

超塑技术在高新材料中的应用及发展战略

The Application of Superplasticity to Hi—Tech Materials and Its Developmental Strategy

张立斌 海锦涛 白秉哲 陆 辛

(机械工业部北京机电研究所, 北京 100083)

一、引 言

金属的超塑性现象从发现至深入研究经历了十几年的历程,到 20 世纪 60 年代金属超塑性才作为一门新学科开始受到世界各国科学家的重视,并在国外一些工业发达国家形成了“超塑性研究热”,在这个阶段主要着重于理论与现象的研究与探讨。从 70 年代开始,美、日、英、法、前苏联等工业强国竞相开发金属超塑技术,揭开了超塑性应用研究及其理论深入研究的新热潮,研究的材料极其广泛,几乎涉及到所有金属材料。超塑性作为一门新技术可以应用于塑性加工(即压力加工)、焊接、热处理、机械加工、粉末冶金等行业或领域,其中在塑性加工方面应用得最早也最为广泛、深入。世界各工业发达国家均投入了大量的人力、财力、物力来研究开发超塑成形技术在航空、航天、军工方面的应用。塑性加工技术是航空工业重要的支柱技术,也是衡量一个国家工业水平特别是航空工业水平的重要标志之一,超塑成形技术作为塑性加工领域中的一枝新秀给古老而重要的行业带来了勃勃生机。同其他的塑性加工方法相比,它具有成形精度高且准确可控、成形性好、设计自由度大、成形后锻件无回弹和残余应力、能够加工成形塑性差的材料(如钛合金等)、材料利用率高等特点。我国正是在 70 年代中期加入到此行列之中的,80 年代初形成了具有我国特色的第一个“超塑热”,即以工业牌号常用结构合金材料为对象,研究开发其超塑性及超塑成形技术为主导,带动超塑新材料、机理、力学等基础研究的发展,取得了一批具有国际先进或领先水平的科研成果(如战略导弹钛合金高压无缝气瓶、红 6—1 导弹涡轮盘等)。经过 30 多年来世界各国学者的努力及相应国家政府的支持,80 年代超塑性已形成了较为完整的体系,发展成为一门涉及金属材料、金

属物理、金属塑性加工、金属热处理、力学等学科的边缘新学科,于 1982 年在美国召开了世界第一届超塑性学术会议。80 年代中期,由于在陶瓷材料中发现超塑现象,将原以为金属材料所独有的现象,扩展到非金属材料范畴,“金属超塑性”这一术语也扩展为“材料超塑性”。由于超塑技术的独特优势,进入本世纪 90 年代,掀起了高新材料(如金属基复合材料、金属间化合物、陶瓷及复合材料等)超塑性研究的又一个新热潮。下面着重介绍当今超塑技术在高新材料方面研究、应用现状及发展,分析我国与世界上其他先进国家的超塑技术差距与优势,提出适合我国国情的超塑技术发展的建议。

二、高新材料的超塑性研究现状及展望

始于 1982 年的国际超塑性学术会议(ICSAM),每 3 年召开一次,到目前为止已开过 5 届。它代表着世界研究材料超塑性的水平及新动向。表 1 是各届国际超塑性学术会议召开的年代、论文总数、高新材料的论文数对比表,从表中可以看到在 1982 年第一届,陶瓷材料、金属间化合物的超塑性研究论文尚为空白,1985 年第 2 届时,陶瓷材料超塑性研究论文出现,到 1991 年第 4 届时,高新材料的超塑性论文已占一定的比例。说明继 60、70 年代锌合金、铝合金、钛合金等超塑性研究高潮之后,研究重点开始转向高新材料的超塑性研究。

表 1 各届国际超塑性学术会议论文分类统计

届数/论文总数	金属及其复合材料	陶瓷及其复合材料	金属间化合物
1/77	77(100%)	0	0
2/17	16(94%)	1(6%)	0
3/95	90(94.7%)	5(5.3%)	0
4/135	111(82.2%)	18(13.3%)	6(4.4%)
5/158	131(82.9%)	19(12.0%)	8(5.1%)

研究陶瓷、金属基复合材料、金属间化合物等先进材料的超塑性,主要因为这些材料具有若干特殊的优越性能及特殊的应用价值,但是其共同的特点是塑性加工性能差,开发其超塑性显然可以提供一条方便、有效、经济的成形加工途径。许多种金属间化合物、金属基复合材料和陶瓷已被证明可以具有超塑性,并且得到了不亚于金属的拉伸变形。第5届国际超塑性学术会议上有关这方面的论文近40篇,占总论文数的1/4。特别是近年来陶瓷材料超塑性研究获得了突破性进展,美国著名的超塑性学者兰登(Langdon)博士称“陶瓷材料超塑性的获得,似乎标志着新石器时代的到来。”在金属材料中存在的组织超塑性和相变超塑性,证明在陶瓷材料中也存在,但从工艺角度来看,研究的着重点是组织超

