

TC4 钛合金超塑成形研究现状及其发展展望

Research Status and Development Trend on Superplastic Forming of TC4 Alloy

北京航空航天大学 李瑞婷 郭伟 朱颖 曲平 康慧 李小强 杜清良 宋鹏

[摘要] 介绍了 TC4 钛合金超塑成形的研究现状, 主要内容包括: 应变速率敏感性指数 m 值研究; 超塑成形过程中材料组织演变过程及超塑变形机制研究; 空洞的演变过程研究, 包括空洞形核、长大机制及断裂机制研究; 超塑成形与焊接方法的组合成形技术研究, 其中着重介绍了超塑成形与扩散连接 (SPF/DB) 和超塑成形与激光焊接 (SPF/LW) 的组合应用以及有限元模拟技术在超塑成形中的应用; 文章的最后对 TC4 钛合金超塑成形的发展趋势进行了展望。

关键词: TC4 钛合金 应变速率敏感性指数 m 变形机制 空洞演变 超塑成形

[ABSTRACT] The research status on superplastic forming (SPF) of TC4 alloy is mainly reviewed, including the research on strain-rate sensitivity exponent m , microstructure evolution and the mechanism of deforming, cavitation which contained cavity nucleation and growth, and fracture mechanism is also included. composite applications of superplastic forming and welding is put forward with emphasis on Superplastic Forming/Diffusion Bonding (SPF/DB) and Superplastic Forming/Laser welding (SPF/LW), and the application of finite element analysis on SPF is also introduced. Finally prospects on the further research trend of superplastic forming in TC4 alloy are proposed.

Keywords: TC4 alloy Strain-rate sensitivity exponent m Deforming mechanism Cavitation SPF

作为一种 $\alpha+\beta$ 的双相合金, TC4 钛合金因有着高强度、优良的耐腐蚀性和可焊性, 以及良好的生物相容性等特点, 在化工领域、航空航天领域和医学领域得到广泛的应用^[1-2]。但由于 TC4 钛合金在室温下存在塑性较低、变形困难的缺点, 它的应用曾一度受到限制。研究表明, TC4 钛合金在温度范围为 850~950℃, 应变速率范围为 10^{-4} ~ 10^{-2} s⁻¹ 时, 呈现良好的超塑性^[3-4]。利用材料的超塑性可以成形在常温条件下无法成形的零件, 即超塑成形^[5]。目前对于 TC4 钛合金超塑性的研究已趋于成熟, 主要集中在变形工艺的选择和优化, 组织演变与变形机制、空洞演变及断裂机制以及超塑成形与焊接方法的组合成形等方面, 本文就 TC4 钛合金超塑成形问

题的研究现状及其发展趋势进行综述。

1 应变速率敏感性指数 m 的研究

为了描述超塑性的力学特征, 早在 1964 年, Backofen 就建立了超塑性拉伸变形的指数方程, 将应变速率的敏感性指数 m 引入超塑性力学领域, 并提出了应力 σ 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的关系式:

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m, \quad (1)$$

式中, σ 为真实应力, $\dot{\epsilon}$ 为真实应变速率, K 为材料常数, m 为应变速率敏感性指数^[6]。应变速率敏感性指数 m 值是材料超塑性能的重要特征参数, 它反映了材料在拉伸变形过程中的抗缩颈能力。随着 m 值的引入, 超塑性变形研究从现象观察进入了理论研究阶段。

目前关于 m 值的研究主要集中于 m 值的测量方法、 m 值的精细研究和利用 m 值指导实际生产等方面。 m 值的测量方法有速度突变法、载荷突变法、变截面试样拉伸试验法、长度及其增量法等^[7-12], 其中, 速度突变法是目前最常用的方法, 优点是它不需要很多试样即可求出 m 的近似值, 但计算过程需要使用外推法或反外推法获得载荷, 难免引入误差, 且它忽略了速度变化对于 m 值的影响^[6-7]。载荷突变法是由宋玉泉院士在速度突变法的基础上提出的一种改进方法, 不需要外推试验曲线, 可以基本上消除试验机惯性对速度跃变的不良影响, 使试验结果更加准确^[7]。此外, 宋玉泉等^[12]对 m 值的精细测量做了大量研究, 用数学上完全相同的测量公式, 得到在不同变形路径下测得的 m 值不相同的结论。这表明超塑性与塑性变形的结构敏感性尚存在更为精细的结构, 因此工程上把 m 值视为常数或者视为与变形路径无关都是很粗糙的。

