

钢纤维聚合物混凝土 机床基础件设计与制造

徐 平 著



东北大学出版社
Northeastern University Press

钢纤维聚合物混凝土 机床基础件设计与制造

徐 平 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 徐平 2009

图书在版编目 (CIP) 数据

钢纤维聚合物混凝土机床基础件设计与制造/徐平著. —沈阳:
东北大学出版社, 2009.5

ISBN 978 - 7 - 81102 - 681 - 8

I. 钢… II. 徐… III. ①混凝土机械—机械设计 ②混凝土机械—机械制造 IV. TU64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 067660 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路3号巷11号

邮编: 110004

电话: 024 - 83680267 (社务室) 83687331 (市场部)

传真: 024 - 83680265 (办公室) 83687332 (出版部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: neuph@neupress.com

印 刷 者: 阜新工大印刷有限责任公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 145mm × 210mm

印 张: 8.5

字 数: 228千字

出版时间: 2009年5月第1版

印刷时间: 2009年5月第1次印刷

责任编辑: 肖德运 刘莹

责任校对: 孙峰

责任出版: 杨华宁

封面设计: 唐敏智

ISBN 978 - 7 - 81102 - 681 - 8

定 价: 30.00元

前 言

采用新材料制造静、动态性能优异的机床基础件,是提高机床加工精度及机械制造业整体水平的有效途径之一。作为新型建筑材料的聚合物混凝土,由于其阻尼性能为铸铁的5~10倍,现已扩展到机床、电机等行业,用它替换传统的灰铸铁制造机床基础件,可以提高机床基础件的动刚度,明显改善机床的动态性能,提高加工质量,延长刀具的使用寿命,降低噪声,提高效率。但聚合物混凝土存在抗压强度、韧性低于铸铁的力学性能等问题,因此如何进一步提高聚合物混凝土的力学性能,是国内外学者十分关注的课题。根据作者几年来的研究,认为向聚合物混凝土中加入钢纤维,形成一种新型混杂复合材料——钢纤维聚合物混凝土,可以在保持聚合物混凝土基体良好阻尼性能的基础上,进一步提高聚合物混凝土的相关静态力学性能,从而获得一种新型机床结构材料,以满足现代科技发展对机床朝着高精度、重切削和高效率方向发展的要求。

本书以复合材料细观力学和损伤力学的理论与方法为基础,并以实验为研究手段,系统地研究了用于制造机床基础件的钢纤维聚合物混凝土材料设计,钢纤维聚合物混凝土的界面形成机理、应力传递机制、纤维增强机理、损伤机理和阻尼机理,钢纤维聚合物混凝土拉应力、界面之间的剪应力、强度和弹性模量等数学模型及抗压损伤本构方程的建立,钢纤维聚合物混凝土的振动搅拌及成型机理,钢纤维聚合物混凝土机床基础件的结构设计、制造工艺规程及其工艺装备的设计与制造。

本书内容系作者近年来在钢纤维聚合物混凝土机床基础件设计与制造方面的最新研究成果,由于时间仓促及作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,殷切希望读者批评指正。

作 者

2009年2月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 研究钢纤维聚合物混凝土机床基础件的意义	(1)
1.2 钢纤维聚合物混凝土机床基础件研究现状	(3)
1.2.1 国外研究现状	(3)
1.2.2 国内研究现状	(4)
1.3 本书的主要内容	(5)
第2章 钢纤维聚合物混凝土材料设计及性能分析	(7)
2.1 机床基础件结构材料应具备的特点	(7)
2.2 钢纤维聚合物混凝土材料组分的确定	(8)
2.2.1 骨料	(8)
2.2.2 填料	(9)
2.2.3 黏结剂	(9)
2.2.4 固化剂	(10)
2.2.5 稀释剂	(10)
2.2.6 增韧剂	(11)
2.2.7 聚合物混凝土材料的配比	(11)
2.3 钢纤维的选择	(11)
2.4 钢纤维聚合物混凝土的纤维质量浓度和长径比的确定	(12)
2.4.1 纤维质量浓度和长径比对钢纤维聚合物混凝土静态性能的影响	(13)
2.4.2 根据静态力学性能确定钢纤维聚合物混凝土纤维质量浓度	

