的超塑合金槽筒,是为纺织工业对纱线质量要求越来越高、络筒机不断趋向高速化而研制的高新技术产品。由于采用了超塑成形技术中的气胀成形工

艺以及高精度的模具,可精确地保证精确的槽形。现已开发出多种规格的金属槽筒,可用于络制不同绞度筒子及平行筒子,供整经、染色、并纱、并捻、针织、无梭织布等工序使用。超塑材料的深加工产品应用和市场前景也很广阔,如工艺美术制品、路灯灯罩、卫星电视接收天线、仪表壳体、录音机飞轮、空调排风罩等。超塑成形中的气胀成形工艺可满足灯饰灯具类产品空心薄壳、外观造型复杂的要求,还可用于制作结构复杂、表面有花纹的高级餐具、包装盒等。

3.2 超塑成形与扩散连接

20 世纪 70 年代,美国洛克威尔公司首先将超塑成形和扩散连接技术相结合,发明了超塑成形/扩散连接组合技术(Superplastic forming/diffusion bonding, SPF/DB)。之后,英、法、德、前苏联和日本投入了大量人力和财力,相继开展这一技术研究。这种技术非常适合于加工复杂形状的零件,例如航空发动机上的风扇叶片、飞机机翼等^[59]。由于 SPF/DB 技术能够成形出形状复杂的整体零件,可减轻结构质量 15%~40%,降低生产成本 30%~50%,因此这项技术发展非常快,目前已从实验室阶段发展到实用化阶段。从用以替换现有的分离式铆接结构件,发展到整体的 SPF/DB 构件;从用于次承力构件,发展到用作主承力构件;在成形材料方面,从钛合金发展到了高强度铝合金、铝锂合金、金属基复合材料、金属间化合物、陶瓷;在毛坯形式方面,从钛、铝板材的 SPF/DB,发展到板材与机加零件的扩散连接。我国于上世纪跟踪了这一先进技术。近年来,已研制出飞机风动泵舱门、框段、电瓶罩盖和发动机维护口盖等部件^[60]。图 2 所示为利用 SPF/DB 技术生产的发动机整流叶片形貌。同时,SPF 和 SPF/DB 工艺也逐渐扩展至其它领域,如电讯产品、交通业、建筑业等方面。北京航空制造工程研究所在 1999 年和 2002 年曾 2 次举办包括材料超塑成形/扩散连接研究与应用的全国性会议,对 SPF 和 SPF/DB 在我国的应用起到了一定的推动作用。

4 近期国际超塑性研究热点

国际先进材料超塑性会议(ICSAM)始于 1982 年,每 3 年召开一次。2003 年 7 月 27 日至 8 月 1 日,第八届国际先进材料超塑性会议(ICSAM-2003, 8th International Conference on Superplasticity

in Advanced Materials 2003) 在英国牛津大学圣凯瑟琳学院(St. Catherine College) 召开。会议设有变形机理和微观结构进展、工业过程优化、超塑成形和汽车应用、商用轻合金、陶瓷和金属间化合物、超塑材料、新工艺和商业应用展望等专题, 共发表论文 137 篇。从国际学术界的趋势来看, 超塑性的研究有以下几个热点。

