

浸金属碳材料载流质量与摩擦学性能的关系

赵彦文¹ 孙乐民²

(1. 郑州职业技术学院汽车工程系; 2. 河南科技大学材料科学与工程学院)

摘要 以浸金属碳材料为研究对象,在 HST-100 载流摩擦试验机上研究了不同摩擦条件下浸金属碳材料摩擦学性能与载流质量的变化。结果表明,速度对载流摩擦性能影响最大,当超过阈值 70 m/s 时,摩擦副材料载流质量和摩擦学性能显著降低,平均载流效率由 98% 降到 67.8%,平均载流稳定性下降了 83%,平均磨损率上升了 510%。微观组织观察表明,随速度和电流增加,摩擦副接触表面膜中金属膜占比逐渐减小、碳膜占比逐渐增大,载流质量和摩擦学特性随之降低。载流摩擦过程中,载流质量和摩擦学特性相互影响,在摩擦副获得较高载流质量的同时,又具有良好的摩擦学特性,有利于提高材料的导电性、降低磨损。

关键词 载流质量;摩擦学性能;摩擦副;导电性

中图分类号 TG146.1;TG115.5⁺8

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Relationship between Current-carrying Quality and Tribological Properties of Metal-impregnated Carbon Materials

Zhao Yanwen¹, Sun Lemin²

(1. Department of Automotive Engineering, Zhengzhou Technical College;

2. Institute of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology)

Abstract: Focusing on metal-impregnated carbon materials, the tribological properties and the current-carrying quality of metal-impregnated carbon materials were investigated on the HST-100 current-carrying friction tester under different friction conditions. The results reveal that the velocity has dominant influence on the current-carrying friction properties. When the threshold value of 70 m/s is exceeded, the current-carrying quality and tribological properties of the friction pair materials are significantly reduced, where the average current-carrying efficiency is reduced from 98% to 67.8%, and the average current-carrying stability is reduced by 83%, and the average wear rate is increased by 510%. Microstructure observations show that the proportion of the metal film is decreased and the proportion of the carbon film is increased gradually, so the current-carrying quality and the tribological properties are decreased gradually with the increase of the velocity and the current. In the process of current-carrying friction, the current-carrying quality and tribological properties are interplayed. Following the friction pairs with higher current-carrying quality, the good tribological properties are presented, which is conducive to improving conductivity and reducing wear.

Key Words: Current-carrying Quality, Tribological Properties, Friction Pair, Conductivity

载流摩擦集电装置是电场中进行相对滑行运动的摩擦副传输电能的重要部件,既有集电功能又兼具摩擦磨损特征,广泛应用于电力轨道交通^[1,2]、电机换向装置^[3]、水轮发电机碳刷/集电环装置^[4]、电磁轨道炮^[5]以及航空航天整流装置^[6,7]等领域。载流摩擦集电装置要求既有高效的电能传输性能,又有优良的耐磨性能以延长其使用寿命^[8],因此高效稳定的载流质量(载流效率、载流稳定性)和良好的动态摩擦磨损性能,对摩擦

集电系统尤为重要,是衡量配副材料载流摩擦学性能的关键指标^[9,10]。

提升摩擦副自身的动态载流质量和稳定性,降低电气磨损、电弧侵蚀,是提高服役性能和延长载流摩擦副寿命的重要途径。因此,载流摩擦磨损成为研究热点^[11~16]。CAO Z F 等^[17]研究了铜滑动电触点的物理性能、接触电阻(ECR)和摩擦学性能,为降低其能耗,提高可靠性和延长使用寿命,采用离子液体(ILs)和多重

收稿日期:2022-01-12;修改稿收到日期:2022-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1730130,U1804252)

第一作者简介:赵彦文,男,1972 年出生,讲师,郑州(450121),E-mail:zyw1024@126.com

引用格式:赵彦文,孙乐民. 浸金属碳材料载流质量与摩擦学性能的关系[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(5):559-564.

ZHAO Y W, SUN L M. Relationship between current-carrying quality and tribological properties of metal-impregnated carbon materials[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5):559-564.