和长径比	(25)
2.4.3 纤维质量浓度和长径比对钢纤维聚合物混凝土动态性能的影响	(27)
2.5 钢纤维聚合物混凝土热态性能参数测试	(30)
2.5.1 比热容的测试	(30)
2.5.2 热膨胀系数的测试	(31)
2.6 钢纤维聚合物混凝土的主要物理和化学性能	(33)
2.6.1 密度	(34)
2.6.2 吸水率	(34)
2.6.3 抗老化性能	(35)
2.6.4 耐乳化液试验	(35)
2.6.5 耐腐蚀性能	(36)
2.7 本章小结	(36)
 第3章 钢纤维聚合物混凝土的界面应力传递	(38)
3.1 界面的形成机理	(38)
3.2 纵向拉伸应力传递的剪滞法	(39)
3.3 纵向拉伸应力的传递——剪切滑移	(44)
3.4 压力作用下横向钢纤维与基体间的应力传递	(49)
3.5 钢纤维聚合物混凝土的界面黏结性	(54)
3.6 本章小结	(57)
 第4章 钢纤维聚合物混凝土的增强机理	(59)
4.1 理想钢纤维聚合物混凝土的应力与弹性模量	(59)
4.2 钢纤维不连续性对理想模型的影响	(60)
4.3 钢纤维乱向的理论模式	(64)
4.3.1 乱向短纤维的方向有效系数	(64)

4.3.2	钢纤维聚合物混凝土中钢纤维的有效系数	(66)
4.3.3	钢纤维聚合物混凝土的抗拉强度和弹性模量	(67)
4.4	钢纤维聚合物混凝土的临界体积率	(67)
4.5	钢纤维聚合物混凝土强度极限和弹性模量公式的进一步修正	(69)
4.6	本章小结	(70)
第5章	基于损伤理论的钢纤维聚合物混凝土本构关系	(72)
5.1	损伤本构模型发展	(72)
5.2	损伤本构理论的热力学基础	(73)
5.3	钢纤维聚合物混凝土单轴受力下的脆弹性损伤本构模型	(76)
5.4	钢纤维聚合物混凝土抗弯性能分析	(80)
5.4.1	钢纤维聚合物混凝土基体刚阵	(80)
5.4.2	钢纤维刚阵	(81)
5.4.3	抗弯损伤本构方程的建立	(82)
5.5	本章小结	(85)
第6章	材料的阻尼和热变形机理分析与建模	(86)
6.1	钢纤维聚合物混凝土的阻尼机理分析与建模	(86)
6.1.1	聚合物混凝土的阻尼	(87)
6.1.2	聚合树脂的阻尼	(88)
6.1.3	填料对阻尼的作用机理	(91)
6.1.4	钢纤维对阻尼的作用机理	(92)
6.1.5	界面对阻尼的作用机理	(92)
6.2	钢纤维聚合物混凝土的热变形理论分析与建模	(97)
6.2.1	钢纤维聚合物混凝土的热变形系数简化模型	(97)

6.2.2	钢纤维聚合物混凝土的热变形性能的影响因素	(99)
6.2.3	钢纤维聚合物混凝土的热变形系数的预测	(101)
6.3	本章小结	(103)
第7章	钢纤维聚合物混凝土机床基础件结构设计与制造 ...	(105)
7.1	钢纤维聚合物混凝土机床基础件结构设计	(105)
7.1.1	钢纤维聚合物混凝土机床基础件总体设计	(105)
7.1.2	钢纤维聚合物混凝土机床基础件预埋件的设计 ...	(108)
7.1.3	钢纤维聚合物混凝土机床基础件设计实例	(109)
7.2	钢纤维聚合物混凝土机床基础件的制造	(113)
7.2.1	钢纤维聚合物混凝土机床基础件制造工艺流程 ...	(113)
7.2.2	钢纤维聚合物混凝土机床基础件制造实例	(115)
7.2.3	钢纤维聚合物混凝土机床床身导轨几何精度保持性 实验	(119)
7.3	本章小结	(122)
第8章	钢纤维聚合物混凝土机床床身的性能分析	(123)
8.1	钢纤维聚合物混凝土机床床身的静态性能分析	(123)
8.1.1	钢纤维聚合物混凝土机床床身的静力分析	(123)
8.1.2	钢纤维聚合物混凝土机床床身的静刚度分析	(125)
8.2	钢纤维聚合物混凝土机床床身的动态性能分析	(130)
8.2.1	钢纤维聚合物混凝土机床床身动态性能的有限元 分析	(130)
8.2.2	钢纤维聚合物混凝土机床床身动态性能的实物测试 分析	(135)
8.3	钢纤维聚合物混凝土机床基础件的热稳定性分析 ...	(138)
8.3.1	机床基础件的热源	(138)
8.3.2	机床工作过程的温度场	(139)