王高潮等^[13]提出了最大 m 值超塑成形 (Max m SPD) 的概念, 即对 Ti-6Al-4V 钛合金进行超塑变形过程中, 通过动态控制和不断调整变形应变速率的大小, 并即时测量 m 值, 使 m 值在变形过程中一直保持最大状态。试验初始应变速度设置为 0.5mm/s, 随后应变速度以楼梯模式循环增长, 并根据动态采集的 m 值不断调整应变速度的大小。试验结果表明, TC4 钛合金在不经过晶粒细化的情况下, 使用最大 m 值超塑成形 (Max m SPD) 与传统应变速率保持不变的成形方法相比, 超

塑性得到显著提高,平均延伸率从 421% 提高到 523%,在 900℃ 下达到 642%,如表 1 所示。最大 m 值超塑成形 (Max m SPD) 方法很好地改善了材料的超塑性能,与传统改善材料超塑性的方法相比,降低了超塑成形对细化晶粒的要求,为实现超塑成形提供了一个新方法。

表1 两种超塑变形条件下Ti-6Al-4V的拉伸试验结果

成形温度 /℃	伸长率 /%	
	传统成形方法	最大 m 值超塑成形
850	421	523
900	352	642

2 组织演变及变形机制的研究

超塑变形过程伴随着金属组织变化,主要有晶粒长大、等轴晶的拉长、晶粒的转动和滑动、位错的增值、动态回复与再结晶以及空洞的形核长大等现象。这些现象的产生,与超塑变形的变形机制有着密切的关系,目前人们已经提出很多超塑变形的机理模型,但是由于超塑变形的复杂性,往往一种机理只能解释一种或几种合金的变形,随着对超塑变形机理研究的深入,人们逐渐明确了利用晶界滑移、扩散蠕变和晶内位错滑移 3 种变形机理综合解释合金的超塑性流动行为^[6]。

赵文娟等^[14]发现,初始晶粒尺寸对超塑性变形中的组织演变及变形机制有着显著的影响,对于细晶粒材料(2.6 μm 和 6.5 μm),位错运动协调的界面滑动是其变形的主要机制;而对于晶粒较粗的材料(16.2 μm),超塑变形机制是晶界滑动与晶内位错运动的共同作用;随着晶粒尺寸的增大,以晶界滑动为主的变形方式逐渐转向以晶内位错运动为主;拉伸变形中晶粒明显粗化,变形诱发晶粒长大是超塑性变形组织的重要特征之一。孙圣迪等^[4]在应变速率为 $7.7 \times 10^{-2} \sim 7.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、温度为 650~950℃ 的条件下,对 TC4 钛合金超塑拉伸断裂之前的组织进行 XRD 分析和 TEM 观察,结果表明,变形过程中材料主要的软化机制为动态回复和再结晶,在低应变速率和高温条件下,有利于形成长板状晶粒;研究还发现,变形温度对于相组成有着显著的影响,较高的变形温度有利于 β 相的形成,而应变速率对此没有影响。

3 空洞及断裂机制的研究

空洞的演变是超塑变形过程中普遍存在的组织变化,当超塑变形达到一定程度时,就会出现空洞的形核,继而发生长大、聚集现象,如图 1 所示^[15]。在超塑性变形过程中,空洞现象是不可忽视的,因为当空洞数量超过一定值时,将对超塑变形产生不利影响^[16]。目前对于