烷基化环戊烷(MACs)润滑铜滑动电触点,引入标准偏差来评价导电性能和摩擦性能的稳定性。丁涛等^[18]研究石墨/铜电流、滑动速度和载荷对浸金属碳材料与不锈钢配副载流摩擦磨损性能的影响,并分析了电流、滑动速度和载荷对销试样磨损表面粗糙度的影响。杨正海等^[19]研究了相对滑动速度对石墨/铜复合材料载流摩擦性能的影响。结果表明,随速度的增加,摩擦因数、磨损率略增,随速度增加电弧侵蚀面积增加,磨损表面粗糙程度严重。钟传枝等^[20]考察了滑动速度对浸金属碳滑板/铜银合金接触线载流摩擦配副的摩擦因数、磨损量、温度变化的影响,发现随滑动速度和电流的提高,摩擦因数减小、磨损率增大、滑板温度升高。周雄等^[21]探讨了速度对 AuNi9/AuAg35Cu5 摩擦配副的载流摩擦磨损行为的影响,发现随速度增加,摩擦副的摩擦因数和接触电压降均增大,磨损面平均粗糙度和磨损率上升。综上所述,关于载流摩擦磨损的研究主要集中在相对滑动速度、电流、载荷、接触电阻、电弧侵蚀等因素对载流摩擦特性、磨损机制的影响和分析,而对载流质量与摩擦学性能之间耦合关系的报道较少。

本课题以浸金属碳滑板/铬青铜为载流摩擦配副,在 HST-100 型高速载流试验机上,系统研究了速度、电流和载荷等服役条件下摩擦配副载流质量和摩擦学性能之间的关系,以期为载体摩擦集电装置的改进和材料研发提供参考。

1 试验设备与过程

1.1 试验设备与方法

图 1 为 HST-100 高速载流摩擦试验机示意图,其中,销试样为浸金属碳滑板材料,盘试样材质为铬青铜(QCr0.5)。销试样通过杠杆砝码加载系统(恒定载荷)压在旋转的盘试样上,电流经恒流源流出并通过电缆经左销试样、盘试样、右销试样再经电缆流回恒流源,形成闭合回路。转速-扭矩传感器、霍尔电流传感器通

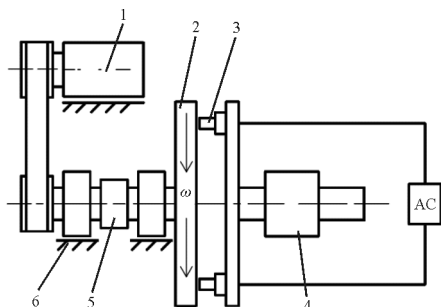


图 1 载流摩擦试验机设备示意图

Fig.1 The schematic diagram of current-loading frictional machine

1.电动机 2.盘 3.销 4.加载装置 5.扭矩传感器 6.轴承座

过数据传输线传输信号到采集系统并记录试验数据。摩擦因数通过系统采集的摩擦力矩和摩擦配副正压力计算得出。销试样尺寸为 9 mm×14 mm×20 mm,盘试样为 $\phi 300$ mm×20 mm,销试样中心距为 160 mm。设备最大载荷为 500 N,加载电流范围为 0~200 A,摩擦速度为 0~100 m/s。

在滑动接触摩擦载流中,由于摩擦副之间摩擦表面磨损引起的导电性能的变化、微观不平带来的表面接触不良、载流条件(速度、载荷、电流)变化引起的接触电阻和真实接触面积的变化、载流摩擦过程中产生热量的大小引发材料理化性能的变化,以及振动离线产生电弧等原因,实际通过摩擦副传输的电流平均值小于名义加载电流值,且随载流条件的变化波动较大。此外,还会有摩擦副瞬时传输电流值与平均电流值偏离程度不同的情况存在,其大小显著影响着供电质量。为合理评价摩擦副载流能效,引入载流效率 η 和载流稳定性参数 δ 来表征其载流质量^[22]。载流效率衡量摩擦副载流能力的大小,其值为摩擦副滑动通电电流平均值与静止通电电流值之比;载流稳定性衡量传输电流偏离平均值的程度,其值为传输电流的标准差与平均值之比。

$$\eta = \frac{I_{\text{动}}}{I_{\text{静}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\sigma_A}{I} \times 100\% \quad (2)$$