塑性。同金属材料组织超塑性不同,陶瓷材料的晶粒尺寸要比金属材料的晶粒尺寸小得多,主要是因为其制造工艺方法以及其晶界迁移率低,这表明了陶瓷材料的超塑变形的潜力,表2是近年来国外陶瓷材料超塑性研究成果。从表2可以看到陶瓷材料的晶粒尺寸都很细小,一般 ≤ 0.5 微米,最大也不超过3微米,这与超塑性金属材料中晶粒尺寸形成对照。按金属材料超塑性理论,晶粒尺寸减小将导致最佳超塑应变速率提高,那么晶粒尺寸非常细小的陶瓷材料将呈现最佳超塑性的应变速率可能相当高。但事实上,表2中的最佳应变速率通常不高于 10^{-4} 1/秒,个别为 10^{-3} 1/秒。但是超塑性陶瓷材料的应变速率敏感性指数(m值)较高,一般在0.5~1范围内。陶瓷材料超塑性的获得,还拓宽了超塑性

表 2 晶间无明显非晶相的陶瓷的组织超塑性

材 料	原始晶粒尺寸(μm)	温度($^{\circ}\text{C}$)	试验状态	m 值**	应变速率(1/s)	延伸率%或最大应变
UO ₂	2	1350	压缩	~1	~10 ⁻⁵	68.6
MGO	0.1~0.4	1054	压缩	~0.83	~10 ⁻⁵	>80
Al ₂ O ₃ (+0.05%MGO)	0.75	1450	压缩	~0.75	~10 ⁻⁶	>39
δ -SiC(+1.5%Al)	1.5~2.8	1900	压缩	~1	~10 ⁻⁴	>40
Al ₂ O ₃ (+0.25%MGO)	1.0	1420	压缩	—	~10 ⁻⁴	>45
Y-TZP *	0.3~2.2	1450	压缩	~0.5	~10 ⁻⁴	>78
Y-TZP	0.3	1450	拉伸	~0.5	~10 ⁻⁴	>120
Y-TZP/20%Al ₂ O ₃	0.9	1499	压缩	~0.53	~10 ⁻⁴	>84
BaTiO ₃	0.45	1150	压缩	0.5	~10 ⁻⁴	>39
Y-TZP	0.5	1297	压缩	—	10 ⁻⁵	39
Y-TZP/20%Al ₂ O ₃	~1	1450	压缩	0.5~1.0	10 ⁻⁴	39
Y-TZP/20%Al ₂ O ₃	~0.5	1450	拉伸	~0.5	10 ⁻⁴	>200
Y-TZP/20%Al ₂ O ₃	0.5	1650	拉伸	~0.5	10 ⁻³	500

* 3mol %Y₂O₃+稳定的正方 ZrO₂

** m 值为应变速率敏感性指数,一般认为 0.3 $\leq$ m $\leq$ 1 为超塑性状态。

表 3 金属间化合物的组织超塑性

材 料	晶粒尺寸(μm)	温度($^{\circ}\text{C}$)	试验状态	m 值	应变速度(1/s)	最大应变(%)
Fe ₃ (Al,Si)	100	850	拉伸	—	10 ⁻⁴	100
Ni ₃ Al/Y	10	1100	拉伸	—	~10 ⁻³	638
Ni ₃ Al	1.6	700	拉伸	>0.4	~10 ⁻⁴	160
Ni ₃ Al+Cr	10	1000	拉伸	~0.5	~10 ⁻³	100
Ni ₃ Al+Cr+Zr	10	1000	拉伸	—0.5	—10 ⁻³	280
TiAl	60	1100	拉伸	0.2~0.3	10 ⁻³	>100
Ni ₃ Si/ α	15	1080	拉伸	0.5	~10 ⁻³	650

的研究范围,即从金属材料扩展到非金属材料。金属间化合物的超塑性列于表3。根据金属间化合物的原始显微组织,其超塑性可分为两种不同类型:(1)单相超塑性,如Fe₃(Al,Si);(2)双相超塑性,如Ni₃Al+Cu+Zr合金等。金属间化合物的单相超塑

性与金属、陶瓷材料的组织超塑性相比,有两点重要区别,一是在金属间化合物中,甚至在原始晶粒尺寸很大的情况下也可得到超塑性,二是在单相超塑性起重要作用的晶粒内位错运动。金属基复合材料的超塑性列于表4。在1991年召开的第4届国际

