

铜基复合材料的载流摩擦磨损研究进展

舒鑫^{1,2} 刘洋赈^{1,2} 李卫^{1,2}

(1.暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院; 2.暨南大学高性能金属耐磨材料技术国家地方联合工程研究中心)

摘要 载流摩擦磨损是电接触系统和机械摩擦系统共同耦合作用的结果。随着科技的快速发展,载流摩擦材料的服役工况愈加苛刻,设计开发高强高导、耐磨损性能优异的载流摩擦副材料尤为迫切。铜基复合材料是通过在铜或铜合金基体中加入不同种类、控制成分含量,从而得到不同结构性能的增强相制成的高强高性能复合材料,其在保留铜基体高导电性等优良性能的同时,又能实现耐高温、耐腐蚀、耐磨损等特点,可作为一种理想的摩擦副材料。以载流摩擦副材料的服役工况特点、性能要求、失效形式等为基础,综述了铜基复合材料的分类、特点及其在载流摩擦工况下的研究现状与进展,并对铜基复合材料载流摩擦副的发展趋势做出展望。

关键词 载流摩擦;铜基复合材料;摩擦磨损;磨损机制

中图分类号 TG146.1¹;TB331

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Current-carrying Friction and Wear of Copper Matrix Composites

Shu Xin^{1,2}, Liu Yangzhen^{1,2}, Li Wei^{1,2}

(1.Institute of Advanced Wear-resistant Corrosion and Functional Materials, Ji'nan University;

2.National Joint Engineering Research Center of High Performance Metal Wear

Resistant Materials Technology, Ji'nan University)

Abstract: Current-carrying friction and wear is the result of coupling between electrical contact system and mechanical friction system. With the rapid development of technology, the service conditions of current-carrying friction materials become severer, therefore, it is particularly urgent to design and develop high-strength, high-conductivity, wear-resistant current-carrying friction pair materials. Copper matrix composite is a kind of high strength and high performance composite by adding different types of reinforcement phase into the copper or copper alloy matrix to control composition and structural properties. The composites can retain excellent properties of copper matrix such as high conductivity, and realize high temperature resistant, corrosion resistance, wear resistance and other excellent characteristics, which can be used as an ideal material of friction pair. Based on the characteristics in service, performance requirements and failure modes of current carrying friction pair materials, the classification, characteristics and research status and progress of copper matrix composites under current carrying friction condition were reviewed, and the development trend of copper matrix composites was prospected.

Key Words: Current Carrying Friction, Copper Matrix Composites, Friction and Wear, Wear Mechanism

载流摩擦磨损是指摩擦副材料在有电流通过的服役工况下相对运动时产生的摩擦磨损行为。载流摩擦磨损广泛存在于铁路轨道交通、航空航天、电子电器、军事武器装备等领域,如高速电气化铁路的受电弓滑板和接触线、电磁轨道炮的电枢和导轨材料、高压开关的接触头等都是常见的载流摩擦副材料^[1~5]。由于电场的介入,载流摩擦过程是电摩擦系统和机械摩擦系统的耦

合作用,是一种完全不同于传统机械磨损的特殊复杂工况^[6,7]。因此,载流摩擦副材料应具有良好的导电、导热性,优异的耐磨蚀性能、减摩耐磨性和润滑性等。

铜及其合金因具有良好的导电导热性能、耐电磨损性而被广泛地用于载流摩擦副的触头、接触线等生产^[8,9]。但随着高速电力机车等应用领域的快速发展,载流摩擦副的服役条件越来越苛刻,现有的铜及其合金

收稿日期:2021-07-15;修改稿收到日期:2021-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1804252);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2020A1515111067)

第一作者简介:舒鑫,女,1996年出生,硕士研究生,广州(510632),E-mail:1692520250@qq.com

通信作者:刘洋赈,男,1989年出生,讲师,广州(510632),E-mail:yangzhenliu@jnu.edu.cn

李卫,男,1963年出生,教授,广州(510632),E-mail:Lwxasn@sohu.com

引用格式:舒鑫,刘洋赈,李卫. 铜基复合材料的载流摩擦磨损研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(4):419-424.

SHU X, LIU Y Z, LI W. Research progress in current-carrying friction and wear of copper matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):419-424.

