

# 聚合物及其复合材料磁致伸缩性能的研究进展

Development of Research on Magnetostrictive Polymer and Polymer-based Composites

詹茂盛, 丁乃秀, 鲁云华

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

ZHAN Mao-sheng, DING Nai-xiu, LU Yun-hua

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 在总结无机磁致伸缩材料特点的基础上, 归纳分析了聚合物材料获得磁致伸缩性能的条件, 回顾了近年来有关磁致伸缩聚合物及其复合材料的研究历程。总结了磁致伸缩聚合物复合材料的性能影响因素、制备方法以及应用情况, 提出了今后磁致伸缩聚合物及其复合材料的研究方向。

关键词: 磁致伸缩; 聚合物; 复合材料

中图分类号: TB332      文献标识码: A      文章编号: 1001-4381(2005) 07-0059-05

**Abstract:** The atomic structure and character of the inorganic magnetostrictive materials were analyzed, in terms of which the essential elements for the polymer based material to gain magnetostrictive properties were concluded. The history of researches on the magnetostrictive polymer and polymer-based composites was reviewed, with importance put on the properties affecting factor, the preparation and the application of the magnetostrictive polymer-based composites. The research direction for the magnetostrictive polymer and polymer-based composites was discussed in the end.

**Key words:** megnetostriction; polymer; composites

所谓磁致伸缩, 通常是指铁磁性材料或者亚铁磁性材料由于磁化状态的改变, 其尺寸发生微小变化的现象。作为智能材料的一种, 磁致伸缩材料因其特殊性能成为精密致动器、智能传感器、换能器等器件的核心材料, 其应用涉及航空航天、国防装备、超声探测、精密自动控制、机器人等高新技术领域, 因此受到世界高新技术领域专家们的极大关注, 发展迅猛<sup>[1-5]</sup>。然而, 传统意义上的磁致伸缩材料绝大部分都是由过渡金属元素、稀土元素等无机元素构成的无机物, 在外加高频交变磁场条件下, 这种磁致伸缩材料内部将产生巨大的涡流效应, 严重扼杀了此种功能材料的应用前景<sup>[6,7]</sup>; 同时, 无机材料密度大, 不易加工成型, 满足不了许多特殊用途。近年来随着各种功能聚合物及其复合材料的发展, 人们逐渐发现了这些材料具有许多无机物所无法取代的优点, 如密度小、重量轻、不易氧化、易于加工成型等。对于磁致伸缩功能材料而言, 聚合物及其复合材料不仅具备这些优势, 还能解决无机磁致伸缩材料目前难以解决的高频交变磁场下的涡流效应问

题<sup>[8,9]</sup>, 因此近年来受到研究者的广泛关注。

## 1 磁致伸缩原理以及聚合物材料实现磁致伸缩性能的必要条件

材料的磁致伸缩性能可以用图 1 所示的简单的椭圆模型说明。假设材料为椭圆型, 磁化沿椭圆的长轴方向进行。在此椭圆上施加磁场时, 沿磁场方向磁化的作用使椭圆形状发生变化, 则材料的宏观长度发生变化, 即发生磁致伸缩现象。如果在施加磁场之前, 在材料上预先施加一定载荷的作用, 则这个形状变化量将会增大, 即提高磁致伸缩应变。

从人们最初发现无机材料磁致伸缩性能到现在已经有 150 多年的历史了, 根据科学家们大量的实验和理论研究结果, 可以将产生磁致伸缩的原因总结为三个方面<sup>[10]</sup>: (1) 自发形变: 由于交换力的作用, 晶体自发磁化, 晶体形状改变, 引起尺寸变化; (2) 场致形变: 磁场作用下, 由于轨道耦合和自旋耦合相叠加的作用, 造成尺寸变化; (3) 形状效应: 单磁畴样品为降低退磁