超塑学术会议上首次发表了关于超导材料的超塑性研究论文,以及用超塑技术挤压超导陶瓷的研究论文。

现代先进材料的超塑性及超塑成形技术的开发、研究是世界瞩目的研究课题,在这方面我国起步较晚,1990年以前各届全国超塑学术会议等全国性会议上尚未见到关于此类材料超塑性方面的论文或报道。1991年第5届全国锻压年会和1992年第5届全国超塑性学术会议上首次有金属基复合材料和金属间化合物等方面的超塑性研究论文。我国1986年开始(863计划)进行高新材料超塑性的研究,已研究了Ni₃Al金属间化合物、Y—TZP陶瓷、

Y—TZP/Al₂O₃陶瓷复合材料、金属基复合材料等方面的超塑性,并取得了一定的成果。

在应用方面,日本通产省工业技术院名古屋工业研究所于1990年用超塑技术制造出陶瓷涡轮(用于汽车充电器),美国已用Ti—24Al—11Nb金属间化合物材料超塑成形出发动机零件,日本用超塑技术制造铝基复合材料的汽车汽缸活塞并小批量生产。我国在陶瓷材料、金属间化合物方面,尚未见到用超塑技术成形零件的报道,仅用颗粒增强铝基复合材料超塑成形出模拟件或试验件。总之在未来的世纪,超塑技术将在高新材料以及超导材料的制造、塑性加工方面发挥更大的作用。

表 4 金属复合材料的超塑性

材 料	温度(℃)	延伸率%	应变速率 1/s	m 值
SiCw/2124 20%vol	475~550	~300	3.3×10^{-3}	~0.33
SiCw/2024 20%vol	100~450	~300	5×10^{-4}	1.0
SiCw/6061 20%vol	100~450	1400	1.7×10^{-4}	1.0
SiCw/7475 12%~15%vol	~520	350	2×10^{-4}	>0.5
Si ₃ N ₄ w/6061 20%vol	545	600	2×10^{-1}	0.6
βSi ₃ N ₄ w/7064 20%vol	545	300	2×10^{-1}	0.4
· Si ₃ N ₄ w/6061	565	620	—	—
SiCp/2014 15vol	480	349	4×10^{-4}	0.4
SiCp/7475 15vol	515	310	2×10^{-4}	0.38
Si ₃ N ₄ p/6061 20%vol	545	450	$10^{-1} \sim 10$	—
SiCp/PM64 10%~15%	516	450	2×10^{-4}	>0.5
βSi ₃ N ₄ w/Zn—22Al13%	250	80	5×10^{-1}	0.24
βSi ₃ N ₄ w/Zn—22Al0.5%~8%	200	200~30	2×10^{-1}	—
SiCw/2124 20%vol	520	240	2×10^{-1}	0.5

三、差距、优势、建议与发展战略

世界超塑技术研究总体上来说一直保持着稳步发展,仅从发表论文数量情况(从1960年不到10篇逐年增加到1988年的300多篇)就可以清楚地看到这一点。超塑性研究主要分为理论研究和应用研究两大类。在理论方面的研究,国外工业发达国家总体上领先于我国,例如在测试方法(如m值)、经典理论专著出版、机理研究等方面。但我国在局部和个别问题上有一些独到之处(例如黑色金属的超塑性研究、非典型超塑性材料的超塑性及变形规律的研究、晶粒在超塑变形中的协调运动研究等)。而在应用研究方面我国与国外的差距不大,有些甚至具有国际领先水平(例如无缝钛合金高压气瓶、涡轮盘的超塑成形研究、模具型腔材料及超塑成形等)。在实际应用、大规模生产及工业化方面,我国还需努力赶上。据不完全统计,1974~1990年欧美市场销售的超塑成形零件从不到10种增加到约260种。以工业化生产而闻名于世的英国 Super-

form Metals 公司、TKR 国际公司和 BAK Airbus 公司,它们用超塑技术生产的各类型飞机构件,销往世界各地取得了巨大的技术、经济效益。在大型锻件超塑等温锻造方面,西方工业发达国家也走在前面,例如美国普惠公司用超塑性技术制造飞机高温合金涡轮盘;另外推重比为7~8的军、民用飞机的发动机涡轮盘和压气机盘也普遍采用超塑等温锻造技术,而我国尚在初研制或试验阶段,离实际应用或工业化阶段尚远。我国在80年代初形成的“超塑热”中,得到了政府的支持,国家科委投资在北京机电研究所建立了超塑性研究与中试基地,成立了全国超塑技术委员会,全国有近百家大专院校、科研院所、企业从事超塑性研究,以超塑技术应用为动力推动我国超塑性研究的发展,取得了大量的科研成果,其中一些应用成果受到国际许多知名专家的高度评价,发表了许多学术论文。到了90年代初,因经费等众所周知的原因,超塑性研究冷却下来,但并没有停止。未来还有许多课题等待研究,我们认为我国在下列几个方面应加强力度:

(下转第23页)

