

T1000 级碳纤维及其复合材料研究与应用进展

陆兆杰 曾金芳 刘新东 程 勇

(西安航天复合材料研究所, 西安 710025)



摘要: 本文介绍了 T1000 级碳纤维的发展历程, 综述了 T1000 级碳纤维及其复合材料的研究及应用情况, 指出了国产 T1000 级碳纤维应用研究需要关注的问题。

关键词: T1000 碳纤维; 力学性能; 界面; 应用

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

Research and Application Progress of T1000 Grade Carbon Fiber and Composite Materials

Lu Zhaojie Zeng Jinfang Liu Xindong Cheng Yong

(Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

Abstract: This paper introduces the development history of T1000 grade carbon fiber. Summarizes the research and application of T1000 grade carbon fiber and its composite materials, and points out the problems that need attention in the research of domestic T1000 grade carbon fiber.

Key words: T1000 carbon fiber; mechanical properties; interface; application

1 引言

碳纤维是一种碳元素组成占总质量 90% 以上, 具有高强度、高模量、耐高温等优点的纤维材料^[1]。最早可追溯至 18 世纪的爱迪生和斯旺^[2], 1959 年日本进藤昭男首先发明了聚丙烯腈 (PAN) 基碳纤维^[3], 而当下碳纤维的核心技术和产能被日本、美国以及一些欧洲发达国家和地区掌控。

T1000 级碳纤维作为碳纤维中的高端产品, 在航空航天领域有着极大的用途。高性能碳纤维的研究可以改善固体火箭发动机消极质量、提升载药量、提高质量比, 对于先进武器的发展研究以及航天探索有重大意义。目前国外已经大量使用 T1000 级碳纤维的缠绕容器和固体火箭发动机壳体, 因此开展国产 T1000 级碳纤维及其复合材料的应用研究迫在眉睫。

碳纤维的制备包括物理、化学、材料科学等多个领域的内容, 总体分为纺丝原液的聚合、聚丙烯腈原丝的纺制、预氧化和碳化三个步骤^[4], 有众多因素需要

调控。根据缺陷理论和最弱连接理论, 制备过程中产生的缺陷是影响碳纤维性能的主要因素, 为保证碳纤维的性能, 需要对每个工艺流程中工艺参数精准调控, 由于加工过程中的各参数之间相互作用十分复杂, 且目前一些工艺流程中的实际形成和演变机理不明, 也使得高性能碳纤维, 尤其是 T1000 级碳纤维的研制有很大困难^[5]。

T1000 级碳纤维的研究主要包括碳纤维本身性能的研究、碳纤维复合材料的改性研究、碳纤维复合材料使用性能的研究几个方面。由于 T1000 级碳纤维本身的高性能、价格昂贵等原因, 且国产 T1000 级碳纤维还没有正式投入应用的报道, 在实际应用方面主要介绍国外 T1000 级碳纤维在航空航天以及其他领域的应用情况。

2 T1000 级碳纤维性能研究现状

东丽公司 1962 年正式开展 PAN 基碳纤维的研制,

作者简介: 陆兆杰 (1998), 在读硕士, 材料科学与工程专业; 研究方向: 树脂基结构材料及制造。

收稿日期: 2022-06-05

1986年研制出 T1000G 碳纤维。2014年3月,通过碳化精细控制技术在纳米层级内控制纤维结构,成功研发出 T1100G 碳纤维,2017年6月强度由 6600MPa 更新至 7000MPa^[6],目前东丽已完成了 T1200 碳纤维的量产。除东丽外,自 2013年起国际上的其他碳纤维企业,为了提高竞争力以及面对航空航天领域对于碳纤维和复合材料的高性能需求,相继推出了更高强度的碳纤维。美国赫氏公司(HEXCEL)的 IM10、三菱的 MR70、东邦的 XMS32,都是拉伸强度约 7GPa、模量约 320GPa 的超高强度碳纤维^[7-8]。中国的碳纤维研究基本与日本同步,但由于当时科研水平落后,国防军工用碳纤维几乎全部依赖进口^[9-10]。我国 T1000 碳纤维研究最先在 2014年由江苏航科突破关键技术,完成 50t/a 产量;2019年中复神鹰超高强度碳纤维百吨级工程化关键技术顺利通过并开始生产^[11-12]。同年中科院山西煤炭化学研究所 T1000 级超强碳纤维验收。另外山东威海拓展、江苏恒神等也开始国产 T1000 级碳纤维的研究和生产。

