

分类号: TH145.9

单位代码: 10422

密级: 公开

学号: 201012326



山东大学

硕士学位论文

论文题目: 人造石精密机床床身动静态性能研究及结构
强化.

Study on Static-dynamic Performance of Resin Mineral
Composites Precision Machine Tool Bed and Structural Strength

作者姓名 郝世美

学院名称 机械工程学院

专业名称 机械制造及其自动化

指导教师 张建华 教授

合作导师 _____

2013年5月21日

摘要*

人造石是以天然花岗石颗粒为骨料，以有机树脂作粘结剂的一种新型复合材料，具有优良的阻尼减振性能、低热膨胀系数、高耐腐蚀性能，以及较好的力学性能，适用于制造高速和精密加工机床、激光、电子等设备的底座和床身等机械基础件。本文对人造石精密机床床身的动静态性能进行仿真研究并试验验证。

对选定的典型人造石精密机床床身进行受力分析，结果表明在工件、主轴箱、尾座、床鞍、刀垫-刀架-车刀等的重力以及切削力共同作用下，床身上的 1 号、2 号导轨正面和侧面所受载荷均呈梯度分布；3 号、4 号导轨的正面所受载荷分布均匀，而侧面所受载荷呈梯度分布；固定主轴头的螺栓处载荷集中。

利用有限元仿真软件 ANSYS 对 HT200 床身和同结构的人造石床身进行静力学仿真分析，结果表明：在相同的工况下，人造石床身各方向的变形量均大于 HT200 床身，并且其 X 方向变形对床身的整体变形量影响最大，Y 方向次之，Z 方向最小。通过导轨预埋 45#钢件、增加床身尺寸等方式对人造石床身进行局部强化，强化处理后的床身各方向变形量均大幅降低，同时改善应力分布，减少应力集中。

对人造石材料的阻尼性能进行研究，明确了树脂用量、最大骨料尺寸、稀释剂、增韧剂和固化剂含量等因素对人造石阻尼性能的定量表征，建立了人造石阻尼性能数学模型，并进行了实验验证。研究结果表明：当树脂用量增多时，人造石的阻尼比逐渐增大；最大骨料尺寸增大时，人造石的阻尼比逐渐下降，但下降的趋势逐渐变缓；随着稀释剂（丙酮）、固化剂（乙二胺）含量的增加，人造石的阻尼比先降低后增大，但稀释剂和固化剂含量对人造石阻尼性影响不显著；提高增韧剂（邻苯二甲酸二甲酯）的含量时，人造石阻尼性能先增大后降低，增韧剂含量为 1.3%时，人造石的阻尼性能最好。

采用仿真软件 ANSYS 对 HT200 床身和加强处理后的人造石床身动态性能进行仿真研究，两种材料床身的前八阶模态性能分析表明：强化处理后的人造石床身质量增加，加强导轨改变了结合面的动态参数，从而提高了人造石床身的动态

* 国家重大科技专项资助项目，项目编号 2012ZX04010-032 及国家自然科学基金资助项目，项目编号 51175308

性能，人造石床身的前八阶模态固有频率均高于 HT200 床身，随着模态阶数的增加，固有频率提高的幅度保持稳定；人造石床身与 HT200 床身的前八阶模态振型不完全相同，最大位移出现的位置不完全一致，最大相对位移量也互有高低。对两种材料床身进行谐响应分析，研究对床身变形影响较大的模态阶次，从而指导实际生产，避免共振。

本文对人造石精密机床床身进行了动静态性能分析和结构强化，为人造石精密机床的设计开发奠定了基础。

关键词：人造石；有限元分析；结构强化；阻尼；固有频率和模态振型

第 1 章 绪论

1.1 人造石

人造石又称为树脂矿物复合材料、树脂混凝土等，是以天然花岗石颗粒为骨料，以有机树脂作为粘结剂，通过添加一系列的增韧增强组分所制备的一种新型复合材料。对人造石材料的相关研究起始于上个世纪 40 年代^[1]，近年来，随着材料制备技术及其相关物理机械性能的不断发 展，人造石材料已被广泛地应用于机械装备、建筑工程、道路桥梁等领域。

