复合材料飞轮储能系统发展现状

毛天祥

(中国科学院力学研究所，北京 100080)

摘要: “复合材料飞轮”是最近几十年来一直受关注的课题。高速旋转的飞轮用来储能是非常古老的技术。随着高强\轻质先进复合材料的出现，高温超导磁悬浮轴承技术的发展，近年来用先进复合材料制造的复合材料飞轮转子，配合磁悬浮轴承，并使其在近乎真空环境下高速旋转，构成了新一代复合材料飞轮储能系统。该系统以其重量轻、高储能比、高寿命等特点可望代替化学储能电池用于混合电力汽车、火车以及空间飞行器中。本文总结复合材料飞轮储能系统的最新进展，并简要介绍在复合材料转子结构应力分析，制造及实验方面所进行的工作。

关键词: 复合材料飞轮，复合材料转子，过盈配合

1 引言

利用高速旋转的飞轮进行能量存储是一种新型无污染的绿色能源技术，近十余年以来，随着新型高强度纤维复合材料、电磁悬浮轴承和电力电子技术等一系列关键技术的突破，复合材料飞轮储能系统的优越性逐渐显示出来，与钢质飞轮相比，它具有储能密度高、重量轻、寿命长等方面的优势。

飞轮储能技术是沿用许久的古老技术。传统飞轮是用石料或金属制成，重量较大，但转速不能太快；而复合材料飞轮是用先进复合材料制成，由于强度高，质量轻，可以高速度旋转而不破坏。飞轮储能的储能密度是与飞轮转速的平方成正比的，所以提高飞轮转速能显著提高飞轮储能比(飞轮单位质量储存的能量)。高速旋转的飞轮所受的外力为离心力(与飞轮材料本身的质量成正比)，唯有高强，轻质的先进复合材料制成的飞轮才有可能实现高速旋转，实现高储能密度的目标。以碳纤维增强复合材料为代表的先进复合材料能满足飞轮转子高速旋转的要求。近几年发展起来的高温超导磁悬浮轴承，以及在真空室的真空环境中，使复合材料转子在近乎零阻力的条件下能够高速旋转。这些新技术使得复合材料飞轮作为储能系统代替化学储能电池用于混合电力汽车，火车以及空间飞行器中成为可能。

纤维束缠绕的飞轮是各向异性的，虽然环向具有很高的强度，其总体强度还受径向强度的制约，通常情况下其径向强度（即单向复合材料的横向强度）往往很低，因此提高飞轮的径向强度成为飞轮设计制造中的关键问题之一[1]。利用多环套装[2~4]以及纤维束缠绕飞轮时施加张紧力[5, 6]等方法可以有效地提高飞轮的径向强度。储能飞轮转子存在实心轴式结构和轮毂式结构，而对于轮毂式结构，可以简化为空心结构（即金属芯轴外表面与飞轮内表面不接触）；计算表明，采用空心结构也可以提高飞轮的径向强度[7]。另外，鉴于飞轮在离心力作用下，应力分布的非均匀性，若采用不同纤维束缠绕形成多环环间混杂的复合材料飞轮[10]（即每一环由同一种纤维缠绕而成，而不同环的缠绕纤维不同），则有利于降低成本。

为了测试张紧力缠绕的三个试验复合材料飞轮的破坏载荷，并与理论分析进行对比，对其实施了高速旋转破坏试验[11]。首先分别用平面应力型全弹性模型和三维数值模型建立了计算复合材料飞轮破坏转速的二维和三维算法。这两个算法均采用了正交各向异性材料的最大拉应力（材料主方向）准则，其中三维算法还采用了两种强度判据，即基于轴向大部分区域每层应力的平均值判据和轴向边界区域每层应力的最大值判据。高速旋转破坏试验结果表明，破坏均

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发生在径向强度最弱的飞轮与金属芯轴的界面处。飞轮的实际破坏转速与理论破坏转速十分接近，证实采用的二维和三维算法是可靠的；二维算法得到的理论破坏转速偏高，而飞轮的实际破坏转速落在三维算法分别按最大值判据和平均值判据得到的两个理论破坏转速之间，说明三维算法的精度更高。

