

金属基复合材料的研究进展

北京航空材料研究所 于 琨

本文简要介绍了金属基复合材料概况及北京航空材料研究所 20 年来在这方面的研究情况，特别是在研制硼纤维、硼 / 铝及碳化硅 / 铝复合材料中所取得的成果。

Development of Metal Matrix Composites in BIAM

Yu Kun

(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

A brief view is given for the general survey of metal matrix composites(MMC) and the outline of the research works in this field in Beijing Institute of Aeronautical Materials over the past 20 years with special emphasis on the development of boron filament, boron / aluminium and silicon carbide / aluminium composites.

随着现代科学技术的进步，特别是航空与航天技术的飞速发展，对结构材料提出了越来越高的要求。复合材料（包括树脂基、金属基、陶瓷基）所具有的高比强度、比模量以及其他特殊性能引起了世界各国的重视，成为当今材料科学的主攻方向之一，并获得了迅猛发展。与树脂基复合材料相比，金属基复合材料具有工作温度高、层间剪切强度高、耐磨损、不吸湿、不放气、不老化等优点，并具有导电、导热的金属属性，成为当代先进复合材料体系中一个重要分支。

金属基复合材料目前主要的基体有铝、镁基，使用温度在 400℃ 以下；钛基，使用温度在 700℃ 以下；镍基及高温合金基，用于发动机热端和高温部件。主要增强体有硼纤维、碳化硅（包括化学气相沉积 CVD 碳化硅单丝、纺丝碳化硅束丝、碳化硅晶须及颗粒）、碳纤维、氧化铝纤维以及金属丝等。由于铝合金的发展与应用已有广泛的基础与成熟的经验，加之熔点较低，复合工艺难度相对较小，因此，铝基复合材料发展最快。无论在国外、国内，铝基复合材料的研究工作均开展得较多。目前国际上主要金属基复合材料的实用性水平列入表 1。这些材料的比强度和比模量见图 1，它能更直观地显示出金属基复合材料在减重效果上的地位。由于金属基复合材料性能在很大程度上取决于纤维，因此图表中的材料性能大体上反映了纤维性能的高低。硼纤维增强铝和 CVD 碳化硅纤维增强铝在目前实用型金属基复合材料中具有最高的强度与模量。其他几种连续纤维（如纺丝碳化硅纤维、碳纤维等）增强铝具有中等的强度与模量；非连续增强体（如晶须与颗粒）增强铝合金的强度略高于基体铝合金，增强体加入主要是弥补基体材料性能上的某些不足，如增强其刚性、耐磨性、耐热性、抗蠕变性等。这类材料的优点是成本较低，并可利用现有冶金设备进行工业生产。上述各种铝基复合材料，性能水平和特点各异，制造工艺难易程度不

同，价格有贵有贱，可按需要用于不同场合，互相弥补，相辅相成。

北京航空材料研究所（以下简称航材所）的金属基复合材料研究工作始于 1970 年。20 年来，主要研究工作集中在化学气相沉积方法（CVD）制造硼纤维及碳化硅纤维，同时也研究这些纤维增强的铝基复合材料，并相应开展性能测试工作。基本掌握了热压扩散结合、等离子喷涂、型材弯曲成形、热等静压、真空吸铸、化学镀膜等复合工艺，以及板材、型材、管材、棒材的制造技术，是国内研究工作历史最长、技术水平较高的金属基复合材料研究基地之一。

化学气相沉积硼纤维及碳化硅纤维

化学气相沉积是目前制备硼纤维唯一的工艺方法。其工艺原理是将炽热的细钨丝通过三氯化硼与氢的混合气体，使其发生化学反应，生成的硼沉积于钨丝上。为避免硼纤维与金属基体之间在复合过程中产生有害的化学反应，在纤维表面一般涂有碳化硼或碳化硅的保护层。