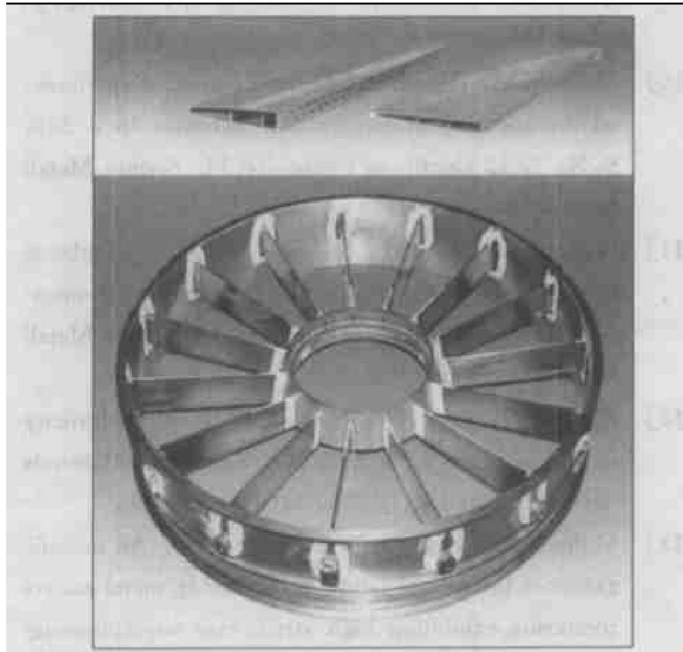


图 2 利用 SPF/DB 工艺制造的发动机整流叶片形貌

Fig. 2 Photo of engine commutating vane manufactured by SPF/DB

4.1 超塑性工业应用的进一步扩展

近来引人注目的是铝合金在汽车工业中的应用。在第八届超塑性国际会议上, 日本和瑞士等国的汽车公司介绍了用超塑成形方法生产的大型铝合金覆盖件, 为超塑成形在汽车工业中的应用开辟了前景。超塑成形具有无弹复、只需单侧模具、单工序、设备载荷低等优点, 但还存在一些问题, 有待于进一步解决。由于在生产中采用了坯料预热、热开模、机械手取件或多工作台交替等方案, 使超塑成形周期降到 10 min 以下。而普通冲压需要多台设备、多工序, 相比较而言, 目前的超塑成形效率是可以接受的。但目前细晶的超塑铝合金板材价格在普通板材的 10 倍左右, 这使超塑成形覆盖件成本居高不下, 难以大规模应用。其原因一方面是铝合金细晶板材制备成本较高, 另一方面是其应用面较窄。超塑性在汽车行业中应用尚需要冶金部门、汽车工业应用部门的共同努力。

4.2 超塑变形机制研究的新阶段

超塑变形过程中的晶界滑动(Grain Boundary

Sliding, GBS) 是人们普遍接受的变形机制。目前, 晶界的结构已得到深入的研究, 但在晶界结构和原子层次方面的研究还很少涉及到晶界滑动。从原子或电子层次的分析给出晶界滑动的物理图像, 将给晶界滑动机制的研究带来一个突破。由于原位直接观察非常困难, 尤其是高温变形材料更是如此, 近年来出现的分子动力学模拟是一个可选手段。瑞士的学者对于二维和三维的晶界滑动问题进行了分子动力学模拟, 并在超塑性国际会议上做了相关的主题报告, 其研究结果曾分别在 Nature 和 Science 上发表, 具有世界领先水平。但是, 由于问题的复杂性, 以及多种不确定因素, 这种模拟主要还是定性的, 或半定量的。如何将宏观和微观研究相结合, 从而更能说明实际问题, 还需要做很多的工作。

4.3 新材料和纳米材料超塑性的深入开发

镁合金、金属间化合物、金属基复合材料、陶瓷等新材料的超塑性将会进一步受到重视。近年来, 陶瓷的超塑性研究备受瞩目。在第八届超塑性国际会议上, 瑞典斯德哥尔摩大学沈志坚博士关于氮化硅陶瓷高应变速率超塑性的论文引起了人们的关注。他将氮化硅在 10^{-2}s^{-1} 的应变速率下进行体积成形, 类似于金属材料的反挤压成形。这项研究距应用较近, 某种程度上代表着陶瓷超塑性的发展方向。开发大块纳米级超塑材料、研究它们的超塑变形行为仍将是研究者们追求的目标, 其中在纳米陶瓷、金属基纳米复合材料等方面都将有所突破。

4.4 微成形研究跻身于材料超塑性研究领域

各种精细零部件材料及加工技术是国际上研究的热点, 并已成为 21 世纪塑性成形技术的发展方向之一。通过微成形制造的零件(外形尺寸为毫米级甚至亚微米级)一般用于微型机械或微电机系统, 应用于国防、空间科学及其他高技术研究领域。与常规塑性成形方法相比较, 超塑成形可在低应力下获得大的变形, 在微成形方面有着独特的优越性。我国的研究者已在这方面进行了有益的尝试, 研究了 1420Al-Li 合金的超塑特性, 并采用表面带有微槽和微孔两种形式的模具研究了该合金的微成形性^[61]。另外, 应当引起重视的是非晶合金精细零部件的超塑成形技术^[62]。采用非晶合金和超塑成形技术, 可制备高性能、高精度的微细机械零部件。国外已能用超塑挤压和锻造方法制造非晶合金精密光学仪器部件和超微齿轮。

