

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.07.012

混合纤维增强树脂矿物复合材料研究^{*}

郭辰光^{1,2}, 朱立达², 李威力¹, 李源¹

(1. 辽宁工程技术大学机械工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 东北大学先进制造与自动化技术研究所, 沈阳 110819)

摘要: 为了研究作为精密机床床身基础构件的混合纤维增强树脂矿物复合材料的性能, 以钢纤维质量分数、丝瓜络纤维质量分数、钢纤维长径比为考察因素, 采用正交试验设计方法开展 16 组钢-丝瓜络纤维混合增强树脂矿物复合材料试件压缩强度与阻尼比测试试验。结果表明, 钢纤维质量分数对材料压缩强度的影响最大, 丝瓜络纤维质量分数对材料阻尼比的影响最大。随着丝瓜络纤维的添加, 试件压缩强度与阻尼比均出现先增大后减小的趋势, 当丝瓜络纤维质量分数达到 0.1% 时, 试件的压缩强度为 98.095 0 MPa, 阻尼比为 0.172 7。钢纤维添加量与试件压缩强度呈线性递增趋势, 且当钢纤维质量分数达到 0.4% 时, 试件阻尼比达到最大值, 为 0.170 7, 当钢纤维质量分数为 0.8% 时, 试件的整体性能最优。当钢纤维长径比为 60 时, 试件的压缩强度为 100.063 0 MPa, 阻尼比为 0.170 9。混合纤维增强树脂矿物复合材料的最佳组分为: 丝瓜络纤维质量分数 0.1%, 钢纤维质量分数 0.8%, 钢纤维长径比 60。

关键词: 树脂矿物复合材料; 混合纤维; 精密机床床身; 压缩性能; 阻尼比

中图分类号: TG502.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)07-0062-06

Research on Mixed Fiber Reinforced Resin Mineral Composites

Guo Chenguang^{1,2}, Zhu Lida², Li Weili¹, Li Yuan¹

(1. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technology University, Fuxin 123000, China;

2. Institute of Advanced Manufacturing and Automation Technology, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to study the properties of precision lathe machine bed manufactured by resin mineral composites, with the influence factors of steel fiber mass fraction, luffa fiber mass fraction and steel fiber length-diameter ratio, 16 groups tests of the properties of compressive strength and damping ratio of resin mineral composites reinforced by mixed steel and luffa fibers were carried out through orthogonal experiment. The results reveal that steel fiber mass fraction has the most significant influence on compressive strength and luffa fiber mass fraction has major influence on damping ratio. With the addition of loofah fiber, compressive strength and damping ratio of the specimen increasing first, and then decreasing. When the mass fraction of luffa fiber is 0.1%, the compressive strength is 98.095 0 MPa, damping ratio is 0.172 7. The steel fiber content and compressive strength of the specimens have linearly increasing trend. When the mass fraction of steel fiber is 0.4%, the damping ratio become 0.170 7. The specimen has the optimal properties when the mass fraction of steel fiber is 0.8%. When the length-diameter ratio of steel fiber is 60, the specimen's compressive strength is 100.063 0 MPa, and the damping ratio is 0.170 9. The suitable constitute of mixed fiber reinforced resin mineral composite material are 0.1% mass fraction of luffa fiber, 0.8% mass fraction of steel fiber and 60 length-diameter ratio of steel fiber.

Keywords: resin mineral composite; mixed fiber; precision lathe machine bed; compressive strength; damping ratio

机床在加工过程中的振动特性是被加工部件表面完整性与质量精度的关键影响因素。随着先进制造行业对数控机床加工精度要求的提高, 研究开发具有优良力学性能与阻尼特性的机床床身基础构件对推动制造业技术进步具有重要的理论与工程应用价值。目前, 我国机床床身基础构件多以铸铁及钢材焊接结构为主^[1], 所制备的床身构件经铸造、机加、焊接成型, 制备周期较长, 且由于该类床身阻尼减振性能由于铸铁材料自身特性已无大量提升

空间^[2], 无法满足精密、超精密加工机床对床身构件阻尼减振性能的要求。

树脂矿物复合材料^[3]以有机树脂作为粘结剂, 花岗岩等矿物岩石颗粒为骨料, 掺杂增塑剂、固化

^{*} 国家科技支撑计划项目 (2012BAF10B11), 国家自然科学基金资助 (501105072, 51475087), 辽宁省科技计划项目 (20131043)