8.3.3	机床基础件工作时的热变形	(141)
8.3.4	钢纤维聚合物混凝土机床床身的热态性能有限元模拟分析	(144)
8.3.5	钢纤维聚合物混凝土机床床身的热刚度分析	(151)
8.4	本章小结	(152)
第9章	材料的搅拌机理及其装备设计	(153)
9.1	混凝土的振动搅拌任务	(153)
9.2	混凝土普通搅拌的局限性	(154)
9.3	振动搅拌技术国内外研究现状	(156)
9.4	振动搅拌技术在钢纤维聚合物混凝土生产中的应用	(160)
9.4.1	振动搅拌的机理	(160)
9.4.2	振动作用下钢纤维聚合物混凝土的流变特性	(160)
9.4.3	钢纤维聚合物混凝土振动搅拌过程的综合模拟	(165)
9.5	钢纤维聚合物混凝土振动搅拌机设计	(168)
9.5.1	钢纤维聚合物混凝土振动搅拌方案的确定	(168)
9.5.2	双卧轴振动搅拌机的总体结构及其工作原理	(168)
9.5.3	传动装置设计	(169)
9.5.4	搅拌叶片及臂设计	(170)
9.5.5	搅拌轴设计	(170)
9.5.6	激振器设计	(170)
9.5.7	搅拌机构主要技术参数设计	(171)
9.5.8	振动机构主要技术参数设计	(174)
9.6	搅拌机构零部件的实体建模、装配及动态模拟	(191)
9.6.1	搅拌机构零部件的实体建模	(191)
9.6.2	搅拌机构的装配过程及干涉检验	(195)
9.6.3	基于3DS MAX的搅拌机构的三维动态模拟	(199)

9.7 本章小结	(202)
第10章 材料的振动捣实机理与制造装备设计	(204)
10.1 振动捣实机械的分类	(204)
10.2 振动捣实成型机理	(205)
10.3 振动台动力学分析	(207)
10.3.1 直线振动台动力学模型的建立	(207)
10.3.2 建立振动系统的振动方程	(208)
10.3.3 钢纤维聚合物混凝土振动台自同步分析	(209)
10.4 钢纤维聚合物混凝土振动捣实设备总体设计	(212)
10.4.1 钢纤维聚合物混凝土振动台总体方案设计	(212)
10.4.2 振动台动力学参数的计算	(213)
10.5 钢纤维聚合物混凝土振动捣实设备关键零部件 设计	(216)
10.5.1 隔振系统设计	(216)
10.5.2 激振装置设计	(220)
10.5.3 激振器箱体设计	(227)
10.5.4 振动台质心的计算和激振器位置的选择	(228)
10.6 振动捣实设备实体建模、装配及运动学仿真分析	(229)
10.6.1 实体建模	(229)
10.6.2 钢纤维聚合物混凝土振动台虚拟装配	(231)
10.6.3 振动台装配过程中碰撞和干涉检查	(234)
10.6.4 钢纤维聚合物混凝土振动捣实设备的运动学仿真 分析	(236)
10.7 本章小结	(245)
参考文献	(247)

第1章 绪 论

1.1 研究钢纤维聚合物混凝土机床基础件的意义

随着现代科学技术的发展,对机械零件的加工质量和加工精度要求越来越高,机械加工正在朝着高精密化、高自动化、重切削等方向发展。为此,必须在不断提高机床自动化程度的同时,尽可能地改善机床的静态性能、动态性能和热稳定性^[1-2]。其解决途径有两条:一是优化机床结构;二是使用性能优越的新型结构材料。近年来,机床的结构设计和控制系统的研究发展很快,传统机床结构材料(铸铁、钢)特性几乎已经达到极限,因此,只有采用性能更好的新型材料,机床特性才可能有实质性改善^[3-4]。