空洞的研究包括空洞形核和长大的机制,材料的断裂机制,防止空洞形核、长大、聚集的方法等^[17-18]。

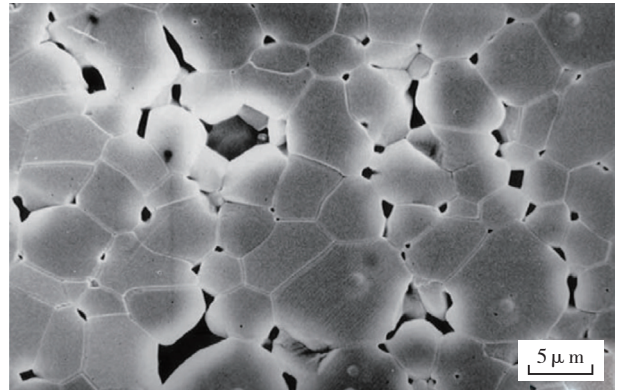


图1 单相铝三叉晶界处空洞的扫描电镜图像

Fig.1 Scanning electron micrograph depicting cavitation at triple points in single phase alumina

研究表明,晶界滑移是超塑变形的重要机制,晶界滑移会引起局部应力集中,阻碍晶界滑移的进一步发生,当应力集中无法借助位错运动消除时,空洞就会形核,继而发生长大。空洞的长大机制有两种:一种是应力促进空洞沿晶界扩散长大;另一种是空洞周围的塑性变形引起空洞长大^[6,18]。超塑性材料对空洞有很高的容忍性,因此较多空洞的存在并不是导致材料断裂的原因,一般认为,导致材料断裂的原因是空洞的聚集或连接,即当空洞在横断面内聚合或连接到一定比例时材料就发生断裂。防止空洞产生的标准方法是施加静水压力,静水压力会降低空洞形核和长大的速度^[19]。

对 TC4 钛合金进行热扭转试验表明^[20],空洞优先在 β 相界及三角晶界处形核,且大部分空洞的形核方向垂直于试样的轴线;随着变形量的增加,空洞开始长大,且空洞并非以等轴状态长大,而是以椭圆形的方式长大。Tom Bieler^[21]发现织构对于空洞形核和长大也存在影响,空洞的形核和长大与 90° 位错区域有着密切的联系,即便是第二应力很小或者为负的情况下,空洞也优先沿着位错取向为 90° 的方向形核;相反,空洞不易于在 60° 位错取向处形核,因为在这种情况下,滑移系被激活,有利于应力的释放,所以这种区域有利于成形。因此,选择降低 90° 位错和增加 60° 位错的变形处理顺序将有利于抑制后续变形过程中空洞的发生。此外,研究发现,空洞的数量与距离表面的尺寸有着密切的关系,Nicolaou^[22]采用光学显微镜和有限元分析方法研究了 Ti-6Al-4V 合金锻压过程中局部变形对于空洞密度和尺寸的影响。研究发现,空洞的数量沿着距自由表面距离的增大而减小,在距离表面大于 10mm 的地方未发

现空洞的存在,最大数量的空洞出现于表面处,如图2所示^[22]。

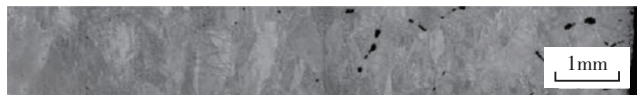


图2 空洞在工件表面深度方向的分布
Fig.2 Distribution of cavitation along radial direction on work-piece surface

4 超塑成形和焊接技术的组合应用

超塑成形方法主要包括气胀成形(吹塑成形)、超塑性拉深、超塑模锻,以及超塑成形/扩散焊接组合工艺(SPF/DB)、超塑成形/激光焊接组合工艺(SPF/LW)等,其中,对气胀成形的研究已日趋成熟,目前引起人们广泛关注的是超塑成形与焊接技术的组合应用,主要集中在焊接类型的选择、焊接参数的控制、焊接对于超塑性力学特征和组织的影响等方面。