联系人: 郭辰光, 讲师, 主要从事先进制造系统及其自动化技术研究

收稿日期: 2016-04-22

剂、稀释剂与适当填料组分制备而成,制备过程无烧结铸造工艺,成型方法灵活,该类材料密度在 $2.3 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$ 之间^[4],阻尼比约为灰铸铁材料的 $5 \sim 10$ 倍,比刚度较高,适合高速精密与超精密数控加工机床对机床基础构件稳定性的要求。然而,树脂矿物复合材料由于级配不合理导致其力学性能较低,影响机床构件质量与性能,对树脂矿物复合材料机床床身构件的推广应用提出了挑战。

诸多学者^[5-10]分别开展了纤维增强树脂矿物复合材料构件的力学性能研究,通过对不同纤维的表面氧化和偶联处理、填充骨料等级配组分的优化,使树脂矿物复合材料构件的力学性能得到提升。研究发现^[5-6],具有较高弹性模量的钢纤维等金属纤维增强可使材料的弯曲强度与剪切强度得到提升,压缩强度得到显著提高;剑麻纤维等^[11]低弹性模量植物纤维增强对材料的压缩强度影响较小,但可显著改善材料的劈裂拉伸强度及脆性,具有较好的增韧、阻裂效果。目前,针对机床构件用树脂矿物复合材料开展金属纤维与植物纤维混杂增强性能的研究还鲜有报道,笔者采用正交试验法,开展钢纤维-丝瓜络纤维混合增强树脂矿物复合材料的力学性能研究,以钢纤维质量分数和长径比、丝瓜络纤维质量分数为变量进行对比试验设计与研究,为制备满足精密机床基础构件使用要求的高性能树脂矿物复合材料提供研究依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

双酚 A 型环氧树脂:工业纯,环氧值为 $0.44 \sim 0.48 \text{ mol/(100 g)}$,济宁华凯树脂有限公司;

固乙二胺:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;

邻苯二甲酸二丁酯:分析纯,无锡市晶科化工有限公司;

丙酮:分析纯,衡阳市凯信化工试剂有限公司;

粗骨料:采用辽宁省朝阳市杨树湾天然花岗岩,密度为 3.21 g/cm^3 ,压缩强度达 $260 \sim 285 \text{ MPa}$,经颚式破碎机连续破碎,筛分粗骨料粒径 $5 \sim 10 \text{ mm}$,连续级配。级配使用前需常温清洗并作烘干处理,含水量不得高于 0.5% ;

细骨料:经除土处理的人工机制河砂筛分得到,粒径 $0.15 \sim 3.5 \text{ mm}$ 。级配使用前需常温清洗并作烘干处理,含水量不得高于 0.5% ;

钢纤维:采用低碳冷拉钢丝切断型,其主要物

理性能见表 1,钢纤维使用前需经超声波清洗并烘干处理;

表 1 钢纤维性能参数

编号	长度 / mm	直径 / mm	长径比	密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	拉伸强度 / MPa
SF1	20	0.5	40	7.8	≥ 800
SF2	25	0.5	50	7.8	≥ 800
SF3	45	0.75	60	7.8	≥ 800
SF4	60	0.75	80	7.8	≥ 800

丝瓜络纤维:采摘阜新市本地生产丝瓜,将晒干的丝瓜剥皮去籽,剖切为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 丝瓜络块,用粉碎机打碎成长度约 $1 \sim 15 \text{ mm}$ 的丝瓜络纤维,用去离子水洗涤并室温晾干备用。其化学组分与物理性能参数见表 2、表 3^[12],丝瓜络拥有多层丝状植物纤维交错连通成的多孔网状结构,质轻、耐磨并富有韧性,它由 α -植物纤维素、木质素、半纤维素及其它有机材料构成;

表 2 丝瓜络纤维的化学组成

α -纤维素	木质素	半纤维素	灰分
$60.0 \sim 66.5$	$9.1 \sim 15.5$	$17.4 \sim 23.3$	$0.4 \sim 3.0$

表 3 丝瓜络纤维的物理性能参数

密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	纤维直径 / μm	结晶度 / $\%$	孔隙率 / $\%$
$0.82 \sim 1.02$	$250 \sim 290$	$41 \sim 81$	$79 \sim 93$

