

高性能有机纤维复合材料及其界面性能

王 斌 金志浩

(西安交通大学 西安 710049)

丘哲明 刘爱华

(陕西非金属材料工艺研究所 西安 710025)

文 摘 综述了高性能有机纤维复合材料在固体火箭发动机壳体发展应用及其表面改性方法、界面性能表征,并用实验数据探讨增强材料、树脂系统及复合材料界面对壳体性能的影响,最后指出应当综合地考虑各方面的影响作用才能达到提高固体火箭发动机高性能有机纤维复合材料壳体性能的最终目的。

关键词 固体火箭发动机,复合材料壳体,容器特性系数

High Performance Organic Fiber Composites and Its Interface Properties

Wang Bin Jin Zhihao

(Xi 'an Jiaotong University Xi 'an 710049)

Qiu Zheming Liu Aihua

(Shanxi Research Institute of Non-metal Materials Technology Xi 'an 710025)

Abstract Development and applications of high performance organic fiber composites in solid rocket motor case are summarized, including surface treatment methods, characterizations of interface properties and its effects on composites. Effects of reinforcement material, resin matrix and composite interface on performance of case are discussed on basis of experimental data. Experimental results show that various combined influence factors have to be considered systematically to improve performance of the high organic fiber wound case of solid rocket motor.

Key words Solid rocket motor, Composite case, Vessel performance factor

1 引言

随着科学技术的发展,迫切要求改进材料的比强度与比模量,因此出现了高强度、高模量、低密度的纤维材料及其增强的高性能复合材料。为了满足航天器性能提高的需要,研究高性能复合材料成为航天材料技术的主要发展方向,所以人们越来越重视新型高性能纤维的研制成果,用纤维缠绕增强的复合材料制造燃烧室壳体已成为评价固体火箭发动机性能水平的重要标志之一,因为这直接影响航天

器的性能和技术指标,如影响运载火箭的射程、有效载荷等。

纤维增强复合材料壳体通常是由纤维浸渍树脂基体后,按照载荷—质量要求,经缠绕铺层而成的。复合材料壳体的性能衡量指标对总体设计部门而言要具有轻质高强的性能,在承受相同的内压(或轴压)等载荷下,复合材料壳体的质量要越轻越好,才能够减少消极质量,增加射程,节约发射经费;而对复合材料壳体成型工艺部门来说,其性能高低主要

收稿日期:2001-03-14

王斌,1970年出生,高级工程师,主要从事有机纤维复合材料成型工艺研究工作
宇航材料工艺 2001年 第4期

— 15 —

由制造出的压力容器的容器特性系数 PV/W_c 值来衡量。这种容器特性系数的概念应用于工程中,是一种综合性能指标,本质上与总体设计部门要求的质量比概念一致。

影响复合材料壳体性能的因素有很多,国内外研究指出,即使是用同种纤维而采用不同种的树脂及不同的成型工艺方法等都可使壳体内压爆破强度之差达 15%~35%^[1,2]。本文结合多年的具体实践经验,从纤维、树脂系统、界面等方面来探讨对复合材料壳体性能的影响因素。

2 增强有机纤维的发展

固体火箭发动机壳体的发展和增强材料的发展有着密切的联系,高比强度、高比模量的纤维相继出现,使它们在发动机壳体上得到充分应用,而高性能发动机的新要求,又推动增强纤维向更高的比强度和比模量方向发展^[3]。早在 70 年代初,美国成功地开发出芳香族有机纤维——Kevlar49 纤维,并用其替代玻璃纤维用于制造各类固体发动机壳体,例如“MX”、“三叉戟—1”、“潘兴—2”等战略战术导弹和“惯性顶级”等航天发动机,一度居于统治地位。继后法国的 M—4 潜地导弹,印度的 PSLV 运载火箭等发动机壳体也引进了这种材料。