2.1 T1000 级碳纤维基本性能

国内外高强中模 T1000 级碳纤维性能如表 1,其中 T 系列为东丽公司产品;IM 系列为美国赫氏公司产品;SYT55、HF50S 分别为中复神鹰、江苏恒神 T1000 级碳纤维产品牌号。由表可以看出国产 T1000 级碳纤维力学性能与国际先进水平相当。由于国外碳纤维技术对中国的封锁,美国的 IM 系列碳纤维的性能及应用少有报道,以下主要介绍东丽及国产 T1000 级碳纤维。

表 1 国内外主要 T1000 级碳纤维性能

纤维牌号	产地	丝束	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	断裂延伸率/%	体密度 /g·cm ⁻³	直径 /μm
T1000G	日本	12K	6370	294	2.2	1.80	5
T1100G	日本	12K	7000	324	2.0	1.79	5
IM9	美国	12K	6136	303	1.9	1.80	4.4
IM10	美国	12K	6964	310	2.0	1.79	4.4
SYT55	中国	12K	6300	295	2.2	—	5.5
HF50S	中国	12K	6370	290	2.0	—	5.5

注:如未有特殊注明,T系列碳纤维均为东丽碳纤维牌号。

2.2 T1000 级碳纤维微观结构

2.2.1 表面形貌表征分析

使用 SEM(扫描电子显微镜)、HRTEM(高分辨率透射电镜)手段可以对碳纤维的表面、截面等形貌进行测试并分析。

谭婷婷^[13]、许桂阳^[14]分别对东丽 T1000 碳纤维和国产 T1000 级碳纤维的表面进行表征,SEM 图像(图 1)表明几种 T1000 级碳纤维的表面均光滑没有沟槽,原因是采用了干喷湿纺工艺。干喷湿纺的碳纤维体密度较高,结构较均匀,表面光滑没有沟槽^[15]。HF50S 表面存在褶皱,表明相较于其他两种纤维,其上浆剂均匀性较差。由碳纤维断面形貌(图 2)分析可得,T1000 的断面形貌为规则圆形,且 T1000 的纤维直径小。根据体积效应和最弱连接理论,直径越小纤维存在缺陷的可能性越小,纤维的强度越高^[4]。

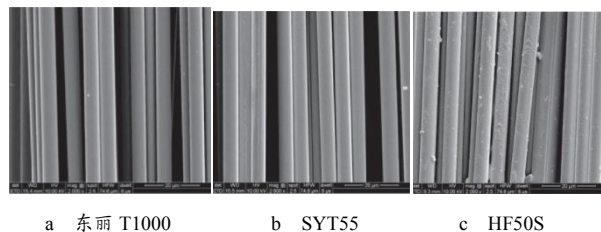


图 1 T1000 级碳纤维侧面形貌^[14]

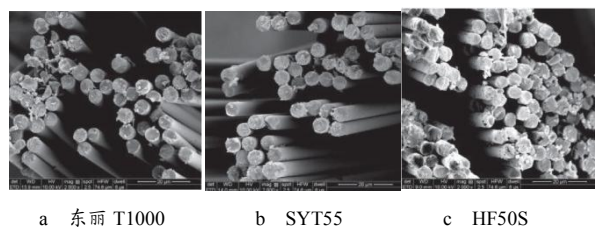


图 2 T1000 级碳纤维截面形貌^[14]

2.2.2 微观组织结构及分析

XRD 图谱分析可以获得碳纤维内部的结构或形态等信息。图 3 为张新^[16]对东丽 T 系列碳纤维的 XRD 图像研究,由赤道扫描图可以发现,T 系列碳纤维在 $2\theta=25^\circ$ 左右均出现 002 衍射峰,但与单晶石墨的衍射峰相比较宽,这是由于结晶不完善或者晶粒尺寸较小所导致的。 $2\theta=55^\circ$ 附近还有一个弱峰为石墨结构(004)晶面的衍射峰,表征了石墨微晶在 c 轴方向的发育程度^[17]。对比石墨 XRD 图谱发现,碳纤维图谱没有其他衍射峰出现,这也说明碳纤维本身石墨结构不完整,仅为二维乱层石墨。对比发现,T1000 的 002 衍射峰更加陡,说明相较于其他碳纤维,T1000 的石墨微晶结构更加完善。子午扫描图谱只出现了一个峰,说明碳纤维内部的石墨微晶沿轴向取向,赤道扫描图也出现的 100 峰表明取向不完善,存在一部分乱序结构。国产及美国牌号碳纤维未有相关研究。