粉煤灰:粒径为 $0.5 \sim 300 \mu\text{m}$,其基本组分包括 5.32% 的 CaO , 22.63% 的 Al_2O_3 , 49.74% 的 SiO_2 , 10.52% 的 Fe_2O_3 , 4.11% 的 MgO , 2.39% 的 Na_2O , 2.02% 的 K_2O ,其它为 3.27% 的烧失量。辽宁阜新市热电厂。

1.2 主要仪器与设备

锤式破碎机:PC0600 $\times$ 400 型,朝阳力保重工有限公司;

搅拌机:SDF400 型,莱州通聚机械厂;

干燥烘干机:101-4S 型,力辰科技有限公司;

试件成型模具:采用 45° 钢自行制备,其尺寸参数为 $260 \text{ mm} \times 260 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$;

振动台:G500 型,沧州精威仪器设备制造有限公司;

万能材料试验机:WAW-600C 型,济南方圆试验仪器有限公司;

试件阻尼比振动性能测试系统:主要包括 B & K 8207 型脉冲锤,灵敏度 0.225 mV/N ; Lance0120IC 型压电加速度传感器,灵敏度 1000 mV/g ,量程 5 g ,频率范围 $0.35 \sim 6000 \text{ Hz}$,分辨率 $2 \times 10^{-5} \text{ g}$; Lance lc20201 型信号调理器,上限频率 30 kHz ,下限频率 0.01 Hz ;振动电压信号经放大、滤波处理后,经 USB-7325 型 A/D 转换器

转换成数字信号; B & K 7700Pulse 型数据采集系统,采样频率为 4 kHz,连续采样;

ME' scope 模态分析软件: 美国 Vibrant Technology 公司。

1.3 试件制备

在添加纤维之前,先完成试件树脂系统、骨料与填料的均匀混合。以质量分数为配合比,将 10% 的环氧树脂、1.35% 的固化剂乙二胺、0.7% 的稀释剂丙酮、0.7% 的增塑剂邻苯二甲酸二丁酯依次加入搅拌桶中,以转速 90 r/min 搅拌 2 min,使树脂体系混合均匀;将搅拌好的树脂体系与质量分数为 14.5% 的填料粉煤灰和 48.25% 的细骨料混合,以转速 30 r/min 搅拌 10 min,使细骨料、粉煤灰与树脂体系充分融合;将 24.5% 粗骨料加入搅拌机搅拌桶,以转速 20 r/min 搅拌 15 min,搅拌均匀备用。

以质量分数为配合比,按正交试验方案,以纤维质量分数和长径比作为试验变量,依次向搅拌桶中添加不同质量分数的丝瓜络纤维、不同质量分数和长径比的钢纤维,并以 20 r/min 转速慢速搅拌 5 min,而后以 60 r/min 转速搅拌 10 min,完成树脂矿物复合材料的混料处理。

组装模具,模具内腔表面用丙酮清洗后,涂抹聚二甲基硅氧烷有机硅油作为试件脱模剂,将搅拌均匀的混合纤维增强树脂矿物复合材料浆料浇筑于成型模具中,将模具固定于振动台振动 20 min。将振实后的模具置于室温 (20℃) 固化 24 h 脱模,而后室内静置养护 7 d 成型。切割试件,压缩性能测试试件尺寸为 50 mm × 50 mm × 50 mm,阻尼特性测试试件尺寸为 40 mm × 40 mm × 240 mm。

1.4 性能测试

(1) 压缩强度测试。

室温 (20℃) 下,在万能材料试验机上开展床身用混合纤维增强树脂矿物复合材料试件的单轴准静态压缩实验,测试应变率为 10^{-3} s^{-1} 时试件的压缩性能。通过试验机记录载荷数据,经式 (1) 处理后得到试件的压缩强度。

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

式中: σ ——压缩强度, MPa;

F ——压缩最大载荷, N;

A ——承载横截面积, mm^2 。

(2) 阻尼比测试。

阻尼比是用来描述材料吸振性能优劣的物理量,阻尼比数值越大,材料的吸振性能越好。其计算

公式如式 (2) 所示:

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{1}{2\pi n} \ln \left(\frac{A_i}{A_{i+n}} \right) \quad (2)$$

式中: ξ ——阻尼比;

δ ——对数衰减率;

