

摘 要

钙铝硅系微晶玻璃具有密度低、机械强度高、耐磨损、化学稳定性好等特性，它在航天航空、机械、建筑和化学工程上具有广阔的应用前景，且组成该材料的氧化物原料资源丰富。因此，近年来微晶玻璃的开发研究十分活跃。有关微晶玻璃的组成与性能、分相与析晶方面已开展了一定的研究，但在如何提高其耐磨性能，进一步扩大其在耐磨、耐腐蚀结构件上的使用范围，目前尚缺乏深入研究。本文旨在研究一种微晶玻璃材料的耐磨性能，以更好地满足工程领域对高性能结构材料应用的需求。

摩擦与磨损是工程材料的重要服役性能之一。本文采用 MM-1000 型摩擦磨损试验机，在不同法向应力和不同转速条件下，对微晶玻璃/H300 特种铸铁、45 钢的摩擦磨损特性进行试验研究。特别探讨了载荷、转速对微晶玻璃摩擦磨损性能的影响，应用现代表面测试技术和摩擦学原理分析了该材料的磨损机理。结果表明，微晶玻璃/H300 的距离平均摩擦系数比较稳定，微晶玻璃/45 钢的距离平均摩擦系数变化比较大。微晶玻璃及对磨副的磨损量均不大。微晶玻璃/H300 的接触表面温升略低于微晶玻璃/45 钢的温升。微晶玻璃的磨损机制主要为粘着磨损、磨粒磨损、疲劳断裂，伴随的磨损现象主要表现为：微观切削、犁沟、元素转移和脆性断裂。

关键词： 微晶玻璃；摩擦磨损；干摩擦

Abstract

Glass-ceramic composed of calcium-aluminous-silicate have excellent characteristics such as low density, high mechanical strength, abrasion-resistance and chemical stability, which make it have wide broad applications in space and aircraft, mechninery, architecture and chemical engineering. The raw materials of the system is abundant, therefore the research about the system has become a focus of glass-ceramic. The compositions and properties, nucleation and crystallization of the system have been made considerable research, however, it has not been reported much to improve the abrasion-resistance so as to widen its applications as structure parts in abrasion and erosion environments, here we would like to analyze a glass-ceramic with good abrasion to meet better needs for structural engineering applications.

Friction and wear are important application performance for engineering materials. Friction and wear properties of glass-ceramic against cast iron H300 and steel 45 at various vertical pressure and initial velocities were investigated on a MM-1000 type wear testing machine. Tribological characteristics of the glass-ceramic was evaluated, especially in the effects of load, sliding speed on friction and wear performance. The wear mechanism was analyzed by the technology of surface micro-analysis and principles of tribology. The results show that the distance average friction coefficients of glass-ceramic/ cast iron H300 under various test conditions are more stable than those of glass-ceramic/ steel 45, and that the mass losses of glass-ceramic, cast iron H300 and steel 45 are all small. The surface temperature increment of glass-ceramic and cast iron H300 is a little lower than that of glass-ceramic and steel 45. The wear mechanisms of the glass-ceramic include adhesion wear, abrasive wear and fatigue wear.

Key Words: Glass-ceramic; Friction wear; Dry Friction

西南交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权西南交通大学可以将本论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复印手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1. 保密 ，在 年解密后适用本授权书；
2. 不保密 ，使用本授权书。

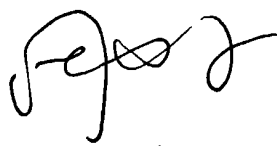
(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：李海丽

日期：2008.5.29

指导老师签名：

日期：


2008.5.29

西南交通大学学位论文创新性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是在导师指导下独立进行研究工作所得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

本学位论文的主要创新点如下：

选择新型微晶玻璃材料和 H300 特种铸铁、45 钢进行摩擦磨损试验研究，结果表明微晶玻璃具有较高达摩擦系数，且摩擦副表面温升不高，作者认为微晶玻璃是一种性能较好的磨阻材料，试验结果具有参考价值，对工程实际应用提供了一定的理论依据。

第 1 章 绪 论

1.1 微晶玻璃的概况

在十八世纪时,人们曾提出通过玻璃析晶来生产与陶瓷性质相似的多晶材料的设想,法国学者 René de Reaumur 于 1739 年进行了初步探索,继上世紀五十年代的玻璃分相理论形成之后,美国康宁公司的 Stooky 才实现了这一设想。他在玻璃中析出了极小的晶体,但这些晶体只占最终材料的一小部分。随后,用这种多晶材料制成的器皿出现在市场上,称为“glass-ceramic (玻璃陶瓷)”,国内普遍译为“微晶玻璃”,并沿用至今。经过几十年的发展,这种材料在理论研究和实际应用方面都取得了长足进展,材料中晶相含量越来越高,可达 90%以上,超过了许多陶瓷材料中的晶相含量。从这个意义上来说,更为准确的定义应是“微晶陶瓷”^[1]。但国内已普遍接受了“微晶玻璃”的称谓,故本文仍采用之。

微晶玻璃从诞生至今,其发展历程大致可以划分为三个阶段。第一个阶段为五十年代末至七十年代中期,主要研究的是具有低膨胀系数的微晶玻璃,并获得了透明材料^[2],其中最为典型的是 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统微晶玻璃。第二个阶段是从七十年代中期到八十年代中期,开发了具有与金属类似的可加工性和较高强度与韧性的可切削微晶玻璃^[3],如片状氟金云母型微晶玻璃,其商品 Macor 已在航天飞机的部件、微波窗口、电真空等多方面获得应用。第三个阶段是从八十年代中期至今,更为复杂结构与多相的微晶玻璃得到了广泛的研究。特别是在生物材料、超导材料、核废物处理等方面,极大地扩展了微晶玻璃的应用领域^[4-6]。在这一阶段,特别是在九十年代,对微晶玻璃制备技术的研究取得了瞩目的成就,开发了新工艺,如溶胶-凝胶法、烧结法等。

自从把受控析晶技术应用于生产实际中以来,已有众多的微晶玻璃系统被开发利用。如低膨胀用 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统、矿渣微晶玻璃用 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统、涂层与焊接用 $\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统、高电性能

MgO-Al₂O₃-SiO₂ 系统等^[7-8]。目前,还开发了比上述三元系统更为复杂的多元系统,以使材料获得某些特殊的性能。例如在 MgO-Al₂O₃-SiO₂ 玻璃中引入适量的 TiO₂ 或 Li₂O 就可获得高强度(300~400MPa)的微晶玻璃。

1.1.1 微晶玻璃的制备

1.1.1.1 熔融法

最早的微晶玻璃是用熔融法制备的,至今熔融法仍然是制备微晶玻璃的主要方法^[9-10]。其工艺流程见图 1-1。

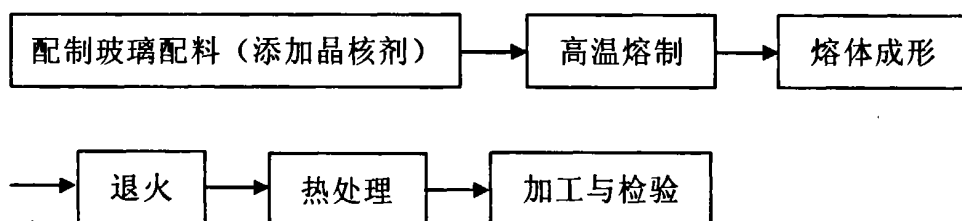


图 1-1 熔融法制备微晶玻璃工艺流程图

熔融法的最大特点是可沿用任何一种玻璃的成型方法,如压延、压制、吹制拉制、浇注等;与通常的陶瓷成型工艺相比,更适合于高速度的自动化操作和制备形状复杂、尺寸精确的制品。一般来说,陶瓷的成型工艺,如挤压、旋压或注浆成型都比玻璃成型方法慢。此外,陶瓷制品通常要求长的干燥和烧成周期,以避免变形和开裂。对于制造薄壁空心制品和其它具有小截面形状的产品,熔融法的优点更为明显,因为没烧成的陶瓷半成品是易碎的,而原始玻璃制品则比较坚固。

只有在一定范围的组成才能采用熔融法制备出满足性能要求的微晶玻璃。一般都应含有一定量的玻璃形成剂,如 SiO₂, B₂O₃ 等,而在网络外体中往往需引入具有小离子半径、大场强的 Li⁺、Mg²⁺ 和 Zn²⁺ 等^[11],其作用在于使玻璃易于引起分相和易于晶化,以间接促进核化与晶化。

熔融法可采用技术成熟的玻璃成型工艺来制备复杂形状的制品,便于机械化生产。由玻璃坯体制备的微晶玻璃在尺寸上变化不大,组成均匀,不存在气孔、空隙等陶瓷中常见的缺陷,因而微晶玻璃不仅性能优良且具有比陶

瓷更高的可靠性。如采用温度梯度、热挤压等方法使晶体定向生长，微晶玻璃的力学性能还将大幅度提高，其中以 $\text{CaO-P}_2\text{O}_5$ 为基的微晶玻璃中析出定向微晶，其抗折强度可达 650MPa，而且断裂韧性也显著提高。

1.1.1.2 烧结法

传统的熔融法制备微晶玻璃存在一定的局限性，如玻璃熔制温度有限、热处理时间较长，而烧结法则有利于克服以上缺点。烧结法制备微晶玻璃的工艺流程如图 1-2。

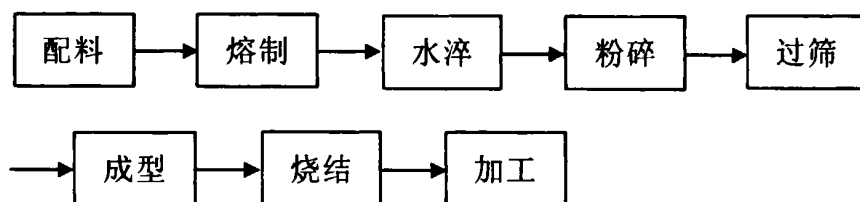


图 1-2 烧结法制备微晶玻璃工艺流程图

烧结法的优点首先在于不需要通过玻璃形成阶段，对难形成玻璃系统和需高温熔炼的玻璃制品较为合适^[12-13]，而且它是通过表面或界面晶化而形成微晶玻璃，可不使用晶核剂。与相应的陶瓷材料相比，这类微晶玻璃具有气孔率低、强度高等优点。

用该法制备的微晶玻璃中可存在含量较高的莫来石、氧化锆、尖晶石等耐高温晶相。将 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统玻璃粉碎后与方镁石混合烧结，形成莫来石质微晶玻璃，耐高温达 1200°C ^[14]。此外，烧结法还有一个显著的特点，即玻璃经过水淬后，颗粒细小，表面积增加，比熔融法制得的玻璃更容易晶化，因而有时可以不使用晶核剂。所以，对于结晶困难的成份，可利用粉体的表面晶化倾向，通过烧结法提高烧结制品的晶化程度。此外，烧结工艺也常用来制备复相微晶玻璃。但相对熔融法来说，烧结法制得的微晶玻璃易产生气孔，组织致密性较差。

用烧结法制备的微晶玻璃集中在 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 、 $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 和 $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ 等系统。如多孔微晶玻璃、主晶相为菁青石的低温烧结微晶玻璃基板等^[15-16]。用烧结法制备的建筑装饰材料已在国内外广泛使用^[17]。

1.1.1.3 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法最早是用来制备玻璃的,近十年来,一直是玻璃和陶瓷等先进材料领域的研究热点。随着微晶玻璃技术的发展,其研究领域也不断拓展,采用溶胶-凝胶法制备微晶玻璃的报道也越来越多^[18-19]。溶胶-凝胶法的主要优点是:①其制备温度比传统方法低得多,可防止某些组分挥发并减少污染;②可获得均质高纯材料;③可扩展组成范围,制备传统方法无法制备的材料,如不能形成玻璃的系统和具有高液相组成的微晶玻璃;④较容易制备包含高度分散的极细小第二相粒子的复相材料,甚至制备出一维第二相(晶须)复相材料。溶胶-凝胶法的缺点是生产周期长、成本高。另外,凝胶在烧结过程中有较大的收缩,制品容易变形。

溶胶-凝胶工艺能制备高均匀度与高纯度的材料,与传统玻璃工艺相比其制备温度要低得多,并可扩展其组成范围,制造不能用传统工艺制备的式样,现在研究主要集中在高温、高强和高韧性等特种材料的制备^[20-21]。其研究系统主要集中在 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$ 、 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ 等系统微晶玻璃。利用溶胶-凝胶方法近年来获得了一系列重要的微晶玻璃材料,尤其在非线性光学、功能材料、电子材料等领域^[22],这些新型的材料展示了重要的应用前景和特有的科学研究价值。

1.1.1 微晶玻璃的种类

最初,微晶玻璃是在熔制的硅酸盐玻璃中加入晶核剂使之体相核化而成的。现在微晶玻璃的范围已扩展到非硅酸盐和非氧化物系统。微晶玻璃的发展极为迅速,目前已获得实际应用的微晶玻璃材料主要有如下几类。

1.1.1.1 硅酸盐类微晶玻璃

光敏微晶玻璃与矿渣微晶玻璃属于此类。光敏微晶玻璃^[23-24]中析出的主要稳定相是二硅酸锂($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$),这种晶体具有沿某些晶面或晶格方向生长而成的树枝状形貌,实质上是一种骨架结构。二硅酸锂晶体比玻璃基体更容易被氢氟酸腐蚀,基于这种独特的性能,光敏微晶玻璃可以进行刻蚀加工成图案尺寸精度高、形状复杂的电子器件,如磁头基板、射流元件等。

矿渣微晶玻璃^[25-29]中析出的晶体主要为硅灰石(CaSiO_3)和透辉石(CaMg

(SiO_3)₂)。据研究,透辉石具有交织型结构,比硅灰石具有更高的强度、耐磨和耐腐蚀性。钢渣微晶玻璃是它的一个重要分支,钢渣的形成温度在 $1500^\circ\text{C}\sim 1700^\circ\text{C}$,其主要组成为 CaO 、 Fe_2O_3 (FeO)、 SiO_2 等;次要组成有 MgO 、 Al_2O_3 、 P_2O_5 等;有的钢渣还含有 V_2O_5 、 Cr_2O_3 和 TiO_2 等。其中的主要化学成分 CaO 、 SiO_2 是 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统微晶玻璃的重要组成; Fe_2O_3 、 FeO 不仅有利于玻璃的熔制,还可以作为微晶玻璃的晶核剂。添加一定量的碳粉或淀粉,引入少量的 Cr_2O_3 (约为 1wt%) 可以制得性能优良的钢渣微晶玻璃材料^[30]。由于 Cr_2O_3 与钢渣中铁的氧化物结合生成一种新的中间体铬铁矿 (FeCr_2O_4) 的熔点高,在硅酸盐玻璃中溶解度有限,因此存在一定的熔制问题。此外,以 ZnS 和 CaF_2 组成的复合晶核剂也可以制备出性能优良的钢渣微晶玻璃^[31],钢渣用量在 60%wt 以上。矿渣微晶玻璃材料被广泛应用于建筑、化工、机械及其它工业部门。

1.1.1.2 铝硅酸盐类微晶玻璃

这类材料具有优良的热稳定性、抗冲击性及化学稳定性,其中主要有: $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统、 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统和 $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统。

$\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统最主要的特性是热膨胀系数在很大范围内可调,而且可达到零膨胀,甚至负膨胀值^[32-33]。这与析出的晶体具有各向异性的热膨胀行为有关。膨胀系数接近零、高强度的透明微晶玻璃,可用于制造天文望远镜、耐高温炊具、环形激光陀螺等。

同时, $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统微晶玻璃具有硬度大、强度高和成形简单等特点^[34],广泛用于滚珠轴承、加工刀具、汽缸、汽轮机叶片、耐酸泵、发动机喷嘴、热交换器和化工管道等部件。此外,它还是非常重要的民用材料,制品的外观从半透明到白色不透明,表面有光泽,特别是白色制品,有清洁感,易清洗,因此可作为超耐热高级炊、餐具,如各类碟、碗和炖锅。即使烧得赤红投到冷水中也不炸裂。

$\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统在晶化过程中可以析出多种介稳与稳定相晶体。其中最重要的是菁青石型 ($2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$) 微晶玻璃。虽然在晶化过程中经历一系列相变过程,析出的稳定主相为菁青石^[35],还可能有方石英、金红石等晶体这种材料具有优良的介电性和抗热震性,可用于制造雷达天线保护罩。

ZnO-Al₂O₃-SiO₂ 系统的微晶玻璃分为以硅锌矿 (SiO₂·2ZnO)、锌尖晶石 (ZnO·Al₂O₃) 及以 β-石英固溶体或透辉长石 (ZnO-Al₂O₃·8SiO₂) 为主晶相的三类。基于不同晶体具有差异很大的热膨胀系数, 所以可通过组成调节热膨胀系数。这类材料可兼有低膨胀系数、高电阻和优良的化学稳定性, 可以用于电气元件和电灶板等。

1.1.1.3 氟硅酸盐类微晶玻璃

这类微晶玻璃中析出一维或二维各向异性的晶体, 类似于天然云母, 具有与金属类似的可加工性和较高的强度和韧性^[36-37]。主要有两种类型: 片状氟金云母晶体型和链状氟硅酸盐晶体型。

片状氟金云母晶体型主要析出氟金云母 (KMg₃AlSi₃O₁₀F₂) 片状晶体。由于它能像金属一样在机床上进行各种加工, 并获得高的尺寸精度, 称为可切削微晶玻璃。其商品 Macor 已生产二十年左右, 并在电绝缘、场离子显微镜的试样架及航天飞船的部件等方面获得应用^[38]。在此基础上, 又发展了一种以四硅云母 (KMg_{2.5}Si₄O₁₀F₂) 为主晶相的材料, 它不仅强度高, 而且具有优良的化学稳定性与半透明性, 主要用于牙齿的整修。若掺杂一些 Ce 使它具有一定的光泽, 外形更接近自然的牙齿^[39]。

1.1.1.4 磷酸盐类微晶玻璃

磷酸盐微晶玻璃由于成本高和一般具有较差的耐化学侵蚀性, 在商业上的重要性要比它的同类硅酸盐微晶玻璃差, 然而, 许多磷酸盐具有像生物相容性这样独特的优点, 使得它在生物医药领域的应用要优于硅酸盐^[40-41]。

氟磷灰石微晶玻璃已经从含氟的磷酸钙铝玻璃以及含有 2~4% 的铝酸镁钙碱玻璃中制备出来, 它具有生物活性, 成功地被植入生物体中。NZP (NaZr₂(PO₄)₃) 是一种具有大固溶范围的固溶体。例如, Na 可以被许多一价和二价离子替代, Zr 可被大多数三价或更高价的过渡金属替代。在范围很广的 Zn 和改性的过渡碱土金属的磷酸盐玻璃中加入 8% 以上的 TiO₂ 作晶核剂, 通过在 800℃~1000℃ 之间晶化, 可获得细晶粒的 NZP^[42]。在室温~300℃ 之间, 这种材料的热膨胀系数的范围为 $-30 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C} \sim 65 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.2 微晶玻璃的特点

微晶玻璃是一种机械强度高、化学稳定性好、硬度高和电绝缘性好的新型无机材料。它是将特定组成的玻璃经过特定的热加工处理，使玻璃体内均匀地生长出众多的微晶，即可制得像陶瓷那样的多晶体^[43]。微晶玻璃的结构和性能与陶瓷、玻璃均不同，其性质是由晶相的矿物组成和玻璃相的化学组成以及它们的数量决定的，因而集中了陶瓷和玻璃的特点，是一类特殊的材料。一方面微晶玻璃中大部分具有晶体结构，而不是玻璃的无定形结构，其强度、硬度、耐热、耐化学腐蚀性均大大优于玻璃；另一方面，它的内部结晶构造比许多陶瓷材料中的晶体要细得多，且更加均匀致密，几乎没有残留气孔，其性能也比相同材质的陶瓷要好得多^[44-45]，迄今，微晶玻璃作为结构材料、光学材料、电学材料、建筑材料等广泛应用于国防尖端技术、工业、建筑及生活的各个方面。

微晶玻璃具有优良的性能、简单的制备工艺技术、廉价的原材料和低制造成本，以及能工业化大规模生产的优势，不失为一种高性能低价位、应用广阔的新型陶瓷材料，因而引起了众多材料科学工作者的关注与兴趣。