已无法满足载流摩擦的服役要求^[10~12]。为此,国内外开展了大量关于组织复合化和结构复合化等方面的研究,以期突破工程技术领域的瓶颈,开发出更加优异的耐蚀、耐磨损和高强高导的新型铜基复合材料^[13,14]。

本课题在阐述载流摩擦的工况特点、接触特点,以及电弧特征的基础上,综述了国内外关于铜基复合材料载流摩擦磨损的研究现状,为后续设计与开发高品质长寿命以及高可靠性的载流摩擦副材料提供参考。

1 载流摩擦磨损概述

1.1 载流摩擦的工况特点

相比于传统的机械摩擦磨损,载流摩擦副的服役工况更为复杂严苛,研究载流摩擦磨损问题时会涉及到电接触学、摩擦学、材料、物理、化学等多学科的复杂理论知识^[15]。载流摩擦副的接触表面存在一定粗糙度,粗糙表面的实际接触面积可看作是无数凸起峰的面积之和,摩擦的过程就是通过这些凸起峰之间的相互作用来实现的^[16](见图1)。在导电过程中,同样也是通过凸起峰之间的连接来传导电流,这些凸起峰也被称为导电斑点(见图2),实际的接触面称为接触斑点^[17,18]。在载流摩擦过程中,少数的接触点承担了所有的接触压力和电流传导,导致接触点处会产生大量的摩擦热与接触电阻热,所以载流摩擦副的粗糙接触面会同时存在应力集中、电流密度集中、热量集中的现象,符合力-电-热耦合作用的负荷集中效应^[19,20]。由于应用工况的特殊性,载流摩擦磨损的影响因素不仅包含电系统中的电流密度,摩擦学系统中的摩擦速度等,大气温度、湿度、环境

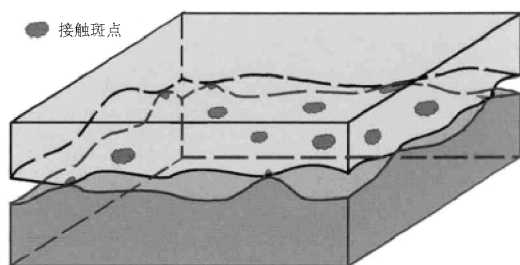


图1 粗糙表面接触示意图^[16]

Fig.1 Contact diagram of rough surface^[16]

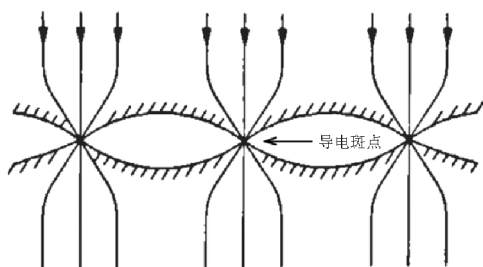


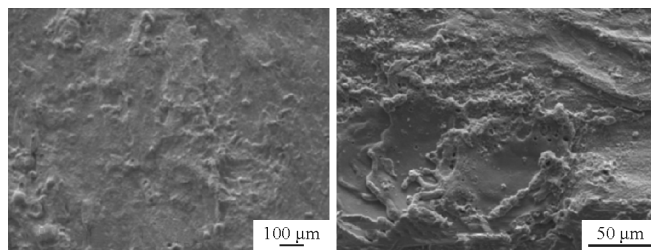
图2 导电斑点示意图^[17]

Fig.2 Schematic diagram of conductive spots^[20]

气氛也会影响其摩擦磨损性能^[21~23]。

1.2 电弧的产生及影响

两接触面在发生相对运动时,接触斑点的数量和位置是随机变化的,导致电流密度在接触面上分布不均匀,接触点容易发生瞬时分离和接触,过程中就会引发电弧放电^[24~26]。电弧放电时会产生大量电弧热使摩擦表面产生瞬时高温,导致接触点的表面氧化和软化,发生剧烈的塑性变形,而且高温摩擦过程中氧化膜的力学性能不稳定导致其易发生剥落,增大了材料的磨损^[27~29]。载流摩擦过程中产生的高温热量和电流集中会使材料发生熔融,高热的熔融材料容易形成熔池,在高速高能量的冲击下会发生喷溅(见图3),熔融和喷溅都会加速摩擦副材料的损伤,造成电弧侵蚀^[30,31]。为减少失接触造成的电弧侵蚀,通常要求材料在保持良好导电、导热性能的同时,兼具高强高导、高耐磨、抗电蚀和抗高温软化等综合性能^[32,33]。