航材所研究设计的硼纤维制造装置由玻璃管制成的清洗室、第一沉积室、第二沉积室和涂覆室组成。两端各有钨丝放线机构和硼纤维收丝机构（图 2）。各室之间及出入口均用水银封隔开，一方面避免不同气体互相流通，另一方面使钨丝得以自由通过，并可作为导电电极将钨丝通电加热。经电解清洗的直径约 12μm 的钨丝从放线机构上拉出，经过水银封通电加热至 1150~1300℃，先在清洗室内用氢气清洗，进入第一沉积室，在沉积硼的过程中钨芯逐步转化为钨的硼化物，在第二沉积室中以较高的温度加速硼的沉积，最后在涂覆室内涂上一层碳化硼保护层，缠绕在收丝盘上。拉丝速度 125m/h，纤维直径 140μm。所沉积的硼为 β-菱形微晶结构，通常称为“无定形”。从截面显微照片图 3 上可以清楚看到钨芯、硼层区和涂层三个部

表 1 几种主要实用型金属基复合材料的典型性能

品 种	纤维体积含量 (%)	拉 伸 强 度 (MPa)	拉 伸 模 量 (GPa)	比 重
硼 / 铝	50	1200~1500	200~220	2.6
CVD 碳化硅 / 铝	50	1300~1500	210~230	2.85~3.0
纺丝碳化硅 / 铝	35~40	700~900	95~110	2.6
碳 / 铝	35	500~800	100~150	2.4
FP 氧化铝 / 铝	50	650	220	3.3
住友氧化铝 / 铝	50	900	130	2.9
碳化硅晶须 / 铝	18~20	500~620	96.5~138	2.8
碳化硅颗粒 / 铝	20	400~510	~100	2.8
CVD 碳化硅 / 钛	35	1500~1750	210~230	3.9
硼 / 钛	45	1300~1500	220	3.7

Table1 Typical properties of widely evaluated MMC

Type	Fiber volume fraction (%)	Tensile strength (MPa)	Tensile module (GPa)	Specific gravity
B / Al	50	1200~1500	200~220	2.6
CVD SiC / Al	50	1300~1500	210~230	2.85~3.0
Spun SiC / Al	35~40	700~900	95~110	2.6
C / Al	35	500~800	100~150	2.4
FP Al ₂ O ₃ / Al	50	650	220	3.3
SUMITOMO Al ₂ O ₃ / Al	50	900	130	2.9
SiC(Whisker) / Al	18~20	500~620	96.5~138	2.8
SiC(Particle) / Al	20	400~510	~100	2.8
CVD SiC / Ti	35	1500~1750	210~230	3.9
B / Ti	45	1300~1500	220	3.7

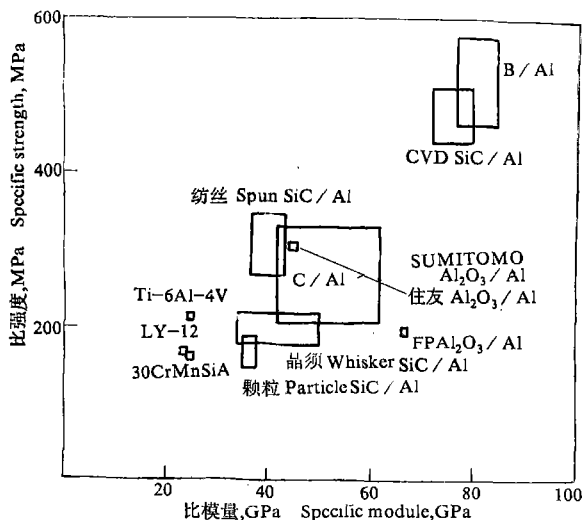


图 1 几种主要金属基复合材料以及普通合金的性能对比

Fig.1 A comparison of properties between the widely evaluated MMC, and conventional alloys as well

分。纤维拉伸强度 $>3200\text{MPa}$ ，模量约 360GPa ，密度 $2.51\text{g}/\text{cm}^3$ ，性能与国外纤维相近。

在化学气相沉积过程中，除混合气体配比和流量等参数外，沉积温度对硼纤维性能有决定性的意义。温度过低则沉积速率不够，温度过高则导致硼形成粗大结晶，使强度急剧下降。因此精确控制沉积温度十分重要。