A_i ——位移衰减曲线第 i 个周期的振幅,通常 i 以 2 或 3 起始,且 $n \leq 5$ 。

采用共振频率法进行床身用混合纤维增强树脂矿物复合材料试件阻尼特性的测试,在试件一端粘接加速度传感器,将另一端夹持固定,形成单支点悬臂梁系统,采用脉冲锤敲击激励试件悬置端部,通过数据采集系统完成脉冲锤力传感器与试件端部加速度传感器的数据采集。

(3) 正交试验设计。

采用正交试验设计法完成试验方案设计,以 1.3 节试件制备过程中树脂系统、骨料与填料的均匀混合浆料为配置基准,在混合浆料中依次添加不同配比的钢纤维与丝瓜络纤维。制备试件中钢纤维增强最大掺入质量分数为 1.2%,丝瓜络纤维增强最大质量分数为 0.3%。相同级配试件每组制备 3 个,且试件最终测试结果为 3 个试件的平均值。纤维质量分数与长径比因素水平列于表 4,正交试验设计方案与测试结果见表 5。

2 结果与讨论

2.1 影响因素比较

计算混合纤维增强树脂矿物复合材料试件力学性能正交试验测试结果的极差,比较各因素对测试结果的影响,结果见表 6、表 7。

由表 6 可知,对于混合纤维增强树脂矿物复合材料的压缩强度,各因素大小影响顺序为钢纤维质量分数 > 丝瓜络纤维质量分数 > 钢纤维长径比。由表 7 可知,对于混合纤维增强树脂矿物复合材料的阻尼比,各因素大小影响顺序为丝瓜络纤维质量分数 > 钢纤维质量分数 > 钢纤维长径比。

2.2 丝瓜络纤维质量分数的影响

丝瓜络纤维质量分数对试件压缩强度和阻尼比的影响如图 1、图 2 所示。

由图 1 与图 2 可知,混合纤维增强树脂矿物复合材料的压缩强度与阻尼比均出现随着丝瓜络纤维质量分数的增加而先增大后减小的现象。

当丝瓜络纤维质量分数由 0.05% 增加到 0.2% 时,试件的压缩强度由 92.022 5 MPa 增加到 98.262 5 MPa,提高了 6.78%;当丝瓜络纤维质量分

表4 纤维质量分数与钢纤维长径比因素水平

水平	因素		
	丝瓜络纤维质量分数 / %	钢纤维质量分数 / %	钢纤维长径比
1	0.05	0.2	40
2	0.1	0.4	50
3	0.2	0.8	60
4	0.3	1.2	80

表5 正交试验设计方案及测试结果

实验序号	丝瓜络纤维质量分数 / %	钢纤维质量分数 / %	钢纤维长径比	压缩强度 / MPa	阻尼比
1	0.05	0.2	40	88.21	0.171 6
2	0.05	0.4	50	89.60	0.170 2
3	0.05	0.8	60	94.06	0.172 2
4	0.05	1.2	80	96.22	0.163 3
5	0.1	0.2	50	94.45	0.172 5
6	0.1	0.4	40	94.92	0.171 4
7	0.1	0.8	80	97.71	0.174 5
8	0.1	1.2	60	105.30	0.172 6
9	0.2	0.2	60	99.71	0.168 6
10	0.2	0.4	80	94.45	0.171 1
11	0.2	0.8	40	97.24	0.166 2
12	0.2	1.2	50	101.65	0.164 8
13	0.3	0.2	80	91.12	0.166 9
14	0.3	0.4	60	101.18	0.170 1
15	0.3	0.8	50	95.57	0.162 9
16	0.3	1.2	40	97.83	0.160 8

表6 压缩强度直观分析计算表

项目	因素		
	丝瓜络纤维质量分数	钢纤维质量分数	钢纤维长径比
K_1	368.09	373.49	378.2
K_2	392.38	380.15	381.27
K_3	393.05	384.58	400.25
K_4	385.70	401.00	379.5
k_1	92.022 5	93.372 5	94.55
k_2	98.095 0	95.037 5	95.317 5
k_3	98.262 5	96.145 0	100.063
k_4	96.425 0	100.250	94.875 0
R	6.240 0	6.877 5	5.512 5