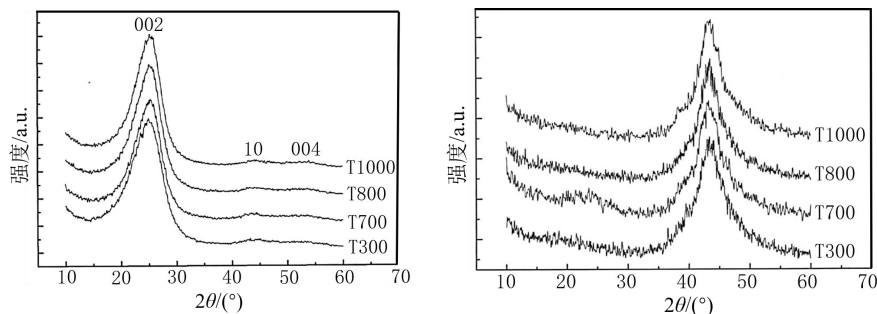


图3 T系列碳纤维的赤道扫描、子午扫描XRD谱图^[16]

王聪等^[18]在碳纤维截面上分别取点测拉曼光谱。结果表明由中心到边缘碳纤维石墨化程度不断增加,且T1000纤维的皮芯结构相较于其他碳纤维程度更浅。

2.3 T1000级碳纤维表面特性

XPS图像可以反映碳纤维表面元素分布情况。由图4图像分析可以看出,相较于T800等其它碳纤维,T1000碳纤维具有更高的C含量,且N含量较低,T1000碳纤维的碳化温度可能比其他碳纤维高。赵雪莹等^[19]研究了碳纤维原丝(CF)、脱去表面处理剂碳纤维(CF-D)、利用浓硫酸刻蚀树脂后复合材料中的碳纤维(CF-S)的XPS图谱。研究显示:N、Si、Cl、S等元素都是上浆剂所含,上浆后O/C比明显变大,表明碳纤维的表面活性大幅提升;复合材料界面只含有C、O、N三种元素,材料截面有一定程度的损伤,可能是由于浓硫酸腐蚀所致;T1000碳纤维原丝的含氧活性官能团含量最高,达到了49.66%,表面含氧官能团高,不仅可以提升碳纤维表面能,有利于树脂基体的浸润,还有利于与树脂基体发生化学反应,形成更强的界面作用力。

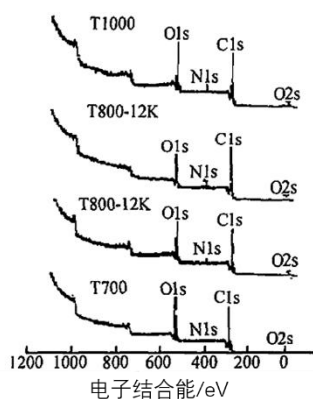


图4 T系列碳纤维表面XPS能谱

3 T1000级碳纤维复合材料的改性研究

对碳纤维及其复合材料进行改性是提升碳纤维与基体之间相容性,提高碳纤维复合材料性能的重要方式。目前对于T1000级碳纤维复合材料的改性研究有 γ 射线辐照和碳纳米管两方面。

3.3.1 γ 射线辐照

γ 射线可以提高碳纤维表面活性以及力学性能,在碳纤维改性方面研究较多。Liu等^[20]研究了氩气、环氧氯丙烷两种介质,XPS显示在氩气氛下辐照的碳纤维表面碳含量增加,氧含量降低;在环氧氯丙烷介质辐照的碳纤维表面碳含量降低,氧含量提升,引入Cl原子。表面能测试表明,辐照后碳纤维的表面活性明显提高,环氧氯丙烷增加碳纤维表面活性方面优于氩气。Sui等^[21]对不同介质 γ 射线辐照后的芯部以及次表面进行了深入研究,经过辐照后碳纤维内部的石墨化程度均有提升,而表面由于在介质存在下产生新的化学基团而表现出石墨化程度降低。