5 结语

超塑性研究虽然已经走过了半个多世纪,但在超塑材料和变形机制方面还有很多未开发或未完全开发的领域,超塑性的应用还有可拓展的空间。目前,应进一步开发新材料及纳米材料的超塑性,并使其在低温高速条件下实现。对变形机理的正确解释可为选择新的成型方法、开发新的超塑材料提供依据,因此应重视超塑性流动过程的理论研究,同时,在超塑应用方面应力图有所创新,使超塑性的研究成果在国民经济发展中发挥其独特的作用。

REFERENCES

- [1] 李旭红,刘兴秋,刘庆,等. 温轧态 Al-Mg-Zr 合金超塑变形过程中力学行为和微观组织相关性研究[J]. 材料研究学报, 1995, 9(1): 25-28.
LI Xu-hong, LIU Xing-qiu, LIU Qing, et al. Study on the correlation between mechanical behavior and microstructural change in a warm-rolled Al-8Mg-0.2Zr alloy during superplastic deformation[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1995, 9(1): 25-28.
- [2] 刘润广,蒋浩民,姜勇,等. 2214 铝合金超塑变形机制[J]. 金属学报, 1996, 32(12): 1244-1247.
LIU Run-guang, JIANG Hao-min, JIANG Yong, et al. Mechanism of superplastic deformation in aluminium alloys 2214[J]. Acta Metall Sinica, 1996, 32(12): 1244-1247.
- [3] Gandhi C, Raj R. A model for subgrain superplastic flow in aluminum alloys[J]. Acta Metall Mater, 1991, 39(4): 679-688.
- [4] 刘志义,崔建忠,白光润. 脉冲电流对 2091 合金的超塑性及断裂行为的影响[J]. 金属学报, 1993, 29(2): A90-92.
LIU Zhi-yi, CUI Jian-zhong, BAI Guang-run. Effect of current pulse on superplasticity and fracture behavior of 2091 Al-Li alloy[J]. Acta metal sinica, 1993, 29(2): A90-92.
- [5] Conrad H, Cao W D, Lu X P, et al. Effect of electric field on cavitation in superplastic aluminum alloy 7475[J]. Mater Sci and Eng, 1991, A138: 247-258.
- [6] 吴诗婷,李森泉. LY12CZ 铝合金超塑变形时的电场效应[J]. 金属学报, 1995, 31(6): A272-275.
WU Shi-tun, LI Sen-quan. Effect of electric field in the superplastic deformation of LY12CZ aluminum alloy[J]. Acta Metall Sinica, 1995, 31A(6): 272-275.
- [7] Mabuchi M, et al. Superplastic behavior at high strain rate in a particulate Si₃N₄/6061 aluminum composite[J]. Scripta Metall Mater, 1991, 25(9): 2003.
- [8] WEI Zheng, ZHANG Bao-liang, WANG Yan-wen. Microstructure and superplasticity in a stir-cast SiC_p/2004 aluminium composite[J]. Scripta Metall Mater, 1994, 30: 1367-1372.
- [9] Mabuchi M, Higashi K, Tanimuta S, et al. Superplastic-like behavior in as-extruded Al-Zr-Mg alloy matrix composites reinforced with Si₃N₄ whiskers[J]. Scripta Metall Mater, 1991, 25: 1675-1680.
- [10] Mabuchi M, Higashi K, Inoue K, et al. Experimental investigation of superplastic behavior in a 20% Si₃N₄/5052 aluminum composite[J]. Scripta Metall Mater, 1992, 26: 1839-1844.
- [11] Higashi K, Okada T, Mukai T, et al. Superplastic behavior in a mechanically alloyed aluminum composite reinforced with SiC particulates[J]. Scripta Metall Mater, 1992, 26: 185-190.
- [12] Zahid G H, Todd R I, Prangnell P B. Superplasticity in an aluminum 2124/SiC_p composite[J]. Materials Science Technology, 1998, 14(9): 901-905.
- [13] Mabuchi M, Higashi K, Langdon T G. An investigation of the role of liquid in Al-Cu-Mg metal matrix composite exhibiting high strain rate superplasticity[J]. Acta Metall Mater, 1994, 42(5): 1739-1745.
- [14] 王桂松,张杰,耿林,等. 金属基复合材料的高速超塑性[J]. 宇航材料工艺, 2001(2): 13-18.
WANG Gui-song, ZHANG Jie, Gen Lin, et al. High strain rate superplasticity of MMCs[J]. Aerospace Material Technology, 2001(2): 13-18.
- [15] Watanabe H, Mukai T, Higashi K. Low temperature superplastic behavior in ZK60 magnesium alloy[J]. Materials Science Forum, 1999, 304-306: 303-308.
- [16] Kaneko J, Sugamata M, Hisara N. Superplastic properties of rapidly solidified Mg-Al-Zn alloys[J]. Materials Science Forum, 1999, 304-306: 85-90.
- [17] Mohri T, Mabuchi M, Nakamura M, et al. Microstructural evolution and superplasticity of rolled Mg-9Al-Zn[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A290: 139-144.
- [18] Tsao L C, Wu C F, Chuang T H. Evaluation of Superplastic formability of the AZ31 magnesium alloy[J]. Z Metall, 2001, 92(6): 572-577.
- [19] Kim W J, Chung S W, Chung C S, et al. Superplasticity in thin magnesium alloy sheets and deformation mechanism maps for magnesium alloys at elevated temperatures[J]. Acta Mater, 2001, 49: 3337-3345.
- [20] Takuda H, Enami T, Kubota K, et al. The formability of a thin sheet of Mg-8.5Li-1Zn alloy[J]. J Material Processing Technology, 2000, 101: 281-286.