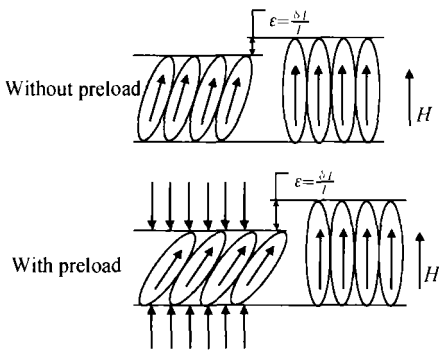


图 1 磁致伸缩的椭圆模型

Fig. 1 The ellipse model for magnetostrictive properties

能体积会发生改变。从宏观角度出发分析材料的磁致伸缩现象, 可以将其归结为两个过程: 首先是磁场作用引起磁畴壁在材料内部的移动; 其次是磁畴壁发生转动。这两个过程促使材料磁畴发生取向, 进而使得材料的尺寸发生变化。

虽然从原子水平上解释磁致伸缩机理非常困难, 目前还没有比较明确的研究结果。但是, 将组成无机磁致伸缩材料的元素总结(如表 1 所示)后可以看出, 这些元素都具有以下三个特点: (1) 原子核外电子排布中, 要具有未抵消的 3d 或 4f 电子; (2) 原子存在稳定的未满电子壳层; (3) 能够提供稳定的磁距源。

相对而言, 构成高分子材料是元素 C, H, O, N, 等, 这些元素只有 S 或 P 电子, 电子层一般是闭壳层, 呈现抗磁性。这些元素的特点如表 2 所示。因此, 要得到有机元素组成的高分子磁致伸缩材料, 必须首先赋予聚合物以强磁性, 则至少要满足两个条件: (1) 引入具有未配对电子的顺磁中心(可以是各种过渡金属离子、有机自由基、极化子等有自旋的准粒子, 或者是它们的组合); (2) 以某种方式引入顺磁中心间的相互作用, 使相邻的顺磁中心间自旋平行, 使得所有的顺磁中心间自旋趋于一致。目前科学家们提出的获得有机磁性体的主要途径包括 Heitler-London 自旋交换、电荷转移复合物、高自旋多重态的分子或者聚合物以及开壳层单体的聚合物等四种<sup>[11]</sup>。目前国内外已经进行研究的分子设计方法主要包括高分子金属络合物的分子设计、利用电荷转移现象进行分子设计以及纯有机体设计等。

表 1 无机磁致伸缩材料典型构成元素

Table 1 The typical element of inorganic magnetostrictive material

Element	Electron configuration	Valence electron
Fe	+ 26) 2- 8- 14- 2	3d6
Tb	+ 65) 2- 8- 18- 27- 8- 2	4f9
Dy	+ 66) 2- 8- 18- 28- 8- 2	4f10
Nd	+ 60) 2- 8- 18- 22- 8- 2	4f4

表 2 高分子材料组成元素

Table 2 The main element of polymer material

Element	Electron configuration	Valence electron
C	+ 6) 2- 4	2p2
H	+ 1) 1	1s1
O	+ 8) 2- 6	2p4
N	+ 7) 2- 5	2p3

虽然从 20 世纪 60 年代起科学家们已经开始研究有机强磁性, 最近几年美国 IBM 埃尔梅登研究中心、俄罗斯莫斯科化学物理研究所、日本冈琦分子研究所、英国伦敦玛丽王后学院、中国科学院磁学开发研究室等相继开展了高分子强磁体的设计原理、合成方法、模型制备、结构分析等工作, 但目前为止仍未获得理想的有机强磁体。另外, 四川师范大学的林展如教授也进行了高分子有机磁性材料的应用开发研究。但目前还没有公开的报道介绍这些高分子有机材料的磁致伸缩性能。

2 磁致伸缩聚合物复合材料的研究进展

近年来, 随着各种功能高分子材料的发展, 复合型功能高分子材料因其具有诸多本征型功能高分子材料所不具备的优点, 引起了研究者的广泛关注, 发展非常迅速。对于磁致伸缩材料而言, 为了适应材料在高频条件下的应用, 自 20 世纪 80 年代起, 研究者用高分子材料作粘结剂, 将无机磁致伸缩材料粘结成复合材料, 开始了聚合物树脂粘结无机磁致伸缩复合材料的研究。

有资料表明<sup>[12]</sup>, 这种以聚合物为粘结剂的磁致伸缩复合材料是 Clark 在 1983 年首先开始研究的, Clark 利用环氧树脂, 制备了 Terfeno+D 磁致伸缩复合材料, 但并没有公开发表其实验结果。1994 年, Sandlund 首次公开其实验结果, 同样是利用环氧树脂, 获得了饱和应变为  $800 \times 10^{-6}$  的磁致伸缩复合材料。自此开始, 陆续有相关的研究成果发表(表 3 总结了聚合物为胶粘剂的磁致伸缩复合材料的研究历程), 其研究内容主要包括以下几个方面。