受能力,对农业保险的保费按照一定比例进行补贴;中央政府每年亦应根据全国农业保险业务的发展情况,按一定比例拨出资金作为农业保险基金,对农业保险的再保险进行补贴。各级政府对农业保险进行补贴,应该形成一个规范化的制度。

2、农业保险体制改革要坚持因地制宜、分类指导的原则。由于我国经济发展存在严重的地区不平衡,沿海和内地、大城市郊区和一般地区农村经济情况千差万别,在农业保险发展模式的选择上,也就不能强求一律,应允许各地根据自己的实际情况进行试验,探索出适合本地区特点的农业保险发展路子。北京、上海等大城市,郊区农业的商品化程度很高,农村的其他经济也比较发达,农民的收入水平也相对较高,政府的财政收入状况也相对较好,农业保险发展的环境和条件也就相对较好。农业保险可以在政府财政的支持下,采取由商业性保险公司经营或与地方政府联合经营的模式。

对于其他农业商品化程度比较低,政府财政支持能力也有限的地区,应该更多地强调调动和发挥农民的积极性,在此基础上政府进行支持和指导。目前一部分地区正在进行的农村互助合作保险试点,就是对适合我国国情的农业保险发展道路的有益探索。农民参加农村保险互助合作会,既是保险人,又是被保险人,有利于增强农民的保险意识和责任感,减少赔款问题上的纠纷和矛盾;保险互助会保险基金的自我积累,有利于调动地方和农民的积极性;农村保险互助会在县以上再进行分保,又可以分散风险;具体业务由人保公司或其他保险公司来代理,有利于提高经营管理水平,降低成本。与在县一级建立的农村保险互助会体制相适应,在省和中央两级,还要有相应的保险组织和财政资金相

配套。

3、应在实行农村保险互助体制的省区,建立农村保险互助会联合会,对全省区农村互助保险进行指导和必要的管理,保证基本政策的统一和基本做法的规范,同时根据省级财政的承受能力建立省级农业保险基金,对各个县级互助会的农业保险进行再保险。成立省一级的联合会的目的在于为基层提供服务和支持,而决不能办成一个盈利性经济组织,也不能办成一个行政机构对县级互助会进行行政干预。

设立全国性的国家农业保险公司,是加强国家对农业的投入,完善农业保险体制的重要措施。国家农业保险公司是国家级的农业保险的再保险公司。它不经办具体的农业保险业务,而是通过对全国各省区农村互助保险会联合会或其他保险机构农业保险的再保险,实现对农业保险的支持。中央财政每年根据农业保险业务的发展情况,按照一定比例拨付资金,建立国家农业保险基金,对农业保险进行补贴。

综合起来,我国的农业保险体系可以按照下述框架来建设:在中央一级成立国家农业保险公司,中央财政每年按农业保险业务的一定比例拨付资金,建立农业保险基金,通过再保险实现对农业保险的投入和支持;在省区市一级,根据不同情况,建立农村保险互助会联合会或依托其他保险机构,对农业保险进行再保险,财政也投入一定的资金进行补贴;在县一级,建立农村保险互助会作为农业保险的基层组织,具体业务可以由商业性保险机构来代理,有条件的地方也可以由商业性保险机构和地方政府联合经营。

(责任编辑 孙立明)

(上接第 41 页)

(1)在基础理论研究方面,应集中国内有限的研究资金(主要来源于国家自然科学基金、“863”计划资金等),资助我国急需且重要的研究课题,避免重复研究。另外人才资源也应集中,考虑资助中青年科研人员的比例,以保持研究的连续性,至少在课题中应有一定比例的青年人(在读研究生除外),培养一批青年骨干研究人员,以保持跨世纪的竞争力。

(2)加强应用基础研究和超塑性普及工作,集中国内有限资金,建立工业化、专业化的生产基地,改变我国分散研制状态和低水平重复现象,实现军工、航天航空产品的工业化生产,扩大民品的研制、批量生产及商品化,改变目前超塑性停滞在试制或小批生产的状态,解决经费问题。

(3)加强工艺技术和装备的研制,为工业化生产奠定技术物质基础。

(4)加强国内外学术、技术交流,掌握世界超塑性研究、应用的命脉。

(5)开展具有中国特色的超塑性研究。例如:超塑与常规塑性理论与应用接轨”的研究,将超塑性原理应用于现有的热塑性加工工艺。另外,在当今世界高新材料超塑性研究热潮中,应保持清醒的认识,避免尾随重复研究,争取从工程实际应用上打开突破口。特别是在超导材料方面,国外也刚起步不久,而我国在超导方面的研究处于世界领先行列,超塑技术在超导材料制造、加工、性能改善等方面将大有可为。

在 21 世纪超塑技术将发挥更大的作用,建议我国政府有关部门给予高度重视,加大投资,完善组织管理,组织联合技术攻关,使我国超塑技术水平跨上一个新台阶。

(责任编辑 刘先曙)