硼纤维作为一种脆性材料，对于能形成应力集中的缺陷异常敏感。纤维的强度受缺陷的存在所限制。因此，钨底丝的优劣对纤维质量有着重要的影响。钨丝表面的缺陷与沟槽在化学气相沉积过程中能诱发纤维在相应的部位产生缺陷。另外，反应气体中的杂质和水银也会对纤维产生不同程度的污染，使纤维产生缺陷。这些缺陷均会造成纤维的低应力断裂。

带碳化硼涂层的硼纤维的研制于1978年完成，1979年获航空工业部科技成果二等奖，1980年获国防办重大成果三等奖。此后又不断研究，使其完善，并于1988~1990年对整个设备进行了技术改造，实现了光纤测温，微机处理自动控制沉积温度，大大提高了整个工艺过程的精度和稳定性，进一步改善了纤维质量。

碳化硼涂层的硼纤维在技术上是先进的。裸硼纤维经碳化硼涂覆后可使强度提高15~20%，且涂层具有较高的热稳定性与化学稳定性，优于美国多年来一直采用的碳化硅涂层。直到1978年底，世界上最大的硼纤维生产厂美

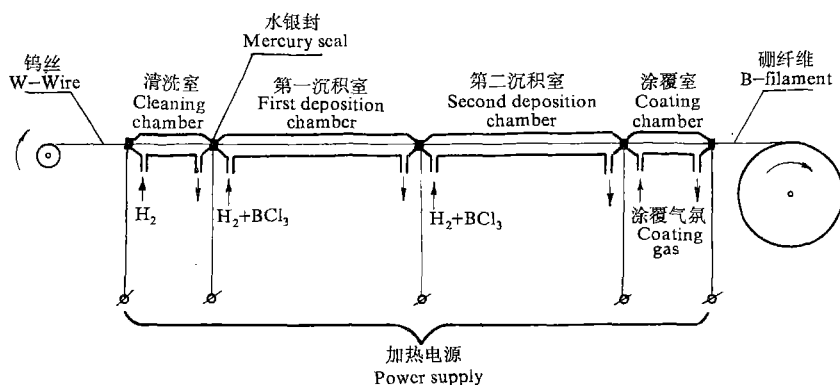


图2 硼纤维化学气相沉积装置

Fig.2 Sketch of chemical vapour deposition device for manufacturing boron filament

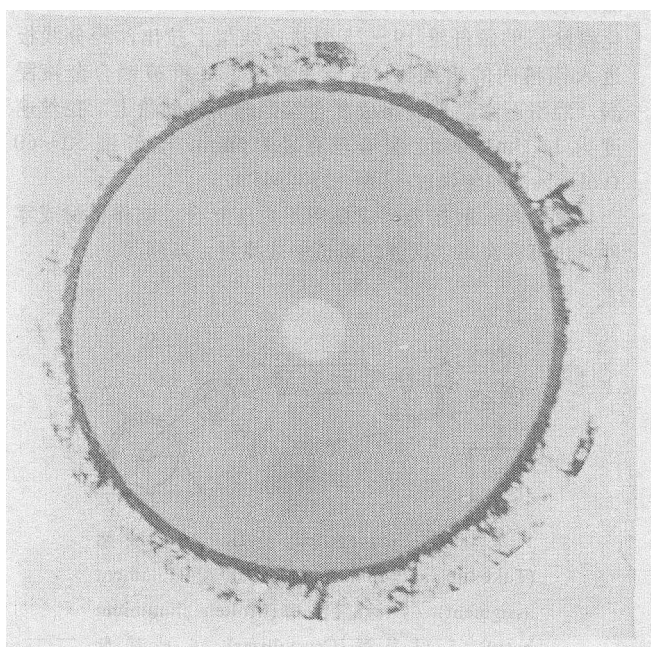


图3 直径140μm带碳化硼涂层的硼纤维的显微照片

Fig.3 Micrograph of a boron filament 140μm in diameter with boron carbide coating