2 复合材料转子的应力分析

高速旋转的复合材料转子承受离心力作用，其在复合材料转子中的应力分布如图 1(Fig.1) 所示。环向应力的极大值靠近转子的外边缘(约为 150 MPa)，径向应力的极大值在转子的中部(约为 15 MPa)。环向应力的极大值约为径向应力的极大值的 10 倍。

由于复合材料转子材料的各向异性，材料在环向(纤维方向)的强度比材料在径向(垂直于纤维方向)的强度大很多，其薄弱环节在径向，仍然先在径向破坏。为了克服复合材料转子在径向薄弱的状态，想了许多办法使得转子在静止状态下径向承受预置的压应力。如果预置压应力足够大，可以使复合材料转子在工作状态下，径向始终处于压应力状态，从而避免径向破坏。如在纤维缠绕制造转子的过程中，对纤维施加拉紧力；将复合材料转子设计成由几个同心的圆环组成，然后用过盈配合的方法将它们装配起来，达到转子径向有压缩预应力。

图 1 所示，由四个同心圆环过盈配合装配起来的转子中的残余压应力分布，在离心外载荷作用下的应力分布以及过盈配合的转子在工作环境下的应力分布。过盈配合转子中的径向应力在工作环境下始终处于压应力装态，避免了径向拉伸破坏。但是，过盈配合转子中环向应力在外环处于拉伸应力状态，其峰值大大超过由离心力引起的拉伸应力峰值，在内环处于压缩应力状态，其峰值达到 150 MPa。

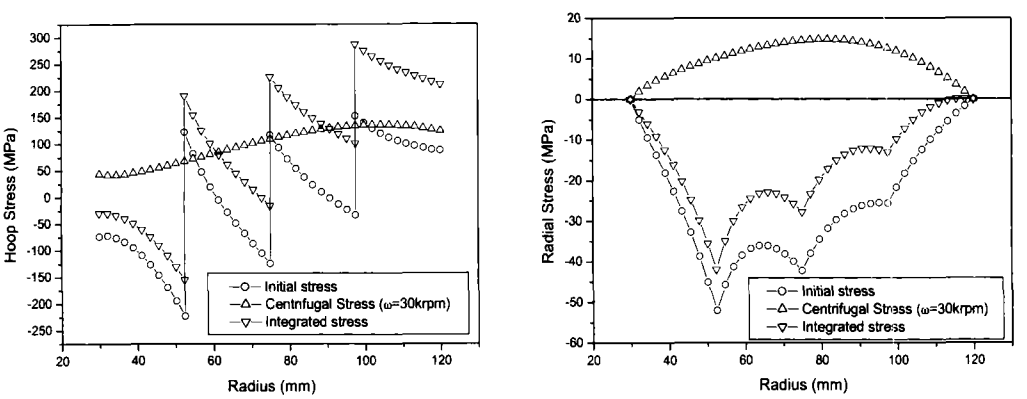

图 1 叠加后的应力分布 (case 2)

Fig.1 Hoop and radial stress for rings subjected to misfit and centrifugal load

由于过盈配合可以大大降低转子径向拉应力，过盈配合转子的应力分析引起许多学者的重视。如考虑转子内环及外环采用具有不同模量的材料制造，以达到等强度设计的目的。这方面的研究工作很多，不一一介绍。

伯克利复合材料实验室的 Mickey Reilley 曾拟文[12]指出过盈配合可能发生的问题。当复合材料飞轮储能系统应用混合动力汽车时，复合材料转子的旋转速度可达 40000 rpm (每分钟 4 万转)。复合材料转子由三个或更多的同心圆环经过盈配合装配而成，此转子直接与直流电机