式中, η 为载流效率,反映摩擦副载流能力,其值越大,载流能效越好,%; $I_{\text{动}}$ 为滑动传输电流平均值,A; $I_{\text{静}}$ 为静止通电电流,A; δ 为载流稳定性,反映传输电流波动的程度,其值越小,载流稳定性越好,%; σ_A 为滑动载流电流的标准差; I 为滑动载流电流的平均值,A。

1.2 试验过程

试验使用的浸金属碳材料和铬青铜物理性能见表 1。将浸金属碳材料制成的销试样装在试验机上,在固定载荷 80 N 下改变电流(40、70、100、130、160 A)和速度(10、30、50、70 m/s),在固定电流为 100 A 下改变载荷(40、60、80、100、120 N)和速度(10、30、50、70 m/s),进行试验,考察电流、速度、载荷对摩擦配副载流质量和摩擦学特性之间的关系。试验前标定电流、扭矩采集系统,试验中同步采集速度、电流、电压、扭矩、正压力,用量程为 220 g、精度为 0.1 mg 的 BS210S 电子分析天平,称量销试样磨损前后质量损失,计算出磨损率。

表 1 销试样和摩擦盘材料的物理性能
Tab.1 Physical property of pin and disc

材料	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	电阻率/ ($10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$)	硬度 (HB)
浸金属碳材料	1.67	10	65
摩擦盘(QCr0.5)	8.89	2.16	61

2 试验结果与分析

2.1 速度和电流对载流质量和摩擦学特性的影响

图2是固定载荷为80 N时,浸金属碳材料的载流效率和载流稳定性随电流和载荷变化的曲线。可以看出,当滑动速度 ≤ 50 m/s时,载流效率和载流稳定性二者波动均较小,且随着电流增大,载流效率略有下降,基本稳定在95%之上;载流稳定性表征值 δ 缓慢增大,稳定性逐渐下降,基本稳定在20%之下。当滑动速度 ≥ 70 m/s时载流质量明显变差,载流效率大幅降低,在60%~75%区间波动,平均载流效率由98%降到了67.8%;载流稳定性显著降低,其表征值 δ 在70%之上,平均载流稳定性下降了83%,且随加载电流的增大载流质量逐渐提高。

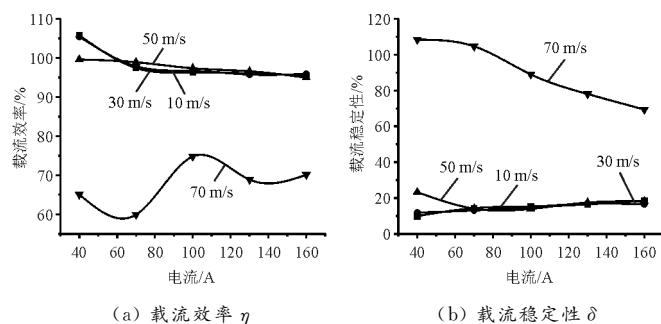


图2 电流和速度对浸金属碳材料载流质量的影响

Fig.2 Effects of currents and velocities on current-carrying quality of metal-impregnated carbon materials

研究表明,摩擦速度是影响摩擦副导电性能的显著因素。当摩擦速度超过某一区间时,由于摩擦副接触表面之间振动频率和离线率的增加,配副表面接触变差致使载流效率下降显著,电能传输损失增加^[23,24]。从图2可以看出,当摩擦速度超过50 m/s时,材料的载流效率和稳定性发生了明显变化。这是由于在固定接触压力下,速度较低时,摩擦热、接触电阻热较小,加之由于离线率低而电弧能量也较低,所以摩擦副表面中浸渗金属流失较少,因此载流效率较高,载流稳定性较好。随着电流增大,销盘之间因摩擦产生的热量和电阻热增多,少量浸渗金属流失使销盘表面接触导电性变差,载流效率和稳定性略有下降。随着速度增大到70 m/s时,摩擦副销盘之间振动增强,销盘接触表面脱离接触频率增加,电弧频率增大,能量升高,与摩擦热、接触电阻热一起使接触表面急剧升温,浸金属碳材料浸渗金属熔融流失增多,表面接触电阻增大,形成了电弧侵蚀,接触表面严重粗糙化,因而载流效率及载流稳定性急剧下降。