与其它材料相比，微晶玻璃的主要特点表现为：①性能优良：熔融玻璃可以得到均匀的状态，而且析晶过程能够严格控制，因而可获得具有极细晶粒、几乎没有孔隙等各种缺陷的均匀结构，这种结构使得微晶玻璃比一般陶瓷、玻璃具有更好的强度、耐磨性、电绝缘性和硬度等。②尺寸稳定：通常的陶瓷在干燥和烧成过程中发生较大的体积收缩（40~50%），这种尺寸的变化容易产生变形，而由玻璃转变到微晶玻璃时，发生的尺寸变化小且易于控制。③制备工艺简单：微晶玻璃可利用整个玻璃制造工艺，形成各种形状复杂的制品。④性能可设计：微晶玻璃适用于广阔的组成范围，其热处理过程可控制，因此各种类型的晶体都可按控制的比例产生出来，从而使微晶玻璃的性能可以通过组成和结构的控制来设计。⑤可与金属焊接：由于微晶玻璃是由玻璃开始的，它在熔融状态下能够“润湿”别的材料，因此可用较简单的方法把它和金属结合在一起。⑥制造成本低：制造微晶玻璃的原料非常广泛，特别是生产矿渣微晶玻璃时可利用工业废料，有利于环境保护和社会经济可持续发展。传统的微晶玻璃材料脆性仍较大，因而应用范围受到限制，改进材料的力学性能，已成为近年来微晶玻璃研究的热点之一^[46-47]。

其中，硅酸盐微晶玻璃具有机械强度高、耐磨损、化学稳定性好等特性，它在航天航空、机械、建筑和化学工程上具有广阔的应用前景^[48-50]，而且组

成该系统的氧化物原料资源丰富，可利用炉渣和矿渣等固体废弃物。因而，微晶玻璃材料作为摩擦学构件的研究和应用在摩擦学和新材料领域受到了广泛关注^[51-52]。然而，针对微晶玻璃摩擦学特性的研究报道较少。近年来，有关该系统玻璃的组成与性能、分相与析晶方面已开展了一定的研究^[53-55]，但在如何提高其耐磨性能，进一步扩大其在耐磨、耐腐蚀结构件上的使用范围，目前尚缺乏深入研究。

1.2 微晶玻璃的强韧方法

对于玻璃材料的增强方法，人们已经进行了较多的研究，而有关微晶玻璃增强方面的研究则相对较少。近十年来，微晶玻璃的增强逐渐引起了人们的重视，该领域的研究报导也越来越多。本节综述了微晶玻璃材料的强韧方法和增强机理。

1.2.1 表面应力法增强微晶玻璃

通过成分调整及工艺优化改变微晶玻璃的组织及结构，达到增强的目的，一直是强韧微晶玻璃的最基本的方法，它也是其它增强方法的基础。

离子交换法是常用的增强方法，它是在一定温度下，将微晶玻璃与熔盐或盐类接触，使微晶玻璃表面的碱金属离子与外来较大的碱金属离子交换，如 K^+ （熔盐）- Na^+ （微晶玻璃）或 Na^+ （熔盐）- Li^+ （微晶玻璃）。在这一过程中，微晶玻璃表面离子交换经历了结构重排，形成了比原微晶玻璃热膨胀系数小的新表面层^[56]。当微晶玻璃冷却时，由于热膨胀系数的差异，在微晶玻璃表面产生压应力而使材料得到增强。

微晶玻璃的微观结构对材料力学性能有很大影响，因此也可用控制结构来改善性能，如交织结构可以提高强度和韧性^[57]，菁青石型微晶玻璃中菁青石晶体是因消耗 α -石英、蓝宝石和尖晶石而形成，它从晶界处生长，而剩余的 SiO_2 则再结晶为枝条状方石英，它与金红石一起大部分为菁青石包围，形成海岸及岛屿型（coast-and-island）交织结构，其断裂韧性可达 $4.2MPa \cdot m^{1/2}$ ，抗弯强度约为 212MPa。

实验表明，采用温度梯度等方法使晶体定向生长，也能大幅度提高力学性能^[58]。如以 $CaO-P_2O_5$ 为基的微晶玻璃中析出定向微晶，其抗弯强度可达

605MPa, 而且断裂韧性也显著提高。

1.2.2 热压成形法增强微晶玻璃

Atkinson^[59]和 Abe^[60]等人研究了具有定向显微结构的微晶玻璃, 发现它比晶体随机取向的微晶玻璃具有更高的强度和韧性。受此启发, 清华大学程慷果^[61]等人对传统的云母微晶玻璃进行热压形变处理, 制备出具有择优取向的新型微晶玻璃材料, 材料的力学性能得到大幅度提高, 其抗弯强度和断裂韧性分别可达 300MPa、 $2.8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 比传统云母微晶玻璃提高 2~3 倍。

1.2.3 纤维增强微晶玻璃

本世纪 60 年代末 70 年代初, 英国原子能研究所的 Sambell 等^[62]首先制备了碳纤维增强的 LAS 微晶玻璃复合材料 (C_f/LAS), 该材料的强度和韧性分别达到 680MPa 和 $3\text{KJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 这完全可以与同时期的碳纤维增强的树脂基复合材料媲美, 而使用温度比树脂基复合材料高得多。张波等人^[63]制备的 C_f/BAS 复合材料的室温强度和韧性分别达到 870MPa 和 $23\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 并分析了纤维与基体 BAS 的界面物理/化学特性。

制备工艺主要是热压, 热压工艺的优点是能够制备出高致密度、机械性能良好的复合材料。载荷是通过纤维与基体界面实现从基体向纤维传递的, 在应力作用下, 界面出现脱粘、裂纹弯曲、纤维拔出, 从而达到补强增韧的目的^[64]。利用纤维增强微晶玻璃无疑可以克服单一材料的不足之处, 达到材料的最佳组合。但就目前的研究状况来看, 并没有达到预期的效果, 关键是如何提高纤维与微晶玻璃之间的结合强度, 以减少和克服结合部位的性能不匹配, 从而拓宽材料的适用性^[65]。

1.2.4 溶胶-凝胶涂层增强微晶玻璃

溶胶-凝胶工艺作为近代材料制备的一种新方法被广泛应用于制备块体、纤维和薄膜材料。近年来用溶胶-凝胶涂层增强微晶玻璃的力学性能是一个新的思路^[66-67]。在微晶化处理过程中, 由玻璃相转变为晶体的过程会出现结构的有序化和致密化, 导致在微晶玻璃表面及内部产生大量的微孔, 由于这些微孔的存在, 预示着微晶玻璃的力学性能下降。方平安等人^[68]用溶胶-凝胶涂

层增强锂云母微晶玻璃的研究结果表明,浸涂溶胶-凝胶涂层的锂云母微晶玻璃较未浸涂前其抗弯强度增加可达 48%。

微晶玻璃浸涂溶胶-凝胶涂层后经过热处理出现增强的现象,可以从两方面加以探讨。一方面,二氧化硅溶胶粒子能够进入微晶玻璃的微孔,填满或部分的填满微孔与微裂纹,凝胶化后经热处理,在除去溶剂及水分的同时凝胶中硅氧键同残余玻璃相中的硅氧键发生键合使整个结构更加牢固;另一方面,溶胶在微晶玻璃表面形成了一致密涂层,使表面的断键和悬键得到修复。

1.2.5 ZrO_2 增强、增韧微晶玻璃

低韧性是微晶玻璃推广使用的主要制约因素,断裂韧性的提高无疑将极大地拓宽微晶玻璃的应用领域。利用 ZrO_2 增强、增韧微晶玻璃是提高其韧性的一条重要途径^[69],微晶玻璃中 ZrO_2 增韧机理主要是应力诱导相变增韧、裂纹偏转增韧及微裂纹增韧。目前制备 ZrO_2 增韧微晶玻璃的方法有熔融法、烧结法和溶胶-凝胶法。

ZrO_2 在微晶玻璃的热处理过程中往往首先析出,并且一般以 $t-ZrO_2$ 的形式存在,如果 $t-ZrO_2$ 的晶粒尺寸小于自发相变的临界尺寸,则 ZrO_2 晶粒从高温冷却下来时,就能以介稳 ZrO_2 的形式保存下来,并在基体中储存了相变弹性压应变能当材料受到外加应力时,基体 ZrO_2 压抑作用得到松弛, ZrO_2 颗粒就发生四方到单斜的相转变^[70-71],并在基体中引起微裂纹,从而吸收了裂纹扩展的能量,削弱或阻止了裂纹的扩展,达到增韧的效果,同时材料的强度也有所提高。

1.3 微晶玻璃的应用

微晶玻璃集中了多种优良性能,适用于代替传统材料以获得更好的经济效益和改善工作条件,在机械、航天航空、电子电力、建筑、生物医药等领域获得了广泛的应用。

1、机械工业

微晶玻璃的机械强度比玻璃高出许多倍,也较大多数陶瓷材料高。通常,微晶玻璃的抗弯强度为 200~300MPa,抗压强度为 400~1200MPa。同时,微

晶玻璃能够获得极其光滑的表面，适用于作轴承；利用其强度高、耐磨性好，可取代钢材制造斜槽、球磨机内衬以及研磨体。由于微晶玻璃使用的矿渣原料资源丰富、比较廉价，因而更具有吸引力^[72]。

微晶玻璃的热膨胀系数，也是作为结构材料使用时的重要参数。一般说来，低的膨胀系数对于构件的尺寸稳定性及抗热震性是有利的，可以满足超精密机械的要求，例如，美国哥伦比亚号航天飞机上有许多部件均是用低膨胀微晶玻璃制成的。相反，用微晶玻璃作为封接材料使用时，则往往要求具有较高的膨胀系数。

2、航天工业

利用其强度与比重之比高，质轻且具有优良的热学性能，可用作飞机、火箭和人造地球卫星的结构材料^[73]。如高速飞机的机翼前缘，喷气式发动机喷嘴。

3、生物医药

微晶玻璃具有高的强度、好的耐磨性以及化学惰性。近年来，生物微晶玻璃得到了广泛深入的研究，并取得了一系列成果。如具有梯度构造的 $\text{CaO-P}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 系生物微晶玻璃与天然生物牙齿有相近的色泽和外观，可用于人工齿冠修复^[74-76]。铁钙硅铁磁体微晶玻璃可将磁滞生热所需的强磁性良好的生物相容性结合，能满足温热治癌的要求，特别适用于治疗某些处于人体深处并且不能用手术切除的癌症，如骨癌、脑癌。此外，微晶玻璃在骨骼移植等方面的应用也有报道。

4、化学工业

微晶玻璃的化学稳定性好、耐磨，被用于制造输送腐蚀性液体的管道、阀门、泵等，还可用作反应器、电解池及搅拌器的内衬。

5、电子工业

微晶玻璃的膨胀系数可在很大范围内变化,能与金属很好地焊接在一起。一些微晶玻璃具有优良的介电性能和绝缘性能,可以在微波、调频高压等领域获得应用。

6、建筑业

微晶玻璃强度高、化学稳定性好,可广泛用于建筑物的装饰上。装饰用微晶玻璃的性能指标见表 1-1。目前,世界各国已开展了以钢渣、粉煤灰、高炉渣等工业废料为主要原料开发研制微晶玻璃装饰材料的工作,这不仅有利于环境保护,而且能给整个社会带来显著的经济效益。

表 1-1 微晶玻璃与其他石材性能指标比较

性能	单位	微晶玻璃	花岗岩	大理石
比重	g/cm^3	2.65-2.7	2.4-2.7	2.6-2.8
抗压	MPa	400	67-100	80-200
抗折	MPa	56	约 16.7	约 14.7
抗冲击强度	Kj/m^2	3.34	1.9	2.4
莫氏硬度		6.0-6.5	3-5	5.5-6.0
吸水性	%	<0.02	0.3-0.8	0.2-0.5
耐酸性	1% H_2SO_4 %	0.08	10.3	1
耐碱性	1% NaOH %	0.06	0.3	0.1
热膨胀系数	$10^{-7}/^\circ\text{C}$	40-70	80-250	50-150
耐海水性	Mg/cm^2	0.073	0.19	0.17
抗冻性	%	0.01-0.03	0.2-0.4	0.2-0.4
镜面光泽度	光泽度单位	97	约 90	约 90

7、核工业

随着核动力工业的发展,传统的材料已不能适应温度、压力以及辐射能量的一些严格条件,微晶玻璃在核工业中也有潜在的应用前景,如微晶玻璃可用于制造反应密封剂、核废料储存材料。

陶瓷材料用于耐磨材料还是最近几十年的事情。1956 年出版的

Rabinowicz 所写的“材料的摩擦与磨损”一书中^[77]，还没有列出有关陶瓷材料的文献资料。到 70 年代初期，对陶瓷材料能否在磨损方面得到实际应用，也没有明确结论^[78]。后来在 1983 年的国际材料磨损会议上发表了很多关于硼化物、碳化物、氮化物及氧化物等陶瓷材料磨损的论文^[79-82]，涉及到了很多的实际应用。十几年前，美国及日本研制出使用陶瓷发动机的车辆，促进了陶瓷材料在工业中耐磨件的实际应用与发展。

1.4 微晶玻璃的摩擦磨损性能研究现状

微晶玻璃是一种无机非金属材料，一般具有较高的摩擦系数，研究表明，在干摩擦条件下，微晶玻璃/金属配副的摩擦系数一般在 0.4~1.0 之间^[83]。微晶玻璃的摩擦学特性与其化学物理状态、表面形貌、接触形式及运动条件密切相关。对微晶玻璃摩擦学性能、磨损机理及其影响因素的研究将有助于对摩擦磨损行为的预测及适当工作环境的选择。

1.4.1 微晶玻璃的疲劳行为

微晶玻璃与许多氧化物陶瓷一样，也存在着疲劳断裂现象^[84]。典型的多晶脆性材料，它的晶体结构和显微组织，包括晶粒尺寸、形态、数量、分布等均可在很大范围内可控调整。由于陶瓷材料不像金属材料裂纹扩展有明显的稳定扩展阶段，陶瓷材料裂纹从开始扩展到失稳扩展的全过程难以控制，因而长期以来人们认为陶瓷材料无疲劳可言，对陶瓷在交变载荷作用下的疲劳行为研究的很少。但是随着研究的深入，愈来愈多的证据已证明微晶玻璃材料疲劳现象的存在^[85]。

太原重型机械学院周俊琪、张敏刚^[86-88]等人则详细研究了微晶玻璃的疲劳行为。结果表明，循环疲劳对最大应力敏感主要是机械疲劳过程，循环载荷对材料造成附加损伤，降低了材料的寿命。

1.4.2 微晶玻璃的磨损失效

对于微晶玻璃，其摩擦由三部分组成^[89-90]：真实接触面积上的面间剪切；真实接触面积上相接触的微凸体相对滑过所要克服的阻力；软的材料在硬的微凸体作用下表面屈服塑性变形形成“犁沟”的作用力。因此影响这三个组

成部分的因素(包括工作参数、环境、材料和表面特性)都将影响微晶玻璃的摩擦和磨损。微晶玻璃材料的迁移一般有三种机制:塑性变形、脆性断裂和摩擦化学机制^[91]。

俄罗斯 O.C.ЗАПВІЙНА 等人较详细地研究了微晶玻璃材料的磨损过程,研究主要集中在三个方面:①微晶玻璃的磨损失效过程;②干摩擦和有水存在时的磨损特性差别;③微晶玻璃摩擦系数的测定。研究表明^[92],随着时间的延长,微晶玻璃材料的磨损速度会减缓。12min 前磨蚀比较严重,此后磨损就会减弱。如果有水存在,微晶玻璃材料的磨损会大大减弱。

金属表面的玻璃涂层即搪瓷,早在 50 年代初就用于煤矿的溜槽上。在 90 年代搪瓷作为一种耐磨材料有了很大的发展,从单一的玻璃涂层发展到微晶玻璃涂层(又称增强搪瓷)。苏联、美国、西德和我国都有在煤矿刮板输送机中部槽上涂烧耐磨搪瓷的报道。但是,目前我国耐磨搪瓷在矿山机械中的应用还远远未能开发,其前景还十分可观,如物料输送管的内衬,选矿厂的料仓、溜槽、水槽、浮选机机体、漏斗和各种排放口都可以应用耐磨搪瓷。

中国矿业大学江利,李植^[93]等人研究了金属表面涂敷 $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系玻璃-陶瓷和玻璃— $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合涂层的三体磨粒磨损特性。研究表明,塑性变形和断裂机理都导致材料迁移,两种复合涂层的耐磨性和力学性能均高于普通陶瓷,其中玻璃— $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合涂层更具有实用价值。

有研究结果指出,微晶玻璃的耐磨性与其烧结机理有关。如在矾土烧结中若有玻璃相,烧结是在具有液体的情况下进行,这样,结晶体之间的相互连接不仅依靠刚玉晶体的紧密连接和凝结实现,而且依靠由刚玉而形成的液体的粘附性能来实现,因而具有良好的耐磨性能。

微晶玻璃在干摩擦条件下的摩擦磨损性能与转速和载荷密切相关。赵运才等^[94]采用 MRH-5A 型环-块摩擦磨损试验机评价了耐磨微晶玻璃/45 钢的干摩擦磨损性能。指出,随着载荷的增加,微晶玻璃的磨损率出现较大的波动。在较低载荷作用下,微晶玻璃的磨损失效主要为轻微的点蚀坑和疲劳剥落;在较高载荷作用下,微晶玻璃的磨损失效主要为表层产生晶粒塑性滑移、疲劳脆性断裂、表层材料元素的转移和表面膜的形成。转速的变化对微晶玻璃的磨损量有较大的影响,在低速区,微晶玻璃的磨损失效主要为轻微的塑性变形和犁沟;在中速区,微晶玻璃的磨损失效主要为表层微观犁削和晶粒脱

落；而在高速区，微晶玻璃的磨损失效主要为大片剥落和表层材料元素的转移。

根据 P.VanLomme 等^[95]的报道，在销-盘实验中，陶瓷与微晶玻璃对摩，不仅摩擦系数高，而且造成微晶玻璃严重的磨粒磨损。陶瓷与微晶玻璃之间具有良好的润湿性和粘着性，可能发生微弱的化学反应。所以陶瓷既不适合作微晶玻璃的摩擦副，也不适于作微晶玻璃的润滑剂。

Dalverny^[96]曾得出结论：碳纤维增强的微晶玻璃复合材料与不同的对偶材料对磨,均呈现出随着载荷的增加，磨损率下降的趋势。

1.4.3 显微结构对微晶玻璃摩擦磨损特性的影响

微晶玻璃材料是由晶粒和玻璃相组成的多晶材料，决定其性能的主要因素是其组成和显微结构，即晶粒、晶间、气孔或裂纹的组合形态^[97]。因此，晶粒的形状与大小、孔隙率和第二相的形状及其体积百分比，以及杂质的分布和缺陷等都可能影响该材料的摩擦学性能。

研究表明，对于陶瓷材料，当晶粒比较细小时，主要发生塑性变形和部分穿晶断裂，产生轻微磨损；晶粒比较粗大时，磨损的主要机制是晶间断裂，产生严重磨损。由于细晶粒陶瓷可以形成比较稳定的光滑表面膜，因而摩擦系数小；粗晶陶瓷因为发生晶间断裂，表面比较粗糙，所以摩擦系数较大。

对于多晶材料，大量实验证明晶粒愈小、愈均匀，强度愈高。细晶材料具有良好的耐磨性能是由于多晶材料的晶界比晶粒内部弱，破坏多是沿界断裂，而细晶材料晶界比例大，沿晶界破坏时，裂纹的扩展要走迂回曲折的道路，晶粒愈细，此路程愈长，则磨损时材料的变形和剥落所需能量就越多。当晶粒粗大时，材料组织结构松散，气孔率高，且易产生应力集中，导致摩擦过程中材料的早期失效。

当然由于所选择的陶瓷材料和试验条件不同，微晶玻璃晶粒尺寸与耐磨性能之间关系的研究目前尚存在差异，所以微晶玻璃晶粒尺寸对材料耐磨性能的影响有待进行深入细致的研究。

相关研究表明，孔隙度小(约 5%~7%)的陶瓷在室温下容易形成光滑稳定的表面膜，故其摩擦磨损性能优良；而当孔隙度增大时，由于发生晶间断裂致使表面膜剥落并引发磨粒磨损^[98]。另外，在摩擦过程中在较大载荷作用下

气孔之间可能会连接起来而形成裂纹源。

微晶玻璃是一种多晶材料，其晶间强度及晶间杂质对材料的性能影响显著。有关陶瓷磨损性能的研究发现^[99]，由于晶粒间各向异性的弹性和热扩散特性，在摩擦过程中晶间处受到微应力的作用，当晶间强度较弱时容易发生晶间断裂而使晶粒被拔出或挤出，从而导致磨粒磨损；相反，当晶间强度较强时，陶瓷材料发生的是轻微磨损。

与传统金属材料相比，微晶玻璃具有优良的力学性能、耐磨性、耐浸蚀、不导电和比重轻等特性，并且可以通过强化处理和调整热处理工艺，提高微晶玻璃的强度和韧性，改善其性能^[100]。如何提高微晶玻璃的耐磨性已经成为该领域的研究焦点^[101-103]。目前，世界各国已开展了以钢渣、粉煤灰、高炉渣等工业废料为主要原料开发研制耐磨微晶玻璃的工作，这不仅有利于环境保护，而且也给社会带来显著的经济效益。