超塑成形与扩散焊接(SPF/DB)是最先在飞行器构件上应用的一种组合工艺技术,它具有成形压力小、模具寿命长、可一次精密成形、成形质量好等优点^[23]。TC4超塑成形与扩散连接(SPF/DB)技术既可以克服TC4钛合金加工成形困难的缺点,又可以制造多层空心的轻量化结构,该工艺在航空、航天发动机和飞行器结构件制造方面具有独特的技术优势,因此获得了广泛的应用^[24]。如Han Wenbo等^[25]利用TC4钛合金气胀超塑成形与扩散连接制造蜂窝状结构,试验分别研究了扩散连接和超塑成形的温度、压力、时间对成形件的厚度均匀性和接头剪切强度的影响,确定了超塑成形与扩散连接的最佳工艺参数。研究发现,室温下变形时,材料在基体而非接口处断裂,证实了超塑成形与扩散连接技术是制造蜂窝状结构的可行方案。

然而,随着航空航天工业的发展,传统的SPF/DB工艺暴露出相当多的局限性和不足,主要表现在:扩散连接时必须在成形部位的不连接部分预先涂敷止焊剂,对后续的超塑成形模具密封性要求很高;要求严格控制扩散连接温度和保温时间,以防止晶粒过度长大,且超塑成形模具在900℃以上长时间承受较大的压力,容易导致模具的疲劳开裂和蠕变变形,降低模具的使用寿命^[26]。近年来,国内外学者开始积极寻找替代扩散连接的其他焊接方法与超塑成形工艺组合,对不同的焊接接头超塑性能力和零件性能等方面进行了研究^[27],其中主要的方法是超塑成形/激光焊接组合工艺(SPF/LW)。

程东海和黄继华等对TC4激光焊接后的超塑性力学行为和组织进行了研究^[24,26-28]。结果表明,在温度为870~920℃,应变速率为 10^{-3} ~ 10^{-2} s⁻¹范围内时,焊缝呈

现良好的超塑性能;拉伸温度和应变速率是影响钛合金激光焊缝超塑性变形的两个主要因素,随拉伸温度的升高或应变速率的降低,焊缝伸长率均呈增加趋势,在900℃、 10^{-3} s⁻¹条件下伸长率达到最大值397%。在超塑性变形过程中,原始焊缝的针状马氏体首先转变为片层状的 $\alpha+\beta$ 组织,而后片层组织发生再结晶等轴化;动态再结晶是焊缝显微组织转变的主要机制。

王刚等^[29]对TC4钛合金板平行于激光焊缝进行超塑性拉伸,拉伸原理如图3所示。结果表明,激光对焊TC4钛合金板的伸长率在101%~154%,流动应力在21.5~34.4MPa, m 值约为0.37;此外,文章还研究了TC4钛合金激光焊接板的超塑胀形能力,发现经激光焊接后的板材具有很好的超塑胀形能力,且焊接速度越快胀形高度越大。

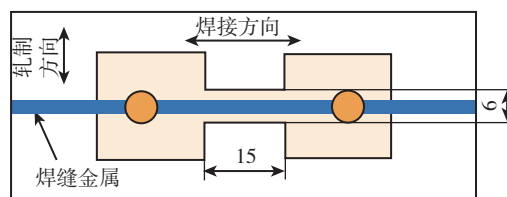


图3 拉伸原理图^[29]
Fig.3 Principle of tensility^[29]

5 有限元模拟技术的应用

近年来,计算机模拟超塑成形的研究取得了突破性进展,利用材料的本构模型可在大应变速率范围内预测与时间有关的行为,如通过有限元方法模拟 m 值、应变速率、成形时间对于成形件厚度的影响,从而可以优化成形模具设备和成形工艺来减小撕裂、褶皱等锻压缺陷^[30]。有限元模拟技术成为了联系材料塑性变形过程中各参数和变形工艺参数的桥梁,为实际生产提供正确的指导,降低了试验成本,引起了人们的普遍关注。

超塑成形过程可以看成是一个非线性粘塑性流动过程,研究发现,摩擦系数的大小对成形件的厚度均匀性有着重要的影响^[31]。Y.Chen^[32]利用有限元分析软件Abaqus分析了TC4钛合金在吹塑成形过程中摩擦系数、应变速率、应变速率敏感性指数 m 对于吹塑成形应力和成形件厚度的影响,以及模拟中采用不同单元类型对结果的影响,并用试验验证了分析结果的准确性。结果表明,采用连续单元能够得到最好的预期结果,超塑成形过程与摩擦系数有着密切的关系,摩擦系数越低成形件的厚度和成分均匀性越好;同样,应变速率敏感性指数越高厚度均匀性也越好。