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

相联。此装置通常支承在磁悬浮轴承上，并置于真空室内以降低高速旋转时的空气气动阻力。过盈配合带来的残余应力，使得复合材料转子在静止状态下径向受压应力。径向残余压应力设计的大小，使得复合材料转子的旋转速度达到最高点时，径向应力仍为压应力，就可以避免复合材料转子的径向破坏。但是，转子减速时，通常马达会有热量散发出来。这些热量传到复合材料飞轮会引起温度升高，由于飞轮环向有压缩残余应力，温度过高会引起飞轮环向破坏。

Mickey Reilley 的分析表明，过盈配合使得转子出现残余压缩应力不一定是好的设计方案。如果复合材料横向的破坏拉伸应变达到一定的水平，飞轮转子在旋转时在径向承受的拉伸应力将不会太高。分析结果建议，使用高温柔性聚氨酯类树酯系统代替在航空结构上使用的高效环氧树酯和聚酯将更适合飞轮转子上的应用。

宾西法尼亚州立大学复合材料制造技术中心的 Charles E. Bakis [13]教授指出：聚氨酯类基体转子具有潜在的优点：由于转子在径向刚度较低，因而在运行时径向应力较低；由于径向应力分布比较合理，灾难性的破坏形式少有发生。在典型的刚性基体复合材料制造的飞轮转子中，最大周向应力发生在复合材料圆环的内侧直径处。在宾西法尼亚州立大学研制的柔性聚氨酯类树酯基体复合材料 (材料的各向异性比在 1000 至此 10000 之间) 制成的圆盘状飞轮转子中，最大周向应力发生在接近外侧直径处。同时最大径向应力也发生在接近外侧直径边界处。由于旋转圆盘的两个应力分量的最大值均发生在接近圆盘外径边缘处，当圆盘旋转太快时，在圆盘外圆周缘处，某些材料可能发生局部破坏，从而被抛出去，而不是使整个转子破坏。尽管这一现象尚未在实验室中得到证实，这可能构成未来破坏--安全或安全--保险飞轮的基础。采用柔性基体制造复合材料飞轮转子的研究工作引起不少学者的关注，蔡维伦教授也在关心“软芯”(soft-core) 复合材料转子的工作[14]。

3 复合材料飞轮转子的试验研究

复合材料飞轮转子的试验研究包含两方面的工作，一是复合材料飞轮转子本身的安全问题，二是包容复合材料飞轮转子的容器的安全性问题。这里，先讨论第一个问题。

中国科技大学夏源明教授领导的课题组自行缠绕制造了三个复合材料飞轮转子，并进行了复合材料飞轮高速破坏试验[11]。

复合材料飞轮高速破坏试验是在自行研制的高速旋转试验机上完成的，图 2 即为试验机原理图。在破坏试验前首先将飞轮连同芯轴套筒一起安装于高速试验机系统中，安装后的系统如图 3 所示。飞轮是直接缠绕在试验主体轴的，且形成复合材料飞轮转子，并在电主轴的驱动下

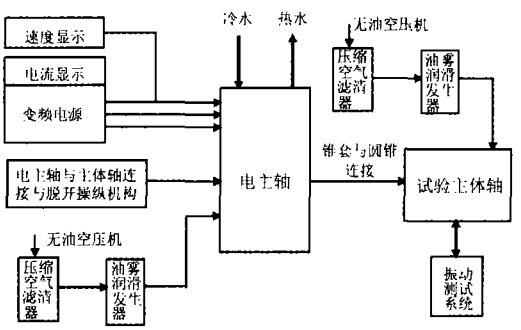

图 2 高速试验机系统原理图

Fig.2 Principle diagram of high speed testing system

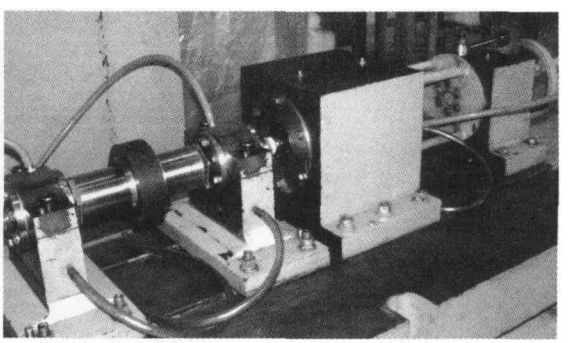

图 3 高速旋转破坏试验系统照片

Fig.3 Photo of the testing system

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

使复合材料飞轮转子高速转动；并通过变频器可监视电主轴驱动电流在加速过程中的变化。当复合材料飞轮发生破坏时会导致变频器驱动电流的骤然上升以至变频器自动切断输出，由此可确定飞轮的破坏转速。