为探索采用新型结构材料制造机床基础件,人们先后经历了尝试采用天然花岗岩→普通混凝土→钢筋混凝土→聚合物混凝土(树脂混凝土)制造机床基础件^[6-9]的历程。

采用天然花岗岩制造机床基础件,可以在一定程度上提高机床的动态特性。但是天然花岗岩可加工性差,尺寸精度和几何精度受到环境的影响大,生产周期长,这些都限制了天然花岗岩在机床基础件中的进一步应用。

普通混凝土是建筑中常用的结构材料,它是由水泥、普通碎(卵)石、砂和水配制而成的混凝土。用普通混凝土制造机床基础件,具有加工生产方便,价格低廉和阻尼性能良好的优点,但其抗拉强度低、抗腐蚀和抗蠕变性能差,固化收缩和尺寸精度受到环境影响大。需要采用表面涂层等特殊方法处理^[10-13]。

早期作为新型建筑材料的聚合物混凝土,由于其阻尼性能为铸铁的5~10倍,所以现已扩展应用到机床、电机等行业。用它替换

传统的灰铸铁制造的机床基础件可以提高机床基础件的动刚度,明显改善机床的动态性能,提高加工质量,延长刀具的使用寿命,降低噪声,提高效率。同时由于其在室温下即可浇注,所以成型精度高,加工余量小,大大节省了能源^[14-19]。但聚合物混凝土存在抗压强度、韧性低于铸铁的力学性能等问题,因此如何进一步提高聚合物混凝土的力学性能,是国内外学者十分关注的课题。根据作者所掌握的理论知识和多年来积累的科研经验,认为向聚合物混凝土中加入钢纤维,形成一种新型混杂复合材料——钢纤维聚合物混凝土,可以在保持聚合物混凝土基体良好阻尼性能的基础上,进一步提高聚合物混凝土的相关静态力学性能,从而获得一种新型机床结构材料,以满足现代科技发展对机床刚度、重量轻、阻尼好的要求^[20-22]。

国内外学者对聚合物混凝土的研究已有多年的历史,而对纤维增强聚合物混凝土的研究近年内才见报道,且多从应用于建筑业的角度出发^[23-30];另外,建筑行业研究的纤维增强聚合物混凝土多是纤维增强聚合物水泥混凝土。国内对聚合物胶结混凝土采用纤维增强技术的研究几近空白。一方面,虽然建筑业对纤维增强普通混凝土或纤维增强聚合物水泥混凝土技术的相关研究,对纤维增强胶结混凝土的研究具有一定的参考价值,但纤维增强聚合物胶结混凝土的组分和制备工艺与它们之间有很大的不同,且由于对建筑材料性能要求远不同于机床基础件,以至即便都是纤维增强聚合物胶结混凝土,如果其中各组分的种类和配比不同,将会导致材料力学性能、成型性能和加工性能等存在很大差异。另一方面,由于材料具有可设计性,只有搞清其微观特性对其宏观特性的影响,各组分对其力学性能、物理性能及化学性能的影响规律,才能更好地根据材料应用的具体场合和要求,设计出最佳的材料组分配比^[31-32]。

因此,系统地研究适合于制造机床基础件的钢纤维聚合物胶结混凝土(为简略起见,本书在以后的各章节中均简称为钢纤维聚合物混凝土)最佳组分配比、微观/细观结构和宏观特征的关系、

多相界面行为、增强和阻裂的机理；全面地探讨钢纤维聚合物混凝土机床基础件的静、动态力学性能，损伤机理及机床基础件的制造工艺过程；不断地试制钢纤维聚合物混凝土机床基础件制造装备，使钢纤维聚合物制造机床基础件形成产业化，对提高机床性能，提升我国机械制造业水平，增强我国国民经济的竞争实力，具有重要的理论和现实意义。

1.2 钢纤维聚合物混凝土机床基础件研究现状

1.2.1 国外研究现状

混凝土自 1830 年问世以来，在建筑等方面得到了广泛应用，在制造机床构件方面也具有很长的历史^[1]。1917 年，德国的 SCHLESINGER 首先提倡在车床床身上采用钢筋混凝土，整个床身（包括导轨面）都由混凝土制成。由于在切屑和油液的喷溅下，导轨面被急剧破坏，因而未能付诸实用^[2]。