(a) 熔融

(b) 喷溅

图3 纯铜材料的熔融和喷溅形貌^[30]

Fig.3 Melting and splashing morphologies of pure copper material^[30]

总之,载流摩擦损伤行为复杂、服役条件苛刻,因此,为了保证载流摩擦副的高品质、长寿命的服役条件,对摩擦副材料的综合性能要求会极为严苛。

1.3 载流摩擦的影响因素

随着科技发展,近年来载流摩擦应用领域的工况日益复杂严苛,对摩擦副的安全稳定性要求也越来越高。因此,研究者也更注重试验与计算机模拟相结合的方式,综合分析温度场、磁场、载荷、速度等因素,并建立磨损预测模型。

为研究载流过程中接触面温度场引起的磨损,郭凤仪等^[34]利用有限元软件进行仿真建模,研究了铜-浸铜碳摩擦副的瞬态温升及分布规律,其计算得到的结论对研究载流摩擦副的温度特性具有积极意义。载荷也是载流摩擦工况中的一个重要因素,载荷增大会加剧接触面之间的塑性变形从而增大机械磨损,载荷过小又容易导致接触面之间的失稳从而发生电弧侵蚀^[35~37]。因此在载荷摩擦磨损工况中,载荷对材料的摩擦性能和损伤机制的影响存在最优解,优化出最佳载荷参数对摩擦副

材料的研发设计具有重要的作用^[38,39]。陈忠华等^[40]以法向载荷、载流和滑动速度为输入量,以滑板磨耗率、载流稳定系数为输出量建立了 BP 神经网络非线性模型(见图 4),进而利用遗传算法优化了相关参数,确定了滑板磨耗率最低、载流稳定系数最小的最佳法向载荷对应的非劣解。

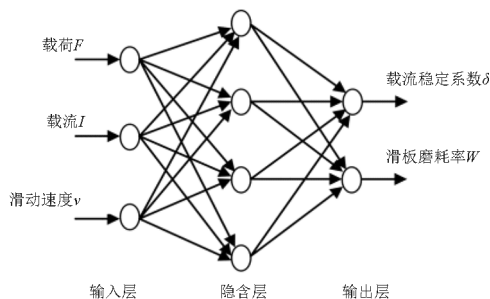


图 4 BP 神经网络结构图^[40]

Fig.4 Schematic diagram of BP neural network^[40]

在载流摩擦过程中电流、载荷和速度产生共同耦合作用,邓朝勇等^[41]着重考虑了载荷和速度的交互作用(PV 因素)对 C_t /PF-Cu 复合材料载流摩擦磨损性能的影响,得到载流摩擦磨损过程中不同 PV 值下的质量磨损率结果后利用矩阵转变拟合将磨损率情况分为轻微磨损、中度磨损和严重磨损 3 个区域(见图 5)。陈忠华等^[42]结合 Stribeck 摩擦模型建立与速度、波动接触力和电流相关的弓网载流摩擦模型,并使用麦夸特法与通用全局优化算法对该模型进行参数辨识,为弓网摩擦力的预测及摩擦磨损性能的研究提供了参考。

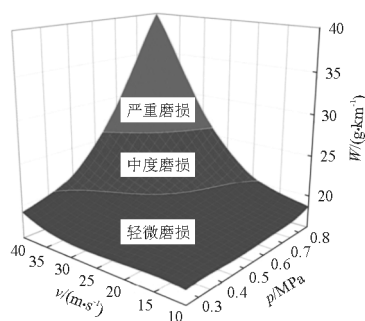


图 5 不同 PV 值下的质量磨损图^[41]

Fig.5 Mass wear diagram under different PV values^[41]

综上,试验与计算机模拟相结合的方法为载流摩擦磨损的研究提供了新的思路。但由于试验设备的局限性,摩擦过程中的系统依赖性和不确定因素的影响都给载流摩擦磨损的研究发展带来挑战,至今未能提出通用的理论公式来解释载流摩擦磨损的性能和接触过程中的界面现象问题。