1.5 本论文的研究意义及主要内容

1.5.1 研究意义

随着科学技术的发展，对交通运输工具和动力机械的速度、负荷和安全性要求越来越高，对摩擦材料的性能提出了更高的要求。先进的摩擦材料应具备的主要特征是：耐磨损、耐高温、摩擦系数大、摩擦性能稳定、密度小等。而传统的摩擦材料都具有一定的局限性，难以满足全部要求。树脂基摩擦材料耐高温性能差，并且其主要产品石棉基摩擦材料会给人们的健康带来威胁。金属基摩擦材料密度大、磨损严重。新型的 C/C 摩擦材料虽然密度小，并且摩擦性能较好，但是其受环境的影响较大，并且制造成本太高，只能应用于一些特定的场合^[104]。

21 世纪科技发展的趋势是环保和节能，为适应这一新形势发展的需求，陶瓷摩擦材料应运而生。微晶玻璃材料具有高强度、高硬度、耐磨损、耐高温等特殊性能，并且资源丰富，价格便宜，生产工艺相对简单，因此作为摩擦材料具有良好的发展前景。选择微晶玻璃材料进行摩擦磨损性能研究，将对其实际应用提供一定的理论依据。

1.5.2 研究内容

本文以矿渣 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系统微晶玻璃为试验对象, 主要研究在低速状态下分别与 H300 特种铸铁、45 钢对磨的摩擦磨损特性。根据 MM-1000 型摩擦磨损试验机的结构和试验内容确定总体方案、结构设计、试样加工以及装配, 并进行测试装置与摩擦磨损试验机的整合。

主要研究内容如下:

1. 测定不同的法向应力下的摩擦系数;
2. 测定不同的初始转速下的摩擦系数;
3. 测定各试验条件下摩擦材料的磨损量和表面温升;
4. 绘制瞬时摩擦系数——摩擦时间曲线、平均摩擦系数——速度曲线、磨损量——速度曲线和表面温升——速度曲线;
5. 综合各种试验条件, 探讨微晶玻璃材料及对磨副的摩擦磨损机制;
6. 对微晶玻璃作为摩擦材料的应用提出展望。

微晶玻璃材料的摩擦磨损不是单一的因素在起作用, 而是由各种因素共同作用的一种综合效应。总的来讲, 人们已经初步认识到影响微晶玻璃摩擦学性能的因素, 并且提出了微晶玻璃的磨损主要涉及塑性变形、脆性断裂、磨屑层形成等机理^[105]。

第 2 章 摩擦磨损试验简介

随着微晶玻璃在机械设备等的摩擦零部件中的广泛应用，需要对工程微晶玻璃进一步研究。许多学者已经研究了各种陶瓷在不同条件下的磨损机制以及磨损图。它不仅有助于在工程领域中正确地选择、设计和使用材料，而且可在较宽的运行工况下比较材料的摩擦学性能。

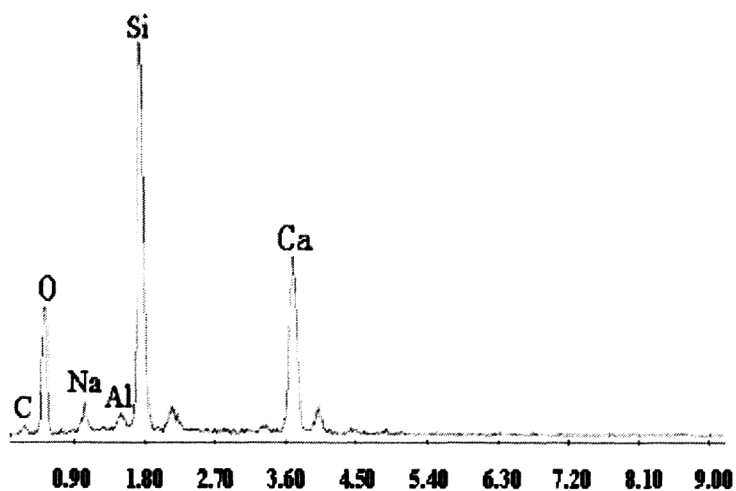
一般而言，多相组织的金属比单相金属的抗粘着性能好，金属/非金属组成的摩擦副比金属/金属摩擦副抗粘着性能好，脆性材料比塑性材料抗粘着性能好。这是由于塑性材料粘着结点的破坏常发生在离表面较深处，磨屑较大，而脆性材料粘着结点的破坏处离表面较浅，主要是剥落，磨屑呈细片状^[106]。

因此，本试验选择微晶玻璃/H300 特种铸铁和微晶玻璃/45 钢两组摩擦副进行摩擦磨损对比试验，为具体条件下，选择合适的应用零部件的陶瓷配对副，提供接近实际工况的可靠的实验数据。

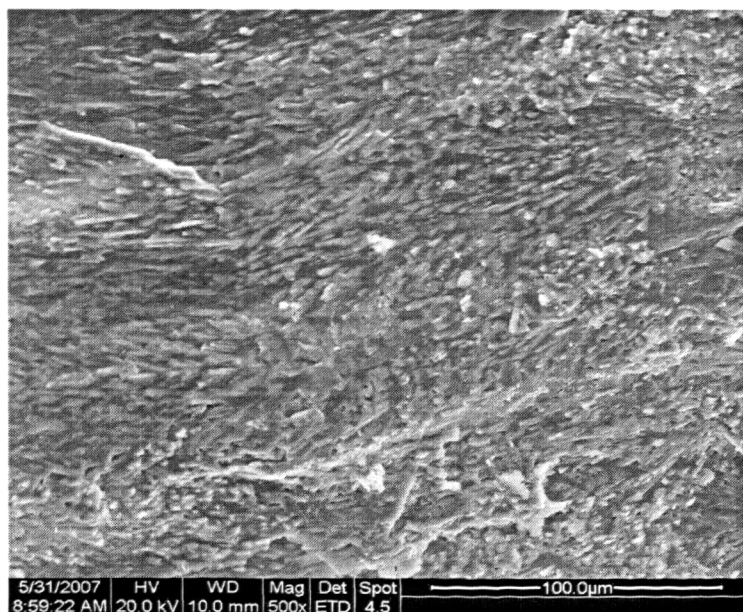
2.1 试验材料

微晶玻璃由成都清大华科微晶材料有限责任公司提供，主要原料为石英砂、石灰石、纯碱、煤矸石、矿渣、添加剂等。生产工艺采用的是烧结法，即将细小水淬玻璃颗粒，放在耐火棚板上，再进入晶化窑中晶化，出窑后切边磨平抛光。烧结晶化法成本较低，产品容易多样化，成品率较高，环保性好^[107]。

试验材料是 CAS ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) 系微晶玻璃，主要化学元素见图 2-1 (a)；主晶相为 β -硅灰石，属于三斜晶系，通常呈枝柱状。晶粒大小约 $20\mu\text{m}$ ，见图 2 (b)。由扫描电镜照片可明显看到分相，一相为柱状的 β -硅灰石晶体相，生长较完整且有一定方向性，另一相为无规则的玻璃相，成连通状。晶相与玻璃相相互咬合存在。



(a) 主要元素



(b) 组织形貌

图 2-1 微晶玻璃的扫描电镜照片

表 2-1 H300 特种铸铁的化学成分 %

C	Si	Mn	P	S	Re	Mg	Cr	Mo	Cu
3.76	2.39	0.55	0.041	0.017	0.015	0.022	0.35	≤0.6	≤0.8

微晶玻璃材料的对磨副分别是 H300 特种铸铁和 45 钢。H300 化学成分^[108]

见表 2-1。

2.1.1 材料性能

CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系微晶玻璃，具有均匀致密的显微结构，其晶粒细小，气孔少，因而具有优良的耐磨性能。具有机械强度高、耐磨损、化学稳定性好等特点^[109-110]。

表 2-2 是微晶玻璃及对磨副材料的物理性能参数。可以看出，由于微晶玻璃的密度比金属的密度小很多，如果能取代工程结构耐磨件中的传统金属材料，可以大幅降低零部件自重。

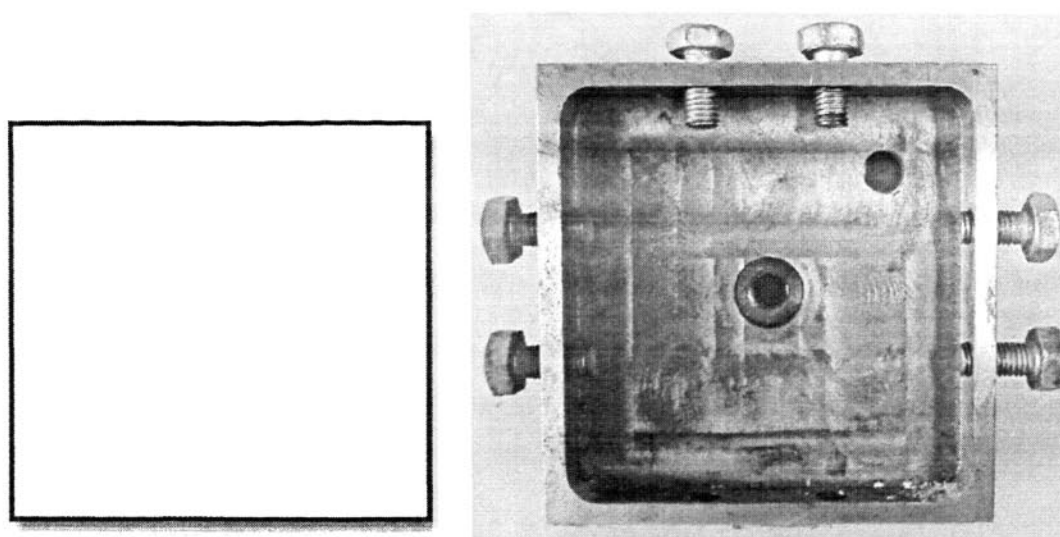
表 2-2 摩擦副材料的性能参数

摩擦副材料		表面粗糙度	密度	硬度
		Ra(μm)	ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	HV0.5/20
微晶玻璃	静试件	1.6	2.65	532
H300	动试件	3.2	6.60	300
45 钢		3.2	7.85	253

2.1.2 设计加工

根据试验装置的结构、安装要求以及材料的加工性能，先后尝试了以下三种设计方案。

方案一、实验之初，由于很难找到具备加工微晶玻璃能力的合适厂家，故由成都清大华科公司提供标准试样。微晶玻璃尺寸为 100mm×100mm×20mm，如图 2-2 (a) 所示。并自行设计加工了 MM-1000 型磨擦磨损试验机上的夹具，以配合安装微晶玻璃试样。如图 2-2 (b) 所示。



(a) 微晶玻璃

(b) 方形夹具

图 2-2 微晶玻璃和夹具的实图

后经试验证明，由于没有排屑槽，微晶玻璃表面损伤很严重，脆性剥落的片层不能及时排出，会进一步划伤表面，致使摩擦材料的磨损量很大。

方案二、微晶玻璃尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ ，在其摩擦表面加工出对称的排屑槽，如图 2-3 所示。夹具同上图 2-2 (b)。

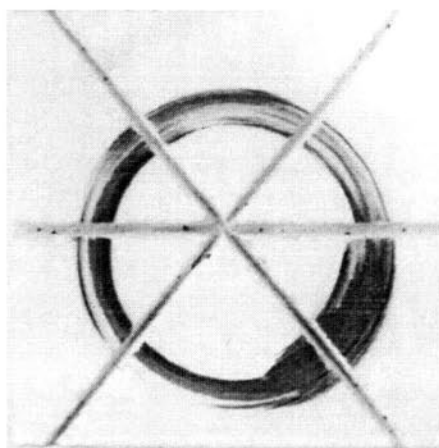


图 2-3 微晶玻璃实图

经过试验，微晶玻璃表面损伤现象依然严重，槽沿边缘易出现崩裂豁口，

进而刮伤对磨副摩擦表面。

方案三、由于微晶玻璃是一种脆性材料，难以进行普通的机械加工。最终选择石材行业的专业高压水刀设备（见图 2-4）来加工微晶玻璃试件。水刀设备用高压泵把密封的水加压至 300MPa 以上，通过高级硬质合金、蓝宝石、金刚石等做成的喷嘴（直径约 0.05mm）喷出，快速切割材料。水刀切割产生的热量经设备循环水冷却，水射切割的切口光滑，不发热无退火现象，切割表面光滑平整。

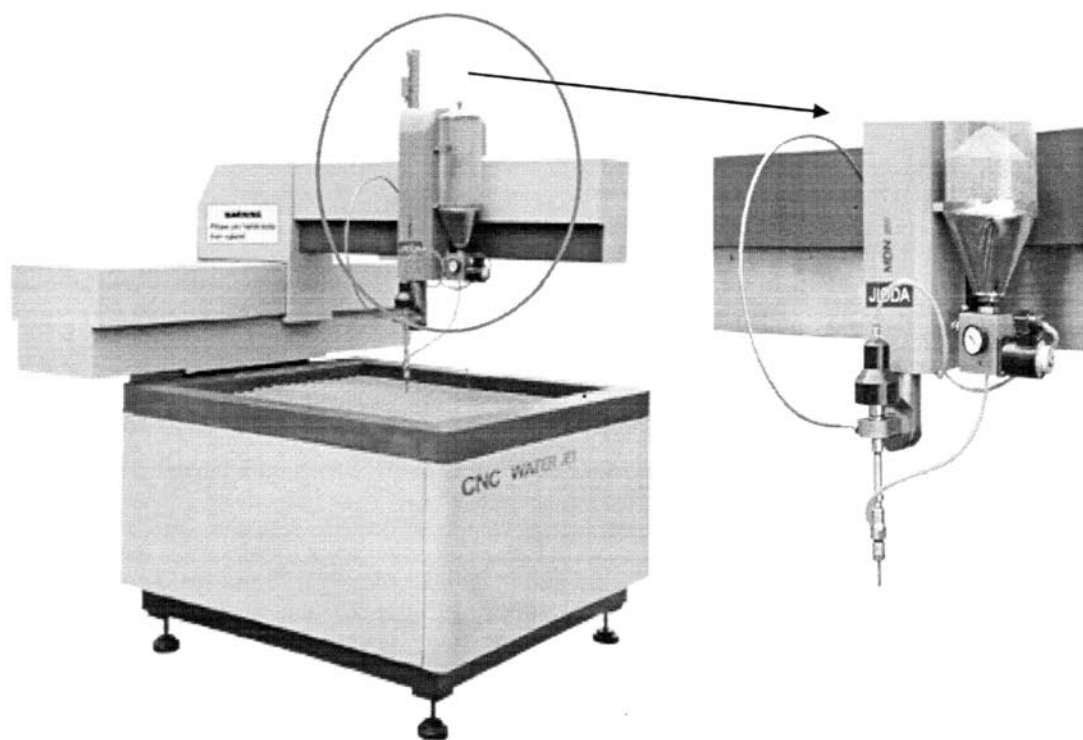


图 2-4 高压水刀设备实图

微晶玻璃试样加工成外径 $\phi 75\text{mm}$ 、内径 $\phi 53\text{mm}$ 、厚度为 16mm~20mm 的圆环。对磨副 H300 特种铸铁和 45 钢均加工为外径 $\phi 75\text{mm}$ 、内径 $\phi 53\text{mm}$ 、厚度为 20mm 的圆环。见图 2-5。

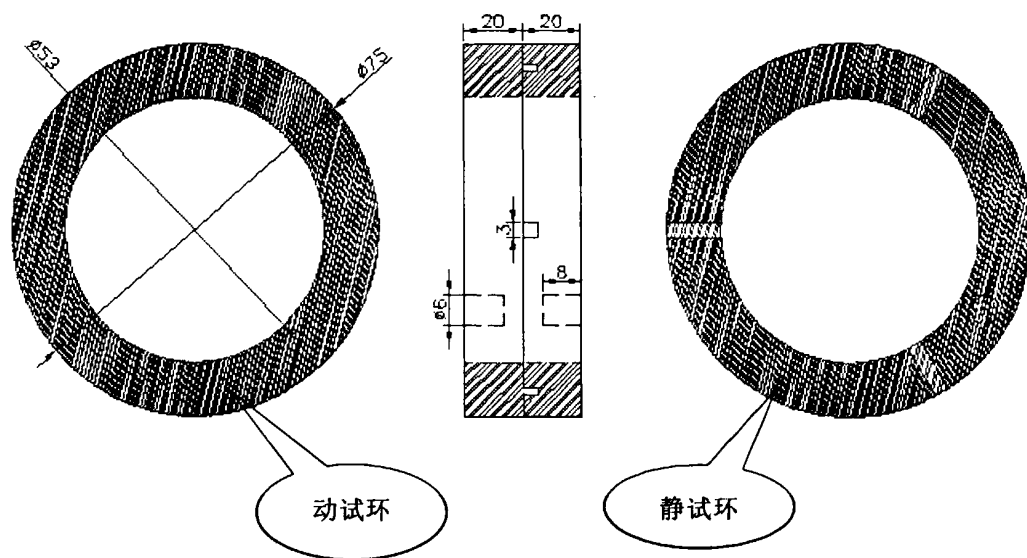


图 2-5 摩擦试环设计图

采用方案一和方案二设计的试验中，每组试验完毕，进行质量称量后安装位置容易跑偏，导致摩擦副接触不充分。经过综合考虑，最终试验材料采取方案三的设计进行加工。

所有磨损过程都分为三个阶段：磨合、正常磨损、严重磨损。磨合是磨损过程的不均匀阶段，严重磨损是磨损的非正常工作状态，它们在整个工作时间内占的比率很小，特征是磨损量都很大；正常磨损阶段的时间最长，其特征是磨损率基本保持不变，本章研究的磨损量计算模型就是针对于磨合和正常磨损阶段的。

2.2 试验装置

2.2.1 MM-1000 型摩擦磨损试验机

关于材料摩擦磨损性能的评价方法大体可以分为两大类：拖磨方式和减速制动方式。

拖磨方式 (Drag Mode): 其特点是在恒定的速度和恒定的压力 (或者力矩) 下摩擦，测试试样的摩擦系数和磨损率。这种试验方法虽然方便快捷，成本低，但是与实际使用没有可比性，其试验结果也不可以直接用于产品使

用性能的评判，它主要用于监控生产过程的质量稳定性。在国际上，这种试验方式正在被否定和淘汰。

减速制动方式 (Deceleration Mode): 它针对具体的工作条件，模拟摩擦材料的实际工况，设计了各种各样的试验程序，其试验结果与产品的使用效果有较好的可比性，可以用于产品性能的评判。这种方式的测试周期和成本都比较高。但是尽管如此，减速制动方式已经成为主要的摩擦磨损性能评价方法^[111]。

本试验采用减速制动方式来评价试验材料的摩擦磨损性能。试验设备是 MM-1000 型摩擦磨损试验机，主要包括主机和控制台两大部分，主机的实体布置如图 2-6 所示。

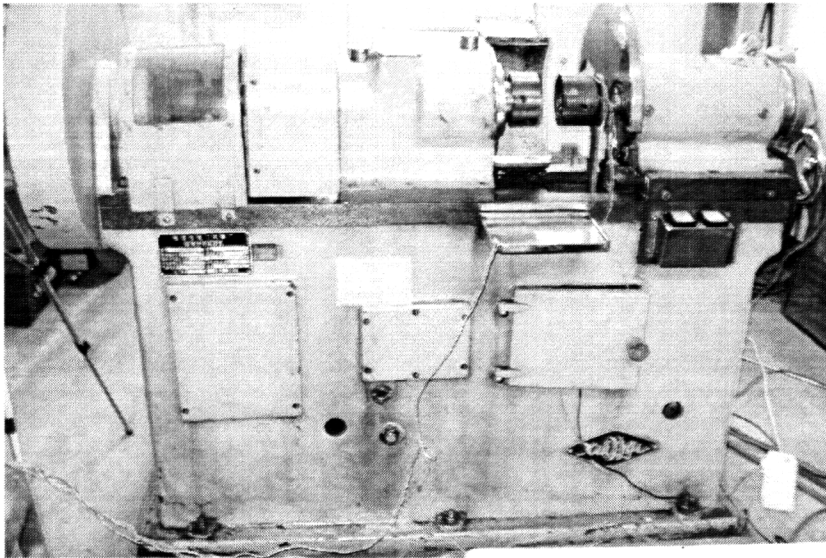


图 2-6 MM-1000 摩擦磨损试验机实体图

试验装置工作原理如图 2-7。工作原理是：采用卧式圆环端面摩擦进行试验。将每组的动摩擦环和静摩擦环装配好，先进行摩擦表面的预磨合，使摩擦面达到 80% 以上的贴合程度。然后将动试环通过键槽与驱动主轴相连，随驱动主轴和惯性飞轮一同加速到规定的初速度后稳定运行约 1 分钟；然后切断动力，由预调压力的压缩空气通过气缸对摩擦面轴向加压；使静试环和动试环发生摩擦并使动试环逐渐减速，最终使试环端面的摩擦行为停止。实验数据包括法向压力、转速、摩擦力矩、摩擦面温度、摩擦时间等。