1.1.1 人造石材料的组分构成

人造石材料的组分构成如图 1-1 所示，目前常用的人造石材料其组分主要包括树脂系统和骨料系统两部分，其突出优点是阻尼减振性能好，约为普通铸铁材料的 10 倍左右，但其抗压强度、抗弯强度等基本力学性能与铸铁材料相比较差，限制了人造石材料的大量推广应用。为了提高人造石材料的性能，通常采用加入纤维以及橡胶颗粒等组分对其进行相应的增韧增强。



图 1-1 人造石材料的组成构成

1.1.1.1 树脂系统

制备人造石材料所用的树脂系统主要包括有机树脂、固化剂、稀释剂、增韧剂等。

(1) 有机树脂

对于人造石材料，有机树脂主要用作粘结剂。根据化学性质的不同可以将有机树脂细分为热固性树脂和热塑性树脂两种^[2]。本文选用热固性环氧树脂作为粘结剂，其主要优点包括胶接强度较高、收缩率与蠕变率较低、耐化学腐蚀性较好、固化时不产生副产品等。

(2) 固化剂

常温环境下环氧树脂性能稳定，不易发生固化反应，需要与固化剂协调作用^[3]，固化剂主要用来调节树脂系统固化反应的时间，本文选用的固化剂为乙二胺。

(3) 稀释剂

稀释剂主要起到降低环氧树脂粘度，增强其渗透性的作用。合理的稀释剂用量能够明显提高骨料的粘结剂包裹性，有效控制固化反应中的热量排出^[4]。针对所选热固性环氧树脂的种类，本文选用丙酮作为稀释剂。

(4) 增韧剂

合理的增韧剂用量可以提高环氧树脂固化后产物的韧性，减少固化反应的热量排出，降低材料收缩率。常见的增韧剂包括活性增韧剂和非活性增韧剂两种，其中，非活性增韧剂不参与固化反应，自身粘度小，能够增强环氧树脂的吸附与浸润效果，同时可以起到稀释的作用。本文选用邻苯二甲酸二丁酯作为增韧剂。

1.1.1.2 骨料系统

骨料是人造石材料的主要组成部分，其重量占材料总重量的 85%以上，主要起骨架支撑作用。按照骨料粒径的大小，可以将骨料系统细分为粗骨料、细骨料和填料三部分^[5]。不同的骨料最大粒径对人造石材料的性能影响较大^[6,7]，适当地增加粗骨料的粒径可以有效提高人造石的物理机械强度，降低细骨料、环氧树脂、固化剂以及稀释剂等组分的用量，降低材料成本；当然，骨料最大粒径不可能无限增加，若骨料最大粒径过大，可能产生明显的离析现象，导致抗压强度、抗弯强度等基本力学性能明显下降。使用填料一方面可充分填充细骨料堆积后的

内部空隙，提高人造石材料的抗压强度，同时，填料的填充作用可有效降低离析现象，改善树脂用量，减小材料收缩率等，本文选用破碎筛分后的“济南青”花岗石为粗细骨料，选用粉煤灰作为填料使用。

1.1.1.3 增韧增强组分

针对人造石材料强度较低、力学性能较差的缺点，为了提高人造石材料的物理机械性能，通常采用添加碳纤维、橡胶等组分的方法以增韧增强材料性能。本文选用碳纤维作为增强材料，纤维的加入可提高人造石材料的抗弯强度与抗冲击韧性，有效减小裂缝的产生。同时，针对碳纤维表面光滑、表面活性较差的缺点，采用偶联剂浸润的方法对碳纤维进行前期预处理，保证碳纤维与树脂基体间界面粘结强度，延长材料使用寿命。