(1) 无机磁致伸缩材料的颗粒大小、形状、分布以及树脂的粘度系数、含量对磁致伸缩复合材料性能的影响。

(2) 制备工艺路线以及工艺参数对磁致伸缩复合材料性能的影响。

(3) 磁致伸缩复合材料的高频磁学性能以及普通磁学性能(磁致伸缩系数、弹性模量、磁机械耦合系数)的研究。

(4) 磁场取向作用下复合材料的磁致伸缩性能研究。

2.1 磁致伸缩复合材料的影响因素

树脂粘结剂的种类、粘度系数、含量是影响复合材料的磁致伸缩系数、极限频率、机电藕合系数、弹性模量以及机械强度的重要影响因素<sup>[13-15]</sup>。目前研究中应用的粘结剂 90% 以上是环氧树脂,也有少数研究者使用了酚醛树脂,以橡胶和热塑性树脂为粘结剂的研究很少。日本东海大学使用硅橡胶制备了磁致伸缩复合材料,美国的 Gregory Paul Carman 教授最近使用了热塑性聚酰亚胺树脂 LaRG-SI 作为基体<sup>[12]</sup>,利用这种树脂独特的加工特性,即树脂合成后加热可熔,再次加热到一定温度后则不可熔,制备磁致伸缩复合材料,开拓了磁致伸缩复合材料复合体系的范围。对于环氧树脂粘结剂来说,树脂的粘度系数越小,复合材料的磁致伸缩性能越好,机电耦合系数越小。树脂含量对材料性能的影响比较复杂,随着树脂含量的增加,复合材料的极限频率和抗拉强度提高<sup>[15,18]</sup>,对于树脂含量对磁致伸缩系数以及机电耦合系数的影响规律,各研究者的研究结果不同<sup>[13,14,18]</sup>,还没有统一的结论,仍需进一步论证。

表 3 以聚合物为胶粘剂的磁致伸缩复合材料研究进程表  
Table 3 The history of research on the polymer bonded magnet ostrict ive composites

Main author	Time	Adhesive agent	Volume fraction of Terfenol-D/ %	Saturation magnetostriction / × 10 <sup>-6</sup>
Clark	1983	Epoxy	50	1777
Sandlund	1994	Epoxy	70~ 80	800
Ruiz de angulo	1996	Epoxy	83~ 89	U nknown
Duenas	1997	Epoxy	10~ 40	700
Anjan appa	1997	Alplex	10~ 30	600
Hudson	1998	Epoxy	55~ 70	U nknown
Pasquale	1999	Metlbond	60~ 71	600
Lim	1999	Metlbond	70	536
Busbridge	2000	Glass/ epoxy	30~ 60	U nknown
Hudson	2000	Epoxy	55~ 70	U nknown
Duenas	2000	Epoxy	20~ 50	1000
Duenas	2001	Epoxy	20	1150
Nersessian	2001	Epoxy	20~ 50	1200
Xie wei	2001	Epoxy	60~ 80	900
Zhang YangHuan	2002	U nknown	70~ 80	800
Gregory P. Carman	2002	Therm oplastic polyimide	10~ 80	640

大部分的研究结果表明<sup>[16-18]</sup>,磁致伸缩介质的形状和颗粒大小对复合材料的磁致伸缩系数、极限频率有着明显的影响作用。常见的 Terfenol-D 颗粒形状有粒状、针状和块状。在一定的颗粒尺寸范围内,随着颗粒尺寸的增大,复合材料的磁致伸缩性能提高,材料总的损耗减小,极限频率提高。但是,复合材料的抗拉强度随着颗粒尺寸的增大会逐渐降低。

磁致伸缩复合材料的制备方法和工艺过程对复合材料的性能也有着重要的影响。磁致伸缩复合材料的制备大部分采用压制工艺。压制成型工艺较为简单,复合材料内部气孔较难排净,会降低材料的磁致伸缩性能。最近美国的 Gregory Paul Carman 教授带领的研究小组首先尝试了注射成型,试图解决压制成型过程的空隙率高的问题,并取得了一定的效果。在成型过程中,利用外加机械作用力和外加磁场作用,使无机粒子进行取向,有利于改善磁致伸缩复合材料的性能<sup>[15,19]</sup>。