2 铜基复合材料的载流摩擦磨损研究

现常用的载流摩擦副材料是铜基复合材料,其主要

是以铜及其合金为基体,加入颗粒、纤维、纳米管等增强相相制得^[43~45]。铜基复合材料具有优异的导电、导热性,较好的耐磨、耐蚀性,广泛应用于高速铁路、集成电路、高压开关触头等领域^[46,47]。其最大的优点在于通过添加增强相,既能保持铜基体优异的导电、导热性,又能使材料的耐高温、耐电磨损性和润滑性等得到提高^[48]。

随着铜基复合材料应用越来越广泛,对其摩擦性能要求越来越高,因此需要不断开发新型的耐磨铜基复合材料^[49]。研究不同成分类型、不同结构铜基复合材料的载流摩擦磨损性能对于开发优异的载流摩擦副材料具有积极意义。通常根据增强相的强化方式可将铜基复合材料分为颗粒增强铜基复合材料、自润滑增强铜基复合材料、纤维增强铜基复合材料等。

2.1 颗粒增强铜基复合材料

颗粒增强铜基复合材料是在铜合金基体中加入细小弥散分布的陶瓷颗粒(Al_2O_3 、SiC、WC、TiB₂等)增强相制成的复合材料,因此也被称为弥散强化铜基复合材料。高强高导耐热的陶瓷颗粒可使颗粒增强铜基复合材料在保留铜基体优良导电、导热性的同时,还具有优异的高温力学性能,可以满足载流摩擦过程中抗高温抗磨损的服役要求^[50]。张治国等^[51]采用粉末冶金法制备了 WC 颗粒增强铜基复合材料,并研究了 WC 含量对复合材料载流摩擦磨损性能的影响。结果表明,载流条件一定时,复合材料的体积磨损率随着 WC 质量分数增加而逐渐减小,说明加入 WC 增强颗粒可以有效提高材料的耐磨性。

随着载流摩擦服役工况的日益严苛,多元多尺度颗粒增强相的铜基复合材料逐渐得到研究者的重视。冯江等^[52]采用真空热压烧结-内氧化一体化的方法制得 Al_2O_3 /Cu-WC 复合材料。结果表明,WC 颗粒的剥落和重新结晶的 Al_2O_3 颗粒会加剧材料的磨粒磨损,说明多元增强相的合理配比还有待研究。张胜利等^[53]采用粉末冶金工艺制备了单一粒径 TiB₂ 颗粒和多粒径($2\mu m+50\mu m$) TiB₂ 颗粒增强铜基复合材料,并对比研究了其载流条件下的摩擦磨损行为。结果表明,多粒径 TiB₂ 颗粒合理配比可以显著提高复合材料的载流摩擦磨损性能。

目前国内对于颗粒增强铜基复合材料的研究更侧重于力学性能,在载流摩擦应用领域的产量化、市场推广应用、参数优化等方面还需要深入研究。

2.2 自润滑增强铜基复合材料

自润滑铜基复合材料是在铜基体加入固体润滑剂制成的复合材料,其兼具铜基体的良好力学性能和固体润滑剂的优异摩擦学性能,可作为理想的载流摩擦副材

料^[54]。固体润滑剂的应用温度范围广、化学性质稳定,常见的固体润滑剂有石墨、硫化物、软金属等^[55,56]。张军伟等^[57]采用粉末冶金法制得梯度石墨/铜复合材料和非梯度石墨/铜复合材料,并对比研究了其载流摩擦磨损性能,发现相比于非梯度石墨成分,梯度石墨/铜复合材料的摩擦因数稳定性明显提高。

通常单一的固体润滑剂使用范围有限,多个润滑剂共同作用、自润滑涂层与颗粒增强相结合制得的铜基复合材料具有更优异的耐磨性能和更广泛的应用范围^[58]。简学全等^[59]采用热压烧结法制备 Al_2O_3 弥散 Cu-MoS_2 复合材料,并研究了其载流摩擦磨损性能,结果表明, MoS_2 的加入使复合材料的耐磨性显著提升。