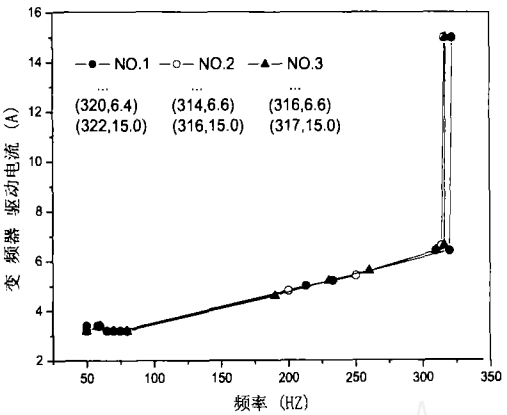

图 4 高速旋转破坏试验变频器驱动电流变化

Fig. 4 Variations of driving current in high speed testing

图 4 给出了三个飞轮破坏试验的变频器驱动电流与输出频率的关系。对于图中的 NO.1 而言，当频率由 320Hz 增加至 322Hz 时引起驱动电流的聚增，这个过程是非常复杂的，表面上是扰动增加的过程，实际上是飞轮破坏的过程；320Hz 至少是初始破坏频率，故本文直接将初始破坏频率 320Hz 定义为飞轮（NO.1）的破坏频率，对应的破坏转速为 320×60=19200rpm。停机后，发现复合材料飞轮与金属芯轴之间已能相对转动，这表示飞轮与芯轴的界面已破坏；飞轮自身并没有破坏。发生这种破坏的形式（界面破坏，飞轮不破坏）的原因在于实心旋转飞轮的总体径向应力的最大值位于飞轮与芯轴的界面处，且界面的强度又相对较低。

另外两组破坏试验测得的破坏频率和破坏转速分别为：飞轮（NO.2）的破坏频率为 314Hz，对应的破坏转速为 314×60=18840rpm；飞轮（NO.3）的破坏频率为 316Hz，对应的破坏转速为 316×60=18960rpm。

德克萨斯大学奥斯汀分校机电中心[15](The University of Texas at Austin，Center for Electromecanics) UT—CEM 进行了复合材料转子的寿命试验。

该中心为混合电力城市公交汽车研制了 2KW-hr 的飞轮电池作为能源。由高强度复合材料制成的飞轮转子，满载荷时旋转 36000 rpm (端部线速度约为 825m/s)，并装置在真空容器中以减小空气阻力。复合材料飞轮转子(图 5)由多个高强碳纤维和环氧树酯制造的同心圆环过盈配合装配而成，以保持飞轮转子在运行状态时，径向应力始终为压应力。金属轮轴作为此预应力飞轮设计的基础。早期试验表明，此预应力复合材料飞轮是结实的稳定的结构。