除此之外,利用有限元技术对空洞形核、长大及断裂进行模拟的研究也日益增多^[22,33],通过有限元模拟,

能够预防或减小空洞形核和长大的趋势,从而增加材料的成形能力。Yibin Xiang^[34]利用有限元模拟技术预测了超塑胀型过程中空洞的断裂演变,得到的结果与试验结果有很好的吻合性,结论如下:空洞优先在变形量最大的地方形核,空洞的存在增大了变形件中各处的矩阵应力,尤其是变形量最大的地方,这将直接减弱材料的成形能力;施加反向压力有助于抑制空洞的产生;随着 m 值的增大,空洞的分布更加均匀,体积分数下降;大的 n 值和相对较低的 R 值(各向异性系数)有利于抑制空洞的产生。

6 TC4 钛合金超塑性研究的发展展望

由于 TC4 钛合金超塑性在航空航天领域的广泛应用和超塑性成形研究的日趋成熟,笔者对于 TC4 钛合金超塑性研究作如下展望:

(1)改善 TC4 钛合金超塑性。通过控制原始晶粒尺寸,如细化晶粒等,以及选择最佳的变形温度、应变速率或添加合金元素,降低成形条件的限制,改善 TC4 钛合金超塑性仍然是今后的一个发展趋势。

(2)快速超塑成形技术。由于超塑成形的一大缺点是成形速率较慢,一般在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间,限制了生产效率的提高^[35],而且当超塑成形的应变速率较低时,零部件在高温下停留时间较长,零件的力学性能将降低,因此,开发能在较高应变速率条件下(10^{-2} s^{-1})超塑成形的材料或快速超塑成形技术,将引起人们广泛关注。

(3)超塑成形与其他方法的组合应用。寻找新的焊接方法代替扩散连接与超塑成形工艺组合,如搅拌摩擦焊、等离子弧焊、真空电子束焊等,是扩大超塑成形应用范围的一个方向。

参 考 文 献

[1] Ko Y G, Lee C S, Shin D H. Deformation characteristics of submicrocrystalline Ti-6Al-4V. *Scripta Mater*, 2008, 58: 1094-1097.

[2] Giuliano G. Constitutive equation for superplastic Ti-6Al-4V alloy. *Materials and Design*, 2008, 29(7): 1330-1333.

[3] 赵文娟,张亚玲,丁桦,等.线性回归法建立 Ti-6Al-4V 合金超塑变形本构关系. *材料与冶金学报*, 2008, 7(3): 201-205.

[4] Sun S D, Zong Y Y. Hot deformation behavior and microstructure evolution of TC4 titanium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20: 2181-2184.

[5] Chan H P, Young G K. Enhanced superplasticity utilizing dynamic globularization of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 496: 150-158.

[6] 吴诗焯. *金属超塑性变形理论*. 北京:国防工业出版社, 1997.

[7] 宋玉泉,管志平,李志刚,等.应变速率敏感性指数的理论和测量规范. *中国科学 E 辑技术科学*, 2007, 37(11): 1363-1382.

[8] 宋玉泉,连书君,张振军.载荷跃变法测量 m 值. *机械工程*

学报, 1989, 25(3): 38-43.

[9] 吴庆龄. 测量超塑性应变速率敏感性指数的一种方法. *东北工学院学报*, 1981, 1: 55-62.

[10] 宋玉泉. 测定超塑性应变速率敏感性指数 m 的新公式——用长度及其增量测定 m 值. *吉林工业大学学报*, 1984, 4: 116-119.

[11] 王仲仁,海锦涛,公方忠. 测定 m 值的变截面试样拉伸试验法. *锻压技术*, 1985, 2: 21-26.

[12] 宋玉泉. 超塑性拉伸变形应变速率敏感性指数的试验测量及其精细分析. *机械工程学报*, 2001, 4: 1-7.

[13] Wang G C, Fu M W. Maximum m superplasticity deformation for Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007(192/193): 555-560.