研究自润滑铜基复合材料应该重视与其他增强相结合,不断地开发应用新型自润滑铜基复合材料对于克服载流摩擦服役方面的困难具有重大的研究意义。

2.3 碳纤维增强铜基复合材料

碳纤维增强铜基复合材料是一种便于加工且生产成本较低的新型复合材料,该材料成功地将铜和碳纤维的优良性能结合在一起,具有高导电导热性、抗电弧侵蚀性等优点,可适用于载流摩擦磨损的服役工况^[60,61]。杨浩等^[62]采用粉末冶金法制备了不同体积分数的短碳纤维增强铜基复合材料,并研究了其载流摩擦磨损特性。结果表明,在相同载流条件下,随着碳纤维含量增加,复合材料的摩擦因数呈现先减小再增大的趋势;且经过镀铜处理的短碳纤维增强复合材料的摩擦因数要低于未经镀铜处理的复合材料。WANG P 等^[63]采用化学气相沉积法和浸渍/碳化法制备了两种碳纤维增强铜/碳复合材料,并考察了复合材料的载流摩擦学性能。结果表明,随机分布的短切碳纤维不易划伤摩擦副磨损表面,有利于复合材料形成光滑的摩擦层,同时碳纤维在载流摩擦试验过程中会承受失效能量,阻碍裂纹扩展,从而提高材料的强度和耐磨性。

目前对于碳纤维增强铜基复合材料的研究已经取得一些成果,普遍利用化学镀、电镀等方法来改善铜/碳间的润湿性问题。铜基复合材料中碳纤维的含量及与其他增强相的合理配比仍然值得深入探索,研究碳纤维/铜基复合材料的摩擦性能对于开发新型的载流摩擦副材料具有重要意义。

3 总结与展望

载流摩擦的服役工况特殊复杂,但其应用领域广泛存在于日常生活中,开发优异的载流摩擦副材料具有积极意义。未来对铜基复合材料载流摩擦磨损的研究,可主要从以下几个方面开展。

(1)铜基复合材料的成分可塑性高,目前多元多尺度增强相、多元润滑相的铜基复合材料已经被开发研究,后期还可以不断地对其进行成分结构优化以适用于载流摩擦工况。

(2)铜基复合材料的载流摩擦机理及其摩擦过程的动态化研究还需要更加深入探索,关于电弧对其载流摩擦的影响认识还不够充分,这方面也将是未来工作开展的重要方向。

(3)当前对铜基复合材料载流摩擦磨损的研究应该着重于试验与计算机的结合,需要不断优化制样工艺、成分参数,使其在各种不同的载流条件下都能保留优异的耐磨性能。

参 考 文 献

- [1] SUN Y X, SONG C F, ZHANG Y L, et al. Oxidation on the current-carrying rolling surface and its subsequent impact on the damage of Cu contact pairs in O_2/N_2 mixture[J]. Materials Letters, 2021, 288: 129-349.
- [2] 闫涛, 刘贵民, 朱硕, 等. 电磁轨道材料表面损伤及强化技术研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(1): 135-140.
- [3] 谢博华, 鞠鹏飞, 吉利, 等. 电接触材料摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(5): 656-668.
- [4] 赵媛霞, 刘平, 刘新宽, 等. 高速电气化铁路接触线的研究与应用[J]. 材料导报, 2012, 26(3): 46-50.
- [5] CHEN J X, YANG F, LUO K Y, et al. Experimental investigation on the electrical contact behavior of rolling contact connector[J]. Rev. Sci. Instrum., 2015, 86(12): 125 110.
- [6] 孙毓明, 宋晨飞, 孙逸翔, 等. 滚动转速对 GCr15 钢载流摩擦电损伤的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 6-10.
- [7] CAO Z F, XIA Y Q, CHEN C, et al. A synergetic strategy based on laser surface texturing and lubricating grease for improving the tribological and electrical properties of Ag coating under current-carrying friction[J]. Friction, 2021, 9(5): 978-989.
- [8] 张伟. 铜基自润滑复合材料的制备及摩擦磨损性能研究[D]. 江苏扬州:扬州大学, 2019.
- [9] 蒋娅琳, 朱和国. 铜基复合材料的摩擦磨损性能研究现状[J]. 材料导报, 2014, 28(3): 33-36.
- [10] LI J W, SONG C F, ZHANG Y Y, et al. Effect of rotation speed on the tribological and conductive behaviors of rolling current-carrying Cu pairs[J]. Materials Transactions, 2021, 62(3): 453-460.
- [11] SUN Y X, SONG C F, LIU Z L, et al. Tribological and conductive behavior of Cu/Cu rolling current-carrying pairs in a water environment[J]. Tribology International, 2020, 143:106 055.
- [12] JIANG Z C, FANG J H, LIU P. Tribological properties and mechanism of lubricating oils containing Nano-copper under current-carrying conditions[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(2): 10-16.
- [13] 吕乐华, 孙乐民, 上官宝, 等. 载流摩擦参数对铜基复合材料起弧率及载流摩擦学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2014, 38(1): 60-63.
- [14] 许玮, 胡锐, 高媛, 等. 碳纳米管增强铜基复合材料的载流摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 303-307.
- [15] ZHANG Y Z, YANG Z H, SONG K X, et al. Triboelectric be-