3.3.2 碳纳米管

碳纳米管是近年来纳米材料科学研究的热点,具有极高的力学强度、特殊的电性能和热性能、比表面积大、密度低等优点^[22]。碳纳米管改性碳纤维树脂基复合材料的方法有两种:一种是通过机械或超声将碳纳米管分散在树脂基体中;第二种是接枝到碳纤维上。两种方法都可以改善碳纤维复合材料的性能,提高纤维与树脂之间的界面,改善力学性能^[23, 24]。

Zhang等^[25]制备了一种液态多壁碳纳米管(L-MWCNTs),将其共混到环氧树脂配方中,SEM图像反映出L-MWCNTs的两端分别与碳纤维和树脂基体紧密相连,在上浆剂和基体间形成了共价键。L-MWCNTs的加入使NOL的拉伸强度、层间剪切强度都有提升。

隋刚等^[26, 27]先在碳纳米管表面接枝氨基,之后再与正丁基缩水甘油醚反应得到反应性的碳纳米管增强体。改性碳纳米管的加入对环氧树脂基体的黏度影响

很小, 改性后的树脂与 T1000 碳纤维以湿法缠绕的 NOL 环层间剪切提升了 30%, 玻璃化转变温度有所提升。陈雨彤^[28]使用表面吸附法将胺化处理后的碳纳米管引入 T1000 碳纤维表面, 微脱粘试验测试仪数据表明复合材料界面剪切强度增加 51%。Kimiyoishi Naito 等^[29]在 T1000GB 上利用 CVD 改性使碳纳米管在碳纤维表面接枝, 有效地提高了碳纤维的热导率。

4 T1000 级碳纤维复合材料性能

4.1 T1000 级碳纤维单向层合板复合材料性能

表 2 T1000 碳纤维单向层合板性能

复合材料		T1000/3620*	T1000/3632*	STT55/环氧	HF50S/环氧
0°	拉伸强度/MPa	3490	3550	3010	2885
	拉伸模量/GPa	158	158	133	132
	断裂应变/%	2.0	2.0	—	—
	压缩强度/GPa	1.70	1.65	—	—
	层间剪切强度/MPa	110	95	72	77
90°	拉伸强度/MPa	60	50	45	42
	拉伸模量/GPa	9	9	7.8	8.4
	断裂应变/%	0.7	0.6	—	—

注: T1000/3620*和 T1000/3632*为东丽 T1000 碳纤维环氧树脂复合材料。

4.2 T1000 级碳纤维缠绕 NOL 环复合材料性能

NOL 环是表征纤维缠绕工艺性的常用试验件。王晓洁^[31]等制备了 T1000 碳纤维/HS19 环氧树脂 NOL 环, 其拉伸强度为 2166MPa、剪切强度 81.9MPa。

许桂阳等^[14]制备了两种国产 T1000 和东丽 T1000 碳纤维 NOL 环, 性能测试结果如表 3。由表可知, 国产 T1000 级碳纤维 NOL 环的拉伸和剪切性能低于东丽 T1000 纤维, 且两种国产 T1000 级 NOL 环断面较平整, 不能充分发挥碳纤维本身的性能。

表 3 T1000 级碳纤维 NOL 环性能

碳纤维	SYT55	HF50S	T1000
拉伸强度/MPa	2665	2530	2925
层间剪切强度/MPa	57.94	38.37	58.74

4.3 T1000 级碳纤维缠绕压力容器性能

缠绕压力容器实验可以反应 T1000 级碳纤维在缠绕容器性能上的表现, 在较少实验消耗的同时, 真实反应碳纤维实际使用中的性能。表 4、表 5 是东丽 T1000, 以及两种国产 T1000 级碳纤维在 $\Phi 150\text{mm}$ 及 $\Phi 185\text{mm}$ 压力容器上的性能表现^[14-32]。研究表明, 在一定的缠绕张力范围内, 缠绕张力越大, 容器性能表现越好。通过国内外 T1000 级碳纤维缠绕 $\Phi 185\text{mm}$ 容

表 2 是东丽 T1000 碳纤维和两种国产 T1000 级 (SYT55、HF50S) 碳纤维单向环氧复合材料力学性能^[14-30]。树脂基体的不同对东丽 T1000 碳纤维单向环氧复合材料 0° 拉伸强度和层间剪切强度有影响, 因此可以通过改变树脂的方式满足对复合材料的性能要求。