- [21] 李 锋, 林 立, 刘 正, 等. 镁合金及其复合材料超塑性的研究现状[J]. 中国镁业, 2003(4): 7-14.
LI Feng, LIN Li, LIU Zheng, et al. Current status of study on superplastic magnesium alloys and composites [J]. Chinese Magnesium Industry, 2003(4): 7-14.
- [22] 尉胤红, 王渠东, 刘满平, 等. 镁合金超塑性的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2002, 16(9): 20-23.
WEI Ying-hong, WANG Qir-dong, LIU Man-ping. Current status and development trends of study on superplastic magnesium alloys[J]. 2002, 16(9): 20-23.
- [23] 白秉哲, 杨鲁义. Ti-6Al-4V 和 Ti-10V-2Fe-3Al 合金超塑性变形中各向异性研究[J]. 塑性工程学报, 1996, 3(4): 7-13.
BAI Bing-zhe, YANG Lu-yi. Anisotropic behavior and constitutive equations of superplastic deformation of Ti-6Al-4V and Ti-10V-2Fe-3Al alloys[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1996, 3(4): 7-13.
- [24] Kim J S, Kim J H, Lee Y T, et al. Microstructural analysis on boundary sliding and its accommodation mode during superplastic deformation of Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering, 1999, A263: 272-280.
- [25] Salishchev G A, Galiyev R M, Valiakhmetov O R, et al. Development of Ti-6Al-4V sheet with low temperature superplastic properties[J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 116(2-3): 265-268.
- [26] Salishchev G A, Valiakhmetov O R, Galiyev R M. Formation of submicrocrystalline structure in the titanium alloy VT8 and its influence on mechanical properties [J]. Journal of Material Science, 1993, 28: 2898-2902.
- [27] Frommeyer G, Czarnowski P V. High strain rate superplasticity and strength properties of two-phase titanium-intermetallic Ti-12Cr-5Al and Ti-12Nb-5Al alloy [J]. Z Metall, 1990(10): 756.
- [28] 张津徐, 葛红林, 程晓英, 等. 一种可在低温高应变速率下超塑成形的钛合金研究及开发[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(2): 105-108.
ZHANG Jin-xu, GE Hong-lin, CHENG Xiao-ying, et al. Study of superplastic forming titanium alloy at low temperature and high strain rate[J]. Rare Materials and Engineering, 2000, 29(2): 105-108.
- [29] 李世春. Zr-Al 共晶合金的超塑性[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998. 16-17.
LI Shir-chun. Superplasticity of Zr-Al Eutectic Alloy [M]. Dongying: Shiyou University Press, 1998. 16-17.
- [30] Valitov V A, Kaibyshev O A, Mukhtavov S K, et al. Low temperature and high temperature rate superplasticity of nickel base alloys[J]. Materials Science Forum, 2001, 357-359: 417-424.
- [31] 刘润广, 蒋浩民, 韩 雪, 等. 718 合金的超塑性[J]. 金属热处理学报, 1998, 19(2): 16-20.
LIU Run-guang, JIANG Haomin, HAN xue, et al. Superplasticity of inconel 718 Alloy[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1998, 9(2): 16-20.
- [32] 吕宏军, 贾新朝, 张凯锋, 等. 超细晶化对高温合金 GH4169 性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(3): 268-271.
LI Hong-jun, JIA Xin-chao, ZHANG Kaifeng, et al. Effect of superfine-graining on mechanical properties of superalloy GH4169[J]. Materials Science & Technology, 2002, 10(3): 268-271.
- [33] 姚祖斌, 吴洛平, 姚天长, 等. 供应态 HPb59-1 黄铜超塑性压缩的实验研究[J]. 热加工工艺, 1993, 1: 5-9.
YAO Zhurbin, WU Luoping, YAO Tianchang, et al. A study of superplastic compression on received HPb59-1 brass[J]. Hot Working Technology, 1993, 1: 5-9.
- [34] Kim W J, Taleff E M, Sherby O D. Superplasticity of fine-grained Fe-C alloys prepared by ingot and powder processing routes [J]. Journal of Material Science, 1998, 33: 4977-4985.
- [35] Xu C H, Gao W, Yang Y L. Superplastic boronizing of a low alloy steel-microstructural aspects[J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 108: 349-355.
- [36] Patankar S N, Lim C T, Tan M J. Superplastic forming of duplex stainless steel [J]. Metall and Mater Trans, 2000, 31A: 2394-2396.
- [37] Zhang J G, Yan B, Zhang H, et al. Superplastic ultrahigh carbon steels processed by spray forming[A]. In: Chandra T, Torralba J M, Sakai T. Materials Science Forum[C]. Switzerland, Spain: Trans Tech Publications Ltd, 2003, 426-432: 919-924.
- [38] Yang H S, Zelin M G, Valiev, et al. Strain induced morphological changes of α_2 and β phase in Ti_3Al alloys during superplastic deformation [J]. Scripta Metall Mater, 1992, 26: 1707-1712.
- [39] 王 斌, 贾天聪, 李世琼. Ti_3Al 基合金超塑性及其应用的研[J]. 钢铁研究学报, 1997, 9(Suppl): 29-34.
WANG Bin, JIA Tiancong, LI Shir-qiong, et al. Study on superplasticity and its application of Ti_3Al -based alloy [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1997, 9(Suppl.): 29-34.
- [40] Shang B S, Mao W F, Li Z Q. Superplastic forming of