2.2 磁致伸缩复合材料的制备工艺

目前有关磁致伸缩复合材料的研究中,大多数采用压制工艺,这也是磁致伸缩复合材料最基本的成型方法。将无机磁致伸缩材料在氩气保护下破碎,经硅烷偶联剂处理后与环氧树脂按一定比例在丙酮溶液中混合均匀后,反复搅拌脱气,尽可能地除去混合物中含有的气体。将混合物倒入模具中,模压成型、固化得到磁致伸缩复合材料<sup>[12]</sup>。如果在混合料置于模具后,将其放入磁场中,则无机磁致伸缩粒子则能在聚合物粘结剂中发生一定程度的取向,有利于提高复合材料的磁致伸缩性能。在压制成型过程中,需要注意的是,在材料固化之前必须进行充分的脱气,使树脂和磁致伸缩粒子混合物中的气泡尽可能少。然而在实际操作中,气泡的产生是不可避免的,因此,压制成型所得到的复合材料中往往都会产生缺陷,同时在压制成型工艺中,磁致伸缩粒子分布也不均匀,从而影响复合材料的性能。

对于长径比较大的磁致伸缩粒子,注射取向成型是较为适合的制备工艺。首先将模具置于磁场中,磁致伸缩粒子通过与模具相连的滑道进入模具,在磁场作用下发生取向。然后将模具密封,仅留一个注射口和抽气口,抽气口与真空泵相连。树脂通过注射口在真空泵的作用下进入模具,经后处理过程后制备成复合材料。为了获得低空隙率的磁致伸缩复合材料,注射工艺中必须保证模具在抽气时处于密封状态,同时必须控制树脂的流动速度,使磁致伸缩粒子在树脂流动过程中不至于脱离在磁场取向后的位置。取向注射工艺中,磁致伸缩粒子可以在干燥的状态下进行取向,

因此粒子转动自由度大,因而取向较容易。同时利用抽真空的方式,可以排除空气,大大降低了磁致伸缩复合材料的空隙率。

### 2.3 磁致伸缩复合材料的应用

磁致伸缩材料在电磁场的作用下可以产生微变形或声能,也可以将微变形或声能转化为电磁能,可以实现无接触激励,具有驱动电压低,机械响应速度快和功率密度高等特点。在国防、航空航天和高技术领域应用极为广泛,如声纳与水声对抗换能器、线性马达、微位移驱动(如飞机机翼和机器人的自动调控系统),噪声与振动控制系统、海洋勘探与水下通讯、超声技术(医疗、化工、制药、焊接等)、燃油喷射系统等领域。磁致伸缩智能材料的主要用途是:

(1)在电器、家电、通讯器材、电脑等生产领域,逐渐取代了传统的电致伸缩材料,使产品升级和更新换代更加容易。

(2)由于磁致伸缩材料的独特性能,特别是在应用领域里呈现出的重要使用价值,越来越受到人们的普遍关注,可被用于开发新一代的元器件,如广泛应用于精密控制系统(如油料控制、伺服仪、导弹发射控制装置等),声光发射系统(如信号处理、声纳扫描、超声、水声等),以及换能器、驱动器等等的开发。

对于磁致伸缩智能材料的应用,目前,美国位居各国之首,其成功标志在于开发出了一系列用于军事目的的尖端产品,如美国已成功地将其应用于舰艇水下声纳探测系统以及导弹发射控制装置等。但是,国内对磁致伸缩智能材料新产品的开发还处于起步阶段,但也已呈现出良好的发展势头。如中国长江水利委员会应用这种材料,开发出了大功率岩体声波探测器,应用于三峡工程和地球物理勘探;辽河油田应用这种材料,开发出了井下物理法采油装置;东北大学和大连理工大学应用这种材料,拟在进给和精密定位方面进行联合开发。