- haviors of materials under high speeds and large currents[J]. Friction, 2013, 1(3): 259-270.
- [16] 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 载流摩擦磨损研究现状及展望[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2 272-2 280.
- [17] 李克敏. 颗粒增强铜基自润滑材料的制备及其载流摩擦磨损性能研究[D]. 河南洛阳: 河南科技大学, 2014.
- [18] 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 超音速等离子喷涂 Mo 涂层的载流摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 109-119.
- [19] 黄伟, 杨黎明, 史戈宁, 等. 载流摩擦条件下 CuCrZr 合金表面组织演变规律[J]. 稀有金属, 2020, 44(7): 687-696.
- [20] 张永振, 杨正海, 上官宝. 载流摩擦的研究现状与挑战[J]. 自然杂志, 2014, 36(4): 256-263.
- [21] HUANG S Y, FENG Y, LIU H J, et al. Electrical sliding friction and wear properties of Cu-MoS₂-graphite-WS₂ nanotubes composites in air and vacuum conditions[J]. Materials Science & Engineering, 2013, A560: 685-692.
- [22] 马振华, 王文芳, 吴玉程, 等. 载流条件下银基复合材料-黄铜滑环摩擦副的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2018, 43(5): 53-58.
- [23] 岳洋, 孙逸翔, 孙毓明, 等. 载荷和电压对纯铜滚动载流摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 67-74.
- [24] 李家伟, 张燕燕, 宋晨飞, 等. 不同转速下纯铜滚动载流摩擦副的电弧行为及电损伤[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 1-9.
- [25] KUBOTA Y, NAGASAKA S, MIYAUCHI T, et al. Sliding wear behavior of copper alloy impregnated C/C composites under an electrical current[J]. Wear, 2013, 302(1-2): 1 492-1 498.
- [26] 丁涛, 陈光雄, 卜俊, 等. 载流摩擦磨损中不同放电现象的机理研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 83-87.
- [27] XIAO Q D, WU S. Tribological behaviours of Ti₃SiC₂ under current carrying conditions[J]. Advances in Applied Ceramics, 2014, 113(7): 381-388.
- [28] 张玉燕, 程洁冰, 王振春, 等. 高速载流摩擦接触面温度的特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 640-647.
- [29] 杨震, 丁涛, 郭媛. 弓网系统中铜盘/碳销的载流摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2019, 52(11): 63-67.
- [30] 徐晓峰, 逢显娟, 杨正海, 等. 电流对载流摩擦副材料损伤行为的影响[J]. 润滑与密封, 2015, 40(11): 6-10.
- [31] 赵燕霞, 刘敬超, 孙乐民, 等. 载流摩擦磨损中电弧侵蚀的研究现状及趋势[J]. 润滑与密封, 2010, 35(8): 111-113.
- [32] 李韶林, 国秀花, 宋克兴, 等. 载流摩擦用铜基复合材料的研究现状及展望[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(4): 1-16.
- [33] 钱刚, 凤仪, 张学斌, 等. 铜基自润滑电接触复合材料研究综述[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 7-12.
- [34] 郭凤仪, 高洪鑫, 刘帅, 等. 载流滑动摩擦副温度场瞬态特性仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1 715-1 723.
- [35] 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 载荷对超音速等离子喷涂 Mo 涂层载流摩擦磨损性能的影响[J]. 材料保护, 2019, 52(8): 1-7.
- [36] 丁涛, 陈光雄, 朱旻昊. 法向载荷对不锈钢/浸金属碳载流摩擦磨损性能的影响[J]. 机械工程材料, 2010, 34(9): 5-8.
- [37] 田磊, 孙乐民, 赵燕霞, 等. 波动载荷对 C/C 复合材料/铬青铜摩擦副载流摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(11): 37-40.
- [38] YIN J, ZHANG H B, XIONG X, et al. Influence of applied load on wear behavior of C/C-Cu composites under electric current[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2017, 27(2): 192-196.