[14] 赵文娟,丁桦. Ti-6Al-4V 合金超塑性变形中的组织演变及变形机制. *中国有色金属学报*, 2007, 17(12): 1973-1980.

[15] Chokshi A H. Cavity nucleation and growth in superplasticity. *Materials Science and Engineering A*, 2005(410/411): 95-99.

[16] Dong X J, Lu S Q, Zheng H Z, et al. Cavity nucleation during hot forging of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alloy with colony alpha microstructure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20: 2259-2264.

[17] Semiatin S L, Seetharam V, Weiss I. Hot workability of titanium and titanium aluminide alloy—an overview. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 243: 1-24.

[18] Tan M J, Zhu X J, Thiruvardchelvan S. Cavitation phenomenon of commercially pure titanium. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191: 202-205.

[19] Chokshi A H, Mukherjee A K, Duba A G, et al. The brittle-ductile transition in Rocks. Washington DC: American Geophysical Union, 1990. 83-89.

[20] Semiatin S L, Seetharaman V, Ghosh A K, et al. Cavitation during hot tension testing of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, 1998, 256: 92-110.

[21] Bieler T, Goetz R L, Semiatin S L. Anisotropic plasticity and cavity growth during upset forging of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 405: 201-213.

[22] Nicolaou P D, Semiatin S L. An analysis of cavity growth during open-die hot forging of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36: 1567-1574.

[23] 林兆荣. *金属超塑成形原理及应用*. 北京:航空工业出版社, 1990.

[24] 程东海,黄继华. TC4 钛合金激光焊缝超塑性行为研究. *航空制造技术*, 2009(10): 106-111.

[25] Han W B, Zhang K F. Superplastic forming and diffusion bonding for honeycomb structure of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 183: 450-454.

[26] 程东海,黄继华. 激光叠焊板超塑性行为研究. *试验研究焊接*, 2010, 7: 42-45.

[27] 程东海,黄继华. 钛合金激光焊缝的超塑性变形行为及显微组织. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 67-71.

[28] Cheng D H, Huang J H. Microstructure and superplasticity of laser welded Ti-6Al-4V alloy. *Materials and Design*, 2010, 31: 620-623.

[29] Wang G, Zhang W C. Superplastic formability of Ti-6Al-4V butt-welded plate by laser beam welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 9: 429-433.

(下转第 99 页)

工业新机研制、基础性研究、技术攻关及预先研究中的专业性研究和试验。(2)航空工业企业应加强建立技术研发中心建立企业技术开发中心,为技术创新工作提供组织保证。(3)要加强知识产权保护,为技术创新保驾护航。要扩大知识产权保护的范围,实施专利产业化工程,以充分发挥专利制度在促进技术创新中的积极作用,形成创新和知识产权保护的环境。

成长型子产业发展支撑策略主要包括:(1)要建设企业技术联盟。其主要途径有增强企业间的合作,培育龙头企业,加快技术创新,完善集群的持续创新和扩散机制完善航空产业链,大力推动相关产业互动集群。(2)应着重培育企业文化。将文化建设作为基地及集群发展的战略任务,采取各种可能的途径与措施,推进基地所倡导的“鼓励成功,宽容失败”的价值理念的社会化进程,进而塑造信任、合作的社会文化环境。

扩张型子产业发展支撑策略主要包括:(1)加强产学研合作。产学研密切联系了产业基地、高校、科研院所等,有利于科技成果的研究和转化。(2)大力发展各种中介机构,尤其是金融服务机构。这样,可增加机构数量和服务种类,搭建内部技术平台和外部服务平台,并发挥其结构洞优势,增强配套协调能力,促进产业集群的结构更加完善。(3)进一步拓展航空服务业。主要途径有拓展航空产业链,发展航空运输服务业,创新商业模式,拓展航空运输支持保障业务。