硼纤维增强铝复合材料

国外硼/铝复合材料的研究工作始于60年代初,是历史最长、最成熟的一种金属基复合材料。曾制造过多种飞行器及发动机零件,并成功地用于美国航天飞机的机身骨架(243根硼/铝管材,总重150kg),使其减重44%。虽然近10年来有关硼/铝的研究进展方面报导较少,但至少在今后的10~20年间,硼/铝仍将是首位优选的高性能金属基复合材料。航材所在硼纤维立足本所的情况下,自70年代初开始了硼/铝复合材料的研究工作,进行过多种复合工艺的探索和研制,取得了一些成果,是国内较早进行硼/铝复合材料研究的单位,并有较强的基础理论和研制经验。

1. 硼/铝热压板材

热压扩散结合工艺是硼/铝板材及模压件的典型工艺。将带有碳化硼涂层的硼纤维按一定间距缠绕在裹有铝箔的滚筒上,用涂树脂胶液或等离子喷涂铝粉的方法将其固定在铝箔上,然后切开取下成为纤维-铝箔条带,经剪切选片后放入真空热压炉内,在低于基体铝熔点温度(一般为520~600℃)和50~70MPa的压力下保持0.5~2h,树脂胶在升温过程中挥发气化并被真空系统抽走,铝箔在高温高压的作用下,产生塑性变形而焊合在一起,将硼纤维固结在其中而成一体。这一工艺经过十余年来的反复试验,情况稳定,效果良好。含有50(vol)%硼纤维,单向增强的复合板材的拉伸强度为1250~1400MPa,模量220GPa,密度为2.6g/cm³。性能与国外同类材料相当。复合板材组织如图4所示。

2. 硼/铝型材弯曲成形

由于铝基体受硼纤维的约束,硼/铝板材的塑性很差,一般室温下不能弯曲成形。若在高温下弯曲,或直接用纤维-铝箔选片热压成型材,都需要复杂的加热模具与设备,工艺困难较大。我们采用包覆板冷弯工艺,成功地在室温条件下弯制出不同截面的硼/铝型材。

包覆板弯曲成形工艺分两步进行:先将硼-铝箔等离子喷涂条带的迭层上下两面衬上不同厚度的钢板,在大气下热压成包钢硼/铝夹层板;然后在室温下将夹层板进行

国AVCO公司(现为TEXTRON)才从法国SNPE公司引进了碳化硼涂覆技术,开始生产碳化硼涂层硼纤维。美国是世界上最主要的硼纤维生产国,1979年年产量约18吨,其中大部分用于增强树脂,约1/10用于增强金属。纤维拉伸强度大于3500MPa,模量400GPa。另外,曾一度广为宣传的碳芯硼纤维目前没有得到发展,主要是因为技术上存在一定障碍,即硼在沉积过程中有一定的体积膨胀而使纤维变长,而延伸率极低的碳芯由于纤维的延长而被拉断成许多小段,在沉积过程中造成温度不均,使用时容易造成应力集中,影响材料性能。除美国外,苏联的硼纤维研制工作亦有一定规模,水平也比较高,目前年产量约为4吨。

化学气相沉积制造碳化硅纤维的过程与硼纤维相似,只是将反应气体改为甲基三氯硅烷。航材所亦曾进行了此种纤维的研制。

弯曲成形。这样，硼／铝板材在包钢板的保护下，应力分布发生了变化，避免了开裂，可按需要弯制成形。最后再用硝酸把包钢板腐蚀掉，即得到硼／铝型材。型材内硼纤维按纵向排列。截面既可全部、也可局部含有纤维。现已制作的型材有角形，工形、帽形等（图5）。图6为局部增强的硼／铝帽形型材截面。由图可见，帽形型材顶部及弯角用硼纤维增强，两侧缘为铝。