前苏联自己开发研制了 APMOC 纤维,其拉伸强度超过 Kevlar49 约 38%,模量高 20%,该纤维广泛用于前苏联的战略导弹领域,如前苏联的 SS—24、SS—25 及当前技术最先进的“白杨—M”(即 SS—27)等洲际导弹、级发动机壳体均采用该种纤维,其壳体容器特性系数可达 35 km~40 km。目前 APMOC 纤维又有新的发展,其拉伸强度已达 6.9 GPa,模量接近 200 GPa。

近年来由于分子设计和工艺技术的突飞猛进,新型高性能有机纤维层出不穷,成为材料领域中十分活跃的一个分支,均列为 21 世纪的超级纤维。现已开发的品种中,聚芳杂环类芳香族有机纤维 PBO 最为突出,受到各国普遍重视。PBO(聚对苯撑苯并双恶唑)纤维原是美国空军 1970 年开始作为飞机用结构材料而着手研究的产品。具有刚性极强的线形伸直链结构,东洋纺公司在日本的商品名为 Zylon,其拉伸强度为 5.8 GPa,模量达 280 GPa,据最新资料表明,PBO 纤维拉伸强度现已达到 7.0 GPa,杨氏模量达 300 GPa~400 GPa,成为当今世界比强度和比模

量最高的增强材料。在固体火箭发动机壳体方面,美国布伦斯维克(Bruswick)公司已经用拉伸强度为 5.5 GPa 级的 PBO 纤维进行缠绕容器的综合研究,共缠绕 6 台内径为 250 mm 的球形高压容器,实测平均爆破压强 91 MPa,纤维应力 4.73 GPa,纤维强度转化率 86%,复合材料特性系数(PV/W_c) 65.2 km,与同样的拉伸强度 5.65 GPa 的 T—400 碳纤维缠绕容器相比(PV/W_c 值仅为 45.2 km),其性能要高 31%。此外,由于 PBO 纤维在高温、高压和严酷化学环境下卓越的稳定性,耐烧蚀性能优异,残碳强度高,因而亦已考虑作为绝热层候选材料,这种新型超级纤维的成功应用将给火箭发动机性能产生较大影响。可以肯定 PBO 纤维在 21 世纪初将会有更大规模的开发。表 1 为几种芳香族有机纤维性能比较,表 2 是几种壳体用增强纤维的比强度、比模量及其壳体性能。

表 1 几种芳香族有机纤维性能比较

Tab. 1 Properties comparison of various aromatic organic fibers

纤维	拉伸强度 / GPa	杨氏模量 / GPa	密度 / g cm ⁻³	分解温度 /
Kevlar49	3.6~3.7	125~133	1.44	-
APMOC	4.5~5.2	145~160	1.45	500~520
PBO	5.8	280	1.56	650

表 2 几种壳体用增强纤维的性能及其壳体性能

Tab. 2 Performance comparison of various reinforced fibers and its cases

纤维种类	密度 / g cm ⁻³	比强度 / 10 ⁵ cm	比模量 / 10 ⁷ cm	480 mm 容器特性系数 / km
S—2 玻璃纤维	2.55	约 109.8	约 631.94	19.6~21.4
Kevlar49 芳纶纤维	1.44	约 234.0	约 902.77	约 24.2
F—12 芳纶纤维	1.44	约 298.6	约 902.77	>33
T—300 碳纤维	1.76	约 214.7	约 1 272.72	30~33
T—800 碳纤维	1.76	约 312.5	约 1 272.72	38~40

我们最近采用实测复丝强度为 5 300 MPa 的 PBO 纤维与环氧基体进行复合材料试验初步研究,测得其层间剪切强度为 25 MPa~30 MPa,其单向复合材料($V_f > 0.55$)的拉伸强度为 2 700 MPa~3 000

MPa。由于 PBO 纤维是一种新型高性能纤维,国内外对其表面处理研究工作刚刚起步,报道文献非常少。美国 DOW 化学公司采用活性等离子体处理方法进行改性研究,其中氧等离子处理使界面剪切强度 IFSS 提高了 71.13%;还采用共聚方法,在分子链中引入特殊官能团,使纤维与树脂间形成化学键,使 IFSS 提高了 33.4%,但也使得纤维自身的力学性能降低。