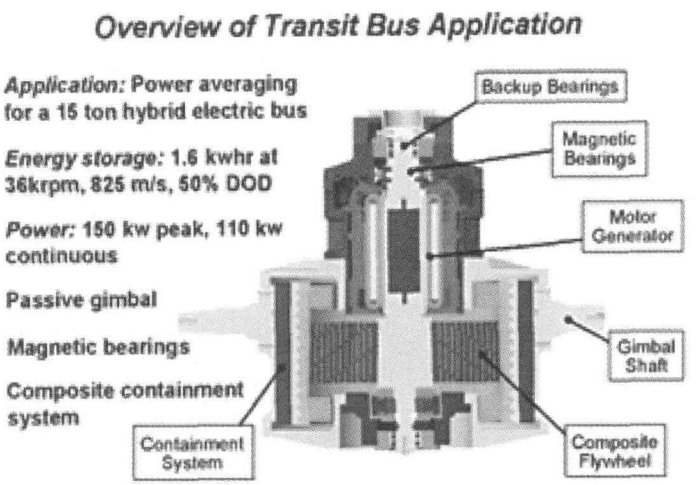

图 5 飞轮系统设计的剖面图

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

CEM 还进行了一个周期的破坏试验。目的在于通过过载试验来记录这件原型件（as built）飞轮的破坏模式。此破坏模式将作为一个基准，用来与经过周期疲劳载荷试验后的类似的飞轮的破坏模式进行对比。

此单周期超速试验，如同所预计的那样；其破坏模式不是环向纤维爆炸性开裂，而是可控制的由质量平衡变为质量不平衡。飞轮的峰值运行速度为 36000rpm。飞轮在达到此速度及刚超过此速度时曾良好地保持质量平衡。在大约 42000 rpm，飞轮呈现轻微的质量平衡变化。出现这一变化是预料之内的，由于飞轮靠内部的圆环中的径向应力开始由压应力转变为拉应力，而且环与环之间已经分离开了。在大约 42000 rpm（1120m/s），飞轮质量不平衡情况加速发展，这是由于圆环与圆环之间以及圆环与转轴之间的分离。如果继续增加飞轮转速，由于强烈的振动将导致主轴的破坏，而且飞轮将坠落至试验装置的底部。CEM 决定停止试验，此飞轮得以安全地停止下来，接受试验后的检测。总之，试验成功地表征了这件原型件飞轮（as built）超速运转后的形态。

CEM 接着完成了第一个疲劳飞轮(Type I)的疲劳循环试验。这个飞轮的试验进行的很顺利，只是在 6500 周时有轻微的异常。在 6500 周时，有很少的复合材料由飞轮圆环外缘表面脱落。飞轮被送回 CEM 进行检测。图 6 与图 7 所示为有材料脱落的外径的表面。在轴向 5/8 英吋的长度内，大约有 0.030 英吋材料脱落了。此圆环外缘的损伤部位明显是径向拉伸破坏。但是，真实的原因尚不确定。可能引起此径向拉伸破坏的贡献有：(1) 某小段预浸料有缺陷；(2) 接触损伤；(3) 由于温度升高的影响(树酯模量蜕化)和自由边界应力状态引起的拉伸撕裂。但是，采用基本的有限元方法，在室温环境树酯的特性对自由边界应力进行了评估，仅仅发现径向压缩应力有不到 15%的降低。

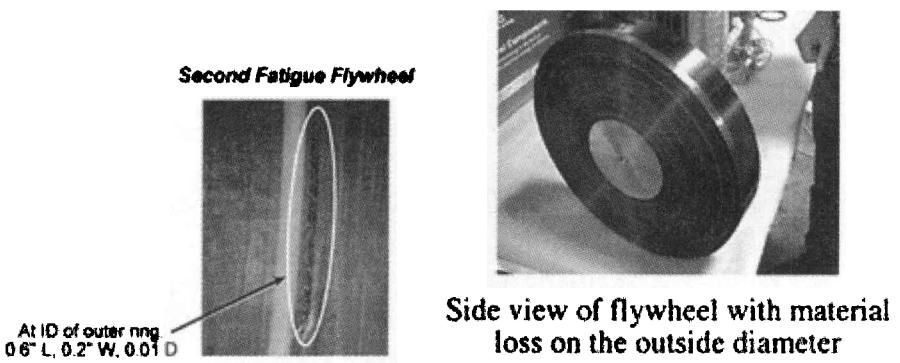

图 6 第二个疲劳试验飞轮外缘局部破坏 (少量材料缺损)