两种国产 T1000 级碳纤维复合材料的 0° 和 90° 拉伸强度和拉伸模量相较东丽 T1000 碳纤维低, 这是由于国产 T1000 与环氧树脂之间的界面粘结强度较低所引起的。因此提高国产 T1000 级碳纤维复合材料性能是国产化应用急需解决的问题。

器的性能对比, 两种国产 T1000 碳纤维缠绕容器的爆破压强较低, 实际应用性能表现较差, 主要因素包括: 国产 T1000 级碳纤维工艺性较差, 存在缠绕起毛现象; 国产 T1000 级碳纤维与环氧树脂之间的粘接较差。

表 4 T1000 级碳纤维 $\Phi 150\text{mm}$ 容器性能

张力/N	20	40	60
爆破压强/MPa	24	26.7	29.5
$PV \cdot W^{-1}/\text{km}$	33.9	44.6	55.3
环向纤维发挥强度/MPa	5023	5582	6174

表 5 T1000 级碳纤维 $\Phi 185\text{mm}$ 容器性能

碳纤维牌号	T1000	SYT55	HF50S
爆破压强/MPa	42.0	39.2	37.0
$PV \cdot W^{-1}/\text{km}$	49.5	46.2	43.6

5 T1000 级碳纤维应用现状

T1000 级别及以上碳纤维是国外对我国重点制裁的材料之一, 由于其性能强、价格高等原因, 除了航空航天领域外, 其他领域很少使用。国产 T1000 级碳纤维也由于刚完成量产, 几乎没有实际投入应用的信息, 以下主要介绍国外 T1000 级碳纤维的应用情况。

5.1 在航天高压气瓶上的应用

压力容器是航空航天领域重要的部件,也是碳纤维的主要应用领域之一。在保证使用以及安全性能的前提下,制备压力容器的材料从最先的金属,过渡到纤维增强复合材料,常用纤维有玻璃纤维、kevlar 纤维、碳纤维^[33]。其中碳纤维复合材料(CFRP)应用于复合压力容器(COPV)具有质轻、强度高等优点,目前 COPV 大多选择 T1000 碳纤维,以 T1000 碳纤维制备的 COPV 相较于全钛材料的质量减轻可达 65%,容器特性系数(PV/W)提升 2~3 倍,平均值达到 41.9km,大量的实验数据也证明其使用的可靠性^[34-35]。

研究人员对 T1000 碳纤维在 COPV 上的应用进行研究。王晓洁等^[18]以缠绕张力为影响因素,结果表明在实验范围内张力的增加提升了 T1000 碳纤维缠绕容器的性能,这是由于较大的张力有助于排出浸胶缠绕过程中的气泡,降低空隙率,并且提升复合材料中的

纤维体积含量,50L 金属内衬气瓶爆破压强达到 65MPa,容器特性系数为 51km。张建宝等^[36]研究了 T1000 纤维复合材料气瓶的疲劳特性,采用 TDE-85/T1000 碳纤维复合材料制备 COPV,经过 30MPa 恒定水压 150 次疲劳后的爆破压力为 86MPa,容器特性系数为 57.7km。许桂阳等^[4]以两种国产 T1000 碳纤维为实验对象,经实验测试发现,东丽 T1000 爆破压强最高,为 42.0MPa。两种国产 T1000 缠绕壳体表面更为粗糙,分析是由于缠绕过程中工艺性能差,发生纤维起毛现象,使得性能表现较差。

目前,T1000 级碳纤维在 COPV 上的应用已经较为成熟,表 6 是一些实际应用信息。而国内近几年才稳定了 T1000 碳纤维的生产制备,在实际投入使用上还需追赶。

表 6 T1000 碳纤维在航天高压气瓶的应用

地区	应用	材料及性能
美国结构复合材料工业公司 ^[37-38]	T1000-COPV	铝内衬 COPV, 33.02km
	T1000-COPV	无缝铝内衬 T1000 碳纤维
美国空间推进系统阿德公司 ^[39-40]	欧洲星 2000 圆柱形氦气瓶	I-718 内衬 T1000/HARF53
	Atlas/Centaur 火箭球形氦气瓶	不锈钢内衬 T1000/HARF305
	Delta II 火箭圆柱形氦气瓶	I-718 内衬 T1000/HARF53, 服务寿命为 30a
	Altair 月面登陆舱氦气瓶	I-718、2219-T62 内衬 T1000/31-43B
美国空间压力系统公司 ^[41-42]	美国空间系统 CP-30 锥形氦气瓶	纯钛内衬 T1000/Epon826
	ETS VIII 空间飞船圆柱形氦气瓶	TC4 内衬 T1000/Epon826
	ESAVega 火箭圆柱形氦气瓶	CP-3 内衬 T1000/Epon826
美国波音公司 ^[43]	Delta III、Delta IV 火箭用氦气 COPV	I-718 内衬 T1000/HARF53