硼／铝弯曲成形工艺为硼／铝复合材料的实际应用提供了基础。

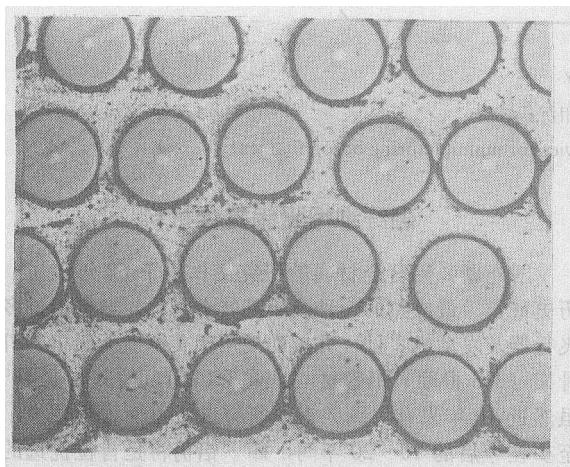


图4 50(vol)%的硼／铝复合板材显微组织

Fig.4 Micrograph of 50(vol)% B / Al composite sheet

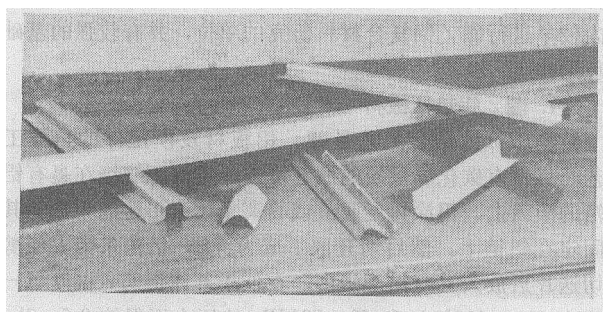


图5 弯曲成形的各种硼／铝型材

Fig.5 Some samples of B / Al shapes formed by bending

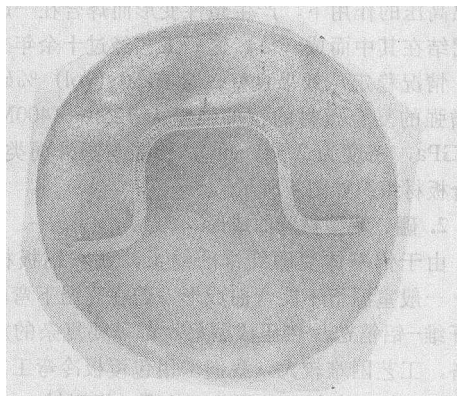


图6 弯曲成形的局部增强帽形型材截面(M1:1)

Fig.6 Selectively reinforced hat section formed by bending

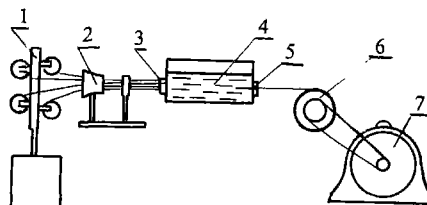
3. 硼／铝热等静压管材

美国航天飞机的机身骨架所用的硼／铝复合管材，是使用热等静压工艺制造的，最大长度可达2m。所用的原料是一种现成的预制品—硼／铝单层预固结条带。用这种条带来压制管材是较为方便的。在我们的研究工作中，采用了纤维—铝箔涂胶条带作为制备管材的原料，为此设计了相应的工艺流程。经过多次试验，初步掌握了热等静压制造硼／铝管材的工艺。试验证明，此工艺是可行的。所压制的含40 (vol) %纤维的硼／铝管材，组织致密，结合良好。与美国工艺相比，本工艺虽增加了工序与操作上的难度，但可使纤维少经受一次热压固结，从而减少了纤维的损伤。

4. 连续铸造硼／铝复合丝材

连续铸造属于液态渗透复合工艺的一种，这种工艺效率高，成本低，适合于制造丝材、棒材、条材等长条形制品。航材所自行设计的连续铸造装置如图7所示。将带碳化硼涂层的硼纤维19~23根从放线架上拉出，经分线板进入铝槽内的熔融铝—硅合金液中。纤维被铝合金液浸润，经滑石结晶器拉出成复合丝，缠于收丝盘上。拉丝速度为1~3m/min。复合丝直径0.6mm，含纤维50~60 (vol) %，拉伸强度1300~1500MPa。