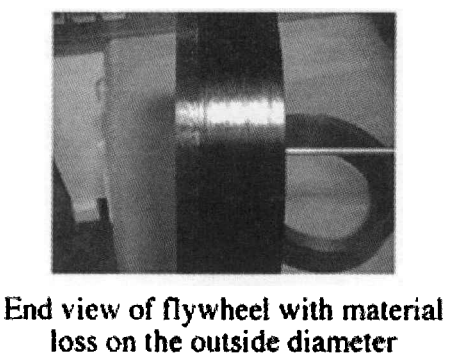

图 7 第二个疲劳试验飞轮外缘局部破坏 (少量材料缺损)(端部视图)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

这个飞轮被送回制造商，并在稍稍降低最大速度的条件下继续试验 (由 39200rpm 降到 36000rpm)。试验顺利进行到 20000 周，没有发生上面所述问题。相信此飞轮的问题是孤立的由于制造引起的问题，因此，决定终止第一个疲劳飞轮的试验，而用余下的经费进行第二个疲劳飞轮试验。

CEM 于 2002 年 4 月完成了第二个疲劳飞轮的疲劳周期试验。此次 CEM 采用混合电动公交车的实际运行载荷譜对这个飞轮进行试验。在 6 个月的周期内，飞轮承受速度振幅为 27000rpm 至 36000 rpm ，其峰值速度为 825m/s。试验是在 140 F 的温度下进行的。在 93500 周时，监测到很小的质量中心的漂移 (50 m/inch，相当于 28 gm—mm)。此时，立即对飞轮和旋转系统进行监测，由于没有发现问题，所以试验继续进行。

达到 101000 周时，实验健康监测系统发现在飞轮外侧有一细小表面脱落。相应的质量平衡变化依然很小(200m/inch，相当于 114 gm—mm)。试验被停下来，检查飞轮转子有何变化，在飞轮转子仅仅发现了小块材料脱落(图 6，图 7)。试验又一次继续进行，顺利进行到 112000 周，未发现任何附加平衡变化。

2002 年 9 月 20 日，对此飞轮进行超速试验。如所希望的，第二个疲劳飞轮的表现与以前实验的原型件飞轮 (as built) 几乎完全一样。第二个疲劳飞轮的破坏模式为预加应力消失，导致质量平衡漂移。在控制主轴振动使其不引起主轴破坏的条件下，最大速度可达 1100 m/s。超速试验揭示，第二个疲劳飞轮 (试验至 112000 周) 的结构退化与原型件飞轮(as built)是不同的。

由试验可以得到以下几点：

(1) 在模拟服役和 140 F 高温条件下，对全尺寸复合材料飞轮进行了相当长周期的疲劳试验。

(2) 转子健康监测表明，实时测量质量分布微小变化的重要性。尽管细小的表面撕裂仅仅造成转子行为的微小变化，监测系统已发现不正常。这可能成为在今后飞轮系统实时监测方法的先驱。

(3) 对今后太空为基础的应用而言，超过 90000 周的持久性试验表明，对于用于太空的复合材料飞轮储能设施，低轨道卫星可以服役 15 年。

机电中心 (CEM) 在发展高性能飞轮储能系统方面，取得了里程碑式的进展。对复合材料飞轮刚刚进行了在两个服役循环速度之间反复加速的 100000 周次试验。对刚刚起步的复合材料飞轮产业而言，这是巨大成功的亮点。这些成就与复合材料界相关机构的其它成果，对证明复合材料飞轮超常服役时间，较高循环应力水平下的持久性和可靠性方面是有所帮助的。与此同时，这些活动建立了进行飞轮持久性试验所需要的设备和方案的基础。

另外一个问题是包容整个复合材料飞轮储能系统的容器的安全问题[16]。尤其是在十多年前，在一次复合材料飞轮储能系统的试验中，发生了机毁人亡的惨痛事故。包容整个复合材料飞轮储能系统的容器的安全问题，再次被重视，并相应地安排了研究工作。这个问题本文不作太多的论述。