- [39] ZHANG J H, ZHANG H Z, CHEN Z H, et al. Study on contact failure of pantograph's sliding electrical contact under fluctuant loading[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(10): 53-60.
- [40] 陈忠华, 康立乾, 回立川. 强电流滑动电接触下的最佳法向载荷研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(11): 208-212.
- [41] 邓朝勇, 张红波, 尹健, 等. 压力-速度因素对 C_f/PF-Cu 复合材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(3): 682-690.
- [42] 陈忠华, 平宇, 陈明阳, 等. 波动接触力下弓网载流摩擦力建模研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1 434-1 440.
- [43] DUONG L V, LUAN N V, ANH N N, et al. Enhanced mechanical properties and wear resistance of cold-rolled carbon nanotubes reinforced copper matrix composites[J]. Materials Research Express, 2020, 7(1): 50-69.
- [44] RAN X, WANG Y, LIU R H, et al. Research on the friction and wear properties of the copper matrix composites reinforced with copperized carbon fibers[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556-562: 624-627.
- [45] GAO X, YUE H Y, GUO E J, et al. Tribological properties of copper matrix composites reinforced with homogeneously dispersed graphenenanosheets[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(10): 1 925-1 931.
- [46] POPOVICH A, SUFIAROV V, POLOZOV I, et al. Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy[J]. Materials Letters, 2016, 179: 38-41.
- [47] YUN H T, LIANG B B, JI H, et al. Structure and dry tribology performance of plasma sprayed copper-graphite composite coating[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(5): 60-65.
- [48] YANG Z H, GE Y X, XU Z, et al. Effect of Carbon content on friction and wear properties of copper matrix composites at high speed current-carrying[J]. Materials, 2019, 12(18): 2 881-2887.
- [49] LI K M, SHANGGUAN B, SANMING D U, et al. Effects of friction velocity and current density on current-carrying friction and wear properties of copper matrix composites[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(3): 22-27.
- [50] 燕鹏, 林晨光, 崔舜, 等. 弥散强化铜合金的研究与应用现状[J]. 材料导报, 2011, 25(11): 101-106.
- [51] 张治国, 张蓓, 李卫. WC 颗粒增强铜的载流摩擦磨损行为[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(5): 17-21.
- [52] 冯江, 田保红, 孙永伟, 等. Al₂O₃/Cu-WC 复合材料载流磨损性能研究[J]. 金属热处理, 2012, 37(3): 66-69.
- [53] 张胜利, 国秀花, 宋克兴, 等. 多粒径 TiB₂ 颗粒增强铜基复合材料的制备与载流摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2 348-2 356.
- [54] 周文艳, 彭可, 冉丽萍, 等. 电流对 Mo₂C 改性 C/C-Cu 复合材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(4): 503-509.
- [55] 陈雨晴, 余敏, 曹开, 等. 铜基自润滑涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 91-100.
- [56] 胡艳艳, 刘耀, 张建波, 等. 金属基固体自润滑复合材料研究现状及展望[J]. 有色金属材料与工程, 2016, 37(4): 165-170.