3 纤维用的树脂基体系统

不同的纤维应该有不同的树脂系统与之匹配复合成型。美国劳伦斯利费尔实验室^[2]、陕西非金属材料研究所的科技人员^[3]等通过大量实验研究发现,用不同的树脂系统缠绕制造出的壳体性能相差高达 35%,这种影响直至现在还没有在理论上得到充分解释,文献^[4]论述了基体对短梁剪切强度的贡献和对壳体内压强度的贡献相关性。文献^[5]认为树脂系统的断裂韧性、延伸率、弹性模量和拉伸强度对壳体性能有影响,但很难得出显著的相关关系。CIBA—GEIG 公司的研究^[6]表明基体的初始模量对复合材料的韧性有负作用。Cohen^[7]则用数理统计理论研究了 6 种树脂系统(其中有 HBRF—55A),他认为树脂系统的断裂韧性、断裂延伸率和弹性模量的提高,可明显降低复丝强度的离散性,且有助于阻止微裂纹的扩展,从而提高复合材料的强度,相反树脂基体材料拉伸强度的提高却会引起微裂纹的扩展,不利于形成裂纹尖端塑性区域。我所科技人员经过几十年对树脂系统的研制开发,经验上认为要求树脂系统应具有较高的拉伸强度(>80 MPa)、模量(>3.0 GPa)和延伸率^[8],尤其高韧性的芳纶纤维对树脂系统的要求更为苛刻,不仅要求树脂的强度高,而且还要有良好的塑性和界面粘接强度。强度是材料抵抗变形和断裂的能力,而塑性则表示断裂时总的塑性变形强度,一般来说环氧树脂系统的强度提高了,拉伸模量也随着提高,但表征塑性的断裂延伸率则降低,强度和塑性构成了一对矛盾,如美国的 HBRF—55A 和 HBRF—241 环氧树脂系统。当树脂基体断裂延伸率差时,就难于协调芳纶纤维的变形,裂纹扩展加剧,留下不可愈合的损伤。因此如何协调树脂强度和塑性是研制芳纶纤维用的环氧配方的一个关键技术。表 3 是几种环氧树脂配方的性能对比及其对 F—12 纤维缠绕容器性能影响。

宇航材料工艺 2001 年 第 4 期

表 3 几种树脂配方性能及其 150 mm 容器性能

Tab.3 Properties of various epoxy formula and its vessel performance factor of 150 mm

配方	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	延伸率 / %	冲击强度 /kJ·cm ⁻²	容器特性 系数/km
3A [#]	90~110	3.8~4.2	4~7	-	36.7~37.7
4 [#]	80~100	3.5~4.0	4~6	2.4	37.0~38.0
6 [#]	76~86	2.6~2.9	2.4~4.2	1.7	34.1~34.9
18A [#]	约 108	约 3.7	约 5.9	4.3	38.0~40.0

从表 3 中可看出,4[#] 配方就是经实验和工程应用证明的具有较高强度而且也有较高断裂延伸率的一种环氧系统,它的成功应用为我们开发新树脂系统提供了参考范例。6[#] 配方韧性(冲击强度)和断裂延伸率都偏低,难于协调 F—12 芳纶纤维的变形,导致其 150 mm 容器性能较低,3A[#] 和 4[#] 配方树脂性能接近,其 150 mm 容器性能也就相差不多。本人曾用界面微脱粘实验研究 F—12 纤维与 4[#] 和 18A[#] 两种树脂系统的界面脱粘现象^[9],发现它们的初始脱粘力值相差不多,与宏观上的短梁剪切强度值表现一致,差别不大。而韧性较好的 18A[#] 树脂系统与 F—12 纤维的界面完全脱粘力值较高,可见树脂基体韧性变形高更有利于界面裂纹扩展能量的吸收和分散,也就是说韧性好的树脂基体 18A[#] 与 F—12 纤维形成的界面韧性较好,可以用完全脱粘力值与初始脱粘力值的差值来间接表征界面韧性,其值的大小代表着纤维与基体之间界面脱粘、纤维基体间的摩擦及基体变形等形式来吸收或分散界面断裂能量,由此可见,对于 F—12/ 环氧复合材料在提高界面粘结强度的同时,还应尽量增大界面层韧性,通过适当提高树脂系统的韧性以形成较恰当的界面结合和界面层,可提高复合材料压力容器的综合性能。