20 世纪 40 年代，德国 BOEHRINGER 公司经过研究后，成批生产了以节约钢铁材料为目的混凝土车床。苏联与美国为了节约钢铁和降低制造成本，也先后于 20 世纪 60 年代在大型车床和龙门铣床上使用了混凝土构件。德国的 BURKHART & WEHER 公司将聚合物混凝土用于制造 HYOP80NCW 加工中心和铣床床身。德国 DARMSTADT 大学对聚合物混凝土进行了全面、深入的研究，并把它成功地用于加工中心和高速铣床上。该校的 Schukz 教授已经完成了聚合物混凝土材料的德国工业标准（DIN），制成了数控车床的床身。

20 世纪 70 年代，瑞士的 GEORGE FISHER 公司和 STUDER 公司、德国的 BOEHRINGER 公司和 DECKEL 公司、意大利的 NORMA 公司和 SAN ROCCO 公司相继推出装有钢筋混凝土构件或聚合物混凝土构件的机床产品。其中，瑞士的 STUDER 公司自行研制成第一台外圆磨床的床身和主轴后，80 年代初又制成了 S30 到 S50 数控外圆磨床的床身，如今该产品已形成系列化。该公司有 1000

平方米的专用车间，配有德国生产的 RESPESTA 牌的连续浇注设备。目前，已实现聚合物混凝土材料和机床构件的商品化，并对该技术实行转让。

与此同时，德国的 EMAG 公司成功地把该技术用于制造双主轴卧式车床，在此基础上开发的加工中心和柔性制造系统已成功地运转在世界许多名牌汽车制造厂，如福特、奔驰、菲亚特等。该公司声称新型车床平均可以提高刀具寿命 20%，提高光洁度一级。

在 CIMT'93 展览会上，瑞士的 STUDER 公司展出的 S30-1 高精度外圆磨床，采用聚合物混凝土床身，获得了良好的刚性、吸振性和热稳定性^[33]。

日本机械工业促进协会技术研究所试制了聚合物混凝土材料磨床床身，磨削实验表明，在切入磨削中，比较容易获得 $0.1\mu\text{m}$ 圆度。在纵向磨削中，比较容易获得 $1.5\mu\text{m}/400\text{mm}$ 的母线直线度。1988 年又引进德国聚合矿物复合材料制造设备和技术，并开始应用在高速车床床身上。

美国 HARDINGE 公司展出的 CONQUEST 42 和 CONQUEST SP 型数控机床的床身均采用聚合物混凝土。这种机床的床身符合抗振、结构稳固和热稳定性能好等需求，能满足较大的切深量、更快的进给速度，能获得更好的表面粗糙度，可以提高生产率。

法国聚合物混凝土机床构件已产业化，形成系列产品，并制定了国家标准。

目前，国外主要将聚合物混凝土材料用于生产机床床身和立柱等支承件，或者用于生产床头箱或减速器的箱体，聚合物混凝土材料在机械制造中的应用正日趋成熟^[33-40]。

1.2.2 国内研究现状

混凝土在我国机床制造业中的应用历史是由 20 世纪 50 年代末提出用非金属材料制造机床支承件开始的。从那时起，一些机床厂尝试以钢筋混凝土或聚合物混凝土作为结构材料，生产中小型机床的部分基础件，缩短了生产周期，降低了成本，机床的动态特性和

热特性也得到了提高。但是, 由于没有解决防腐、蠕变等关键问题, 这些机床基本上无法正常使用, 这项研究也就停止了。

1985 年同济大学凭借与德国 THDARMSTADT 工业大学建立技术合作与交流的优势, 在此领域取得了很大的成就^[3]。1988 年在德国 VOLBSWAGON 基金的帮助下, 同济大学用聚合物混凝土浇注了一台精密磨床床身。同时他们还与北京第二机床厂合作, 对聚合物混凝土材料的性能和要求进行了研究。选定的材料配方使得聚合物混凝土在较宽的工作温度和工作频率范围内具有较高的阻尼、强度及较好的耐腐蚀性和较短的固化时间, 收缩、蠕变和热变形等均满足要求, 材料的物理力学性能和机械性能均达到了国际同类产品的水平。