5.2 在固体发动机壳体上应用

表 7 是 T1000 碳纤维应用在固体火箭发动机上的一些实例^[44-45],T1000 碳纤维应用于固体火箭发动机壳体上,可以在保证安全性能的前提下降低质量,从而提升载药量。

表 7 T1000 碳纤维在固体发动机壳体的应用

地区	应用	材料及性能
日本	H-2A 火箭助推器	T1000 碳纤维复合材料
美国陆军	小型动能导弹(CKEM)	T1000/环氧树脂复合材料
欧空局	织女星火箭二、三级发动机	T1000G 纤维/UF3325 树脂复合材料

5.3 在其他领域的应用

碳纤维及其复合材料在汽车构件、风力发电、建筑补强、油田钻探、体育用品材料等方面也有很大的用处^[46],但 T1000 级碳纤维的应用研究开展较少。

Rudzei 等^[47]研究了 T1000 碳纤维在飞机元件上的

应用,并开展了疲劳寿命的评估算法。Dhoka 等^[48]将 IM10 碳纤维应用到涡轮叶片中,极大地改善了热膨胀性。RhodesRichard^[49]在文章中说明 NASA 在 Z-2 宇航服的一些零件中使用了 IM10 碳纤维。ShaheerUIHassan 等^[50]利用 IM10 碳纤维制备小型储能系统飞轮,并进行仿真分析。Stepanova 等^[51]将 T1000 应用于飞机翼梁,并且在 CFRP 材料中出现的应力变化、声发射信号结构以及梁断裂的发生和扩展之间建立了联系。

6 T1000 级碳纤维在固体火箭发动机壳体上应用的问题

固体火箭发动机壳体的消极重量是影响其导弹射程的重要因素,为了提高固体火箭发动机性能,国外在一些导弹固体火箭发动机壳体中使用 T1000 碳纤维,而国产 T1000 级碳纤维还处在应用基础研究阶段。

分析我国 T1000 级碳纤维在固体火箭发动机上应用的实际问题主要包括: a. 国产 T1000 级碳纤维的力学性能与国外相当, 但纤维性能稳定性较国际存在差距; b. 与 T1000 碳纤维相适配的树脂基体研究不足, 国产 T1000 碳纤维复合材料的力学性能低于进口碳纤维复合材料性能; c. T1000 级碳纤维的缠绕工艺性较差, 缠绕过程中起毛损伤纤维等。

对于国产 T1000 级碳纤维在固体火箭发动机上所遇到的问题, 提出以下几点建议: a. 探究国产 T1000 级碳纤维稳定性及复合材料性能表现较差的原因, 进行更加细致深入的研究, 分析对比影响的因素; b. 树脂作为碳纤维之间的基体, 在一些研究中也证明其对复合材料的力学性能有一定影响, 对比与国产 T1000 级碳纤维复合的树脂基体, 研发能够更大程度发挥碳纤维性能的基体; c. 对于国产 T1000 级碳纤维工艺性上的问题, 探究其工艺性表现较差的原因, 加强改进, 或者研究更加适合国产 T1000 级碳纤维的工艺条件。

7 结束语

通过对以上文献的综述分析, 得出如下结论:

a. 国产 T1000 碳纤维的力学性能与东丽 T1000 相当;

b. 国产 T1000 级碳纤维单向复合材料力学性能、NOL 环、压力容器性能低于进口 T1000 级碳纤维的性能, 需要深入研究;

c. 高性能碳纤维制备过程中的 PAN 的合成、原丝的纺制、预氧化碳化过程需要保持均匀一致性, 国内目前还有所欠缺;

d. 目前国外在 T1000 级碳纤维应用上已经成熟, 而国产 T1000 级碳纤维还处在应用基础研究阶段, 需要加大研究力度, 拓宽国产 T1000 级碳纤维的性能以及应用领域的进一步研究, 推动国产 T1000 级碳纤维在航空航天领域尤其是固体发动机领域的应用。