4 纤维—树脂界面的表征及纤维表面改性方法

4.1 有机纤维复合材料界面结构和性能的表征

要有效地设计复合材料界面,并在实验上把复合材料的性质和界面的性质联系起来,必须对界面性能进行准确的定量表征,这主要包括两方面:一是分析界面组成和结构;二是测定纤维/基体界面的结合强度。目前表征界面粘结强度的方法主要有:单纤维拔出法、临界纤维长度法、单纤维压入/顶出法和界面微脱粘法等。从文献^[10~12]来看,表征有

机纤维(如 Kevlar 和 F-12 芳纶纤维)复合材料界面微结构和微观力学性能的方法显得太少了,这可能是由于此种纤维的样品比较昂贵及此种纤维的高韧性和轴向压缩性差的特点。从力学性能表征手段看,公开的实验多用微观的单丝拔出强度和宏观的层间剪切强度来共同表征界面的剪切性能。黄玉东^[13]利用微脱粘原位测试技术研究了纤维界面剪切强度与宏观剪切强度的关联性,王斌等人^[9]用微脱粘原位测试技术研究了 F-12 纤维界面剪切强度与树脂系统的关系,但由于有机纤维轴向抗压性能差的特点,微脱粘原位测试技术并不非常适用于有机纤维复合材料界面的表征。

近代的先进分析技术可分析纤维表面和复合材料界面的组成和结构,其中应用比较成熟的分析工具有俄歇电子能谱(AES)、X射线电子能谱(XPS)、二次离子质谱(SIMS)和离子散射谱(ISS)。常用的是 XPS 和 AES,它们能给出纤维表面和复合材料界面的元素和键合状态。扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM),尤其是高分辨率的透射电镜(HRTEM)还可给出纤维表面、复合材料界面或断口形貌(粗糙度)、显微结构和断裂模式。文献[13]曾用 SEM、TEM 观察了纤维复合材料的界面微观结构,S.J. Bai^[14]也利用 X-ray 衍射手段研究了有机纤维的表面晶体微观结构特征。R.J. Young 等^[15]利用激光拉曼光谱研究了由单根纤维组成的微复合材料的界面应力分布和变形情况。目前来看,SEM、Raman 光谱及 X-ray 能谱仪仍是研究有机纤维界面的主要手段。

4.2 有机纤维的表面改性方法

由于高性能有机纤维表面缺少化学活性基团,表面光滑,界面粘接较弱,致使其复合材料层间剪切强度、压缩强度较低,限制了此类材料优越性的发挥,这已引起国内外复合材料界广泛的注意,纷纷进行高性能有机纤维的表面改性研究。

(1) 表面氧化法:使用强酸氧化,严重破坏纤维表皮结构,使纤维强度急剧下降,所以这种方法已被淘汰。

(2) 表面化学接枝法:文献[16,17]利用 NaH 和 DMSO 使 Kevlar49 纤维表面金属化,然后与卤代烃接枝反应,这样化学接枝的纤维增强环氧复合材料的剪切强度和抗湿性能都有所提高。文献[18]用异氰酸酯对 F-12 纤维进行了表面接枝,可使 F-12/环

氧的剪切强度提高 10% 以上,缺点是环境中的水分对其处理效果影响较大。

(3) 氧化还原方法^[19]:它是一种芳纤表面氧化还原处理方法,先在纤维表面进行硝化,然后还原,最终在芳纶纤维表面引入能与环氧树脂起作用的氨基来研究芳纶纤维的改性机理。