复合丝一般作为半成品用于热压复合，制作板材或零件，也可再经第二次连续铸造制成棒材、条材等。



1. 放线架 (Filament pay-out); 2. 收线架 (Take-up spool); 3. 纤维分配 (Filament assignment); 4. 液态铝槽 (Molten aluminium bath); 5. 结晶器 (Crystallizer); 6. 收线盘 (Take-up); 7. 马达 (Motor);

图7 硼／铝复合丝连续铸造装置

Fig.7 Sketch of continuously casting device for manufacturing B / Al wire

碳化硅纤维增强铝复合材料

碳化硅纤维由于具有抗氧化和耐高温等优点而成为金属基复合材料重要的增强体。目前连续碳化硅纤维有两种生产方法：化学气相沉积法 (CVD) 和纺丝法。化学气相沉积碳化硅纤维的直径为100μm或140μm的单丝，密度为3.05g/cm³ (碳芯纤维) 或3.4g/cm³ (钨芯纤维)。拉伸强度为3500~4000MPa，模量400~415GPa；纺丝碳化硅纤维由聚碳硅烷纺丝后烧结而成，直径约12μm，一般每束500根。纤维仅含SiC约62%，余为SO₂(28%)与碳(10%)。拉伸强度2800~3000MPa，模量200GPa，密度2.55g/cm³。与CVD碳化硅纤维相比，力学性能较低。

1. CVD 碳化硅纤维／铝热压板材

热压复合工艺与硼／铝板材基本相同。使用中国科学

院沈阳金属所研制的 CVD 碳化硅纤维（强度约 3000MPa）压制的复合板材，当纤维体积比在 46% 时，其强度可达 1200~1250MPa，模量为 200~240GPa。

2. 真空吸铸碳化硅/铝复合棒材

碳化硅纤维耐高温，适合于用液态渗透工艺与铝进行复合。液态渗透工艺首要条件是必需保证纤维完全被铝液浸润，并在此前提下尽可能降低温度与缩短时间，以减少对纤维的损伤。然而大多数纤维与铝的浸润性很差，需要采取各种措施来改善其浸润性。为此，我们设计了独特的真空吸铸工艺，成功地解决了 CVD 碳化硅纤维与铝的复合问题，制得了高性能的棒材。

将 CVD 碳化硅纤维放入钢管中。钢管的一端用铝塞密封，另一端连接真空系统。在真空条件下将装有纤维的钢管部位预热至高温，然后将带铝塞的一端插入熔融铝液中，铝塞立即熔化，铝液则被吸入钢管中渗透纤维。冷却后用硝酸腐蚀掉钢管，便得到完整的复合棒材。

本工艺的特点不但简便，且能创造极为有利的浸润条件：（1）纤维在真空下预热至高温，无空气阻碍铝液浸润，并可活化纤维表面；（2）密封塞在铝液中深处溶化，吸入的铝液无氧化膜干扰浸润；（3）有大气压力的作用。因此，在采用 Al-10%Si 合金为基体时，700~750℃ 的吸铸温度即可使 CVD 碳化硅纤维完全浸润。整个吸铸过程非常短暂，对纤维的损伤很小。用 50 (vol) %SCS-6 型 CVD 碳化硅纤维增强 Al-10%Si 的棒材，拉伸强度高达 1600~1700MPa，达到了世界先进水平。用此工艺还成功地吸铸了外径 20mm、壁厚 2mm 的管材。