参考文献

- 贺福. 碳纤维及其复合材料[M]. 北京: 科学技术出版社, 1995
- Liu Y, Kumar S. Recent Progress in Fabrication, Structure, and Properties of Carbon Fibers[J]. Polymer Reviews, 2012, 52(3): 234~258
- 张健, 揣雪冰. 碳纤维的发展及其应用现状[J]. 化工管理, 2017(23): 60
- 杨茂伟. 聚丙烯腈原丝纺丝工艺与性能相关性研究[D]. 济南: 山东大学, 2007
- 高权. 干喷湿纺聚丙烯腈纤维结构形成及其演变过程的研究[D]. 济南: 山东大学, 2017
- 彭公秋, 李国丽, 曹正华, 等. 高性能聚丙烯腈基碳纤维发展现状与分析[J]. 材料导报, 2017, 31(S2): 398~402
- 毕鸿章. 三菱丽阳公司开发高性能的中弹性模量碳纤维“パイロファイル”MR70[J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39(2): 78~79
- 徐樾华, 王宇. 国产高性能聚丙烯腈基碳纤维技术特点及发展趋势[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 43~51
- 刘瑞刚, 徐坚. 国产高性能聚丙烯腈基碳纤维制备技术研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 32~42
- 钱鑫, 王雪飞, 马洪波, 等. 国内外 PAN 基高模量碳纤维的技术现状与研究进展[J]. 合成纤维工业, 2021, 44(5): 58~64
- 徐坚. “从无到有”到“从有到优”的“卡脖子”军民两用关键材料突破——回顾师昌绪先生在高性能碳纤维国产化战略决策中的作用[J]. 科技导报, 2018, 36(19): 26~31
- 刘燕. 中复神鹰 T1000 级超高强度碳纤维百吨级工程化关键技术通过鉴定[J]. 东方企业文化, 2019(6): 70~71
- 谭婷婷. 高性能 PAN 基碳纤维微观结构与力学性能相关性研究[D]. 济南: 山东大学, 2013
- 许桂阳, 博学金, 王中, 等. 国产 T1000 级碳纤维性能[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(1): 78~83
- 张世杰, 王汝敏, 刘宁, 等. 纺丝工艺对 T800 碳纤维及其复合材料性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(8): 118~124
- 张新. PAN 基碳纤维微结构特征的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008
- 张新, 马雷, 李常清, 等. PAN 基碳纤维微结构特征的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2008(5): 57~60
- 王聪, 唐海通, 高忠民, 等. 用 Raman 光谱研究不同 PAN 基碳纤维的皮芯结构[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 44~47
- 赵学莹. 国产碳纤维组织结构及其复合材料界面结构与性能表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010
- Liu Liangsen, Wu Fan, Yao Hongwei, et al. Investigation of surface properties of pristine and γ -irradiated PAN-based carbon fibers: Effects of fiber intrinsic structure and radiation medium[J]. Applied Surface Science, 2015, 337(may15): 241~248
- Sui Xianhang, Xu Zhiwei, Hu Chuansheng, et al. Microstructure evolution in γ -irradiated carbon fibers revealed by a hierarchical model and Raman spectra from fiber section[J]. Composites Science and Technology, 2016(130): 46~52
- 田继斌, 梁胜彪, 隋刚, 等. 羧基化多壁碳纳米管对 T-1000 碳纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(1): 36~39, 45
- Qian H, Bismarck A, Greenhalgh E S, et al. Hierarchical Composites Reinforced with Carbon Nanotube Grafted Fibers: The Potential Assessed at the Single Fiber Level[J]. Chemistry of Materials, 2008, 20(5): 1862~