铸造金属型模具水冷快速设计方法

陈思源 赵国平

(江苏大学材料科学与工程学院)

摘要 通过水冷过程的热力学计算分析,借助 ProCAST 软件对实际铸造金属型模具温度进行多道次热循环模拟分析,提出了一种模具冷却水量的快捷计算方法。该水冷设计方法可为使用金属型模具的铸造工艺快速达到热平衡温度场提供参考。

关键词 金属型模具;热平衡计算;模具冷却;数值模拟

中图分类号 TP311;TG76

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quick Design of Permanent Mold Water Cooling

Chen Siyuan, Zhao Guoping

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University)

Abstract: A quick calculation equation of permanent mold cooling water volume was proposed through thermodynamic calculation and a casting simulation software for multiple cycle simulation analysis on temperature of the casting mold. The water-cooling design method can provide a theoretical reference for fast reaching heat balanced temperature field of casting process by permanent mold.

Key Words: Permanent Mold, Heat Balance Calculation, Mold Cooling, Numerical Simulation

金属型铸造具有快速冷却、缩短生产周期等特点,特别适用于大批量自动化生产。在实际生产中,多道次循环铸造生产过程会使金属模具温度不断升高,导致铸件凝固冷却时间越来越长,最后影响铸件品质和生产周期。因此,在满足产品品质和工艺出品率基础上,设计合理高效的水冷系统、缩短铸件凝固时间具有重要意义。

目前,有关模具冷却及其设计方法的研究报道较少。尚桂凡等^[1]研究了低压铸造发动机缸体的水冷工艺,通过数值模拟与实际生产相结合,发现在确保铸件品质的情况下最佳的水冷工艺比自然冷却缩短 160 s,生产效率提高 38%。赵岩等^[2]基于数值模拟结果确定水冷通道的位置与大小和开启水冷的时间,使铸件生

产周期缩短了约 60 s。孙东恩等^[3]利用 ProCAST 软件分析低压铸造铝合金轮毂充型凝固温度场分布规律后,在轮毂模具对应热节部位加设了水冷管道,并确定 60 s 开启冷却水能有效消除铸件缺陷,改善铸件力学性能。刘金保^[4]分析了压铸模的水冷控制,总结了一套模具水冷通道的计算公式,以简单压铸件为例计算了其水冷通道的参数。杨宪章^[5]根据经验公式推算压铸模的工作温度后给出了冷却热量的计算公式,并提出模具水冷通道设计的注意事项。上述研究对于模具水冷的设计主要还是试错法,且多依赖经验公式或生产经验。总之,模具的水冷参数仍缺乏简单实用的设计方法。

本课题结合传热学和传统金属型模具冷却通道设计的基础理论,推导出冷却水量与铸件、模具模数之间

收稿日期:2021-08-17;修改稿收到日期:2021-10-13

第一作者简介:陈思源,男,1996 年出生,硕士研究生,江苏镇江(212013),E-mail:csy_akatwosee@163.com

通信作者:赵国平,男,1968 年出生,副教授,江苏镇江(212013),E-mail:guoping.zhao@ujs.edu.cn

引用格式:陈思源,赵国平. 铸造金属型模具水冷快速设计方法[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(4):424-427.

CHEN S Y, ZHAO G P. Quick design of permanent mold water cooling[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):424-427.

- [57] 张军伟,杨正海,孙乐民,等. 梯度铜碳复合材料的载流摩擦磨损性能[J]. 材料热处理学报,2020,41(7):33-40.
- [58] 李博雅,曹志强. 金属基固体自润滑复合涂层及其制备技术研究进展[J]. 表面技术,2017,46(9):32-38.
- [59] 简学全,李继文,谢敬佩,等. 高导电弥散铜-MoS₂复合材料的载流摩擦磨损性能[J]. 材料热处理学报,2013,34(6):11-17.
- [60] 祝志祥,丁一,徐若愚,等. 碳纤维增强铜基复合材料制备方法研究进展[J]. 功能材料,2021,52(3):3 060-3 066.
- [61] 黎炳前,张福勤,杨昭,等. 碳纤维增强铜基自润滑复合材料的摩

擦磨损性能研究[J]. 矿冶工程,2016,36(5):107-109.

- [62] 杨浩,朱明明,李卫. 短碳纤维增强铜基复合材料的载流摩擦磨损行为[J]. 特种铸造及有色合金,2013,33(8):765-768.

- [63] WANG P, WANG L, KANG K J, et al. Microstructural, mechanical and tribological performances of carbon fiber reinforced copper/carbon composites[J]. Composites, 2021, A142: 106-247.

(编辑:刘卫)