4 结束语

本文从陕西航空产业结构出发,针对其特点运用层次分析法对集群子产业的两个维度,即行业竞争力和行业吸引力两方面进行指标权重的计算,从而根据其大小进行重要性排序,最后采用GE矩阵分析法对陕西航空产业集群子产业重点发展的优先级别进行评价。通过评价研究,将陕西航空产业集群子产业归纳为维持型子产业、成长型子产业、扩张型子产业3个主要类型,并根据其类型,针对性的制定相应的发展支撑策略,这些策略能够有效的解决陕西航空产业集群子产业业务选择中存在的一些问题。并且随着数据挖掘等新的、更为科学的量化分析方法引入集群研究中来,航空产业集群化发展研究必将有新的突破与创新,从而为推动航空产业集群的可持续发展提供理论支持。

参考文献

- [1] Andersson T, Schwaag-Serger S, Sörvik J, et al. The cluster policies whitebook. Sweden: Holmberges, 2004: 11-15.
- [2] Michael P. Location, competition, and economic development. *Economic Development Quarterly*, 2000, 14(1): 15-34.
- [3] Orjan S, Goran L, Christian K. The cluster initiative greenbook.

Stockholm: Ivory Tower, 2003: 18-19.

- [4] 迈克尔·波特. 国家竞争优势. 李明杆, 邱如美(译). 北京: 华夏出版社, 2002. 45-60.
- [5] 蓝庆新. 基于竞争优势的产业集群动态创新能力研究. 北京: 对外经济贸易大学出版社, 2009. 21-23.
- [6] Knorrinda P, Meyer-Stamer J. New dimensions in enterprise cooperation and development: From clusters to industrial districts. *ATAS Bulletin XI: The Hague and Duisburg*, 1998.
- [7] 陈剑锋. 国外产业集群研究综述. *外国经济与管理*, 2002(8): 22-27.
- [8] 白山稳. 基于SWOT的陕西民用航空产业发展战略研究. *科技管理研究*, 2010(22): 120-123.
- [9] 段婕, 杨慧芳. 陕西省航空产业竞争力评价及提升对策研究—基于因子分析法的实证研究. *科技管理研究*, 2010(24): 76-81.
- [10] 金乾生. 陕西航空产业要走集群化道路. *当代陕西*, 2007(8): 20-21.
- [11] 杨昌明, 江荣华, 查道林, 等. 产业集群资源支持力评价. 北京: 中国地质大学出版社, 2008. 37-40.
- [12] 卢杰, 黄新建, 章帆. 产业集群竞争力评价的理论基础与模型构建. *统计与决策*, 2008(19): 67-69.
- [13] 林振锦. GE矩阵在战略制定中的应用. *中国石油企业*, 2005(4): 44-46.
- [14] 尹红炜, 孟宪忠. GE衍生矩阵区域产业制定中的应用研究. *昆明理工大学学报(理工版)*, 2006, 31(1): 108-111.
- [15] 刘善仕. 德尔菲法在企业人力资源预测中的运用. *企业经济*. 2003(2): 116-117.
- [16] 刘爱雄, 朱斌. 产业集群竞争力及其评价. *科技进步与对策*, 2006(1): 144-146.
- [17] 王学军, 郭亚军. 基于G1法的判断矩阵的一致性分析. *中国管理科学*, 2006, 14(3): 65-66.
- [18] 郭亚军, 潘德惠. 一类决策问题的新算法. *决策与决策支持系统*, 1992(3): 56-62.
- [19] 郭亚军. 综合评价理论与方法. 北京: 科学出版社, 2002.

(责编 良辰)

(上接第94页)

- [30] Lu C, Zhang L W. Numerical simulation on forging process of TC4 alloy mounting parts. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16: 1386-1390.
- [31] Bonet J, Gil A, Wood R D, et al. Simulating superplastic forming. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195: 6580-6603.
- [32] Chen Y, Kibble K, Hall R, et al. Numerical analysis of superplastic blow forming of Ti-6Al-4V alloys. *Materials and Design*, 2001, 22: 679-685.
- [33] Semiatin S L, Goetz R L, Shell E B, et al. Cavitation and failure during hot forging of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30: 1411-1424.
- [34] Xiang Y X, Wu S C. Numerical simulation of cavity damage evolution in superplastic bulging process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 116: 224-230.
- [35] 王国峰, 张凯锋. 快速超塑性的研究与应用. *塑性工程学报*, 2010, 17(6): 55-61.

(责编 深蓝)