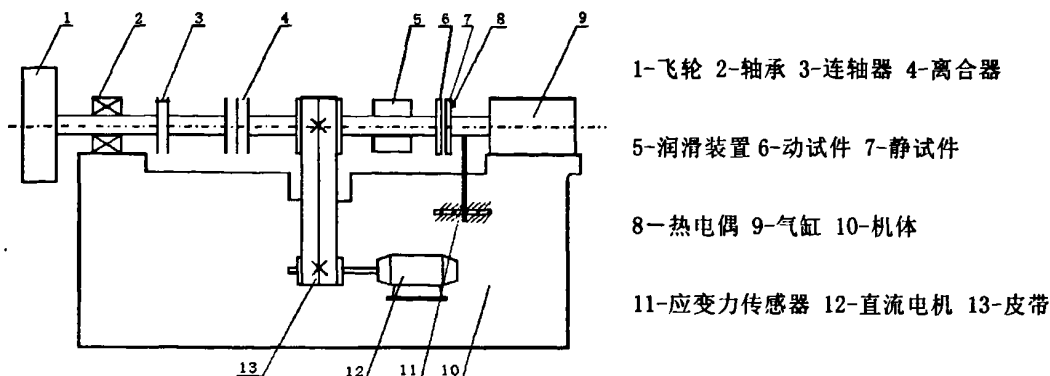


图 2-7 MM-1000 摩擦磨损试验机工作原理图

2.2.2 试验数据的采集

采集测试系统框图如图 2-8 所示。

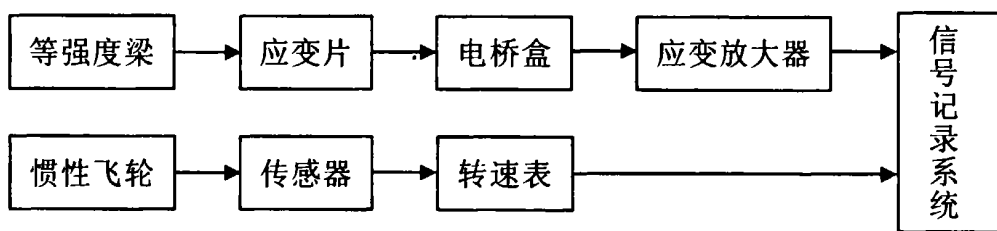


图 2-8 测试采集系统框图

2.2.2.1 摩擦力矩的采集

摩擦力矩通过与静磨头同轴安装的等强度梁的应变来测量。等强度梁在法向压力和摩擦力的作用下产生应变，应变片与电桥盒连接，由 YE3817 应变放大器测得应变信号，通过导线输入 JV5200 高速动态数据采集系统进行数据存储记录。

2.2.2.2 动试环转速的采集

试验转速由安装在惯性飞轮上的传感器采集，通过 HB966 转速表显示转速的变化。转速信号通过导线输入 JV5200 采集系统进行数据存储记录。

2.2.2.3 摩擦表面温度的测量

摩擦表面的温度由安装在静磨头上的镍铝-镍铬热电偶测温仪测量，量程为 0~600℃。

2.2.3 试验参数

2.2.3.1 摩擦力矩标定

摩擦力矩的标定是用标准砝码进行加载，在等强度梁上产生应变输出，经过动态电阻应变仪进行测量。将标定托盘用直径 0.5~1.0 mm 的钢丝挂在标定的盘槽内（见图 2-9），放上 1~10 kg 的砝码，通过动态电阻应变仪读数，每隔 1kg 记录一次，原始数据记录见表 2-3，由此绘制摩擦力矩标定曲线如图 2-10。

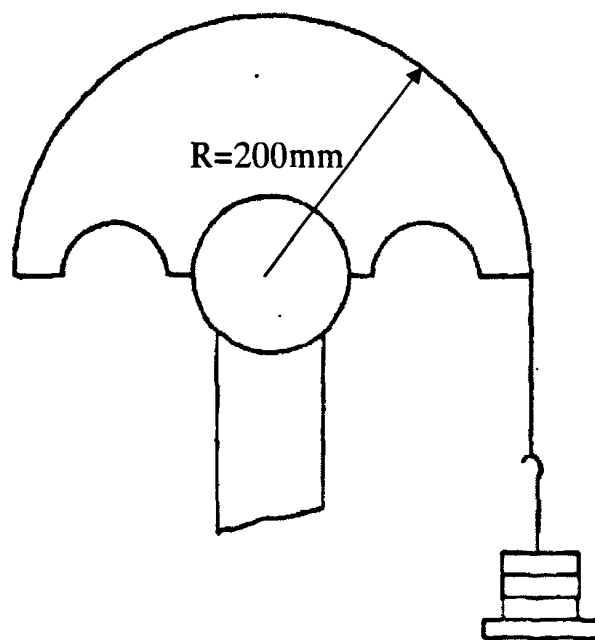


图 2-9 摩擦力矩标定示意图

表 2-3 摩擦力矩标定数据

载荷 (N)	加载 (V)	卸载 (V)	平均值 (V)	摩擦力矩 (N*m)
0	0.005	0.055	0.030	0
10	0.220	0.272	0.246	2
20	0.440	0.490	0.465	4
30	0.649	0.696	0.673	6
40	0.865	0.910	0.888	8
50	1.079	1.129	1.104	10
60	1.329	1.352	1.341	12
70	1.542	1.590	1.566	14

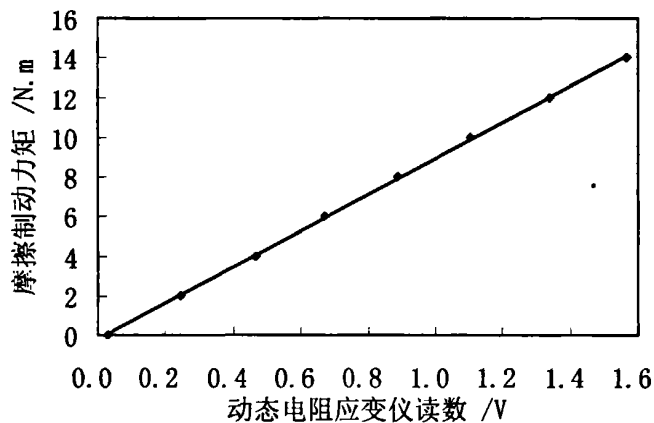


图 2-10 摩擦力矩与应变仪电压读数的关系曲线

得出摩擦力矩与应变仪电压读数的函数关系为：

$$M = 9.1495 \times A - 0.2184 \quad (2-1)$$

式中： M 为摩擦力矩 (N·m)， A 为动态电阻应变仪电压读数 (V)。

2.2.3.2 试验参数设定

试验状态：干摩擦，大气氛围，室温环境

转动惯量： $0.3174 \text{kg} \cdot \text{m}^2$

试验初速度：100rpm, 200rpm, 300rpm, , 900rpm, 1000rpm

试验法向应力：0.1MPa, 0.3MPa

2.3 分析方法

目前还没有对磨损评定的统一标准，常见的主要有二种方法^[112]：磨损量、耐磨性和比磨损率。本论文通过测定质量磨损量来评价其磨损性能。

2.4.1 摩擦系数计算

摩擦系数是评价材料摩擦磨损性能的一项基本参数。

试验过程中通过动态电阻应变仪采集摩擦力矩，由公式 (2-1) 计算瞬时摩擦系数 μ ，公式 (2-2) 计算距离平均摩擦系数 μ' ^[113]。

$$\mu = \frac{2M}{P \cdot (r_1 + r_2)} \quad (2-1)$$

$$\mu' = \frac{W_{\text{等效}}}{P \cdot S} \quad (2-2)$$

式中： M 为摩擦力矩， P 为法向应力， r_1 为试件内径， r_2 为试件外径； $W_{\text{等效}}$ 为制动过程的摩擦功， S 为摩擦距离。

2.4.1.1 瞬时摩擦系数曲线的绘制

运用 matlab 软件编制计算程序。以微晶玻璃/H300 特种铸铁对磨副为例，当法向压力为 0.1MPa，初速度为 400rpm 时，计算过程编制如下：

```
clc
clear                                     %清屏
[fid,message]=fopen('520602_035.txt','r');
U=[fscanf(fid,'%f',[1,inf])];           %读入转速的电压信号
l=length(U);
t=0:(l-1);
t=t/20000;                               %x轴坐标换算为制动时间
figure(1),plot(t,U)                     %转速的电压信号随时间的变化
```

```

[fid,message]=fopen('520601_035.txt','r');
MU=[fscanf(fid,'%f',[1,inf])];           %读入摩擦力矩的电压信号
l=length(MU);
t=0:(l-1);
t=t/20000;                                %x轴坐标换算为制动时间
%摩擦力矩信号经由软件中的sptool滤波后存为“sig2.data”。
N=8678.2*0.1-336.79;
y=sig2.data;
ls=length(y);
t=0:ls-1;
t=t/20000;
ym=9.1495*y-0.2184;                       %利用标定公式计算摩擦力矩
figure(3),plot(t,ym/N/0.032)              %利用公式(2-1)计算瞬时摩擦系数
xlabel('time /s')
ylabel('friction coefficient  $\mu$ ') %绘制瞬时摩擦系数随时间变化的曲线

```

以微晶玻璃/H300特种铸铁在法向压力0.1MPa，初速度为400rpm的的试验数据为例，绘制图形如图2-11。

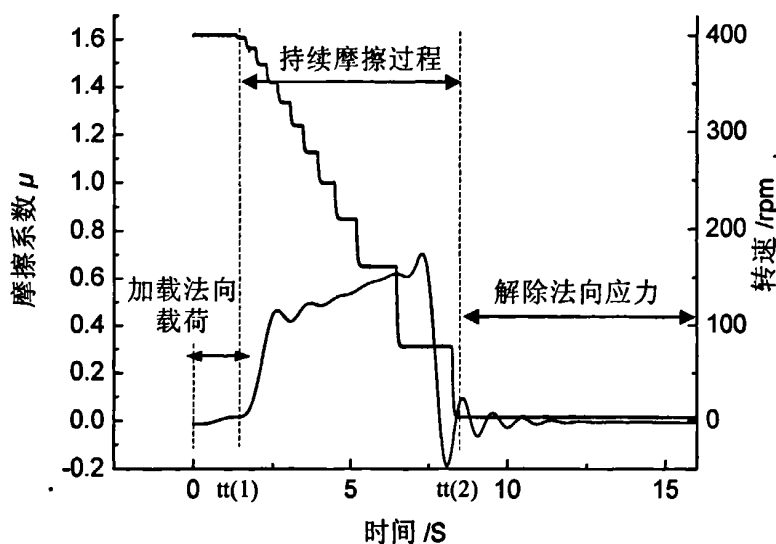


图 2-11 瞬时摩擦系数与转速随时间的变化曲线

2.4.1.2 平均摩擦系数的计算原理

运用 matlab 软件编制计算程序，以法向压力 0.1MPa 为例。

```
clc
clear
[fid,message]=fopen('520601_035.txt','r');
MU=[fscanf(fid,'%f',[1,inf])];           %读入摩擦力矩电压信号
l=length(MU);
t=0:(l-1);
t=t/20000;                                %x轴坐标换算为制动时间
%摩擦力矩信号经由软件中的sptool滤波后存为“sig2.data”
N=8678.2*0.1-336.79;
y=sig2.data;
ls=length(y);
t=0:ls-1;
t=t/20000;
ym=9.1495*y-0.2184;                       %利用标定公式计算摩擦力矩
figure(4),plot(t,ym);                     %绘制摩擦力矩随时间变化的曲线
xlabel('time /s')
ylabel('M')
zoom on;
[tt, ym]=ginput(2), zoom off;             %选择持续摩擦试验的起始点
MW=trapz(tt(1):tt(2),ym(tt(1):tt(2)))/(tt(2)-tt(1));
                                           %数值积分计算摩擦功
muaverage=MW/N/0.032                      %利用公式2-2计算距离平均摩擦系数
```

仍然以微晶玻璃/H300特种铸铁在法向压力0.1MPa，初速度为400rpm的试验数据为例，在图2-11上选取持续摩擦过程，其起始点分别为tt(1)和tt(2)，采用梯形积分法求得摩擦功，再根据公式(2-2)计算距离平均摩擦系数，即程序中muaverage值。

2.4.2 磨损量测量

使用 JA3003 精密电子天平称量试件的磨损量。最大量程为 300g，精度为 0.1mg。每一组实验（3~5 次制动）后清洁完称重。为避免温度的影响，试件须冷却到试验初始室温再进行称量。

2.4.3 摩擦面温度测量

每组试验完毕，摩擦表面温度测量是通过静试环上靠近摩擦表面安装的热电偶测得。通过测量摩擦表面温度，可以了解到试件在不同试验条件下的散热情况，有利于准确分析摩擦表面温升对材料摩擦磨损性能的影响。

2.4.4 磨损形貌的检测

在光学显微镜（OM）下观察试件的表面形貌，并用扫描电子显微镜（SEM）测定磨损前后测试区的表面能谱，完成对材料表面的微观结构分析。

2.4 试验步骤

① 清洗

在试验前，依次用清水、丙酮清洗试件表面，清除掉表面的灰尘杂质。

② 干燥

清洗完毕后，吹风机冷风吹干。

③ 称重

冷却至室温，放在精密电子秤上进行称重（精度为 0.1 mg），记录试验前质量。

④ 安装样品、输入试验参数

按照试验要求将微晶玻璃及其对磨副通过键槽固定在主轴轴筒中，罩上防护罩。在计算机软件操作界面输入试验的参数，频率为 20KHz。

⑤ 开始试验

在选定的试验条件下，先进行预磨合，试样表面摩擦面积达到 80%以上时开始摩擦试验。调节电机到预定的转速，稳定运行约 1 分钟后切断动力，加载设定的轴向压力，同时采集记录试验数据。试验过程中要时刻观察试验

机的运转状况，如试验机出现异常或测试显示不正常，立即停机检查。

⑥ 试验后处理

试验结束后，停机，卸下样品。存盘保存摩擦力矩电压信号数据；记录实验前后摩擦副表面间温度变化，记录转速。用丙酮清洗残留在样品上的磨屑；然后用吹风机吹干，冷却至室温后；用精密电子秤称重，记录试件的质量，计算试件的磨损量。

⑦ 重复试验

改变试验参数，进行下一组试验。每组实验重复 3~5 次，以避免出现个别情况影响实验准确性。平均摩擦系数取其平均值。

第 3 章 试验结果与讨论

摩擦磨损是一个复杂的过程，包括各种复杂的物理和化学现象。相对金属材料而言，人们对微晶玻璃材料摩擦学行为的认识还不是很充分。影响材料摩擦磨损性能的内因主要包括材料的力学性能及微观结构，外因主要包括载荷、速度、温度、环境气氛及对偶件的化学活性等。本文将这两种因素相结合来讨论微晶玻璃的摩擦磨损行为。

3.1 微晶玻璃/H300 特种铸铁

讨论了不同初速度、不同法向应力条件下摩擦系数的变化；以及初速度和法向应力对磨损量和摩擦表面温升的影响。

3.1.1 不同初速度下的摩擦系数变化曲线

图 3-1 是微晶玻璃/H300 特种铸铁在不同法向应力和初速度下的平均摩擦系数变化曲线。

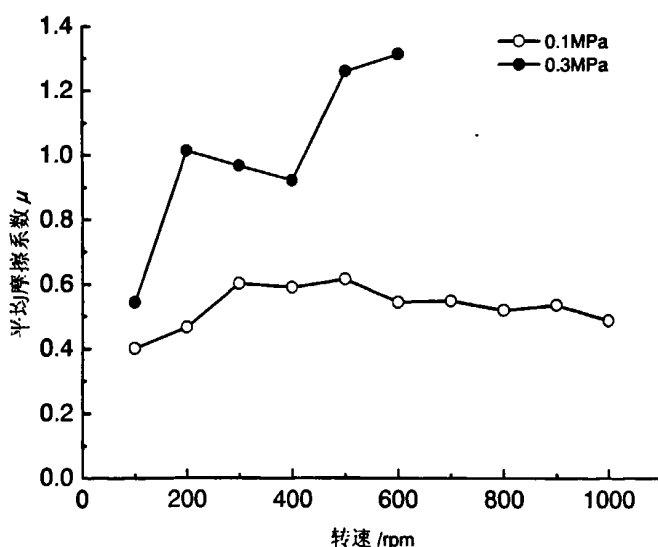


图 3-1 微晶玻璃/H300，不同初始转速下的平均摩擦系数

可以看出,法向应力为 0.1MPa,初速度在 100rpm~300rpm 区间,摩擦系数随着初速度的增大而陡增;初速度为 500rpm~1000rpm 时,摩擦系数随着初速度的增大呈小幅减小趋势;总之,在法向应力为 0.1MPa 的条件下,微晶玻璃/H300 的距离平均摩擦系数比较稳定 (0.40~0.60)。

法向应力为 0.3MPa 时,摩擦系数变化幅度比较大。可以看作三个阶段:第一阶段,初速度为 200rpm 的平均摩擦系数 (1.11) 比 100rpm 的平均摩擦系数 (0.55) 增大一倍;初速度由 200rpm 升高至 400rpm 时,摩擦系数呈现递减趋势;当初速度在 400rpm~600rpm 范围内时,摩擦系数又变现为随初速度的增大而增大。

总体来看,法向应力一定时,平均摩擦系数随初速度的变化比较多样;初始速度 (100rpm~600rpm) 一定时,法向应力为 0.3MPa 时的摩擦系数明显高于法向应力为 0.1MPa 时的摩擦系数,但由于其摩擦系数变化不稳定,故不建议将微晶玻璃/H300 特种铸铁作为配磨副用在类似工况的工程实际。

3.1.2 初速度和法向应力对磨损量的影响

图 3-2 表示的是微晶玻璃/H300 特种铸铁磨损量的变化。可以看出,法向应力一定的条件下,微晶玻璃的磨损量基本上随着初速度的增大而增大。

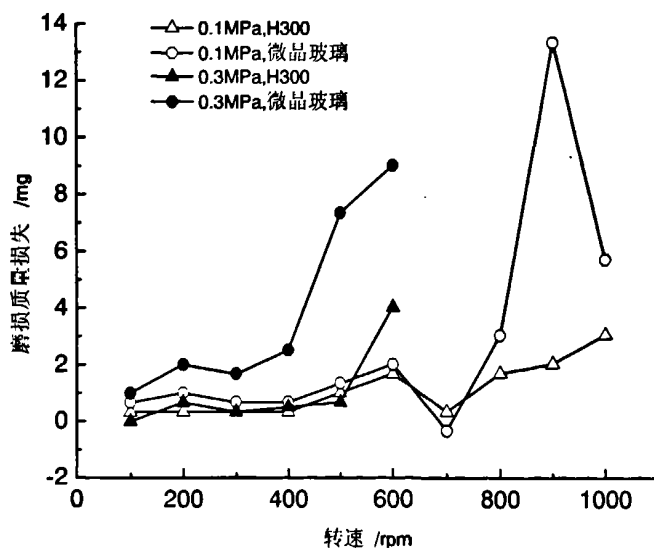


图 3-2 微晶玻璃/H300, 不同初始转速下的磨损量

当法向应力为 0.1MPa，速度小于 400 rpm 时，微晶玻璃与 H300 几乎没有质量损失；速度在 400~600 rpm 时，磨损量略增；速度在 700rpm 时，微晶玻璃的质量损失出现负值，可以推断摩擦过程中存在着质量依附与磨屑层转移；速度高于 700 rpm 时，H300 的磨损量随转速的提高而略增，微晶玻璃的磨损量明显比 H300 的磨损量大；微晶玻璃在 900 rpm 时的磨损量最大，约为 13 mg^[114]。由于实验初速度为 1000rpm 时，微晶玻璃发生脆性断裂，故可知微晶玻璃在 900rpm 的速度下已经处于严重磨损阶段，导致其磨损量陡增。