图3为浸金属碳材料在定载荷80 N,不同速度条件下摩擦学特性随电流的变化曲线。可以看出,在10、

30 m/s下摩擦因数和磨损率随着电流的增大,呈逐渐增大的趋势,这是因为在速度较低时,低电流条件下,浸渗在碳材料里的浸渗金属主要由Pb、Sb等组成,其熔点较低(Pb为327℃,Sb为630.7℃),在接触电阻热和摩擦功作用下,摩擦表面温度较高,使浸渗金属熔化,被滑动挤压后形成金属液膜。熔融的金属液膜起到了润滑作用,降低了摩擦阻力,因此摩擦因数较小;随着电流增加,电阻热随之增大,电弧能量增大,熔融金属增多,熔融后形成的金属小液滴与配副铜盘吸附在一起,相对滑动时被铜盘带走,金属液膜比例减少,摩擦阻力有所增加,致使摩擦因数和磨损率增大。在50、70 m/s时随着电流增大,摩擦因数骤降而磨损率剧增,表明当速度超过某一阈值时,电流对销试样摩擦特性具有显著影响。在载流摩擦磨损条件下,速度较大时相对运动速度显著影响起弧程度。随电流增大,电阻热、电弧热剧增,销盘之间的接触状况变差,电弧的强度和发生的频率也更大,接触表面恶化与电弧剧烈程度相互影响、相互激励,形成马太效应,因而载流摩擦状况更加严重恶化。在强烈的电弧作用下,接触表面的碳材料和浸渗金属在高温下被气化,接触表面因材料流失、致密度下降而粗糙不平,在热应力作用下裂纹形成并扩张,加之摩擦过程中由于表面粗糙度增加而冲击加大,致使表层材料脱落,磨损率迅速升高,当速度为70 m/s时,平均磨损率提高了510%。摩擦因数随电流增大而减小的原因,一方面是由于磨损后表面粗糙不平,实际接触面积减少;另一方面是因为电弧能量增加,摩擦副接触变差,实际接触时间变短,摩擦阻力减小,致使摩擦因数平均值减小。

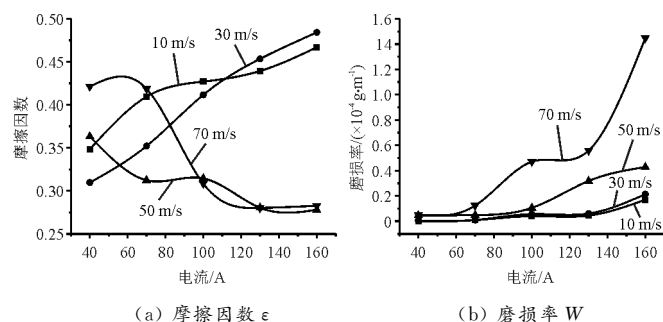


图3 不同速度下浸金属碳材料摩擦学性能随电流的变化

Fig.3 Tribological property variation of metal-impregnated carbon materials with currents under different velocities

图4是载荷为80 N时,不同电流和速度条件下碳材料销试样的磨损形貌。可以看出,速度为10 m/s,电流为40 A时磨损表面主要由浸渗金属膜和碳膜构成,浸渗金属膜比例较大,表面较平整,载流摩擦学特性表现为载流效率高、稳定性好,摩擦因数较小。速度为30 m/s时,磨损表面主要是碳膜和金属膜,碳膜所占比

例较大,表面光滑平整,这与其载流质量较好,摩擦因数大相吻合。当速度为 50 m/s 时,磨损表面主要由碳膜构成,表面较为光滑。速度为 70 m/s 时,电弧较为剧烈,浸渗金属在强烈的电弧作用下被气化,加之浸渗金属在电弧热、电阻热、摩擦热等大量热能作用下熔融后被摩擦副带走,表层及亚表层浸渗金属急剧减少,磨