- 1869
- 24 田继斌. 碳纳米管官能化以及对 T1000 碳纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2009
- 25 Zhang Qingjie, Li Xiaochao, Liang Shengbiao, et al. A kind of liquid-like MWCNT reinforcements for T1000 carbon fibre filament winding composites[J]. *Composites Science & Technology*, 2016, 131(aug.2): 89~97
- 26 隋刚, 梁胜彪, 李卓, 等. 活性碳纳米管增强体对 T1000 碳纤维复合材料性能的影响[C]//*复合材料: 创新与可持续发展 (下册)*, 2010: 97~102
- 27 李晓超. 活性碳纳米管对纤维复合材料界面及力学性能影响[D]. 北京: 北京化工大学, 2011
- 28 陈雨彤. CNT/碳纤维/树脂复合材料设计及有限元模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
- 29 Naito K, Yang J M, Xu Y, et al. Enhancing the thermal conductivity of polyacrylonitrile- and pitch-based carbon fibers by grafting carbon nanotubes on them[J]. *Carbon*, 2010, 48(6): 1849~1857
- 30 赵稼祥. T1000 超高强碳纤维及其复合材料[J]. *化工新型材料*, 1988(6): 22~25
- 31 王晓洁, 梁国正, 李辅安, 等. T-1000 碳纤维/环氧树脂基复合材料性能研究[J]. *材料科学与工艺*, 2005(5): 94~97
- 32 王晓洁, 梁国正, 张炜, 等. 高性能碳纤维表面分析及其力学性能研究[J]. *航空材料学报*, 2006(4): 119~122
- 33 陈学东, 范志超, 崔军, 等. 我国压力容器高性能制造技术进展[J]. *压力容器*, 2021, 38(10): 1~15
- 34 张天平. 空间应用复合材料压力容器研制技术[J]. *上海航天*, 2002(1): 54~58, 62
- 35 于斌, 刘志栋, 靳庆臣, 等. 航天复合材料压力容器研制技术[J]. *上海航天*, 2012, 29(5): 54~60
- 36 张建宝, 林松, 王俊锋, 等. 卫星用复合材料气瓶性能[J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(4): 67~69
- 37 于斌, 刘志栋, 靳庆臣, 等. 国内外空间复合材料压力容器研究进展及发展趋势分析(一)[J]. *压力容器*, 2012, 29(3): 30~42
- 38 Betti F. Design and Development of Vega Solid Rocket Motors Composite Cases[R]. AIAA-2007-5810, 2013
- 39 于斌, 刘志栋, 靳庆臣, 等. 国内外空间复合材料压力容器研究进展及发展趋势分析(二)[J]. *压力容器*, 2012, 29(4): 30~41
- 40 Clauss C, Anselmo E, Sneddon K, et al. Design, Qualification and Thermal Testing of a Specialized Composite Overwrapped Pressure Vessel[R]. AIAA-2007-5558, 2013
- 41 Tam W, Jackson A, Nishida E, et al. Design and manufacture of the ETS VIII xenon tank[R]. AIAA-2000-3677, 2000
- 42 Benton J, Ballinger I, Ferretti A, et al. Design & Manufacture of a High Performance High Mass Efficient Gas Tank for the Vega Avum[R]. AIAA-2007-5500, 2007
- 43 Tam W, Ballinger I, Kohorst P. Design and Manufacture of a Composite Overwrapped Elastomeric Diaphragm Tank[R]. AIAA-2004-3507, 2004
- 44 李莹新, 莫纪安, 王秀云, 等. 固体火箭发动机壳体复合材料研究进展[J]. *航天制造技术*, 2020(4): 65~69
- 45 陈小平, 王喜占. T800 碳纤维在复合材料压力容器上的应用研究[J]. *高科技纤维与应用*, 2017, 42(3): 45~49
- 46 谭媛, 韩香, 齐肖阳. 碳纤维材料的应用研究进展[J]. *山东化工*, 2021, 50(13): 46~47
- 47 Rudzei G F, Kalyuta A A. On the Possibility of Predicting the Fatigue Life of Structural Elements Made of Aviation Composite Materials and Alloys[J]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020, 2020(4): 470~476
- 48 Dhoka A. Thermo-Structural Analysis of Carbon Fibre-Ni Based Super Alloy Composite Employed in Gas Turbines[J]. *SSRN Electronic Journal*, 2020,4(3): 60~65
- 49 Ross A, Rhodes R, Jones R J, et al. Z-2 Threaded Insert Design and Testing Abstract[A]. *International Conference on Environmental Systems, Inc. (ICES)*; 46th[C]. 2016
- 50 Hassan S U, He B, Khayyam U. Design and Analysis of Flywheel for Small Scale Energy Storage System using Different Structures and their Comparison[C]// 2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). 2019, 295~299
- 51 Stepanova L N, Petrova E S, Chernova V V. Strength Tests of a CFRP Spar Using Methods of Acoustic Emission and Tensometry[J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, 54(4): 243~248