初速度(100rpm~600rpm)相同的条件下，微晶玻璃在法向应力为 0.3MPa 的磨损量明显大于法向应力为 0.1MPa 时的磨损量。

总体来看，试验条件一定时，微晶玻璃的磨损量要比其对磨副略大。

3.1.3 摩擦表面温升

不同的法向应力下，微晶玻璃/H300 特种铸铁摩擦表面温度随初速度的变化关系见图 3-3。

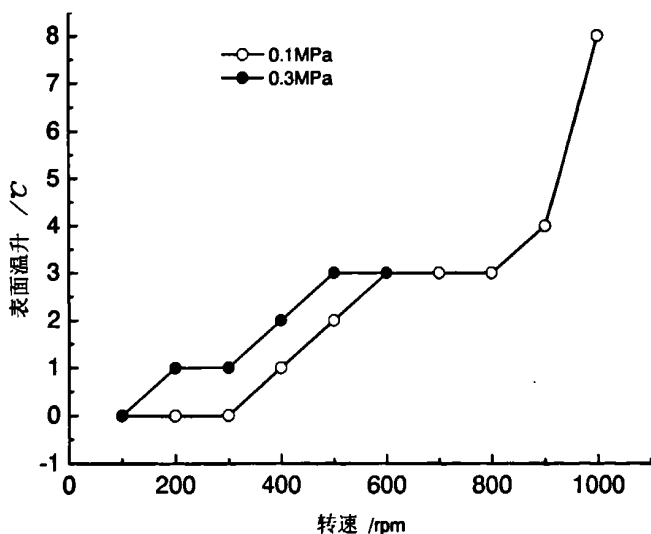


图 3-3 微晶玻璃/H300，不同初始转速下的表面温升

可以看出，法向应力一定时，摩擦表面的温升基本上随着初速度的升高而增大，由于初速度升高，制动时间延长，摩擦力做功增大，产生的摩擦热

增加, 所以摩擦表面的温度也升高; 转速 (100rpm~600rpm 区域) 相同的条件下, 法向应力增大, 摩擦表面的温升也增大。

3.2 微晶玻璃/45 钢

讨论了不同初速度、不同法向应力条件下摩擦系数的变化; 以及初速度和法向应力对磨损量和摩擦表面温升的影响。

3.2.1 不同初速度下的摩擦系数曲线

图 3-4 是微晶玻璃/45 钢在不同法向应力、不同初速度下的平均摩擦系数变化曲线。

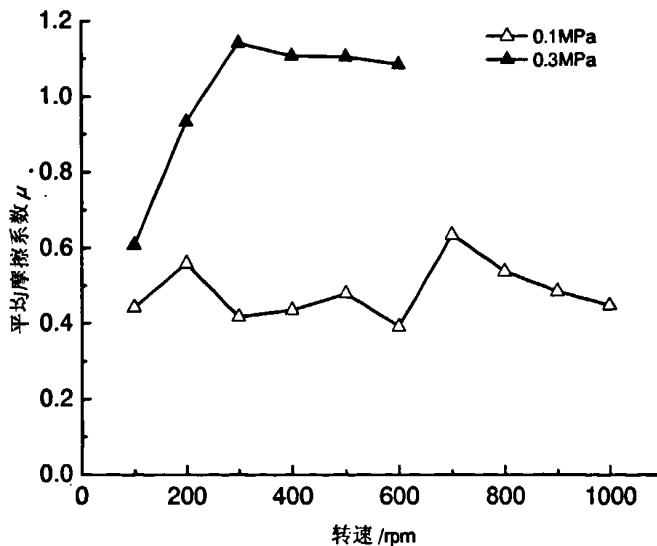


图 3-4 微晶玻璃/45 钢, 不同初始转速下的平均摩擦系数

法向应力为 0.1MPa 时, 摩擦系数变化可以大致分为三个阶段。第一阶段, 初速度低于 200 rpm, 摩擦系数随着转速的升高而略增; 第二阶段, 初速度 300rpm~600rpm, 微晶玻璃/45 钢的摩擦系数有小幅波动 (0.39~0.48); 第三阶段, 初速度为 700rpm, 微晶玻璃/45 钢的摩擦系数达到最大 (0.63); 当初始转速高于 700rpm, 摩擦系数随初速度的提高而减小 (0.44~0.53)。

法向应力为 0.3MPa, 以初速度 300rpm 为分界点, 其摩擦系数呈最大约

为 1.14；初速度小于 300rpm 时，摩擦系数随转速的升高而陡增；初速度大于 300rpm 时，摩擦系数随着转速的增大而趋于减小。总体来看，初速度大于 300rpm 后，摩擦系数变化相对平稳。

总之，法向应力一定，微晶玻璃/45 钢的平均摩擦系数随初速度的变化比较大；初速度一定时，法向应力增大，其平均摩擦系数也增大。法向应力为 0.1MPa 时的摩擦系数变化相对稳定，但稳定性没有微晶玻璃/H300 特种铸铁的好。

3.2.2 初速度和法向应力对磨损量的影响

图 3-5 是微晶玻璃/45 钢磨损量的变化。法向应力为 0.1MPa，初速度为 700rpm 的条件下，微晶玻璃的磨损量最大约 6.25mg；法向应力为 0.3MPa，初速度为 600rpm 时，45 钢的磨损量最大约 7.67mg，可能是由于此条件下，微晶玻璃出现脆性断裂，导致其质量严重损失；除此之外的试验过程中，微晶玻璃和 45 钢磨损量都不大。

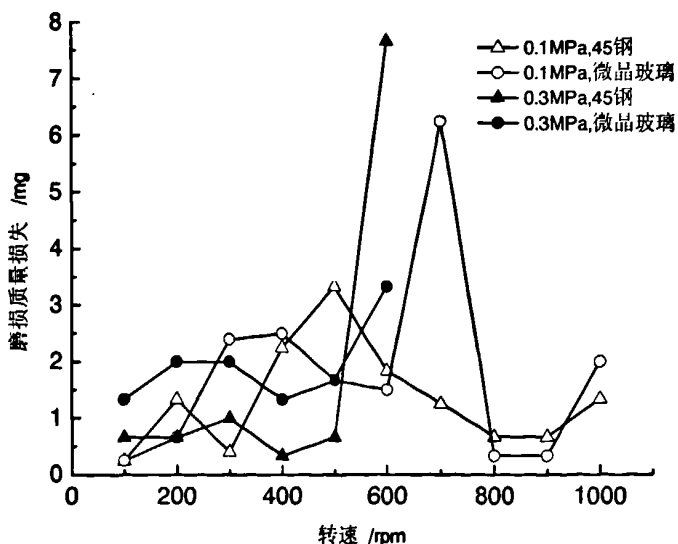


图 3-5 微晶玻璃/45 钢，不同初始转速下的磨损量

微晶玻璃/45 钢的摩擦磨损过程中以粘着磨损为主，整个磨损过程中，

两种材料的摩擦表面均出现材料黏附和转移，质量磨损变化没有明显的规律性。

3.2.3 摩擦表面温升

不同的法向应力下，微晶玻璃/45 钢摩擦表面温度随初速度的变化关系见图 3-6。

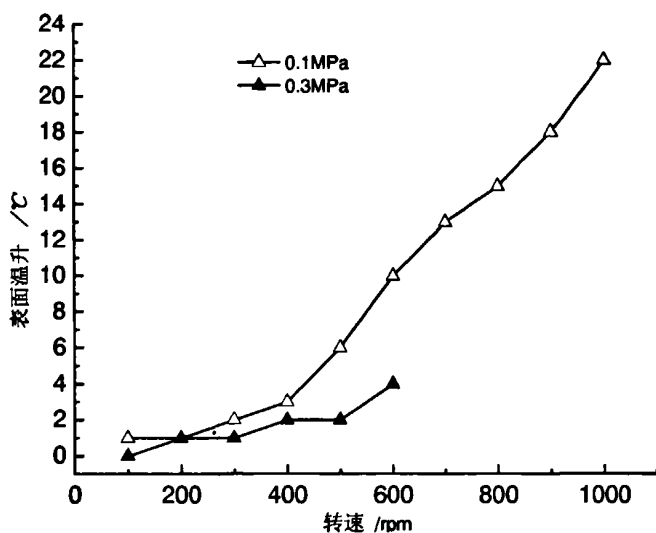


图 3-6 微晶玻璃/45 钢，不同初始转速下的表面温升

可以看出，法向应力一定时，随着初始速度的升高，微晶玻璃/45 钢的表面温升呈增加趋势。

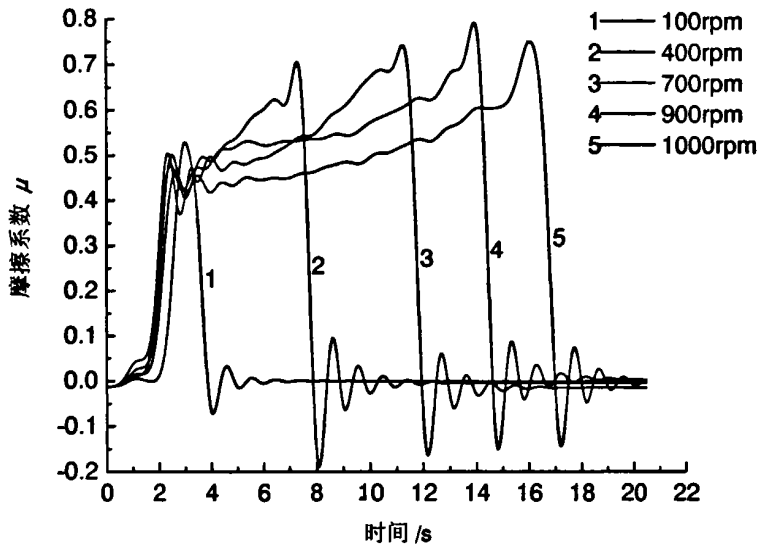
初速度（200rpm~600rpm）一定的条件下，法向应力增大为 0.3MPa 后，摩擦表面的温升反而小于 0.1MPa 时的温升，这点与微晶玻璃/H300 特种铸铁的现象不同。可能是转速一定的条件下，增大法向应力使微晶玻璃/45 钢的摩擦时间大大缩短，而 45 钢热敏性不好，所以摩擦产生的热量比较少，没有导致很高的表面温升。

3.3 两组对磨副的比较

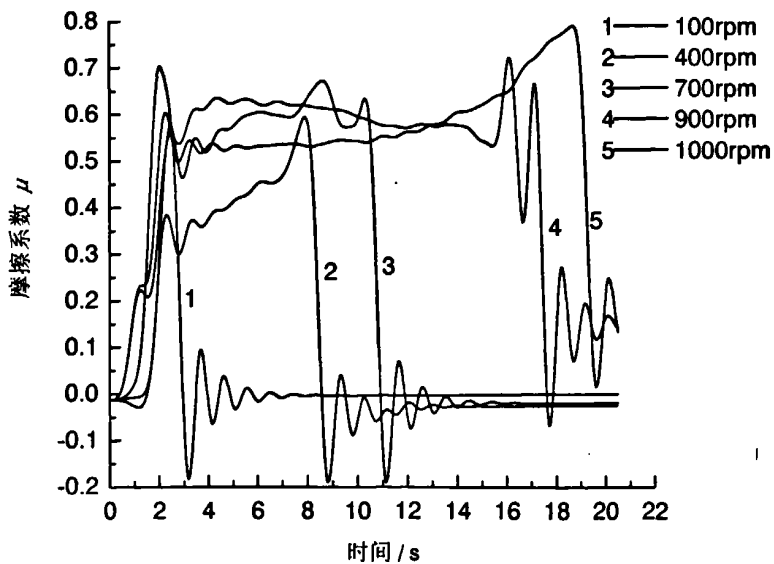
3.3.1 瞬时摩擦系数随时间的关系曲线

图 3-7 为瞬时摩擦系数随时间变化的曲线。可以看出，随着摩擦时间的

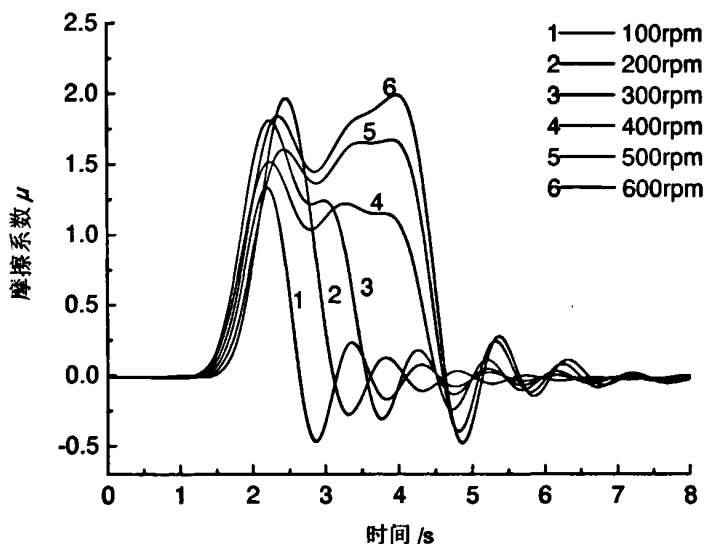
延长摩擦系数有较大的变化：在持续摩擦的初始阶段（约 1s），摩擦系数随摩擦时间的增加有所下降，这是因为摩擦面较大的初始表面粗糙度得到改善，增大了实际接触面积，因接触面摩擦力的变化而导致摩擦系数有所下降；当摩擦时间继续延长时，接触面工况恶化，摩擦副间材料出现相互粘附，摩擦系数又有所上升。



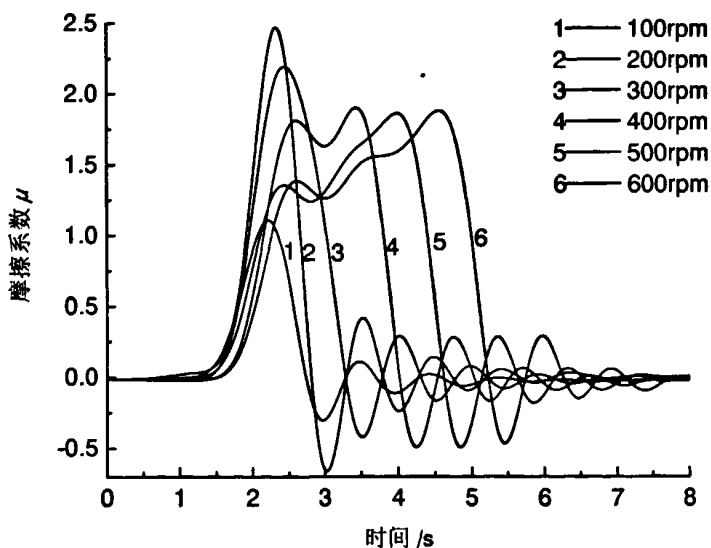
(a) 0.1MPa, 微晶玻璃/H300



(b) 0.1MPa, 微晶玻璃/45 钢



(c) 0.3MPa, 微晶玻璃/H300



(d) 0.3MPa, 微晶玻璃/45 钢

图 3-7 瞬时摩擦系数随时间的变化

图 3-7(c)显示, 初速度为 200rpm 和 300rpm 时, 微晶玻璃/H300 在持续摩擦过程中摩擦系数随着转速的降低是减小的, 这可能跟持续摩擦时间 (1~2s) 极短有关系。

3.3.2 平均摩擦系数随转速的关系曲线

图 3-8 是距离平均摩擦系数随初速度变化的关系。图 3-8 (a) 所示法向应力为 0.1MPa, 其摩擦系数变化大致分为三个阶段。在第一阶段, 初始转速低于 200 rpm, 摩擦系数都是随着初始转速的升高而增大, 此阶段微晶玻璃/H300 的摩擦系数略小于微晶玻璃/45 钢的摩擦系数; 第二阶段, 初始转速 300rpm~600rpm, 微晶玻璃/H300 的摩擦系数 (约为 0.6) 比微晶玻璃/45 钢的摩擦系数 (0.39~0.48) 大; 第三阶段, 初始转速为 700rpm, 微晶玻璃/H300 的摩擦系数约为 0.55, 而微晶玻璃/45 钢的摩擦系数达到最大 (0.63); 当初始转速高于 700rpm, 微晶玻璃同两种对磨件的摩擦系数趋于接近 (0.46~0.53), 均表现为随初始转速的升高而减小。

当初速度为分别为 100rpm、200rpm 以及 800rpm~1000rpm 时, 微晶玻璃/H300 的摩擦系数要比微晶玻璃/45 钢的小, 且变化趋势基本一致。前者表现为摩擦系数随着初速度的升高而增大, 后者的摩擦系数则随着初速度的升高而降低。在初速度为 200rpm 时摩擦系数差值约 0.1; 在初速度为 800rpm 时, 摩擦系数差别最小约 0.01。

初速度范围在 300rpm~700rpm 时, 微晶玻璃/H300 的摩擦系数大于微晶玻璃/45 钢的, 且两组摩擦系数的差别比较大, 但摩擦系数的变化趋势是一致的。两组摩擦副的摩擦系数差值最大为 0.19, 最小为 0.16。

整体来看, 法向应力为 0.1MPa 时, 在初速度为 300rpm~500rpm 的范围内, 微晶玻璃/H300 特种铸铁的摩擦系数比较大, 约为 0.6, 且变化趋势比较稳定。

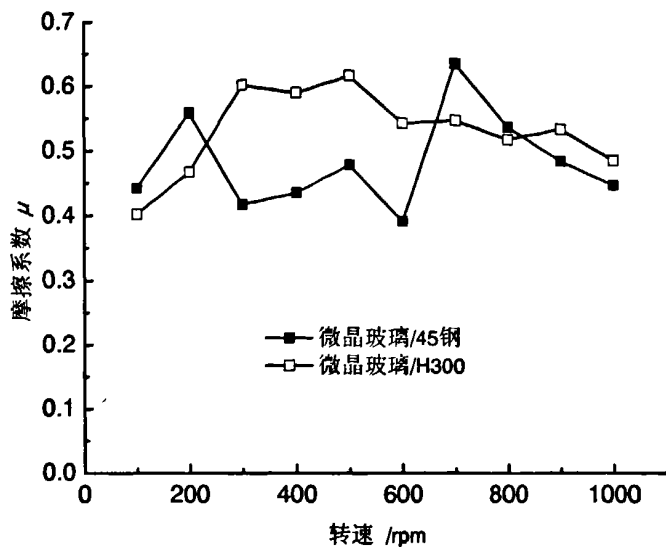
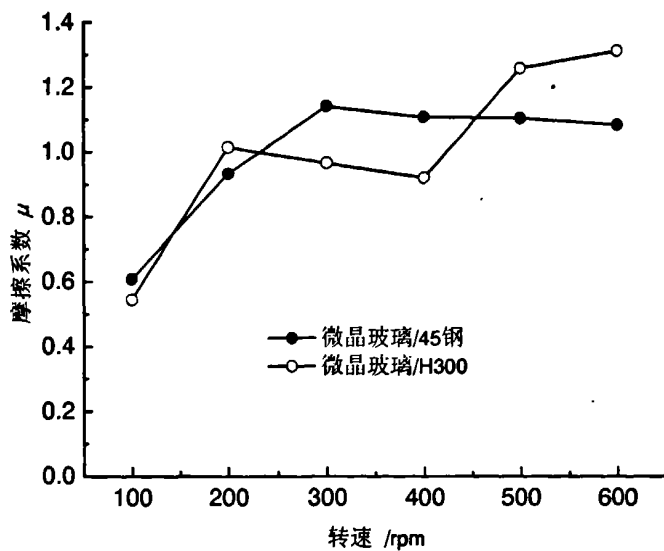
(a) $P=0.1\text{MPa}$ (b) $P=0.3\text{MPa}$

图 3-8 距离平均摩擦系数随转速的变化

图 3-8 (b) 所示为法向应力是 0.3MPa 的实验数据。由于两组对磨副均在初速度为 600rpm 的摩擦试验后出现断裂现象，故试验转速只选取 $100\text{rpm}\sim 600\text{rpm}$ 。

当初速度为分别为 100rpm 、 200rpm 时，两组摩擦副的摩擦系数变化趋

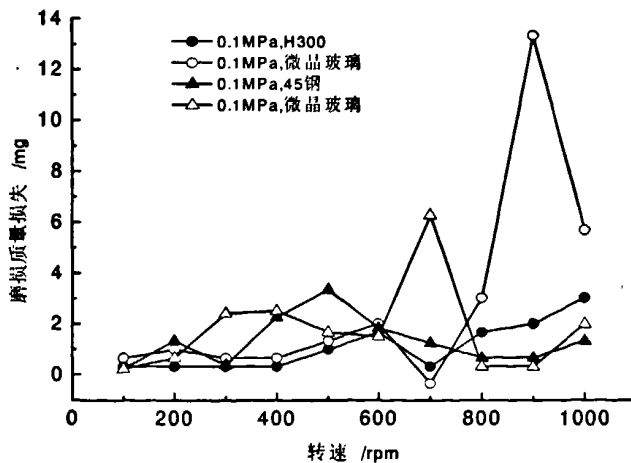
势一致,且摩擦系数值非常接近,差值约为 0.08;当初速度在 300rpm~600rpm 范围之内时,两组摩擦副的摩擦系数差别较大,初速度为 300rpm 和 400rpm 时,微晶玻璃/45 钢的摩擦系数要比微晶玻璃/H300 的摩擦系数的大,差值大致为 0.18,但其变化趋势是一致的;初速度为 500rpm 和 600rpm 时,微晶玻璃/H300 的摩擦系数大于微晶玻璃/45 钢的,差值最大约 0.19。