(4) 冷等离子体处理: M. R. Wertheimer 等^[20]用不同类型气氛等离子体处理芳纶纤维,使其层间剪切强度明显提高。龙军^[21]用冷等离子体空气处理 APMOC 芳纶纤维表面,同时还用等离子体偶联接枝聚合改性 APMOC 表面,得到其层间剪切强度增加 13%。

(5) 表面涂层处理法:上述表面改性方法,除冷等离子体都难于实现工业化,且对有机纤维表皮有不同程度的刻蚀损伤作用^[22,23],最理想的改性方法是表面改性的同时应尽量避免对纤维表皮的损伤,表面涂层处理就是其中之一。S. Yawae 等^[24]对 PBO 纤维进行了化学偶联处理,用单纤维拔出试验表征了其界面强度。F. J. McGarry 则对 PBO 纤维表面进行陶瓷涂层以提高其轴向压缩性能^[25]。文献[26]使用一种硅烷偶联剂对 APMOC 纤维进行表面偶联涂层处理,以促使其与环氧基体的界面牢固结合,使其层间剪切强度由 50 MPa ~ 53 MPa 提高到 60 MPa ~ 65 MPa。

(6) 其它表面处理方法: R. J. Young 等^[15]采用电晕法处理了 PBO 纤维,利用激光拉曼光谱研究了由单根纤维组成的微复合材料的界面应力分布和变形情况。文献[27]采用 γ 射线辐照接枝方法处理 PBO 纤维表面,以期改善 PBO 纤维与环氧树脂基体的界面粘接性能。

5 有机纤维复合材料的界面影响

界面是复合材料的重要组成部分,它控制着复合材料的损伤积累,控制着容器的破坏承载能力及其破坏模式。通过对玻璃纤维、有机纤维和碳纤维与环氧树脂基体复合成型对比表明,在这三大类型的纤维中,有机纤维与环氧复合后的层间剪切强度最低(见表 4),如超高分子量聚乙烯(UHMPE)纤维只有 6 MPa ~ 9 MPa^[29],PBO 纤维只有 22 MPa ~ 27 MPa,这与它们的纤维表面惰性有关,要使这种在 21 世纪最具有潜力的有机纤维真正应用到发动机壳体上,这必然需要对它们进行界面设计和界面改性。

宇航材料工艺 2001 年 第 4 期

在这些有机纤维中 F-12 芳纶/环氧复合材料的层间剪切强度最高,达到了 50 MPa ~ 53 MPa, 然而其容器的纤维强度转化率偏低,与玻璃纤维和碳纤维相比较差得太远,所以提高芳纶纤维在固体火箭发动机壳体中的强度转化率,使容器特性系数得到较大提高一直是国内外研究的课题,我们通过对 F-12 芳纶表面进行偶联涂层处理,可以使其层间剪切强度提高,而且 150 mm 容器特性系数值也相应提高了 6.6%,但纤维强度转化率约降低了 3%。

表 4 各种纤维与环氧树脂的层间剪切强度及其纤维强度转化率

Tab. 4 Interlaminar shear strength of various fiber reinforced epoxy resins and its developed fiber strength ratio

纤维种类	层间剪切强度 / MPa	纤维强度转化率 / %
玻璃纤维(S-2)	65 ~ 75	90 ~ 100
碳纤维(HTA-P30)	79 ~ 88	78 ~ 90
Kevlar49 纤维	35 ~ 40	约 66
F-12 芳纶纤维	50 ~ 53	> 70
PBO 纤维	22 ~ 27	未应用
UHMWPE 纤维	6 ~ 9	未应用