- a Ti₃Al alloy and its application in aerospace[J]. Materials Science Forum, 1997, 243 - 245: 775 - 782.
- [41] 施幸华, 张 获, 葛 云, 等. 热轧态 TiAl 基金属间化合物超塑性研究[J]. 材料科学与工程, 1998, 16(1): 24 - 27.
- SHI Xing-hua, ZHANG Di, GE Yun, et al. Study of superplasticity in as-rolled TiAl based intermetallic[J]. Materials Science and Engineering, 1998, 16(1): 24 - 27.
- [42] 黄伯云, 贺跃辉, 邓忠勇, 等. 热变形 TiAl 基合金的超塑性行为[J]. 金属学报, 1998, 34: 1173 - 1177.
- HUANG Bai-yun, HE Yue-hui, DENG Zhong-yong, et al. Superplasticity behavior of thermally deformed TiAl based alloys[J]. Acta Metall Sinica, 1998, 34: 1173 - 1177.
- [43] 陈荣石, 郭建亭, 殷为民, 等. NiAl 基多相金属间化合物的显微组织、超塑性研究[J]. 金属学报, 1998, 34: 1121 - 1125.
- CHEN Rong-shi, GUO Jian-ting, YIN Wei-min. Investigation on microstructure and superplasticity of a NiAl based multiphase alloy[J]. Acta Metall Sinica, 1998, 34: 1121 - 1125.
- [44] Stoner S L, Mukherjee A K. Superplasticity in fine grained nickel silicide[A]. In: Hori S, Tokizane M, Furushiro N. Proceedings of Superplasticity in Advanced Materials[C]. Osaka: The Japan Society for Research on Superplasticity, 1991. 323 - 328.
- [45] Zhou W L, Guo J T, Chen R S, et al. Superplasticity of a Ni₂₈. 5Al₂₀. 4Fe intermetallic alloy[J]. Acta Metall Sinica, 2000, 13(3): 888 - 892.
- [46] 杜兴嵩, 郭建亭, 周彼得. 单相组织金属间化合物的超塑行为[J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(6): 52 - 55.
- DU Xing-hao, GUO Jian-ting, ZHOU Bi-de. Superplastic behavior of single phase intermetallic compound[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2001, 13(6): 52 - 55.
- [47] Chu J P, Liu I M, Wu J H, et al. Superplastic deformation in coarse grained Fe-23Al alloys[J]. Materials Science and Engineering, 1998, A258: 236 - 242.
- [48] DING Hua, SONG Dan, ZHANG Cai-bei, et al. Superplastic behavior of a β -forged Ti₃Al-Nb alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A281: 248 - 252.
- [49] 王殿梁, 丁 桦, 宋 丹. 锻态 Ti₃Al 合金超塑压缩的力学行为及组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2001, 30(6): 444 - 447.
- WANG Dian-liang, DING Hua, SONG Dan, et al. Mechanical behavior and microstructural evolution during superplastic deformation of a forged Ti₃Al based alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(6): 444 - 447.
- [50] Dunand D C. Transformation superplasticity in metals, alloys and composites[A]. In: Chandra T, Sakai T. Proceedings of THERMEC'97[C]. Warrendale: The Minerals, Metals and Material Society, 1997. 1831 - 1838.