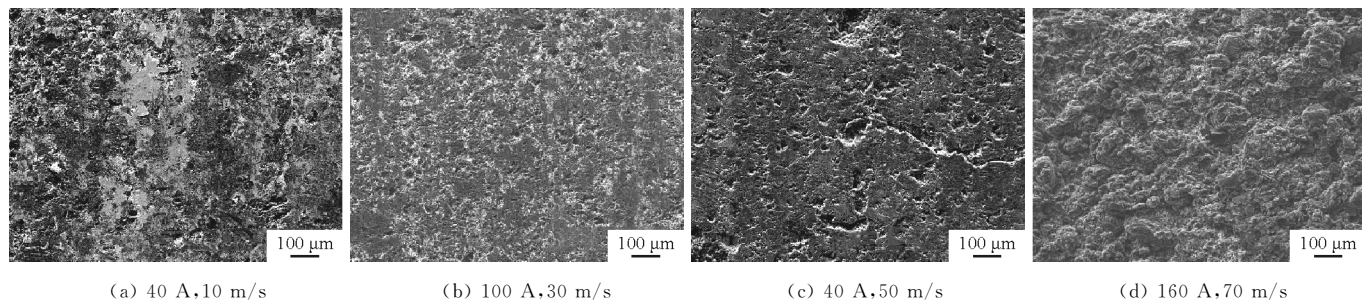


图4 不同电流、速度下销试样的摩擦面形貌

Fig.4 Morphology of pin wear surface under different currents and velocities

2.2 速度和载荷对载流质量和摩擦学特性的影响

图5是固定电流为 100 A 时,浸金属碳材料的载流效率和载流稳定性随速度和载荷变化的关系。可以看出,当滑动速度 ≤ 50 m/s 时,载流质量良好,载流效率和载流稳定性二者均波动较小。随着载荷增大,载流效率和载流稳定性均略有提升,载流效率基本稳定在 95% 之上,载流稳定性基本稳定在 19% 之下。当速度为 70 m/s 时载流质量明显变差,载流效率显著降低,平均值由 96.4% 降到了 78.7%,在 68%~89% 区间波动;载流稳定性大幅降低,其表征值 δ 在 50%~83% 之间变化,平均载流稳定性下降了 77%,且随载荷的增大,载流质量逐渐提高。分析可知,在给定电流条件下,速度是影响摩擦副导电性能的显著因素,当速度超过 70 m/s 时,载荷对载流质量的影响作用明显加剧。

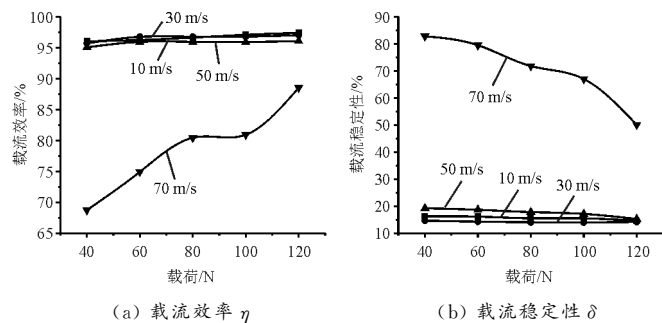


图5 载荷和速度对浸金属碳材料载流质量的影响

Fig.5 Effects of loads and velocities on current-carrying quality of metal-impregnated carbon materials

载流摩擦副滑动接触导电,从微观看是在接触表面载荷的挤压作用下微凸峰相互接触传输电能的,随着滑动速度增加,相互接触的微凸峰接触时间变短、分离速度加快、导电中断频次增多,致使载流效率降低、接触电阻增大。随速度增加,摩擦表面热量增多,少量浸渗金

属熔融流失,接触导电性能变差,载流质量降低^[25]。随着速度增大到 70 m/s,摩擦副销盘之间,电弧频次和能量增加,电弧侵蚀加剧,摩擦表面及亚表面浸渗金属流失增多,接触表面粗糙度增加,载流质量急剧下降;随着载荷增加,摩擦接触表面真实接触微凸峰数量增多,接触导流体数目和面积增加,接触电阻减小,电弧侵蚀略有降低,改善了导电状况,载流质量有所提高。