### 3 小结与展望

与无机材料相比,聚合物材料具有密度小,重量轻,不易氧化,易加工等优点。开发磁致伸缩聚合物及其复合材料不但能解决无机磁致伸缩材料脆性大、不易加工、高频交变场下出现的涡流效应等问题,还可以赋予材料其他优异性能,如提高机械强度,降低生产成本,简化生产工艺,提高抗拉强度和韧性等。另一方面,从聚合物材料的角度出发,聚合物基功能材料也是当今材料研究的热点,聚合物基磁致伸缩复合材料的研究为功能高分子材料开拓了发展方向,为人类提供一种崭新的智能材料。但是目前的研究工作还远远不

够,聚合物材料的磁致伸缩性能目前还没有公开报道,磁致伸缩复合材料还有许多问题没有解决,通过对近年来相关研究的分析与总结,我们认为今后磁致伸缩聚合物及其复合材料的研究应该从以下几个方面进行:

(1)聚合物磁致伸缩材料方面,应该进一步探索目前具有磁各向异性的聚合物获得磁致伸缩性能的可行性以及赋予聚合物磁致伸缩性能的手段。

(2)对于磁致伸缩聚合物复合材料而言,应该探索合适的聚合物基体,发展新的磁致伸缩复合材料体系,开发新的磁致伸缩聚合物复合材料。

(3)在磁致伸缩复合材料的制备方面,还需要解决许多技术问题以获取高性能的磁致伸缩复合材料。如磁致伸缩材料的粉末化过程中的氧化问题,复合材料制备过程中的空隙率问题等。

(4)利用外场作用使磁致伸缩粒子在聚合物基体中获得取向,有利于提高磁致伸缩性能,是一个非常有前景的研究方向,还需要大量的研究解决其中的关键技术问题,同时其机理也有待于进一步研究。

(5)磁致伸缩聚合物复合材料的应用方面,还应进一步开发应用方向。

### 参考文献

- [1] SANDLUND L, FAHLANDER M, CEDELL T, et al. Magnetostriction, elastic moduli and coupling factors of composites Terfenol-D [J]. Journal of Applied Physics, 1994, 75: 5656- 5658.
- [2] DOOLEY J A, LINDENSMITH C A, CHAVE R G. Magnetostriction of single crystal and polycrystalline Tb<sub>0.60</sub>Dy<sub>0.40</sub> at cryogenic temperatures [J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85: 6256- 6258.
- [3] HAHN I, BARMATZ M, CLARK A. New superfluid leak tight low temperature valve using a magnetostrictive actuator [J]. Materials Research Society Symposium-Processing, 1995, 360: 253 - 257.
- [4] 江民红, 杨平生. 超磁致伸缩复合材料及其在超声中的应用[J]. 国外金属热处理, 2003, 24(4): 10- 15.
- [5] 朱厚卿. 稀土超磁致伸缩材料的应用[J]. 应用声学, 1997, 17(5): 3- 10.
- [6] ANGULO L R, ABELL J S, HARRIS I R. Magnetostrictive properties of polymer bonded Terfenol-D [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 157- 158: 508- 509.
- [7] LIM S H, KIM S R, KANG S Y, PARK J K, et al. Magnetostrictive properties of polymer-bonded terfenol-D composites [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1999, 191: 113- 121.
- [8] NERSESSE N, SIU W, GARMAN G P. Magneto-thermo-mechanical characterization of 1-3 type polymer-bonded terfenol-D composite [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 263: 101- 112.
- [9] OR S W, NERESSIAN N, MCKNIGHT G P, et al. Dynamic

magnetomechanical properties of [ 112]-oriented terfenol-D/epoxy 1- 3 magnetostrictive particulate composites[ J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93: 8510- 8512.

[ 10] 钟文定. 铁磁学[ M]. 北京: 科学出版社, 2000. 26- 28.

[ 11] 方忠, 姚凯伦, 刘祖黎. 有机强磁体研究进展[ J]. 物理, 1995, 24 (9): 528- 533.

[ 12] GEOFFREY P MCKNIGHT. [ 112] Oriented Terfenol-D composites[ D]. Los Angeles: University of California, 2002.

[ 13] HUDSON J, BUSBRIDGE S C, PIERCY A R. Magnetomechanical coupling and elastic module of polymer-bonded terfenol composites[ J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83: 7255- 7257.