1.2 人造石材料的优点

相比于传统的铸铁材料与钢材焊接结构，人造石材料具有以下几方面优越性：

(1) 动态特性良好。人造石材料具有 10 倍于铸铁的阻尼减振性能，用于制备机床基础件可有效地改善整机动态特性，提高机床精度。

(2) 人造石材料可在室温下一次浇注成型，其生产过程不需要烧结，具有复杂外形的成型能力和整合能力，成形精度高，残余应力小。

(3) 抗化学腐蚀能力强，对酸、碱及润滑油不敏感。

(4) 原料来源丰富，加工废料经过破碎处理后可以回收利用，减少材料浪费。

(4) 工艺设备简单，生产周期短，无污染物排放，对环境污染小。

1.3 存在的问题

虽然人造石材料具有优良的阻尼减振与热稳定性能，但是，其静态力学性能较差的缺点限制了人造石材料的大量推广应用。表 1-1 为人造石材料与灰铸铁材料基本性能参数的比较，对比发现，人造石材料的抗压强度仅为灰铸铁的 1/6~1/5，其弹性模量是灰铸铁的 1/3 左右，抗弯强度仅为铸铁的 1/11~1/8。当较大的外部应力作用于人造石材料机床基础件时，会因材料强度较差而产生微观裂纹的扩展，甚至产生断裂现象，这限制了人造石材料的广泛应用。

表 1-1 人造石与灰铸铁的性能参数

参数	人造石	灰铸铁
密度/(kg/cm ³)	2.1~2.4	7.15
抗压强度/MPa	110~140	720
抗弯强度/MPa	25~35	290
弹性模量/GPa	30~45	88~113
断裂伸长率/%	0.1~0.2	0.3~0.8
阻尼比	0.02~0.3	0.003
热膨胀系数 (10 ⁻⁶ /°C)	12~20	10
热容量/[KJ/(kg·°C)]	0.9~1.1	0.5

1.4 人造石在机床基础件中的应用

目前国内外大部分机床的基础件材料仍然采用传统的铸铁和钢材焊接结构，虽然抗压、抗弯强度等静态力学性能较好，但其减振性能已经接近于极限。随着高速精密以及高效加工技术的不断发展，铸铁材料和钢材焊接结构动态性能较差的缺点日益明显，已无法满足现代机械行业对机床高精度、高热稳定性以及高阻尼减振性能的要求。通过一系列的材料与结构优化设计，将人造石材料应用于机床基础件以提高机床整机的动静态力学性能已经成为提高机床精度的必由之路。

1.4.1 国外对人造石床身研究现状

1917年，德国 SCHLESINGER 首次提出使用人造石材料制造机床床身产品，但是，限于材料制备技术的不成熟，导轨面在切屑与油液的喷溅下发生破坏，导致该方案未能正式付诸实施^[8-10]。二十世纪四十年代，德国 BOEHRINGER 公司为节约钢铁材料的使用，成批生产了应用人造石床身的机床产品。此后二十年，前苏联与美国亦先后使用人造石材料制造了大型车床和龙门式铣床上的构件^[11]。

20世纪70年代开始，瑞士、英国、日本等工业发达国家相继开展了相关人造石在机械行业中的应用研究。其中，日本通过对机床制造工艺、整机减振能力、结构优化设计等方面的研究得出结论^[12,13]：机床整机尺寸越大，人造石材料的优

势体现的越明显，其提高加工精度、改善机床动态性能、降低成本的效果越好。1977年，瑞士 Studer 公司成功制造了型号为 S100 的全自动外圆磨床，其床身整体采用人造石材料浇注而成，80年代后期又研制出一系列产品^[14]。与此同时，德国 EMAG 公司成功应用人造石材料制造出双主轴卧式车床，通过实验测试，该车床可延长使用寿命 20%以上，并能显著提高加工精度^[15,16]。

德国 Darmstadt 大学的 Schukz^[17]教授等人对人造石材料的性能及其机械应用进行了较为系统的研究，成功生产出使用人造石床身的高速铣床与加工中心等，德国根据其实验结果制定了相应的工业应用标准，并详细规定了人造石材料的性能、工艺及其试验方法等。

迄今为止，一系列国际著名的机床生产商，包括阿奇-夏米尔、DMG、西门子等公司均在国际知名机床展上展出过使用人造石材料制备机械基础件的机床整机，受到业界广泛关注。

1.4.2 国内研究现状

国内研究人造石材料的工作起始于上世纪 50 年代，最初将其应用于制造机床支撑件^[18]。部分机械厂采用人造石材料制造小型机床的结构件，虽然缩短了生产周期，降低了成本，但由于人造石制备技术不够成熟，材料使用过程中易产生蠕变，并且耐腐蚀差的问题未能有效解决，无法保证机床的加工精度，使得人造石材料未能大范围推广应用。