图6是浸金属碳材料在电流为 100 A,不同速度下摩擦学特性随载荷的变化曲线。可以看出,当摩擦副接触载荷逐渐增大时,摩擦学特性参数(摩擦因数和磨损率)均呈下降趋势。这是因为随接触压力增大,摩擦表面实际接触微凸峰数量增多,改善了销盘表面接触,接触电阻减小,电弧强度和频次降低,电气磨损的程度有所减轻,磨损面上金属膜和碳膜共存,磨损面较为光滑,因此在给定电流条件下,摩擦因数和磨损率随载荷的增加均降低。当速度 ≤ 50 m/s 时,随速度增加,销盘之间热量增多,浸渗金属熔融流失,摩擦接触面金属膜减少,碳膜增加,接触导电状况恶化甚至脱离接触形成电弧。速度越大,电弧的强度和频率也越高,摩擦表面

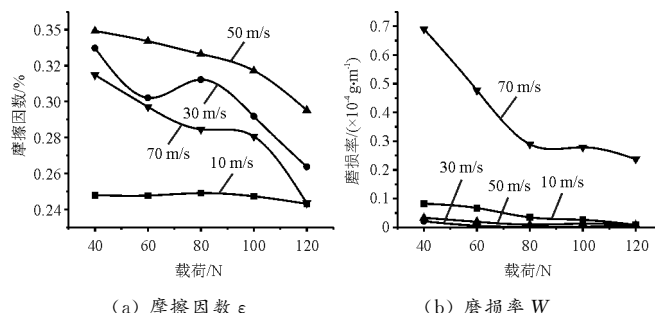


图6 不同速度下浸金属碳材料摩擦学特性随载荷的变化曲线

Fig.6 Tribological property variation of metal-impregnated carbon materials with loads under different velocities

的不平度增加,从而使摩擦阻力增加,所以当速度 ≤ 50 m/s 时,摩擦因数随速度增加而增大。当速度为 70 m/s 时,销盘之间的电弧强度和频率更高,浸金属碳材料表面的浸渗金属被大量气化,致使大量碳颗粒外露,接触表面状况变差,甚至脱离接触。摩擦表面实际接触点的减少,引起了摩擦阻力的降低,在脱离接触的瞬间甚至摩擦力为 0,由于摩擦因数是摩擦过程的统计平均值,因此随速度增加,摩擦因数下降而磨损量剧增。

图 7 是电流为 100 A 时,不同载荷和速度下碳材料

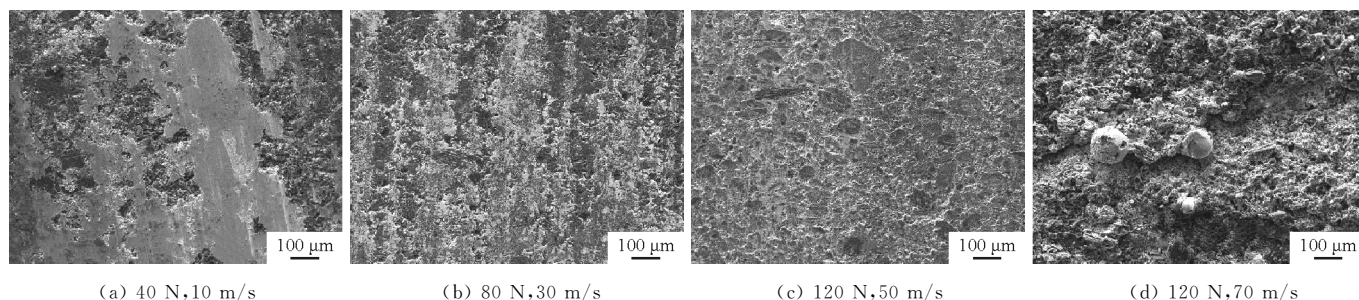


图7 不同速度、载荷下销试样的摩擦面形貌

Fig.7 Morphology of pin wear surface under different velocities and loads

3 结 论

(1)浸金属碳材料/铬青铜摩擦副的载流摩擦磨损过程中,速度对载流摩擦性能影响最大,电流和载荷次之。当速度为 70 m/s 时,载流质量和摩擦学性能显著降低,平均载流效率由 98%降到了 67.8%,平均载流稳定性下降了 83%,平均磨损率上升了 510%。

(2)摩擦表面分析结果表明,浸金属碳材料/铬青铜摩擦配副载流摩擦接触表面膜的组成显著影响其载流质量和摩擦学特性。随速度和电流增加,摩擦配副接触表面膜中金属膜占比逐渐减小、碳膜占比逐渐增大,载流质量和摩擦学性能明显降低。