[ 14] GUO Z J, BUSBRIDGE S C, PIERCY A R, et al. Effective magnetostriction and magnetomechanical coupling of terfenol-D composites[ J]. Applied Physics Letter, 2001, 78: 3490- 3492.

[ 15] SANDLUND L, FABLANDER M, CLARK A E, et al. Magnetostriction, elastic module and coupling factors of composites terfenol-D[ J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76: 5656- 5658.

[ 16] DUENAS T A, CARMAN G P. Particle distribution study for low-volume fraction magnetostrictive composites[ J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90( 5): 2433- 2439.

[ 17] PASQUALE M, LIM S H. High frequency magnetic properties of polymer-bonded terfenol-D composites[ J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85( 8): 4633- 4635.

[ 18] 解伟, 吴双霞, 江丽萍. 粉末冶金粘结磁致伸缩材料[ J]. 金属功能材料, 2001, 8( 4): 29- 32.

[ 19] ORS W, NESSESIAN N, MCKNIGHT, G P, et al. Dynamic magnetomechanical properties of [ 112] - oriented Terfenol-D/epoxy 1- 3 magnetostrictive particulate composites[ J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93: 8510- 8512.

收稿日期: 2004-05-27; 修订日期: 2005-03-25

作者简介: 詹茂盛(1954- ), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高分子复合材料研究, 联系地址: 北京航空航天大学材料科学与工程学院(100083)。

(上接第 54 页)

carbon epoxy composite laminates on pinned joint strength[ J]. Composite Structures, 2003, 62: 107- 111.

[ 5] 华玉, 郦正能, 寇长河. 复合材料单钉接头的损伤累积模拟[ J]. 航空学报, 1995, 16( 2): 186- 191.

[ 6] 关长文, 陈浩然, 成万植. 复合材料和结构机械连接件破坏历程的数值模拟和试验验证[ J]. 航空学报, 1995, 16(2): 143- 147.

[ 7] 薛克兴, 周瑾. 复合材料结构连接件设计与强度[ M]. 北京: 航空工业出版社, 1988.

[ 8] 汪裕炳. 复合材料的结构连接[ M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.

[ 9] MATTHEWS F L, ROSHAN A A, PHILIPS L N. The bolt bearing strength of glass/ carbon hybrid composites[ J]. Composites, 1982, 13: 225- 227.

[ 10] OKUTAN B, ASLAN Z, KARAKUZU R. A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass fiber reinforced epoxy laminate[ J].

Composite Science and Technology, 2001, 61: 1491- 1497.

[ 11] ICTEN B M, OKUTAN B, KARAKUZU R. Failure strength of woven glass fiber-epoxy composites pinned joints[ J]. Journal of Composite Materials, 2003, 37( 15): 1337- 1350.

[ 12] OKUTAN B, KARAKUZU R. The strength of pinned joints in laminated composites[ J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 893- 905.

[ 13] OKUTAN B, KARAKUZU R. Progressive analysis of pin-load carbon-epoxy woven composite plates[ J]. Composites Science and Technology, 2002, 62: 1259- 1271.

收稿日期: 2004-11-24; 修订日期: 2005-04-20

作者简介: 刘建超(1969- ), 博士研究生, 从事树脂基复合材料及工艺研究, 联系地址: 西安市 101 信箱研发中心(710025)。

# A380 超大型喷气式客机用 PM 高温合金盘

2006 年美国空中客车公司 A380 超大型喷气式客机正式投入运营, 它将使用一种由通用电气公司、普·惠公司和 NASA 公司共同研制的新型镍基高温合金制造的高温/ 高压涡轮盘(PM 盘)。

这种 PM 盘将在 GE 飞机发动机公司和普·惠公司联合开发的新型商务发动机 GP7200 上运转使用。

据 R& D 杂志报道, 这种粉末合金具有高强度/ 损伤容限, 而且能耐高温。与大多数现役发动机相比, 该合金在较高燃烧温度下使用时, 可有助于综合提高发动机燃料利用效率, 减少燃料的消耗, 排放物减少 5%。

GE 与普·惠公司的联盟成立于 1996 年, 旨在制造可容 450 座或更多座位的大型四发动机的客机。GP7000 系列发动机综合并改进了 GE90 和 PW4000 系列发动机的技术。PM 涡轮盘通常要经热压成型、挤压和等温锻造处理。

(徐)