微晶玻璃/H300 的平均摩擦系数变化比较大,初速度为 600rpm 时,摩擦系数最大为 1.31。微晶玻璃/45 钢的平均摩擦系数变化较稳定,初速度由 100rpm 提高至 300rpm,平均摩擦系数随之增大;初速度在 300rpm~600rpm 区间,摩擦系数随着初速的增大而减小;其摩擦系数在 300rpm 初速度的条件下最大为 1.14。

整体来看,法向应力为 0.3MPa 时,在初速度为 300rpm~600rpm 的范围内,微晶玻璃/45 钢的摩擦系数比较大(约为 1.1),且变化趋势比较稳定,摩擦系数随着初速度的升高而降低,差值非常小。

3.3.3 磨损量

两组摩擦副在摩擦试验过程中的质量磨损对比见图 3-9。可见 0.1MPa 的法向应力条件下(图 3-9a),两组对磨副中,微晶玻璃都有个别转速下质量磨损特别严重的情况。总体来看,微晶玻璃及其对磨副的质量磨损都比较小(0~4mg)。



(a) $P=0.1\text{MPa}$

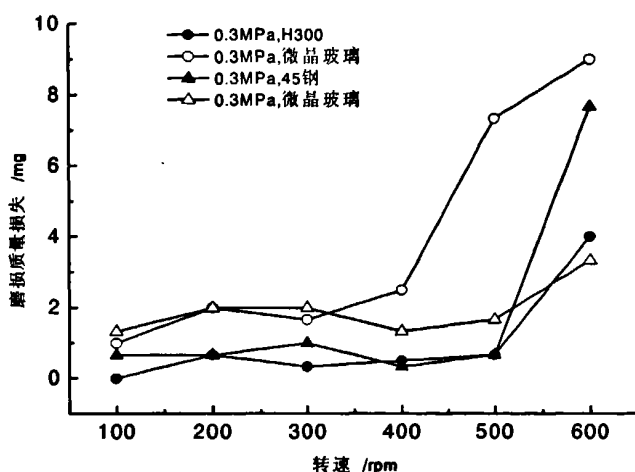
(b) $P=0.3\text{MPa}$

图 3-9 磨损量随转速的变化

法向应力为 0.3MPa (图 3-9b), 初速度为 600rpm 条件下, 微晶玻璃在摩擦试验结束后发生断裂, 产生很多块状剥落, 同时块状颗粒严重擦伤其对磨件, 所以微晶玻璃及其对磨件的磨损量都达到最大; 整体来看, 初速度在为 100rpm~500rpm 时, 微晶玻璃的磨损量明显比其对磨件大 1~2mg。

3.3.4 摩擦表面温升

摩擦热引起的表面温升是干摩擦运动的主要特点^[115]。试验表明, 摩擦表面的温度不仅是摩擦表面吸收功率的一种度量, 也是摩擦副对法向应力、摩擦时间和摩擦初速度适应能力的反映, 直接影响摩擦材料的使用性能和使用寿命, 是导致摩擦副失效的主要因素^[116]。摩擦热不仅影响摩擦系数而且也影响到材料的热衰退性, 而热衰退性是摩擦材料的重要技术指标^[117]。

图 3-10 显示了摩擦过程中初速度对摩擦表面温度的影响。可以看出, 随着初速度的升高, 两组对磨副的表面温升都呈增加趋势, 这是因为初速度较大时摩擦消耗的功率也较大, 发热量增大, 所以温升增高。

微晶玻璃/45 钢的表面温升比微晶玻璃/H300 特种铸铁的高。当速度高于 600rpm 时, 微晶玻璃/45 钢的表面温升比微晶玻璃/H300 的表面温升高 10 度左右, 可能是由于特种铸铁 H300 比 45 钢更利于散热的缘故。

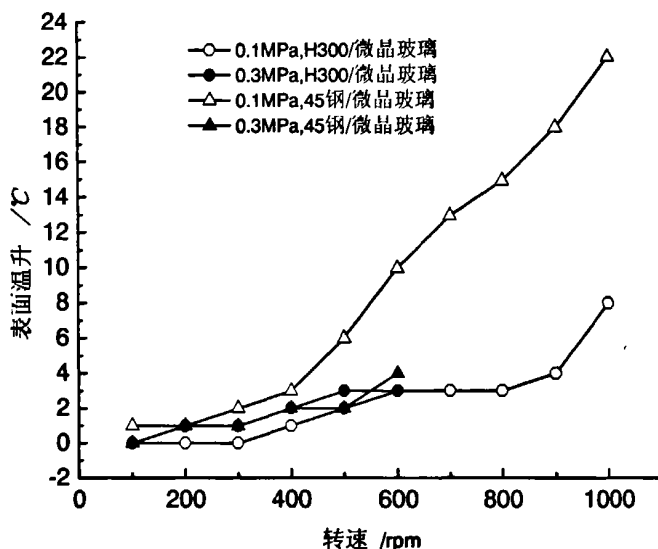


图 3-10 初速度对摩擦表面温升的影响

3.4 小结

1、在法向应力和初始转速一定的条件下，摩擦系数在制动最初阶段（约 1s）随着转速的下降而减小，之后随着转速的降低摩擦系数呈增大趋势；持续摩擦过程中的瞬时摩擦系数随着转速的降低而增大。

2、微晶玻璃/H300 摩擦副的距离平均摩擦系数比较稳定，微晶玻璃/45 钢摩擦副的距离平均摩擦系数变化比较大。

3、法向应力一定，转速不同的条件下，微晶玻璃及对磨件的磨损量均不大，但微晶玻璃的磨损量会在某一转速下突然增大，且远大于该条件下对磨副的磨损量。

4、由实验中摩擦表面的温升数据可得，微晶玻璃/H300 摩擦副的接触表面温升略低于微晶玻璃/45 钢。

5、微晶玻璃/H300 摩擦副的持续摩擦时间比微晶玻璃/45 钢摩擦副的持续摩擦时间要短；微晶玻璃/H300 摩擦副的持续摩擦过程比微晶玻璃/45 钢摩擦副的持续摩擦过程稳定。

第 4 章 摩擦磨损机理分析

4.1 磨损形貌

4.1.1 微晶玻璃/H300 特种铸铁

图 4-1 所示为法向应力为 0.1MPa 的条件下,微晶玻璃/H300 对磨后的表面形貌。

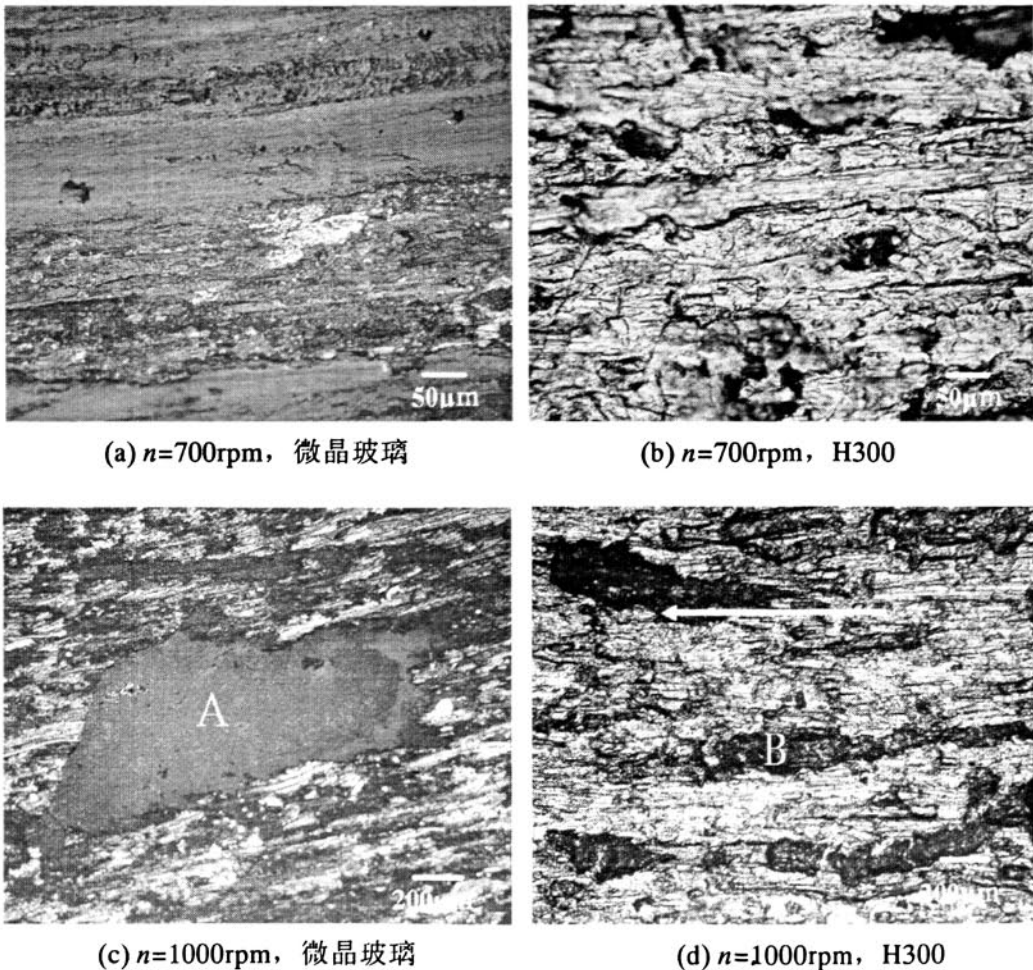
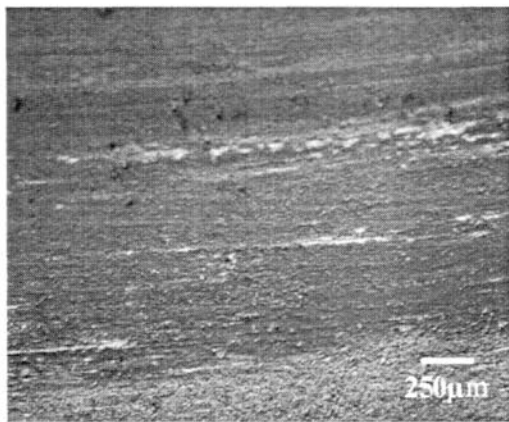


图 4-1 0.1MPa, 微晶玻璃/H300 对磨后的光镜图片,箭头所示为摩擦方向

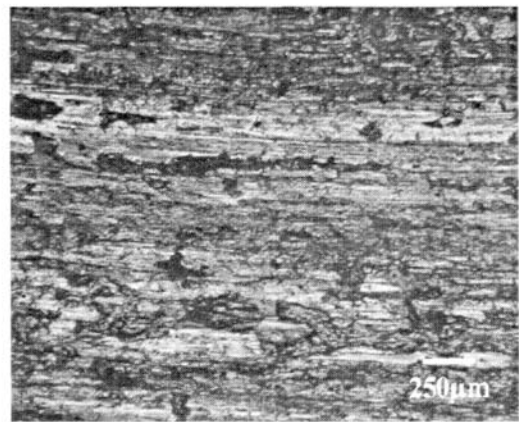
可见,初始转速为 700rpm 时,微晶玻璃和 H300 磨损现象并不严重,微

晶玻璃表面有少许的颗粒剥落，H300 特种铸铁表面有点蚀坑，应该是微晶玻璃表面未及时排出的硬质细小颗粒压入使然。在 1000rpm 时，微晶玻璃的剥落颗粒略增，在摩擦副之间形成摩擦第三体，使微晶玻璃表面出现较大区域的擦伤（图 4-1c 中 A 区）；同时对 H300 表面产生犁削作用，在摩擦方向上形成条状沟壑（图 4-1d 中 B 区）^[118]。

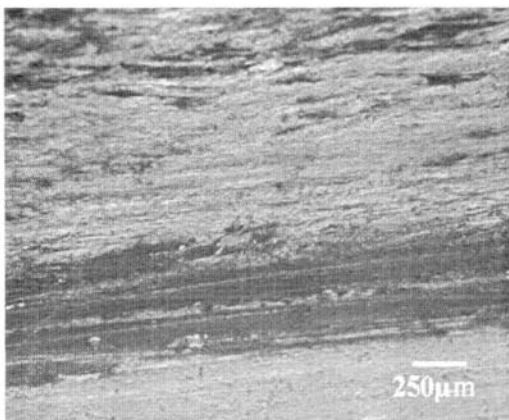
图 4-2 所示为法向应力为 0.3MPa 的条件下，微晶玻璃/H300 对磨后的表面形貌。可见，初速度为 500rpm 时微晶玻璃表面有大量细小的磨屑，形成微凸第三体，磨痕比较浅。微晶玻璃表面的硬质点对摩擦对偶形成轻微的擦伤和压入麻点，以及较浅的犁沟（图 4-2a 和图 4-2b）。



(a) $n=500\text{rpm}$ ，微晶玻璃



(b) $n=500\text{rpm}$ ，H300



(c) $n=600\text{rpm}$ ，微晶玻璃



(d) $n=600\text{rpm}$ ，H300

图 4-2 0.3MPa，微晶玻璃/H300 对磨后的光镜图片

从图 4-2 (c) 和 4-2 (d) 看出，微晶玻璃表面出现明显的磨痕和颗粒状

磨屑。H300 特种铸铁表面出现较多平行与摩擦方向的犁沟，应该是微晶玻璃发生脆性剥落之后，形成的颗粒未及时排出，在对磨副之间形成第三体磨粒磨损，颗粒对 H300 进行微观切削形成犁沟；同时硬质颗粒在摩擦过程的碾压中入相对软的对磨副中形成剥蚀坑，从而导致在应力集中的区域产生无规则的微裂纹。

总之，可以看出，初速度升高，摩擦副表面形貌损伤也随之加重。微晶玻璃/H300 特种铸铁的磨损失效以磨粒磨损、塑性变形、疲劳裂纹为主。

4.1.2 微晶玻璃/45 钢

图 4-3 所示为法向应力为 0.1MPa 的条件下，微晶玻璃/45 钢对磨后的磨痕表面形貌。与 H300 不同，45 钢表面在沿着摩擦方向形成了连续交错叠加的“S”形磨损形貌，且随着试验初始转速的提高而增多。

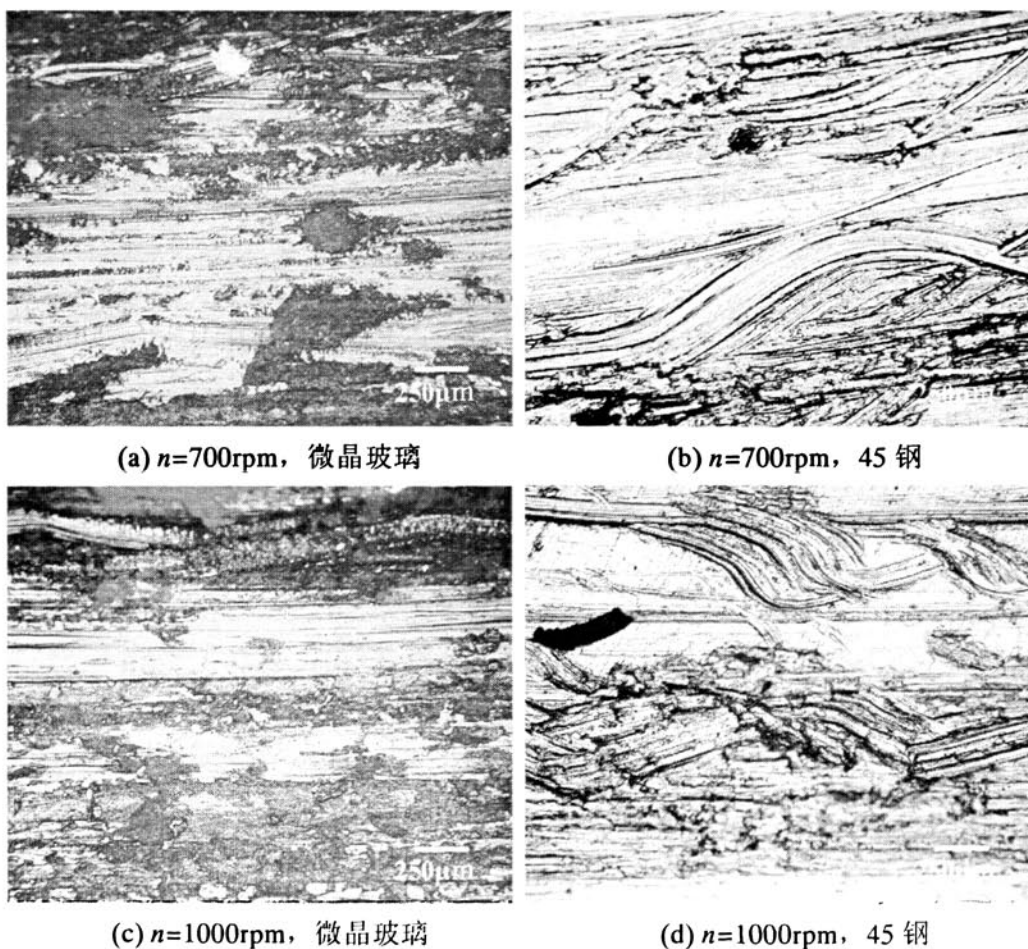
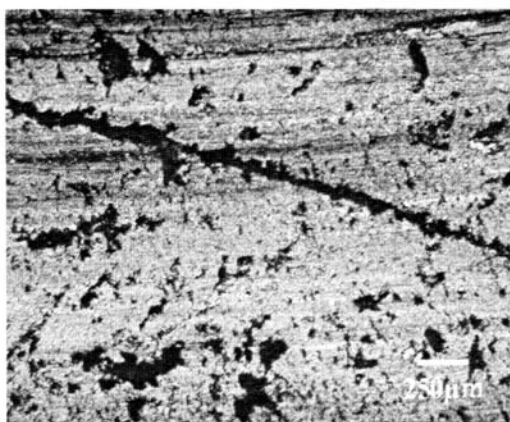


图 4-3 0.1MPa，微晶玻璃/45 对磨后的光镜图片

由图 4-3 (a)、(c) 可知, 微晶玻璃表面附着的金属元素也随着初始转速的提高而增多, 图中白亮区域为微晶玻璃基体, 黑色区域为对偶件的转移元素。试验过程中观察到, 在初始转速为 700rpm 时, 微晶玻璃由于摩擦热未能及时散发, 出现了火花, 其高温对摩擦副的烧蚀作用伴随着粘着磨损, 导致其“S”形表面形貌的产生(见图 4-3b 和图 4-3d)。

图 4-4 所示为法向应力为 0.3MPa 的条件下, 微晶玻璃/45 钢对磨后的磨痕表面形貌。由图 4-4 (a) 和图 4-4 (b) 看出, 微晶玻璃表面出现很多点蚀坑, 并在倾斜于摩擦方向上出现微裂纹; 45 钢表面在接近平行于微晶玻璃裂纹的方向上出现很多细细的擦伤痕迹, 这是由于微晶玻璃的裂纹边缘有尖锐的硬质点, 使得裂纹边缘表面变得非常粗糙, 在摩擦实验中粗糙表面对 45 钢产生了较浅的犁削作用。



(a) $n=300\text{rpm}$, 微晶玻璃



(b) $n=300\text{rpm}$, 45 钢



(c) $n=600\text{rpm}$, 微晶玻璃



(d) $n=600\text{rpm}$, 45 钢

图 4-4 0.3MPa, 微晶玻璃/45 对磨后的光镜图片

由图 4-4 (c) 和 4-4 (d) 可见, 当初速度升高时, 微晶玻璃表面也出现类似“S”形的形貌, 磨屑相对变多且呈浪花状; 45 钢表面的“S”变得相对密集而短促, 且犁沟加深。可能是由于 45 钢硬度比 H300 特种铸铁的硬度小, 且 45 钢的散热性能没有 H300 特种铸铁好, 导致了两种对磨副表面磨损形貌的差异。

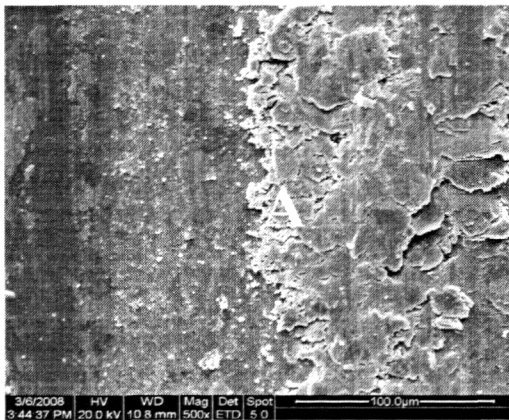
可以认为: 微晶玻璃/45 钢的磨损方式以粘着磨损、磨粒磨损、疲劳微裂纹和犁削为主。