参考文献

- [1] YIN J, ZHANG H B, XIANG 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, 2(2): 192-196.
- [2] CHEN L M, PENG P H, HE F. Fatigue life analysis of dropper used in pantograph-catenary system of high-speed railway[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(5): 1-10.
- [3] 惠阳, 刘贵民, 杜林飞, 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.
- [4] POLJANEC D, KALIN M, KUMAR L. Influence of contact parameters on the tribological behaviour of various graphite/graphite sliding electrical contacts[J]. Wear, 2018, 406-407: 75-83.
- [5] 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.
- [6] 贾清健, 姚培. 空间用导电滑环真空高温摩擦转矩特性分析[J]. 润滑与密封, 2020, 45(7): 123-127.
- [7] 刘兴富, 朱野, 刘会杰, 等. 星载长寿命导电滑环的传输可靠性评

销试样的磨损形貌。可以看出,随速度增大,接触表面膜中金属膜的比例逐渐降低,由金属膜和碳膜共同存在,逐渐转变为以碳膜为主的表面膜;磨损表面平整度逐渐变差,载流摩擦学特性由载流效率高、载流稳定好、摩擦因数较小,逐渐转差,但整体载流摩擦性能较好。当速度为 70 m/s 时,电弧剧烈,表层浸渗金属流失严重,大量碳颗粒外露。磨损微观表面主要由碳材料颗粒构成,表面粗糙不平,载流质量明显降低,摩擦性能变差。

- 估[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 2 028-2 035.
- [8] 谢博华, 鞠鹏飞, 吉利, 等. 电接触材料摩擦学研究进展[J]. 摩擦学报, 2019, 39(5): 656-668.
- [9] 杨中平. 高速铁路技术概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [10] LI Y C, HUANG J X, WANG M, et al. Microstructure and current carrying wear behaviors of copper/sintered-carbon composites for pantograph sliders[J]. Metals and Materials International, 2020, 27: 1-11.
- [11] 沈明学, 李含欣, 季德惠, 等. 弓网系统载流摩擦磨损研究现状[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 113-125.
- [12] KOLUBAEV A V, SIZOVA O V, TERYUKALOVA N V, et al. Wear of quenched and aged Cu-Be alloy at current transfer[J]. Journal of Friction and Wear, 2021, 41(6): 559-564.
- [13] 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.
- [14] 孙逸翔, 宋晨飞, 李家伟, 等. 转速对水环境下纯铜滚动载流摩擦损伤的影响[J]. 摩擦学报, 2021, 41(3): 365-372.
- [15] FADIN V V, KOLUBAEV A V, ALEUTDINOVA M I, et al. On wear resistance of steel-containing composites under extreme friction conditions[J]. Steel in Translation, 2019, 49(8): 517-521.
- [16] LANG H J, XU Y M, ZHU P Z, et al. Superior lubrication and electrical stability of graphene as highly effective solid lubricant at sliding electrical contact interface[J]. Carbon, 2021, 183: 53-61.
- [17] CAO Z F, XIA Y Q, LIU L H, et al. Study on the conductive and tribological properties of copper sliding electrical contacts lubricated by ionic liquids[J]. Tribology International, 2019, 130: 27-35.
- [18] 丁涛, 魏绍鹏, 杨义, 等. 不锈钢与地铁集电靴用浸金属碳材料的摩擦磨损性能研究[J]. 粉末冶金技术, 2019, 37(4): 243-247.
- [19] 杨正海, 上官宝, 孙乐民. 相对滑动速度对铜-石墨复合材料载流摩擦性能的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 1-6.
- [20] 钟传枝, 许岩, 陈光雄. 浸金属碳滑板/铜银合金接触线载流摩擦磨损性能的试验研究[J]. 润滑与密封, 2021, 46(11): 34-39.