自 1985 以来，同济大学、山东大学、上海机床厂、北京机床厂等开始进行人造石材料性能的优化研究，对材料的组分、制备以及成型工艺等进行了详细的设计和分析，并制作了人造石铣床夹具和砂轮磨刀机支架等典型产品。其中以同济大学的研究最为突出，他们与北京二机床合作，制备出强度较高、阻尼性能良好、固化时间短、耐腐蚀、热变形小且精度高的人造石材料，并研制成功中国第一台人造石精密外圆磨床。同一时期北京机床厂研制出人造石材料制造的机床基础件^[19]，通过对比灰铁材料床身，人造石材料床身具有更好的吸振性及热稳定性，同时降低了 15%左右的制造成本。然而，由于缺乏对人造石材料微观作用机理和工业应用的系统深入研究，人造石材料及其产品在我国一直未能广泛应用于实际工

业并转化为生产力。

国内众多研究人员对人造石材料进行了大量的研究工作并取得了许多研究成果。辽宁工程技术大学的徐平^[20]等人利用有限元软件与模态分析方法,对含钢纤维的人造石床身和铸铁床身动态性能进行分析,结果表明人造石床身的动态性能明显优于同结构的铸铁床身。山东大学的孙杰、王积森^[18,21]等人设计了人造石材料的成型工艺,并制作了砂轮支架。郑州纺织工学院的吴隆^[22]对人造石材料配比进行了研究,分析了砂率、填料及组分配比等对人造石材料性能的影响,并对人造石床身进行了性能测试,研究发现人造石材料比铸铁材料的吸震能力提高了 6.5 倍,人造石床身的整体刚度大于同质量的铸铁床身,同时可降低成本 10%~30%。山东大学的白文峰^[23]等人对人造石的阻尼性能进行了研究并通过实验验证,建立了一种新的人造石阻尼模型。

1.5 有限元仿真在床身动静态性能分析中的应用

计算机技术的快速发展,尤其是有限元仿真软件的出现,推动了有限元方法的应用普及。由于有限元仿真具有建模方便,模拟精度高,操作简单,适用范围广等特点,已经成为科学研究中重要的分析手段,广泛应用于解决各种实际工程问题。目前常用的有限元仿真软件包括 ANSYS、ABAQUS、LS-DYNA、NASTRAN、I-DEAS 等。

在床身静态性能仿真方面,有限元方法主要分析静力载荷下床身的应力应变情况,通过施加各方向的应力分布,找出应力集中区域,进而通过设置加强筋、增加床身尺寸、加大壁厚等方式增强机床床身的静态力学性能。在床身动态性能仿真方面,有限元方法主要以床身固有频率和振型为目标,对床身进行优化设计,既能够满足实际使用要求,又能加工方便,降低成本。在有限元静动态仿真方面,国内外众多研究人员做了大量的工作。

美国 M.A.Elbestawi^[24]利用有限元分析软件 LS-DYNA 对某高速铣床整机动力学特性进行了仿真研究与试验验证,获得了铣床动态性能参数。西班牙 M.Zatarain^[25]采用 NASTRAN 软件建立了某型号移动铣床的有限元模型并进行相应的模态分析,通过对比几种结构的特点,最终获得铣床的最优结构形式。韩国

Sun-Min Kim^[26]等利用 ANSYS 软件与试验研究相结合的方法,研究了某型号磨床主轴和砂轮结合面条件对系统整体动态性能的影响。

东南大学的汤文成^[27]等人运用 ANSYS 软件研究了板厚对机床床身性能的影响,研究结果表明相比于板筋厚度,床身的厚度对床身固有频率和振型的影响更大,并且主墙板厚度和隔墙板厚度差值越大,床身扭转振型和弯曲振型的固有频率越高,扭转振型的一阶固有频率和二阶固有频率的差值越大,但弯曲振型的一、二阶固有频率差值越小,在设计时需要进行综合考虑。

东北大学的张镛^[28]等人运用 ANSYS 软件对 CKS6125 数控机床的床身进行仿真分析,得到该型号机床床身的前六阶固有频率及工况条件下各方向的变形量,进而通过模态分析提出了相应的优化方案,包括增加五条横向板筋,设置厚度增加为 18mm 等,可以有效提高床身的动态特性,并且对床身质量影响较小,不会增加生产成本。