4.2 元素转移

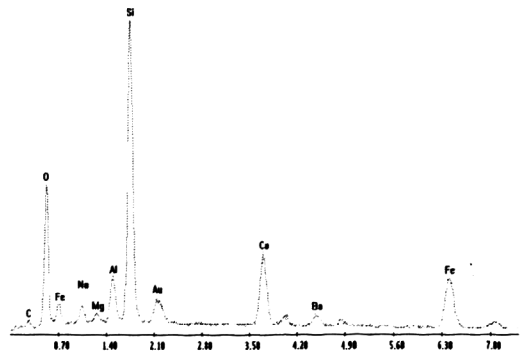
4.2.1 微晶玻璃/H300 特种铸铁

图 4-5 所示微晶玻璃/H300 对磨后的表面形貌。

如图 4-5(a), 微晶玻璃在有较多粘着物的部位(A 区)进行能谱分析, 发现表面有转移的 Fe 元素, 并有少许的微晶玻璃颗粒剥落。这说明在干摩擦条件下微晶玻璃与对磨副发生了粘着磨损和磨粒磨损。



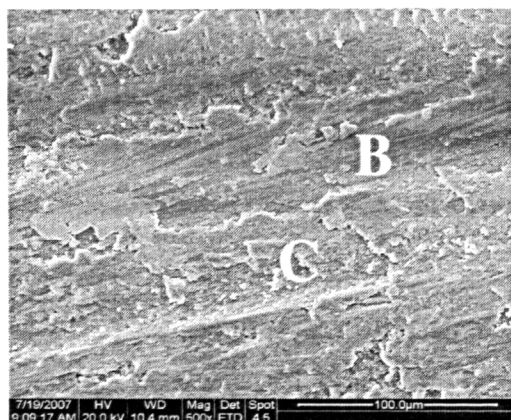
(a) 微晶玻璃 SEM



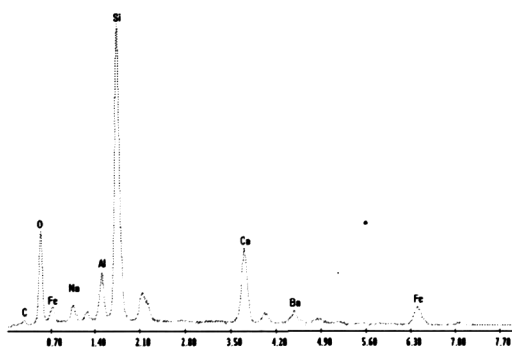
(b) 微晶玻璃 A 区 EDX

图 4-5 $P=0.1\text{MPa}$, $n=1000\text{rpm}$, 微晶玻璃/H300 对磨后的扫描电镜图片

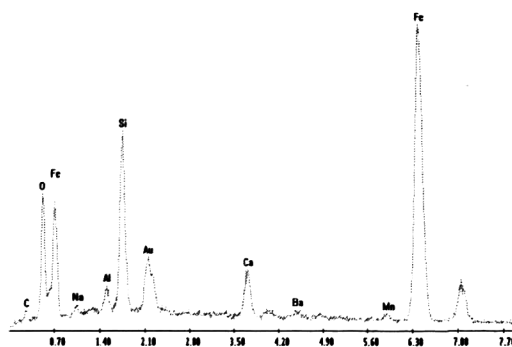
如图 4-6, B 区为磨痕呈犁沟状, 成分以微晶玻璃元素为主, 有少量 Fe 元素粘着; C 区为摩擦转移层, Fe 元素明显增多。表明, 磨损过程以犁削和磨屑层转移为主。



(a) 微晶玻璃 SEM



(b) 微晶玻璃 B 区 EDX



(c) 微晶玻璃 C 区 EDX

图 4-6 $P=0.3\text{MPa}$, $n=600\text{rpm}$, 微晶玻璃/H300 对磨后的扫面电镜图片

4.2.2 微晶玻璃/45 钢

图 4-7 所示微晶玻璃/45 钢对磨后的表面形貌。

如图 4-7(a), 与相同试验条件下的微晶玻璃/H300 对磨后的磨损形貌类似, 微晶玻璃表面布满云层状磨屑。

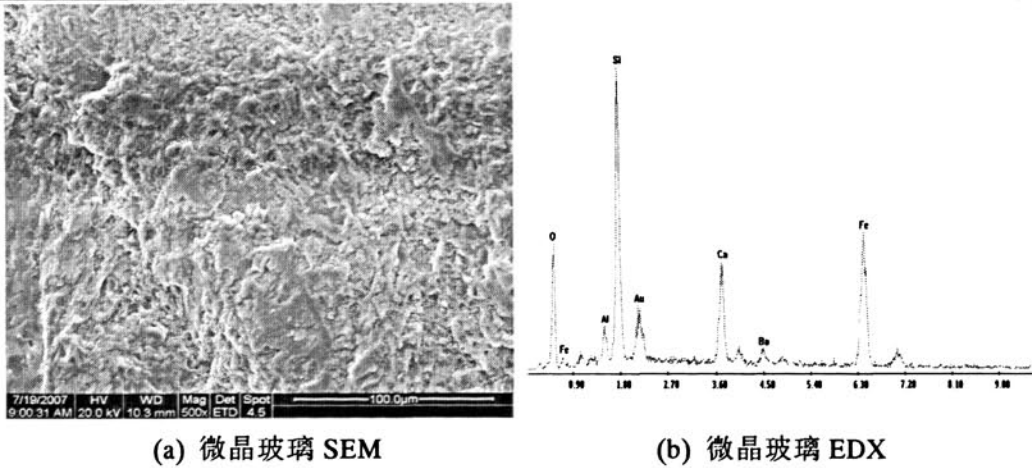


图 4-7 $P=0.1\text{MPa}$, $n=1000\text{rpm}$, 微晶玻璃/H300 对磨后的扫描电镜图片

如图 4-8(a), 与相同试验条件下的微晶玻璃/H300 对磨后的磨损形貌类似, 但表面有大量的微晶玻璃颗粒; D 区为大块磨屑, Fe 元素比较多。可知磨损过程中存在犁削、磨粒磨损及元素转移等磨损方式。

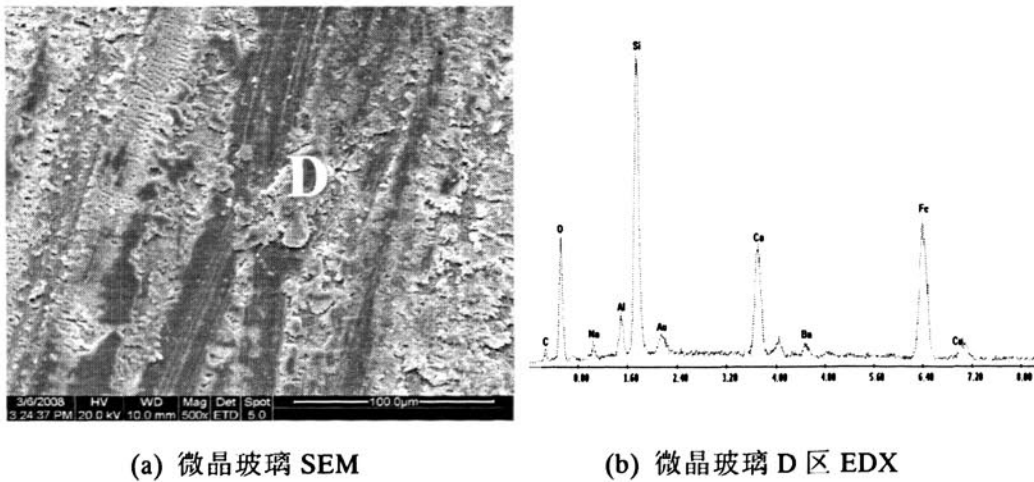
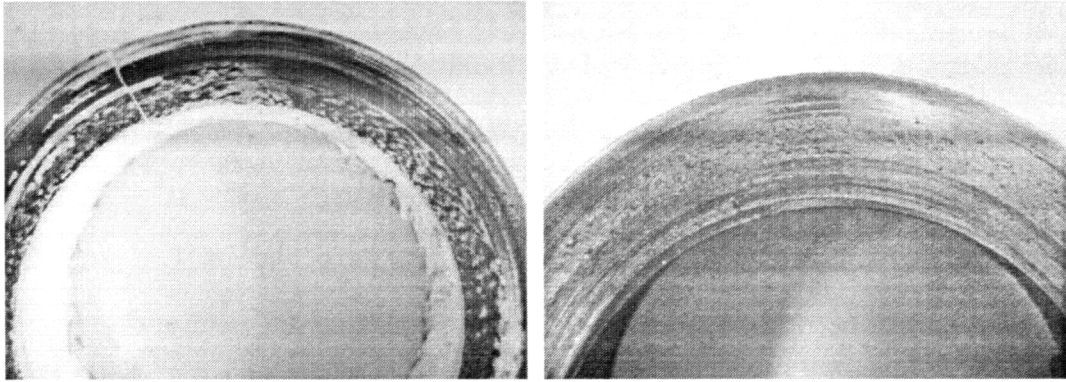


图 4-8 $P=0.3\text{MPa}$, $n=600\text{rpm}$, 微晶玻璃/45 钢对磨后的扫描电镜图片

4.3 磨损失效机理探讨

从磨损后的宏观形貌来看, 微晶玻璃的磨损形貌主要以金属元素附着、犁沟和脆性断裂, 断裂裂纹方向或垂直或倾斜于摩擦方向 (见图 4-9a 和图 4-10a)。H300 特种铸铁的磨损形貌主要表现为粘着撕裂和点蚀坑 (见图 4-9b)。45 钢的磨损形貌主要为犁沟和块状剥落坑, 且 45 钢表面的犁沟明显

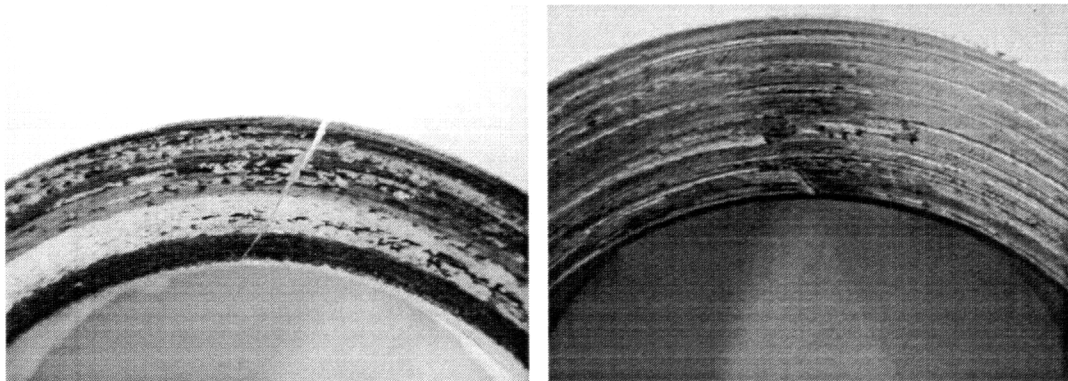
比 H300 特种铸铁的多而且深（见图 4-10b）。



(a) $P=0.3\text{MPa}$, 微晶玻璃

(b) $P=0.3\text{MPa}$, H300

图 4-9 微晶玻璃/H300 对磨后的宏观形貌



(a) $P=0.3\text{MPa}$, 微晶玻璃

(b) $P=0.3\text{MPa}$, 45 钢

图 4-10 微晶玻璃/45#钢对磨后的宏观形貌

4.3.1 塑性变形

在磨损的早期阶段，微晶玻璃及其对磨副的表层往往产生晶粒塑性变形和犁沟。最初对磨副表面会形成环形摩擦痕，随着时间的延长，摩擦表面出现块状或者片层状剥落磨屑，由于不能及时排除摩擦表面，表面的磨屑被不断的碾碎，故又在摩擦表面形成第三体磨粒磨损。韧性材料（对磨副）组织缺陷处多为浅层剥落裂纹源，由于该处切应力最大，故塑性变形最剧烈，在接触应力作用下，材料局部弱化，该处首先形成裂纹，金属的疲劳裂纹正是

这种交替滑移产生累积损伤的结果。压应力可在缺口前端产生局部塑性变形，之后造成累计损伤，最后形成疲劳点蚀或浅层剥落。浅层剥落主要是裂纹开始在循环接触表面平行发展一段后，才产生垂直于表面或倾斜的分支裂纹(图 4-2b)。当扩展至表面时产生剥落，进而形成麻坑^[119]。

4.3.2 磨屑层的形成

试验过程中出现粘着磨损，摩擦热使摩擦表面温度升高，致使摩擦表面出现粘着撕裂或擦伤的损伤形貌，期间伴随有对偶材料元素的转移。其微观机理包括摩擦表面磨屑层的形成和破坏^[120]。在法向压力作用下，摩擦表面上形成磨屑层，也导致了对磨副之间的元素转移；随着摩擦表面的相对滑动，摩擦表面的部分碎屑发生脱落，从而导致磨屑层破坏。从宏观角度来看，摩擦副的厚度和质量将发生变化，即发生线性磨损和部分质量损失。本文采集了质量损失进行分析研究。

4.3.3 摩擦副的疲劳破坏

裂纹在试件表面形成，主要为径向裂纹和侧向裂纹，并从表面沿与加载方向成一定角度向试件内部扩展，使微晶玻璃表面的陶瓷晶粒均发生晶间断裂与穿晶断裂^[121]。而微晶玻璃的破坏形式主要是接触疲劳破坏，导致材料表面出现点蚀和脆性剥落直至疲劳断裂。分析如下：

1. 微晶玻璃摩擦表面在法向应力作用下，法向应力和切向力将通过接触点的作用传递到次表层、基体，在这些力的作用下，微晶玻璃表面上较硬的凸点将变形。

2. 表层附近晶粒塑性滑移的积累导致在微晶玻璃亚表层中形成微裂纹源。在法向应力和摩擦力的进一步作用下，微晶玻璃摩擦表面被反复挤压，表层同时产生剪切应变。随着塑性变形区内位错密度增加，反复的弹性变形和晶粒塑性滑移又使位错集中；离表面一定距离的亚表层也出现位错塞积而产生滑移，继而发展成平行于表面的横向裂纹以及垂直于表面的纵向裂纹。

3. 一旦在亚表层中形成了裂纹，随着碾压和滚动次数的增加将使裂纹扩展、长大，相邻裂纹连通，并在一定深度处扩展。

4. 在载荷作用下，这些裂纹在某些薄弱位置最终向表面扩展，形成一个

薄碎片磨屑从磨损表面剥落出来。由于微晶玻璃是脆性材料，剥落断裂处呈现明显的脆性断裂特征如图 4-7 和 4-8。

4.4 小结

- 1、在室温、干摩擦条件下，微晶玻璃及其对磨副的主要磨损方式有：
轻微塑性变形、粘着磨损、磨粒磨损和疲劳断裂等。
 - 2、整个试验过程中磨损现象主要表现为：
塑性变形、微观犁削、磨屑层的形成、表面元素的转移、表面裂纹的产生及扩展、剥层脱落和疲劳脆性断裂等。
-

结论与展望

主要结论

当代国际摩擦学研究的重点从金属材料转移到微晶玻璃材料及其复合材料。研究表明,不同材料组成摩擦副的摩擦磨损特性是不同的^[122]。这方面的研究虽然取得了一定的成果,但系统的研究比较微晶玻璃配对摩擦副的摩擦磨损特性还不多。本文研究了微晶玻璃/H300 特种铸铁、微晶玻璃/45 钢摩擦副在室温干摩擦条件下的摩擦磨损行为与机制,并对其磨损特性进行比较,为选择摩擦学构件时合理应用微晶玻璃提供一定的理论依据。

本文通过对微晶玻璃/H300 特种铸铁和微晶玻璃/45 钢两种摩擦副的摩擦磨损特性的研究,得到以下结论:

一、摩擦系数:

1. 法向应力和初始转速一定,两组摩擦副的瞬时摩擦系数变化一致。即在制动最初阶段(约 1s)随着转速的下降而减小,之后随着转速的降低摩擦系数呈增大趋势;持续摩擦过程中的瞬时摩擦系数随着转速的逐渐降低而增大。

2. 法向应力一定,两组摩擦副的距离平均摩擦系数随初速度的变化比较大,没有规律可循。有待后续工作者的深入研究。

3. 初速度一定,法向应力由 0.1MPa 增大至 0.3MPa,两组摩擦副的距离平均摩擦系数均大幅增大。

4. 在法向应力为 0.1MPa 的条件下,两组摩擦副的摩擦系数变化均相对平稳,不过微晶玻璃/H300 的稳定性要好于微晶玻璃/45 钢。

法向应力为 0.3MPa 的条件下,微晶玻璃/H300 的摩擦系数变化幅度太大,故不建议在类似的工况下,选择它们作为配磨副;而微晶玻璃/45 钢在初速度为 300rpm~600rpm 的范围内,摩擦系数比较稳定。

二、磨损量:

1. 总体来看, 在正常磨损阶段, 微晶玻璃及对磨副的磨损量都不大。仅在个别情况下磨损量出现异常, 诸如摩擦表面出现质量依附和粘结时, 磨损量可能减小; 而进入严重磨损阶段, 微晶玻璃发生断裂, 出现大片片层状剥落, 导致微晶玻璃磨损量剧增。

2. 微晶玻璃/H300 特种铸铁的配磨试验中, 当法向应力一定时, 磨损量基本上随着初速度的升高而增大; 当初速度一定时, 法向应力由 0.1MPa 增大至 0.3MPa, 磨损量也随之增大。

3. 微晶玻璃/45 钢的配磨试验中, 磨损量变化没有呈现出明显的规律性。

三、摩擦表面温度变化:

1. 法向应力一定, 两组配磨副的表面温升均随初速度的升高而增大。

2. 初速度一定, 微晶玻璃/H300 特种铸铁摩擦副的表面温升随着法向应力的增大而增大; 而微晶玻璃/45 钢摩擦副的表面温升则相反。

3. 法向应力和初速度均相同的条件下, 微晶玻璃/H300 特种铸铁摩擦副的表面温升基本上都比微晶玻璃/45 钢小。

四、摩擦磨损机制:

微晶玻璃及其对磨副的主要磨损方式为: 轻微塑性变形、粘着磨损、磨粒磨损、疲劳断裂等。摩擦过程中伴随有犁削、磨屑层的形成、表面元素转移、表面裂纹的产生及扩展、剥层脱落和疲劳脆性断裂等现象。

总之, 在室温干摩擦条件下, H300 特种铸铁比 45 钢的散热性要好, 呈现出良好的摩擦稳定性。当初速度在 100rpm~1000rpm 的范围内, 法向应力为 0.1MPa 的条件下, 微晶玻璃/H300 特种铸铁的摩擦系数比较大(0.4~0.6), 变化趋势也相对稳定。

研究展望

本文对微晶玻璃/H300 特种铸铁、45 钢配磨的摩擦磨损行为进行了初步研究, 为微晶玻璃应用于结构耐磨件提供了一定的理论依据, 但由于时间和客观条件所限, 仍有许多问题需要进一步分析和探讨。

1. 深入研究材料的表面形貌、接触形式及运动条件对微晶玻璃耐磨性能

的影响。建立材料的摩擦学特性与载荷、速度、时间及环境等变量变化之间的函数关系图，以便于在研究和应用中正确选择、设计和使用；

2. 采集摩擦过程中的振动信号，进而分析转速对摩擦副磨损量的影响机理；

2. 采用强韧化技术对微晶玻璃表面处理，改善材料脆性，尽量减少材料微裂纹的产生，从而进一步提高其耐磨性；

3. 研究水或油等不同介质对微晶玻璃摩擦磨损特性的影响，探讨其耐腐蚀性能；

4. 采集减速摩擦过程中的噪声并加以分析，研究其噪声的发生机理以及减少摩擦噪声的技术^[123]；

5. 建立微晶玻璃材料的力学性能与耐磨性之间的关系。深入分析微晶玻璃摩擦磨损的本质规律，便于有目的地调整材料的性能以提高其耐磨性。

烧结法微晶玻璃的耐磨性能是其内在质量的外在表现。必须从提高其晶相和玻璃相的耐磨性以及烧结质量，减少表面缺陷等几个方面同时入手，消除其内部结构中的薄弱环节^[124]。

采用工业废渣为原料制造的矿渣微晶玻璃不仅具有性能优异、成本低廉、用途广泛等优点，而且对于“三废”利用，综合治理环境污染等都有重要的意义。

致 谢

本论文是在陈光雄教授的精心指导和周仲荣教授的悉心关怀下完成的。感谢陈教授在我试验研究工作中的悉心指导和谆谆教诲。陈教授严谨求实的学风、孜孜不倦的教导、平易近人的作风使我受益匪浅。感谢周教授对我生活上给与的帮助和对课题选择上的支持。