注: $K_1 \sim K_4$ 为各因素水平下试验结果之和, $k_1 \sim k_4$ 为测试结果均值, R 为极差。

表7 阻尼比直观分析计算表

项目	因素		
	丝瓜络纤维质量分数	钢纤维质量分数	钢纤维长径比
K_1	0.677 3	0.679 6	0.670 0
K_2	0.691 0	0.682 8	0.670 4
K_3	0.670 7	0.675 8	0.683 5
K_4	0.660 7	0.661 5	0.675 8
k_1	0.169 3	0.169 9	0.167 5
k_2	0.172 7	0.170 7	0.167 6
k_3	0.167 7	0.168 9	0.170 9
k_4	0.165 2	0.165 4	0.168 9
R	0.007 6	0.005 3	0.003 4

注: $K_1 \sim K_4$, $k_1 \sim k_4$, R 的含义同表6。

数达到 0.1% 时,试件的压缩强度为 98.095 0 MPa,继续增加丝瓜络纤维质量分数,压缩强度增速放缓,

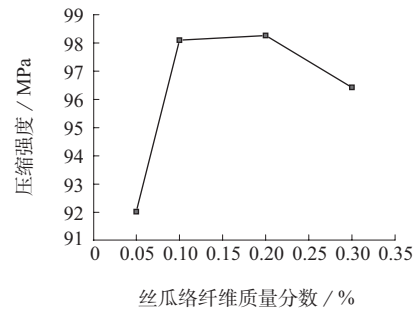


图1 丝瓜络纤维质量分数对试件压缩强度影响

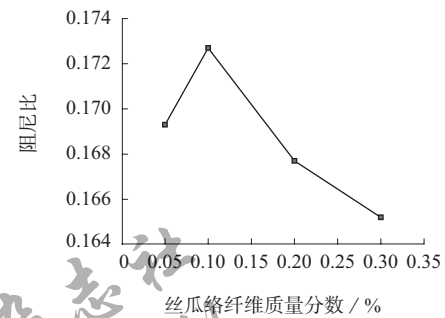


图2 丝瓜络纤维质量分数对试件阻尼比影响

并最终在丝瓜络纤维质量分数达到 0.2% 时,压缩强度达到最大值,为 98.262 5 MPa。随着丝瓜络纤维质量分数递增至 0.3%,试件的压缩强度却出现减小,为 96.425 0 MPa,这是由于丝瓜络纤维质量分数的增加,其体积含量增大导致混合纤维增强树脂矿物复合材料搅拌过程中出现“团聚”现象,影响了试件的均布密实效果,同时在材料内部形成局部蜂窝、孔洞的聚集,出现纤维搭接、缠绕等问题,使丝瓜络纤维与基体接触面减少,纤维与基体粘结削弱。

当丝瓜络纤维质量分数达到 0.1% 时,试件的阻尼比达到 0.172 7,随着丝瓜络纤维质量分数的继续增加,试件的减振性能出现下降趋势,最小阻尼比出现在丝瓜络纤维质量分数为 0.3% 时,其测试值为 0.165 2。团聚现象的出现,在降低试件整体压缩强度的同时,减振性能也出现降低,纤维增强作用弱化。因此,当丝瓜络纤维质量分数达到 0.1%,试件可获得最佳的性能。

2.3 钢纤维质量分数的影响

钢纤维质量分数对试件压缩强度和阻尼比的影响如图3、图4所示。

由图3可知,随着混合纤维增强树脂矿物复合材料中掺入钢纤维质量分数的增加,测试试件的压缩强度持续上升,呈现近似正比例线性关系递增。在钢纤维质量分数为 1.2% 时,试件的压缩强度达到最大值,达到 100.250 0 MPa,比钢纤维质量分数

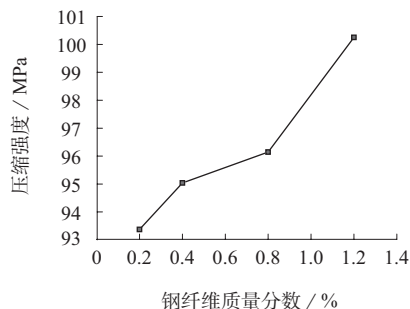


图3 钢纤维质量分数对试件压缩强度影响

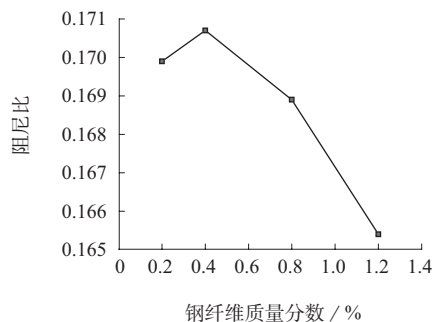


图4 钢纤维质量分数对试件阻尼比影响

为0.2%时的试件压缩强度93.3700 MPa提升了7.37%。钢纤维的添加,使试件的抗压能力增强,随着钢纤维质量分数的增加,钢纤维与树脂基体的粘结面增大,且钢纤维在某种程度上起到了破坏裂纹止裂的作用,钢纤维逐步替代粗骨料承担起主要抗压支撑结构的角色。