合肥工业大学的李强^[29]等人运用 Hyper Mesh 和 OptiStruct 软件对某重载货车的车架进行有限元仿真,分析该车架在弯曲和扭转两种情况的应力分布和应变情况,研究结果表明车架在扭转时应力应变最大,将车架厚度减少 1~1.5mm,可满足强度要求,又能减轻车体重量,节约成本。

上海交通大学的朱军^[30]等人运用 ANSYS 软件对某高速立式加工中心进行有限元模态分析,通过对模型的动力学仿真,分析了机床的最薄弱环节并提出改进方案,分别运用元结构法和拓扑优化法对床身和立柱进行了动态优化设计,最终利用机床部件进行模态试验所得数据,优化了机床仿真参数。

虽然利用有限元软件对机床动静态性能进行仿真研究越来越多,但对使用人造石材料机床床身进行的仿真研究确鲜有报道,加之国外的技术保护措施严格,该方面的研究资料较少。

1.6 课题的研究意义和研究内容

1.6.1 课题研究目的和意义

机床行业是国民经济和国防工业的基础,精密与高精度加工技术是机械行业发展的主要趋势,机械加工精度反映了一个国家的整体机械水平。目前,我国在

高档精密机床的结构设计、关键部件生产上相比国外还有不小的差距，开发研究综合性能优良的人造石精密机床床身，对于加强我国先进设计制造基础研究，降低能源消耗，减少环境污染，推动机械行业的整体技术进步，有着重要的理论与实际意义。

本文是在掌握了有限元、机床动力学等理论的基础上，运用大型非线性有限元仿真软件 ANSYS 对选定型号的人造石精密车床床身进行有限元仿真，分析其静态力学性能和动态性能，根据分析结果进行相应的床身结构优化，保证床身在满足精度要求的同时，有效节约材料消耗。

1.6.2 本课题的来源及主要研究内容

本课题来源于国家自然科学基金资助项目“纤维增韧增强人造石精密机床床身关键技术及机理研究(51175308)”和国家高档数控机床与基础制造装备科技重大专项“纤维增韧增强树脂矿物复合材料及其精密机床床身精度稳定性技术(2012ZX04010-032)”。

本文是在前人大量的相关工作基础上，以人造石床身为研究对象，主要研究内容包括以下几个方面：

(1) 对选定的典型人造石精密机床床身进行受力分析，计算外力作用下床身导轨的载荷分布与固定主轴头的螺栓处受力。

(2) 对选定型号的 HT200 床身与同结构的人造石床身进行静态力学仿真分析，掌握床身在各方向的变形量及应力分布，对应力集中分布的位置进行相应的强度校核。

(3) 根据静态力学分析结果，通过导轨预埋 45#钢件、增加床身尺寸等方式，对人造石床身进行局部强化，提高其静刚度。

(4) 对人造石材料的阻尼特性进行相关研究，结合理论模型与实验研究确定树脂用量、最大骨料尺寸、增韧剂和固化剂含量等因素对人造石阻尼性能影响的定量表征。

(5) 采用仿真软件 ANSYS 对 HT200 床身和加强处理后的人造石床身动态性能进行仿真研究，对比两种材料床身的前八阶模态固有频率与振型，验证人造石

变形最大的节点进行谐响应分析，通过对比 X、Y、Z 三个方向的变形量，验证人造石床身对外界激振良好的适应性。

学位论文评阅及答辩情况表

姓名		专业技术 职 务	是否博导 (硕导)	所 在 单 位		总体评价 ※
霍孟友		教授	是	山东大学		优秀 已达要求
姓名		专业技术 职 务	是否博导 (硕导)	所 在 单 位		
主席	张明勤	教授	是	山东建筑大学		
委 员	张勤河	教授	是	山东大学		
	霍孟友	教授	是	山东大学		
答辩委员会对论文的 总体评价※		B	答辩秘书	张敏	答辩日期	2013.5.18
备注						

※优秀为“A”；良好为“B”；合格为“C”；不合格为“D”。