在摩擦所的生活和学习期间，李炜博士给予我很多关心和帮助，在此对李炜博士表示由衷的感谢。科研过程中，摩擦学研究所的朱昊昊教授、刘启跃教授、钱林茂教授和郑靖副研究员等老师潜心钻研、精益求精的精神，使我备受感染，各位老师科研上的忘我精神激励着我在工作和学习中要时刻积极进取。感谢石心余高工在试验中给与细心的帮助和潜移默化的教导，我自身解决问题的能力 and 自觉动手的能力由此得到极大的提高。同时感谢吴乐轩高工、武劲松师傅的大力支持和帮助。感谢王文健、丁涛博士，以及李灵敏、贾步超、何宏高和张大鹏等全体研究生对本论文工作的热心帮助！

衷心感谢我的家人和朋友对我的关心与支持，几年来正是在他们无私的支持与关怀下，我才能潜心研究，并完成此论文。

此外，本论文的研究工作得到了国家自然科学基金创新研究群体项目(50521503)资助，在此一并感谢！

参考文献

- [1] Lin M H, Wang M C. Phase transformation and characterization of TiO_2 and ZrO_2 addition in the $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ gels. *J. Material. Res*, 1996, 11(10): 2611-2619
- [2] Stookey S D. *Glastochn. Ber*, 1959, K32
- [3] Li.Rouan, Zhu Peinan. Phlogopite-based glass ceramic *J.Non-Cry. Solids*, 1986; 80(3): 600-605
- [4] Reisfeld R. Potential uses of chromium(III)-doped transparent glass ceramics in tunable lasers and luminescent solar concentrators. *Mater. Science& Eng*, 1985, 71(2): 375-380
- [5] Bhargava A, Shelby J E, Snyder R L. Crystallization of glasses in the system $\text{BaO}-\text{TiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3$. *J.Non-Cry. Solids*, 1988, 102(1): 136-140
- [6] Takayuki Komatsu, Chisai Hirose, Tomohiro Ohki. Super conducting-coupling nature at grain boundaries in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ glass-ceramic. *J.Am.Ceram. Soc*, 1993, 76(7): 1885-1889
- [7] 陈建华, 孙方明. DTA 在锂铝硅透明微晶玻璃研究中的应用. *玻璃与搪瓷*, 1995, 24(1): 13-16
- [8] Doenitz FD, Russ C, Vogel W. *J. Non-Cry. Solids*, 1982, 53: 315-319
- [9] 邢军, 宋守志. 金矿尾砂微晶玻璃的制备. *中国有色金属学报*, 2001, 11 (4): 319-323
- [10] 乔冠军, 金志浩. 微晶玻璃的发展——组成、性能及应用, *硅酸盐通报*, 1994, 23(4): 52-56
- [11] 沈定坤. 微晶玻璃的组织、结构与性能. *玻璃与搪瓷*, 1989, 19 (6): 26-32
- [12] 陈千. $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系烧结微晶玻璃的初始相变. *陶瓷研究*, 1998, 21(1): 3-6
- [13] 朱时珍, 张飞鹏. 生物玻璃的烧结与析晶. *硅酸盐通报*, 1993, 21 (5):

421- 427

- [14] Watanabe K, Giess E A. Coalescence and crystallization in powdered high-cordierite($2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$). *J. Am. Ceram. Soc.*, 1985, 68(4): 102-108
- [15] Roger P S, Williamson J. The nucleation of crystalline phase in silicate glasses containing iron oxides. *Glass Tech*, 1969, 10(5): 128-132
- [16] Beall G H, Duck D A. *J. Mater. Sci.*, 1969, 4: 340
- [17] 李有光, 龚七一. 利用铬渣制造玻璃建筑装饰板. *环境科学*, 1991, 15(6): 41-42
- [18] 赵鹏, 张良莹. 复相功能玻璃陶瓷及其溶胶-凝胶法制备. *功能材料* 2000, 15(1): 15-17
- [19] 岳振星, 周剂. 铁氧体-微晶玻璃纳米复合材料的结构与性能. *无机材料学报*, 1999, 14(3): 375-380
- [20] Kamitani K, et al. Synthesis and optical property of TPP derivative-doped silica gels prepared by sol-gel process. *Proc. of 17th Inter. Conf. on Glass*, 1995, 4: 538-542
- [21] Bentivegna F. Magnetically textured $\text{Y}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ Nan particles in a silica gel matrix structure and magnetic properties. *J. APP. Phy*, 1998, 83(12): 22-26
- [22] Yao Kui, Zhang Liangying, Yaoxi, et al. preparation and properties of Barium Titanate glass-ceramic sintered from sol-gel derived powder. *J. Mater. Sci*, 1997, 32(14): 3659-3666
- [23] W. Vogel, Holand W. *15th Int. Cong. Glass*, 1989, 3a: 102-107
- [24] Abe Y. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1984, 87(7): 142-148
- [25] Seiicki Taruta, Kazuya Mukoyama. Crystallization process and some properties of calcium mica-apatite glass-ceramic. *J. Non-cryst. solids*, 2001, 296: 201-211
- [26] Davis J B, Marshall D B, Hensley R M. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1998, 81: 2169-2173
- [27] Watanabe K, Giess EA. Coalescence and crystallization in powdered high-cordierite($\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$). *J. Am. Ceram. Soc.*, 1985, 68(4): 102-108
- [28] 贾德昌, 周玉. 热压对 $\text{SiO}_2\text{f}/\text{SiO}_2$ 复合材料结构与力学性能的影响. 宇
-

- 宙材料工艺, 2001, 6(1): 29-31
- [29] 黄步玉, 任立军. 短切碳纤维对玻璃陶瓷力学性能的影响. 广西有色金属学报, 2000, 10(2): 125-128
- [30] Oscar Peital, Edgar Dutra Zanotto. Highly bioactive $P_2O_5-Na_2O-CaO-SiO_2$ glass-ceramic[J]. J Non-Cry Solids, 2001, 292: 115-126
- [31] Moisescu C, Hoche T. Influence of the Ca/P ratio on the morphology of fluorapatite crystals in $SiO_2-Al_2O_3-CaO-P_2O_5-K_2O-F$ glass-ceramic[J]. J Non-Cry Solids, Solids, 2001, 289: 123-134
- [32] Wang PW, Zhang L P, Lu L, et al. Surface modification of lead silicate glass under X-ray-irradiation[J]. Applied Surface Science, 1995, 84: 75-33
- [33] Liu Y(刘越), Yu BH(于宝海), Wang Z B(王镇波), et nl. A study on the wear and friction behaviours of TiC/NiCr cermets (TiC/NiC 金属陶瓷复合材料摩擦磨损性能)[J]. tribology (摩擦学学报), 2000, 20(2): 90-94
- [34] Xiang Z X(项忠霞), Cheu S C(陈树昌). Wang Z(王铮), et al. Study on the tribological behavior of Si_3N_4 ceramic against chilled cast iron(Si_3N_4 陶瓷/冷激铸铁的摩擦学性能研究)[J]. Tribology(摩擦学学报), 2000, 20(3): 183-185
- [35] John A, Topping. The fabrication of glass-ceramic materials based on blast furnace slag-A review, Journal of the Canadian ceramic Society, 1976, 45(7): 63-67
- [36] Maxghussion V K, Dayi Niaki M H. Effects of composition changes and the crystallizations behavior and properties of $SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO$ glass-ceramic. Journal of European Ceramic Society, 1995, 15(4): 343-348
- [37] Rocabocs P, Pontoire J N. Crystallization kinetics of $Al_2O_3-CaO-SiO_2$ based oxide inclusions. J.Non-Cryst. Solids, 2001, 282: 98-109
- [38] Sridharan S.J. Non-Cryst. Solids, 1995, 182(3): 262-268
- [39] Abe Y, Kasuga T, Hosono H, et al. preparation of high-strength calcium phosphate glass-ceramic by unidirectional crystallization. J.Am. Ceram. Soc, 1984, 67(7): 42-46

-
- [40] Stookey S D. U.S. Patent, 1954, NO.2684911
- [41] Simpson HE. *GlassEnd*, 1959, 40(1): 13-18
- [42] Aitken B G. 15th Int.Cong.Glass3, 1989, 3a: 96-101
- [43] Kim H S, Rawlings R D, Rogers P S. Sintering and crystallization phenomena in silceramglass. *J.Mater. Sci*, 1989, 24(3): 1025-1029
- [44] Negro A, Bachiorrin A. Use of blast-furnace slags in the preparation of glass-ceramic. *Ceram. Inf(Faenza)*, 1978,13(9): 523-528
- [45] Davies M W, Kerrison B, W.E.Gross, et al. Slagceram-a glass ceramics from blast furnace slag. *Jnl, iron & steel Inst*, April, 1979: 348-354
- [46] Roger P S, Williamson J. The nucleation of crystalline phase in silicate glasses containing iron oxides. *Glass Tech*, 1969, 10(5): 128-131
- [47] 肖汉宁, 邓春明, 彭文琴. 工艺条件对钢铁废渣玻璃陶瓷显微结构的影响. *湖南大学学报*, 2001, 28 (1): 135-139
- [48] 陈惠君, 董大奎, 陈云芳等. 钢渣玻璃及微晶玻璃的研究. *玻璃与搪瓷*, 1988, 16(2): 1-7
- [49] Beall G H, Duck D A. *J.Mat. Sci*, 1969, 57(4): 340-343
- [50] Jen-yen Hsu, Robert F. Comparison of the effects of Titania and Tantalum oxide nucleating agents on the crystallization of $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-6\text{SiO}_2$ glasses. *J.Am.Ceram. Soc*, 1989, 72(12): 2334-2341
- [51] 李拓文, 张家鹿, 赵效忠. 微晶玻璃. *中国玻璃*, 1992, 21 (1) : 28-32
- [52] Moisescu C, Hoche T. Influence of the Ca/P ratio on the morphology of fluorapatite crystals in $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O}-\text{F}$ glass-ceramic. *J. Non-Cry. Solids*, 2001, 289: 123-134
- [53] Chyung C K, Beall G H, Grossman D G. 10th Int. Cong. Glass, 14, 1974: 33-40
- [54] 陈伟民, 陈楷, 邓再德. 氟硅酸盐微晶玻璃的结构与性能. *硅酸盐通报*, 1998, 15(2): 39-42
- [55] Daniels W H, Moore R E. Crystallization of a tetrasilic fluormica glass. *J.Am.Ceram.Soc*, 1975, 58(5): 117-120
- [56] Vogel W, W.Holand, K. Naumann, *J.Non-Cry. Solids*, 1982, 53: 315
- [57] 李拓文, 张家鹿. 微晶玻璃. *中国玻璃*, 1992, 21(1): 28-32
-

-
- [58] 王艳丽, 沈菊云. TiO_2 对菁青石基微晶玻璃的分相与晶化的影响. 玻璃与搪瓷, 2000, 28(2): 21-26
- [59] Atkinson D I H, Mcmillan P W. *J.Mater. Sci*, 1997,12: 443-448
- [60] Abe Y, Kasuga T, Hosono H. *J.Am.Ceram. Soc*, 1984, 67(7), 142-147
- [61] 程慷果, 万菊林, 梁开明. 具有定向显微结构的高强云母微晶玻璃. 材料研究学报, 1997, 1(3): 309-311
- [62] Sambell R A J, Bowen D H, Phillips D C. *J. Mater.Sci*,1972, 7: 676
- [63] 张波. 博士学位论文. 西安: 西北工业大学, 1996
- [64] Gadkaree KP. Whisker reinforcement of glass-ceramic *Journal of Materials Science*, 1991, 26(3): 4845-4854
- [65] 黄积强, 黄清伟, 件亚红. 短碳纤维增强玻璃陶瓷基复合材料制备与机械性能. 西安交通大学学报, 1997, 31(3): 97-102
- [66] Blum.Y.D.*J. Am. Ceram.Soc.* 1990, 73(1): 1700-1702
- [67] Brzesowsky RH.*J. Non-Cryst.Solids*, 1998, 241: 27-37
- [68] 方平安, 吴召平. 溶胶-凝胶涂层增强锆云母微晶玻璃. 无机材料学报, 2001, 16(1): 153-156
- [69] Duck D A, Mac Dowell J F, Karstetter B R. Crystallization and chemical strengthening of nepheline. *J.Am.Ceram.Soc*,1967, 50(3): 67-70
- [70] 陈伟民, 陈楷. ZrO_2 在微晶玻璃中的增韧作用. 材料科学与工程, 1998, 16 (3): 73-77
- [71] Nogami M. *Journal of Materials Science*, 1991, 26(13): 3665-3669
- [72] 赵运才. 耐磨铝硅酸盐微晶玻璃的制备及其摩擦学特性研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2003, 29
- [73] Grossman D G. *Adv.in Ceramic*, *Am.Ceram. Soc*, 1982: 249
- [74] B.Thomas, Troczynski. *J.Am.Ceram. Soc*, 1991, 74(8): 1803-806
- [75] Wolfgang, Winter. *J.Am.Ceram. Soc*, 1993, 76(7): 1837-842
- [76] 王德平. 具有梯度构造的 $\text{CaO-P2O5-A12O3-B2O3}$ 系统微晶玻璃的制作. 玻璃与搪瓷, 1999, 27(1): 1-5
- [77] 岳钟英、周平安、王斌, 《冷敷耐磨胶粘涂层的工艺及其磨损机理的研究》, 1988, 10
- [78] Eutectic Castolin Institute Plant Manager No.29
-

-
- [79] 《保养焊接》1988 粘第 1 期（总第 3 期）（北京）卡斯特林公司咨询示范与培训部
- [80] 《高分子合金修补剂及应用技术》，中国技术进出口总公司，（美国）贝尔佐纳高分子合金修复技术服务中心
- [81] DIAMANT TRADITION 1986（产品介绍说明书）
- [82] 胡大樾，林亨耀等.《环氧耐磨涂层及其应用》.机械工业出版社，1987，12
- [83] Wang P W, Zhang L P, Lu L et al. Surface modification of lead silicate glass under X-ray-irradiation. *Applied Surface Science*, 1995, 84: 75-83
- [84] 周俊琪，张敏刚，王永兰.微晶玻璃的疲劳行为.太原重型机械学院学报，1996，17(4)：339-344
- [85] Okazaki M, Mcevely A J, Tanaka T. *Metall. Trans.* 1991, 22A: 1425-1426
- [86] 周俊琪，王立新.玻璃陶瓷在循环应力作用下的疲劳研究.太原重型机械学院学报，1997，18(2)：174-178
- [87] 周俊琪，王灵卉.玻璃陶瓷疲劳断裂的宏观规律研究.材料科学与工艺，1998，6(1)：73-77
- [88] 周俊琪，张敏刚，王永兰.微晶玻璃在不同介质中的静疲劳特性.太原重型机械学院学报，1997，18(1)：54-59
- [89] Kitaoka S, Tsuji T, Katoh T. Tribological characteristics of Si_3O_4 ceramics in high temperature and high pressure water. *J.Am. Ceram. Soc.*, 1994, 77: 580-588
- [90] Dong X, Jahanmir S. Wear transition diagram for silicon nitride. *Wear*, 1993, 165: 169-180
- [91] Gates R S, Hsu S M and Klaus E E. Tribochemical mechanism of alumina with water. *Tribology Transactions*, 1989, 32(3): 357-363
- [92] 邓琪玲译，O. C. a A n B n й H H A 等著.玻璃陶瓷材料的磨蚀过程，建筑新科技，1995(4)：48-49
- [93] Kitaoka S, Tsuji T, Katoh T. Tribological characteristics of Si_3O_4 ceramics in high temperature and high pressure water. *J.Am.Ceram.Soc.*, 1994, 77: 580-588
- [94] 何峰，钮锋，姜广辉，等.烧结法建筑装饰微晶玻璃冲蚀磨损研究[J].
-

-
- 武汉理工大学学报, 2003, 25(3): 17-19
- [95] P.Vantomme, P.Deprez, A.Comet. Study of glass ceramic materials interfaces[J]. Material Letters, 1998, 36(5-6): 315-319
- [96] Dalverny, O.Vie tribologique à chaud et température interfaciale dans des contacts céramiques[D]. Ph.D. thesis, Bordeaux University, France, 1998
- [97] 薛群基, 刘惠文, 陶瓷摩擦学-陶瓷的摩擦与磨损. 摩擦学学报, 1995, 15(4): 376-384
- [98] Liu Ning, Hu Zhenhua, Cui Kun. Ti(C,N) based cements and its fractal analysis of fracture surfaces. Trans Nonferrous Met Soc China, 1996, 6(2): 101-104
- [99] Okada K, Ban T, Yasumori A. Immiscibility phase-separation in Al_2O_3 - SiO_2 system and crystallization of mullite. European J Solid State and Inorganic Chemistry, 1995, 32: 683-692
- [100] Wang J. Fatigue Fract of ZrO_2 Ceramics. Engng.Mater. Struct, 1994, 17(4): 105-111
- [101] 刘敏. 反应烧结 SiC 陶瓷摩擦磨损性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005
- [102] 段仁官, 梁开明, 顾守仁. 玻璃分相形貌和玻璃陶瓷力学性能之间的关系[J]. 西南交通大学学报, 1998, 33(1): 61-66
- [103] 程慷果, 万菊林, 梁开明. 氧化锆增韧微晶玻璃的制备[J]. 硅酸盐学报, 1998, 26(3): 365-368
- [104] 邹林华, 黄勇等. C/C 复合材料的显微结构及其与工艺性能的关系[J]. 新型炭材料, 2001, 16(4): 63-70
- [105] 田晓. 陶瓷材料摩擦副的摩擦磨损特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2003, 16
- [106] 高志, 潘红良. 《表面科学与工程》. 华东理工大学出版社. 2006, 48
- [107] 国家级微晶材料产业基地商业计划书, 成都清大华科微晶材料有限责任公司
- [108] 梁爽. 车辆制动摩擦特性及摩擦颤振的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005, 22
-

-
- [109] Stanton K, Hill R. The role of fluorine in the devitrification of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-CaF}_2$ glasses [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 20: 1911-1916
- [110] Mussler B H, Shafer M W. Preparation and properties of cordierite-based glass-ceramic containing precipitated ZrO_2 [J]. *American Ceramic Society Bulletin*, 1985, 64 (11): 1459-1462
- [111] 李康, 汽车摩擦材料行业技术发展问题的再思考
- [112] 潘守芹. 新型玻璃. 上海: 同济大学出版社, 1992, 57-58
- [113] 梁爽, 陈光雄, 戴焕云, 曾京, 周仲荣. 四种车辆制动闸瓦材料摩擦特性试验研究 [J]. *润滑与密封*, 2006, (3): 62
- [114] 李海丽, 陈光雄, 周仲荣. 微晶玻璃/H300 铸铁、45[#]钢低速摩擦学性能试验研究[J]. *润滑与密封*, 2008 (2): 28
- [115] 张永振. 铸铁的干滑动摩擦磨损. 专题论述——铸铁的干滑动摩擦磨损 (2). 2000: 19-21
- [116] 张友森, 楼浩良, 瞿玉生. 石棉摩擦材料/钢摩擦副许用温度的试验研究. *润滑与密封*, 2000 (5): 19-21
- [117] H. Jang, K. Ko, S. J. Kim, et al. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*, 2003, 256: 406-414
- [118] 李海丽, 陈光雄, 周仲荣. 微晶玻璃/H300 铸铁、45[#]钢低速摩擦学性能试验研究[J]. *润滑与密封*, 2008 (2): 28
- [119] 徐红岩, 李国平. 1999 年 9 月第 5 工程陶瓷疲劳磨损件能研究. 天津城市建设学院学报卷第 3 期
- [120] Awasthi S, Wood J L. C/C Composites Materials for Aircraft Brakes [J]. *Advanced Ceramic Materials*, 1988, 3: 449-451
- [121] 赵运才. 耐磨铝硅酸盐微晶玻璃的制备及其摩擦学特性研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2003, 98
- [122] 田晓. 陶瓷材料摩擦副的摩擦磨损特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2003, 75
- [123] 陈光雄, 周仲荣. 摩擦噪声有限元预测[J]. 成都: 西南交通大学, 2007, 43 (6): 164
-

-
- [124] 邹林华, 黄勇等. C/C 复合材料的显微结构及其与工艺性能的关系[J].
新型炭材料, 2001, 16 (4): 63-70
-

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 李海丽, 陈光雄, 周仲荣. 微晶玻璃/H300 铸铁、45[#]钢低速摩擦学性能试验研究. 润滑与密封 2008, 33 (2): 26-29
 - [2] 孔梅, 李炜, 李海丽, 刘夕东, 周仲荣. 四种常用假肢材料与人体皮肤摩擦学特性的研究. 生物医学工程学杂志
-