同期, 北京机床研究所、上海机床研究所也开展了聚合物混凝土机床基础件研究。在 CIMENT'93 展览会上, 北京机床研究所推出的机床展品中^[33], 有两台采用了聚合物混凝土制造的基础件。这种床身的吸振性和热稳定性均优于灰铸铁床身, 制造成本比灰铸铁低 15% 左右。

上述聚合物混凝土机床基础件研究应该属于国内聚合物混凝土在机床行业应用的第一阶段, 此阶段主要借鉴国外经验, 以试制机床基础件为主, 缺少系统、全面的基础理论研究。20 世纪 90 年代末, 辽宁工程技术大学系统地开展了相关的研究, 在全面分析和综述该方面研究的国内外现状的基础上, 提出向聚合物混凝土中加入钢纤维, 在改善材料的动态性能的同时, 使材料的静态性能达到最低限度的损失, 以适应机床基础件的高静、动态和良好的热稳定性的要求, 并系统地开展了钢纤维聚合物混凝土机床基础件静、动态力学性能及其在机床基础件中应用方面的研究^[41-66]。该项研究先后两次得到辽宁省教育厅科学研究基金项目的资助。

1.3 本书的主要内容

本书主要介绍钢纤维聚合物混凝土机床基础件的材料设计、结

构设计及制造装备的设计。具体包括以下几个方面:

① 钢纤维长径比和质量浓度对钢纤维聚合物混凝土静、动态性能的影响规律, 确定适合于制造机床基础件的最佳材料组分配比;

② 应用复合材料细观力学理论, 对钢纤维聚合物混凝土的细观结构与宏观特性的关系、多相界面形成机理及其力学行为、钢纤维对聚合物混凝土的增强机理等方面进行研究;

③ 运用损伤力学理论, 对该材料的损伤机理进行分析并建立钢纤维聚合物混凝土的损伤本构模型;

④ 根据复阻尼理论, 分析钢纤维对聚合物混凝土阻尼的影响, 并对其机理进行微观解释;

⑤ 钢纤维聚合物混凝土热态性能的实验研究和计算机仿真研究;

⑥ 钢纤维聚合物混凝土机床基础件的静、动态力学性能分析和激振实验方法研究;

⑦ 钢纤维聚合物混凝土机床基础件制造工艺规程;

⑧ 振动作用下钢纤维聚合物混凝土材料的流变特性、搅拌机理, 双卧轴振动搅拌机总体设计和关键零部件的设计;

⑨ 钢纤维聚合物混凝土材料振动捣实机理及设备的总体设计和关键零部件的设计。

第2章 钢纤维聚合物混凝土 材料设计及性能分析

材料设计是指根据使用条件对材料性能的要求,依据有关复合理论及各组分材料性能特点,通过合理选择原材料体系、比例、配置和复合工艺类型及参数,获得所需要的复合材料性能^[9]。

钢纤维聚合物混凝土是由环氧树脂、骨料、填料和钢纤维共同组成。固化以后,填料和环氧树脂构成固化树脂,将骨料与钢纤维联结为一个整体,构成混杂复合材料^[60-61]。由于复合材料的特点之一是可设计性,即通过优化设计,选择和控制复合材料组成、分布、比例、截面结构及合理的复合制造技术,可以制备出具有优异综合性能、性能范围广泛的新材料,满足特殊的需要,更合理、更经济地使用材料。为此,根据机床基础件材料应具有的特点,结合材料设计理论和实验研究,设计出适合于制造机床基础件钢纤维聚合物混凝土材料的最佳组分配比。

2.1 机床基础件结构材料应具备的特点

机床基础件又称支承件或“大件”,包括床身、立柱、底座、横梁、摇臂、工作台、箱体、刀架等^[4]。机床的结构材料应具有如下特点^[4-6]:

- ① 可以制造成一定的形状,以适应结构上的需要;
- ② 弹性模量应该尽量高;
- ③ 要有良好的吸振性;
- ④ 要有良好的尺寸稳定性;
- ⑤ 应该具有合适的热膨胀系数;
- ⑥ 要有良好的耐腐蚀性和耐磨性。