纺丝碳化硅的浸润性较差，单用真空吸铸的方法不能使之浸润，而必须施加 5 个大气压的压力方能达到浸润。

碳化硅纤维增强铝是目前国际上极为重视的研究方向。用低成本的铸造工艺研究此种材料，是多年来航材所与西德宇航院的科技合作项目之一。

颗粒增强金属基复合材料

颗粒增强金属基复合材料成本较低，工艺简便，虽然在增强效果上不及连续纤维，但易于实现工业化生产，能较快地进入实际应用，因而是目前国内外重点研究方向之一。航材所近年来开展了颗粒增强铝基、钛基、镍基复合材料的研究，以改善基体合金在 300℃、600℃ 和 1100℃ 的高温性能，初步解决了工艺问题，在性能上取得了明显的增强效果。

基础研究

我们配合工艺试验进行了多方面的基础性研究工作：如碳纤维断裂机理的研究表明，纤维的断裂类似于玻璃，断裂起源于原有的缺陷和裂纹处，并对不同类型的缺陷进行了分类，确定其对应的拉伸强度范围；为研究浸润性，用座滴法测定了在不同温度下铝液与纤维的接触角，首次用 CVD 碳化硅纤维铺成的平面来代替整体碳化硅材料，使测定的结果更接近实际工艺；从硼/铝热压板材中分离

出的纤维强度试验表明，碳化硼涂层对纤维具有良好的保护作用，热压后纤维强度的下降并非由于强度频率分布图上的峰值与强度范围向低应力方向移动，而是因原来的单峰分布变成了双峰分布，这说明纤维仅在长度方向上局部受损，并根据界面附近元素分布的情况分析，将界面结合模式确定为基本上是物理状态的结合，但在局部受损处会有元素扩散甚至化学反应；对 CVD 碳化硅纤维及其与铝复合材料的研究表明，纤维涂层的作用不仅在于保护纤维避免与基体发生反应，而且还在于不使基体与纤维结合过强，使扩展的裂纹能得到有效地偏转与钝化，从而有利于提高复合材料强度，因此，涂层使纤维和基体之间达到较好的相容性，必须符合两个基本条件：（1）从基体中分离出的增强纤维具有良好的强度；（2）纤维和基体之间的界面结合不应过强。

当前，材料科学发展的趋势已逐渐显示出，依靠合金化的手段来强化金属已越来越走向它的极限。要想在性能上有大幅度的突破，发展复合材料是最有希望的途径。这就是为什么复合材料研究在当今材料科学中占有如此重要的地位的原因。北京航空材料研究所作为一个在材料科学领域有 35 年历史的老所，今后将持续在金属基复合材料方面进行不懈的研究和攻关工作。

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※

豪梅特公司精铸件销售额不断提高

由于英国工业联合会最近预测英国整个经济将处于停滞状态，英国大多数工业界都害怕它们的工厂即将进入低谷时期。然而，与此相反，以生产熔模精铸件著称的豪梅特公司欧洲铸造分部宣称，它现在正经历着商业兴旺时期，在过去的两年内销售额不断提高，1990 年几乎为 1988 年的两倍，而 1991 年的订货单表明又将增长 30%。它生产的燃气涡轮叶片和导向叶片有 40% 为宇航喷气发动机零件，约 60% 为陆地涡轮零件。宇航用零件的最大用户为罗·罗公司。在过去的近两年中，陆地涡轮市场的需求，尤其是世界各国小型发电站的需求量猛增，使豪梅特公司销售量显著提高。

为了适应不断增长的销售要求，在过去的 18 个月里，该分部的人员增加了 280 人，总共约 700 人。不光生产的零件数量增加了，而且为了满足用户增加零件的尺寸和重量的要求，他们正在安装一些能生产这种零件的新设备，以便有效地提高工厂的生产能力。目前正在安装一条新的熔模铸造壳型浸涂生产线。第一阶段投资 160 万英镑，安装了三台新的机械手，其中一台可浸涂 500 公斤重的模组。另外，还将安装一个传送系统，将模组送到干燥区和脱蜡区。1991 年，豪梅特公司将改造一台现有的定向凝固炉，使其达到另一台现为欧洲最大的定向炉的水平。据称，此后它将拥有两台能生产 600mm 长定向凝固叶片的定向凝固炉。

（东华）