- [51] Pickard S M, Derby B. The influence of microstructure on internal stress superplasticity in polycrystalline zinc[J]. Scripta Metall Mater, 1991, 25: 467 - 472.
- [52] Zwigl P, Dunand D C. Transformation superplasticity of iron: modelling and experimental evidence[A]. In: Chandra T, Sakai T. Proceedings of THERMEC'97[C]. Warrendale: The minerals, Metals and Material Society, 1997. 1831 - 1838.
- [53] Dunand D C, Bedekc C M. Transformation mixmatch superplasticity in reinforced and unreinforced titanium[J]. Acta Mater, 1996, 44: 1063 - 1076.
- [54] Huang C Y, Daehn G S. Superplastic forming of metal matrix composites by thermal and pressure cycling[A]. In: Ghosh A K, Bieler T R. Proceedings of Superplasticity and Superplastic Forming 1995[C]. Warrendale: TMS, 1996. 135 - 142.
- [55] Schuh C, Dunand D C. Transformation superplasticity of super α -titanium aluminide[J]. Acta Mater, 1998, 46(6): 5663 - 5675.
- [56] Zwigl P, Dunand D. Internal stress plasticity in titanium by cyclic alloying/dealloying with hydrogen[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 117: 409 - 417.
- [57] Osada K. Commercial application of superplastic forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68: 241 - 245.
- [58] 郝凤元. 大型钛合金构件及其制造工艺在飞机上的应用[J]. 航空制造工程, 1998(5): 113.
- HAO Feng-yuan. Application of large titanium alloy member and alloy manufacturing process on plane[J]. Aviation Producing Engineering, 1998(5): 113.
- [59] Xun Y W, Tan M J. Applications of superplastic forming and diffusion bonding to hollow engine blades[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99: 80 - 85.
- [60] 王 哲. 钛合金超塑成形/扩散连接技术在飞机结构上的应用[J]. 钛工业进展, 1999(3): 23 - 25.
- WANG Zhe. Application of SPD/DF of titanium in the aircraft structures[J]. Titanium Industry Development, 1999(3): 23 - 25.
- [61] 张凯锋, 王长丽, 于彦东. 1420Al-Li 合金的超塑性及微成形[J]. 金属成形工艺, 2003, 21(1): 11 -

14.
ZHANG Kai-feng, WANG Chang-li, YU Yan-dong.
Superplastic characteristics and microforming of 1420
Al-Li alloy[J]. Metal Forming Technology, 2003, 21
(1): 11 - 14.
- [62] 谢建新, 周 成, 张志毫. 非晶合金精细机械零部件
的超塑性成形技术[J]. 材料导报, 2003, 17(2): 8 -
11.
- XIE Jian-xin, ZHOU Cheng, ZHANG Zhi-hao. Super-
plastic forming techniques for fine precision amorphous
alloy parts[J]. Materials Review, 2003, 17(2): 8 - 11.
- (编辑 陈爱华)