航天用 7055 高强铝合金热变形行为及热加工图

刘 乐^{1,2} 石大鹏^{1,2} 孙晓军^{1,2} 金 宏^{1,2} 关 悦^{1,2} 万志慧^{1,2}

(1.河南省紧固连接技术重点实验室; 2.河南航天精工制造有限公司)

摘 要 利用高温压缩试验研究航天用 7055 高强铝合金在温度为 330、380、430、480 °C, 应变速率为 0.001、0.01、0.1、1 s⁻¹ 条件下的高温流变应力的变化。根据高温压缩试验数据, 借助线性回归方法, 拟合出 7055 高强铝合金的峰值流变应力本构方程和稳态流变应力本构方程。结果表明, 在热压缩变形的开始阶段, 7055 高强铝合金的流变应力随着应变量的增加迅速增大至峰值, 然后由于产生应变软化, 其真应力随着应变量的增加降低, 直至进入稳态流变阶段。当应变速率一定时, 流变应力随着变形温度的升高而降低; 当变形温度一定时, 流变应力随着应变速率的增加而增大。建立了真应变为 0.2 时的热加工图, 在成形温度为 330~410 °C, 应变速率为 0.001~0.05 s⁻¹ 的区域, 功率耗散系数大于 20%, 此范围为航天用 7055 高强铝合金较合理的工艺参数。

关键词 7055 高强铝合金; 热变形行为; 本构方程; 热加工图

中图分类号 TG146.21; TG306

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.05.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Hot Deformation Behavior and Hot Working Diagram of 7055 High Strength Aluminum Alloy for Aerospace

Liu Le^{1,2}, Shi Dapeng^{1,2}, Sun Xiaojun^{1,2}, Jin Hong^{1,2}, Guan Yue^{1,2}, Wan Zhihui^{1,2}

(1. Henan Provincial Key Laboratory of Fastening Technology;

2. Henan Aerospace Precision Manufacturing Co., Ltd.)

Abstract: Through high temperature compression experiment, the variation of high temperature rheological stress of 7055 high strength aluminum alloy for aerospace was investigated under different temperatures (330, 380, 430 and 480 °C) and strain rates (0.001, 0.01, 0.1 and 1 s⁻¹). According to the high temperature compression experimental data, with the help of linear regression method, the peak flow stress constitutive equation and steady flow stress constitutive equation of 7055 high strength aluminum alloy were established. The results indicate that at the beginning of hot compression deformation, the flow stress of 7055 high-strength aluminum alloy is increased rapidly to the peak value with the increase of stress, then the true stress is decreased with the increase of stress variable due to strain softening until the steady-state flow stage. When the strain rate is constant, the flow stress is decreased with the increase of deformation temperature. When the deformation temperature is constant, the flow stress is increased with the increase of strain rate. Finally, the hot working diagram with true strain of 0.2 was established. In the region of forming temperature of 330~410 °C and strain rate of 0.001~0.05 s⁻¹, the power dissipation coefficient is more than 20%, which is the reasonable process parameters of 7055 high strength aluminum alloy for aerospace.

Key Words: 7055 High Strength Aluminum Alloy, Thermal Deformation Behavior, Constitutive Equation, Hot Working Drawing

收稿日期: 2021-12-16; 修改稿收到日期: 2021-12-31

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2013ZX04002081)

第一作者简介: 刘乐, 男, 1988 年出生, 工程师, 河南信阳(464000), E-mail: liule20210629@163.com

引用格式: 刘乐, 石大鹏, 孙晓军, 等. 航天用 7055 高强铝合金热变形行为及热加工图[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(5): 564-568.

LIU L, SHI D P, SUN X J, et al. Hot deformation behavior and hot working diagram of 7055 high strength aluminum alloy for aerospace [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(5): 564-568.

- [21] 周雄, 罗博, 张雷, 等. 速度对 AuNi 9/AuAg 35Cu 5 载流摩擦磨损行为的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2020, 25(5): 369-374.
- [22] 赵彦文, 孙乐民. 紫铜/铬青铜配副电流稳定性与摩擦性能关系的探讨[J]. 材料保护, 2021, 54(10): 97-101.
- [23] ZHAO J, PENG Y T, ZHOU Q G, et al. The current-carrying tribological properties of Cu/graphene composites[J]. Journal of

Tribology, 2021, 143(10): 102-111.

- [24] 陈忠华, 孙国军, 回立川, 等. 波动压力载荷下弓网滑动电接触特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 82-88.
- [25] 武云龙, 黄海, 陈光雄, 等. 弓网载流效率及其对碳滑板磨损性能影响的试验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 21-26.

(编辑: 张正贺)