由图4可见,试件的阻尼比随着钢纤维质量分数的增加呈现先增大后减小的趋势,且当钢纤维在混合纤维增强树脂矿物复合材料中的质量分数达到0.4%时,试件的阻尼比达到最大值,为0.1707。随着钢纤维的加入,钢纤维与树脂基体的粘结面增大,且搅拌过程中易在钢纤维与树脂基体材料间形成细小分离孔穴,且内部多填充空气,形成阻尼气室,使试件的阻尼比增大,减振性能递增。但是,随着钢纤维的进一步增加,且由于钢纤维的阻尼比明显劣于树脂基体,导致试件的整体阻尼比随着钢纤维的增加快速下降。

考虑到试件的阻尼特性,并结合钢纤维质量分数对试件压缩性能的影响,钢纤维质量分数选择0.4%~0.8%为宜。为了优先保证试件的压缩性能,选择钢纤维质量分数为0.8%。

2.4 钢纤维长径比的影响

钢纤维长径比对试件压缩强度与阻尼比的影响如图5、图6所示。

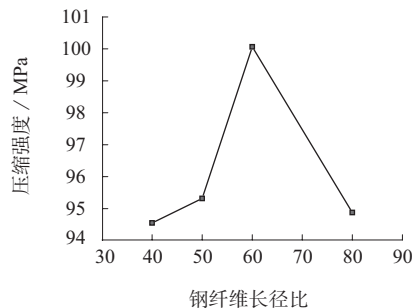


图5 钢纤维长径比对试件压缩强度影响

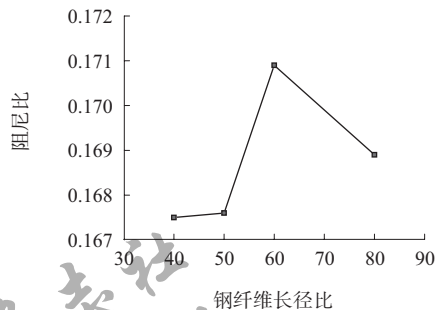


图6 钢纤维长径比对试件阻尼比影响

由图5可看出,当钢纤维长径比为40时,试件的压缩强度为94.5500 MPa,当长径比为60时,试件的压缩强度为100.0630 MPa,压缩强度提升了5.83%。当长径比由60增大到80时,试件的压缩强度下降了5.18%,下降为94.8750 MPa。可见长径比为60的钢纤维与树脂及骨料体系的粘结力最强。

由图6可以看出,试件的阻尼比随着钢纤维长径比的增加出现了先缓慢增加,而后快速增长,并在钢纤维长径比为60时阻尼比达到最大值(0.1709),比钢纤维长径比为40时的阻尼比0.1675提升了2.03%,而后阻尼比随着钢纤维长径比的增加出现下降的现象。但阻尼比的增幅与减幅均较小,长径比对混合纤维增强树脂矿物复合材料试件的阻尼比影响不敏感。当钢纤维长径比增大时,一方面使试件受外载作用时,沿界面分布的钢纤维起到阻止初始裂纹并刚性支撑的作用,压缩强度增大,且配料搅拌过程中易使材料内部出现较多的空隙,阻尼比增大。但当钢纤维的长径比为60时,配料搅拌过程中可实现搅拌均匀,且与胶合界面实现较好的结合,从而使其压缩性能与减振性能达到最优。但长径比的进一步增加,却导致钢纤维与树脂基材料间的结合面出现大量孔隙,界面强度退化,试件整体的压缩强度降低。同时随着刚度优良的钢纤维长径比的增大,试件整体的阻尼特性呈现逐步降低趋势。综上所述,

当钢纤维长径比为 60 时,试件可获得最佳的性能。

3 结论

(1) 随着钢纤维与丝瓜络纤维的掺入,树脂矿物复合材料的压缩强度均有增加,钢纤维质量分数对压缩强度的影响最大,具有近似正比例线性关系。丝瓜络纤维质量分数达到 0.2% 时压缩强度达到最大值,为 98.262 5 MPa,随后随着丝瓜络纤维掺入量的加大,出现“团聚”现象,压缩强度降低。钢纤维长径比对压缩强度的影响敏感性最小,其测试数据极差值为 5.512 5,钢纤维的最佳长径比为 60。