4 结语

复合材料飞轮储能系统的发展已经取得了长足的进展。由于材料的各向异性，复合材料飞轮转子的径向是薄弱环节。通常由多个复合材料的同心圆环用过盈配合的方法装配起来，使转

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

子径向有压缩残余应力，克服转子径向拉伸破坏的问题。近期，研究了过盈配合可能带来的问题，提出用一层柔软树酯将多个复合材料的同心圆环分割开来，以阻止拉伸应力的传递。也有学者提出用较柔软的聚氨酯类树酯基体代替航空界常用的环氧树酯制造飞轮。用聚氨酯类树酯基体代替航空界常用的环氧树酯，可能引起飞轮转子破坏模式的变化。由环氧树酯基体复合材料飞轮破坏在飞轮内部，变化为聚氨酯类树酯基体复合材料飞轮轮缘表面材料的缺损。

参考文献

1. Flywheels M, 宫能平, 夏源明, 毛天祥. 复合材料飞轮的三维应力分析. 复合材料学报, 2002, 19(1): 113~116
2. Lee SY, Springer GS. Filament winding cylinders—part I: process model. *Journal of Composite Materials*, 1990, 24(12): 1270~1298
3. Cai Z, Gutowski T. Winding and consolidation analysis for cylindrical composite structures. *Journal of Composite Materials*, 1992, 26(9): 1374~1399
4. 秦勇, 夏源明, 毛天祥. 复合材料空心飞轮多环套装整体变形及应力分析. 复合材料学报, 2003, 20(5) 95~99
5. 秦勇, 夏源明, 毛天祥. 纤维束张紧力缠绕复合材料飞轮的预应力简化分析. 复合材料学报, 2003, 20(6) 87~91
6. 秦勇, 夏源明, 毛天祥. 计及复合材料飞轮内孔卸载影响的多厚环套装的简化分析. 复合材料学报, 2004, 21(2):117~122
7. Genta G. Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems. Butterworth & Co. Ltd., Woburn, MA, 1985
8. Tutuncu N. Effect of anisotropy on stresses in rotating discs. *International Journal of Mechanical Science*, 1995, 37(8): 873~881
9. Sung Kyu Ha et al. Optimum design of multi-ring composite flywheel rotor using a modified generalized plane strain assumption. *International Journal of Mechanical Science*, 2001, 43: 993-1007
10. 秦勇, 夏源明, 毛天祥. 多环环间混杂复合材料飞轮离心应力分析. 复合材料学报, 2004, 21(4): 157~161
11. 秦勇, 王硕桂, 夏源明, 毛天祥. 复合材料飞轮破坏转速的算法和高速旋转破坏试验. 复合材料学报, 2005, 22(4): 112~117
12. Mickey R. Design of Composite Flywheel Rotors. 摘自“加州大学伯克利分校复合材料中心”网页
13. Charles EB. Composite Flywheel Energy Storage. 摘自“宾西法尼亚洲立大学复合材料制造技术中心” 网页
14. CorbinCK, Tsai SW. Composite Flywheel Rotor Technology Development Overview
15. Richard C. Thompson, Composite Rotor Lifetime Testing. 摘自“德克萨斯大学奥斯汀分校机电中心”网页
16. Steven Ashley. Designing Safer Mechanical Engineering, 118(11)

Development of composite flywheel energy storage system

Mao Tianxiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: “Composite flywheel” is one of the most attractive program for the composite communities

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

in the past few decades. It is a very typical technique that the high speed spun flywheel is used for energy storage system. With appearance of the high strength, light weight advanced composite materials and development of high temperature superconduct magnetic bearings, a new generation composite flywheel energy storage system has been developed. This system composed with composite flywheel rotors, magnetic bearings and spun in very high speed in a vacuum spin chamber. This system has the advantages of light weight, high energy storage density, high life time etc. and has the application in the hybrid electrical vehicle, locomotive and even in the spacecraft instead of the chemical batteries. This paper gives the summery of the state of art of the development of the composite flywheel energy storage system, and the stress analysis, manufactures and testing of the composite flywheel rotors.

Key words: composite flywheel, composite rotors, misfit

www.cnki.net

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net