复合材料的高强度,需要较强的界面粘合以有效地传递纤维与树脂之间的载荷,但较强的界面粘合将导致材料较低断裂能量的吸收,进而使材料发生脆性破坏,可见对于综合性能较佳的复合材料,并不需要过强的界面粘合,尽管树脂基体的塑性变形功对于材料韧度的贡献不应忽略,但是取决于界面剪切强度的脱粘后的摩擦以及纤维的拔出等机制对于材料韧度的贡献则更为重要。当界面结合强度较低时,复合材料的裂纹寻找最低的能量通路沿着弱的界面向前传播,相应地,纤维与基体间界面脱粘、脱粘摩擦以及断裂纤维从基体中拔出,从而吸收了大量能量。

美国杜邦公司对 Kevlar49 (T981) 粗纱采用一种象松粘剂的表面处理剂进行处理,对纤维起松粘作用,降低纤维与基体的界面粘合,使芳纶纤维强度转化率由 65% 提高到 86%^[28]。然而这种强度转化率的提高是以树脂支配性能(如剪切、拉伸和压缩等)降低为代价的,因此如何使容器特性和强度转化率都提高,一直是国内外学者梦寐以求的目标。

宇航材料工艺 2001 年 第 4 期

6 结语

有机纤维、树脂系统、复合工艺及复合界面等都对复合材料壳体性能有影响。提高复合材料壳体性能是一项涉及多学科多专业领域的综合技术,仅强调某一方面而忽略另一方面的作用都是不能奏效,应当实事求是、全面综合地考虑各方面的影响作用,才能达到提高固体火箭发动机复合材料壳体性能的最终目的。

参考文献

- 1 顾星若,钟铭安. 芳纶纤维强度转化率的实验研究. 见:第五届全国复合材料会议论文集,西安,西北工业大学,1988:196 ~ 202
- 2 焦祖韬. 汉姆斯塔脱 M A 等. 高性能纤维/环氧复合材料压力容器. 见:芳纶纤维及其复合材料译文集,西安,向阳化工机械公司,1980:11
- 3 顾星若. 纤维缠绕固体发动机壳体用树脂配方研究. 固体火箭推进,1983;(2):109 ~ 117
- 4 卢天键,稽醒,顾星若. 树脂基体性能对纤维缠绕复合材料结构强度影响的研究. 固体力学学报. 1991;12:102 ~ 113
- 5 Lee S M. Failure mechanism of delamination fracture. ASTM STP972,1988:356 ~ 365
- 6 Jones R E,Caldwell D L. The correlation of resin toughness and the fiber-resin interfacial shear strength with damage tolerance. Proc. SAMPE,1991:154 ~ 161
- 7 David Cohen. Lowe K A. The Influence of epoxy matrix properties on delivered fiber strength in filament wound composite pressure vessels. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1991;10(2):112 ~ 131
- 8 徐璋. 固体火箭发动机复合材料壳体树脂基体的选择原则. 宇航材料工艺,1992;(4):38 ~ 41
- 9 王斌等. 树脂系统对 F-12/环氧复合材料性能的影响. 见:第八届全国复合材料界面工程会议论文集,长沙,国防科技大学材料工程与应用化学系,1999:78 ~ 81
- 10 雷渭媛,汪渊,许亚洪,张双存. N-取代烯丙基芳纶的表面特性. 宇航材料工艺,1997;(2):16 ~ 20
- 11 李寅,张志谦,魏月贞,刘立洵. 芳纶纤维表面接枝及其与环氧树脂粘附性的研究. 见:复合材料进展——第八届全国复合材料会议论文集,南京,航空工业出版社,1994:280 ~ 285
- 12 Masse P,Cavrot J P. Adhesion improvement of high modulus polyethylene fiber by surface treatment: evaluation by pull-out testing. Composite,1994;15(3):247 ~ 251
- 13 张志谦,黄玉东,孙文训,魏月贞. 复合材料界面的

表征研究. 南京大学学报(自然科学), 1995; 31: 264 ~ 272

14 Bai S J. Axial X-ray scattering on high-performance polymeric fibers. J. Polym. Sci. (part B), 1994; 32: 2 575 ~ 2 584

15 So C L, Young R J. Deformation micromechanics in poly(p-phenylenebenzobisoxazole (PBO) / epoxy composite. In: 4th International conference on deformation and fracture of composite, London, 1997: 549 ~ 557