(2) 随着钢纤维质量分数、丝瓜络纤维质量分数及钢纤维长径比的增加,树脂矿物复合材料的阻尼比出现先增大后减小的变化趋势。当丝瓜络纤维质量分数、钢纤维质量分数和钢纤维长径比分别达到 0.1%、0.4% 和 60 时阻尼比出现最大值。且各因素对试件阻尼比影响按由大到小排序为:丝瓜络纤维质量分数、钢纤维质量分数、钢纤维长径比。

(3) 综合考虑机床床身用混合纤维增强树脂矿物复合材料对压缩强度和抗振性的需求,确定添加质量分数为 0.1% 的丝瓜络纤维,质量分数为 0.8%、长径比为 60 的钢纤维为纤维增强最佳级配。

参考文献

- [1] 周忆,张巍,王言法. 树脂复合材料整体床身热结构耦合分析[J]. 现代制造工程,2012(11):100-103.
Zhou Yi, Zhang Wei, Wang Yanfa. Coupled thermo-structure analysis of integration machine bed made of resin composites[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(11):100-103.
- [2] 机械设计手册编委会. 机械设计手册单行本机架、箱体及导轨[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
Editorial board of machine design manual. Machine design manual, box and slide guide[M]. Beijing:China Machine Press, 2007.
- [3] 李鹏,季忠,刘韧,等. 矿物复合材料及其在机床上的应用[J]. 机床与液压,2013,41(19):159-163.
Li Peng, Ji Zhong, Liu Ren, et al. Mineral composite material and its application on machine tools[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013,41(19):159-163.
- [4] 丁江民,李想,王瑞. 复合混凝土卧式加工中心床身的热性能[J]. 大连交通大学学报,2014,35(6):56-60.
Ding Jiangmin, Li Xiang, Wang Rui. Study of thermal performance for composite concrete machining tool bed[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2014,35(6):56-60.
- [5] 刘敬福,徐平,于英华,等. 填料对聚合物矿物混凝土性能影响的实验研究[J]. 非金属矿,2014,37(2):36-39.
Liu Jingfu, Xu Ping, Yu Yinghua, et al. Experiment research on effect of filler on properties of polymer mineral concrete[J]. Non-Metallic Mines, 2014,37(2):36-39.
- [6] Yang Hao, Zhang Jianhua, Sun Guoyan, et al. Effect of fiber's pretreatment on the interfacial bonding strength between steel fiber and resin[J]. Advanced Materials Research, 2014,989-994:177-180.
- [7] Wang Tao, Zhang Jianhua, Bai Wenfeng, et al. Forming process and mechanical properties of fibers-reinforced polymer concrete[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013,32:907-911.
- [8] Gonzalo M B, Enrique V S, Miguel M L, et al. Luffa fibers and gamma radiation as improvement tools of polymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013,47(7):86-91.
- [9] Parida C, Das S C, Dash S K. Mechanical analysis of bio nanocomposite prepared from luffa cylindrica[J]. Procedia Chemistry, 2012,43(4):53-59.
- [10] Joshi S V, Drzal L T, Mohanty A K, et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004,35(3):371-376.
- [11] 王磊,刘存鹏,熊祖菁. 剑麻纤维增强珊瑚混凝土力学性能试验研究[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2014,33(6):826-830.
Wang Lei, Liu Cunpeng, Xiong Zujing. Study test on mechanical property of sisal fiber reinforced coral concrete[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2014,33(6):826-830.
- [12] 艾小林,陈燕丹,黄彪,等. 丝瓜络纤维的综合利用研究进展[J]. 化工进展,2015,34(6):1708-1713,1729.
Ai Xiaolin, Chen Yandan, Huang Biao, et al. Progress in comprehensive utilization of loofah sponge fibers[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015,34(6):1708-1713,1729.

欢迎订阅 2017 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42,24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2017 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志,订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊,大 16 开本,每月 10 日出版,2017 年定价 15 元/期,全年 180 元。《化学分析计量》为双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版,2017 年定价 15 元/期,全年 90 元。

电话:(0531)85878223 85878057 传真:(0531)85947355