16 雷渭媛, 许亚洪, 来侃, 田军安. 表面活化 Kevlar49 拉伸断裂应力统计特性与抗湿性. 南京大学学报(自然科学), 1995; 31: 104 ~ 109

17 雷渭媛, 季铁正, 刘国俊, 张双存等. 芳纶复合材料的界面粘结. 见: 复合材料进展——第八届全国复合材料会议论文集, 南京, 航空工业出版社, 1994: 118 ~ 123

18 王斌, 丘哲明, 杨建奎. F-12 芳纶纤维表面处理对复合材料剪切性能的影响. 固体火箭技术, 1995; 18(1): 64 ~ 68

19 贺泓, 朱鹤孙, 孙慕瑾. 芳纶纤维的表面改性. 复合材料学报, 1990; (3): 17 ~ 24

20 Wertheimer M R, Schreiber H P. Surface property modification of aromatic polyamides microwave plasmas. J. Appl. Polym. Sci., 1981; 26: 2 087

21 龙军. 接枝偶联剂对 APMOC—纤维表面改性的研究. 见: 张志谦, 黄玉东主编. 复合材料界面科学, 哈尔滨, 哈尔滨工业大学出版社, 1997: 284 ~ 287

22 竺有仙, 孙慕瑾, 席宗敏. 表面冷等离子体改性对纤维抗拉强度的影响. 复合材料学报, 1992; 4: 83 ~ 86

23 胡宝荣等. 聚合物表面冷等离子体处理效果退化效应的研究. 化学与粘合, 1990; 3: 22 ~ 23

24 Yalvac S, Jakubowski J J, So Y H. Improved interfacial adhesion via chemical coupling of cis-phenylbenzobisoxazole fibre-polymer systems. Polymer, 1996; 37: 4 657 ~ 4 659

25 Fawaz S A, Polazotto A N. Axial tensile and compressive properties of high-performance fibres. Polymer, 1992; 33: 100 ~ 105

26 王斌, 丘哲明, 杨建奎. 偶联涂层处理对 APMOC/环氧复合材料层间剪切性能影响的研究. 固体火箭技术, 1994; 17(4): 66 ~ 71

27 黄玉东, 王天慧, 李瑞华, 龙军等. PBO 超级纤维及其表面处理. 见: 复合材料和现状与发展——第十一届全国复合材料学术会议论文集, 合肥, 中国科学技术大学出版社, 2000: 62 ~ 66

28 SAMPE Quarterly, 1986: 1 ~ 11

调压成型精铸技术

本成果为适用于航空、航天大型薄壁复杂铝合金熔模精密铸造。

本成果的技术原理: 在充型前将上室(置有铸型)和下室(置有合金液、保温坩埚和升液管)造成一定的负压, 然后根据铸件结构形状、工艺要求和铸型特点施压于下室, 使液态金属在逆重力条件下, 受控地进入铸型并充满型腔。继而在恒定的压差条件下, 向上、下室同时施压, 即对正在凝固的铸件和铸型外部同时施压, 使铸件的凝固环境从接近真空状态按既定速度, 变化到高压状态。待铸件凝固后, 使上、下室的压力平衡。升液管和浇注系统中尚未凝固的金属液, 在重力作用下返回坩埚中。

本技术特点: 优越的充型过程控制条件, 不依赖铸型透气性或排气措施, 仅取决于给定的加压系数, 具有优异的充填力。可在 700 ~ 710 °C 下顺利地充填薄壁铸型(壁厚可达 0.25 mm)。铸件在可调压力下结晶, 压力随凝固过程的进行而逐渐增加, 能抑制气体逸出, 防止针孔, 有利铸件补缩, 提高铸件性能。工艺简化, 适应性强, 节省金属、能源, 生产成本低。本技术为国内首创, 具有国际水平, 有推广价值。已获得国家专利并获得国家发明三等奖, 经济效益可观。

· 李连清 ·