



王艳,周向葵,吴深.块体非晶合金摩擦磨损性能的影响因素与研究现状[J].轻工学报,2021,36(4):97-104.
WANG Y,ZHOU X K,WU S,et al. Influential factors and research status on friction and wear performances of bulk amorphous alloys[J]. Journal of Light Industry,2021,36(4):97-104. DOI:10.12187/2021.04.012
中图分类号:TG146.1 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2021)04-0097-08

块体非晶合金摩擦磨损性能的影响因素与研究现状

Influential factors and research status on friction and wear performances of bulk amorphous alloys

王艳,周向葵,吴深

WANG Yan,ZHOU Xiangkui,WU Shen

郑州轻工业大学 机电工程学院,河南 郑州 450002

College of Mechanical and Electrical Engineering,Zhengzhou University of Light Industry,Zhengzhou 450002,China

关键词:

块体非晶合金;摩擦磨损性能;影响因素;耐磨性能

Key words:

bulk amorphous alloy;
friction and wear performance;
influence factor;
wear resistance

摘要:通过分析块体非晶合金摩擦磨损过程的特点,总结了影响其摩擦磨损性能的主要因素,并从非晶合金与相应晶态合金对比、热处理和摩擦诱导晶化结构3个方面对其摩擦磨损性能研究现状进行阐述,指出:影响块体非晶合金摩擦磨损性能的主要因素为传热因素、配副材料和摩擦条件,且不同的影响因素之间相互关联、相互影响,即配副材料的热性能决定摩擦热导出速率,通过影响摩擦表面温度对摩擦过程产生影响,当摩擦条件改变时,非晶合金材料的稳定性发生变化,磨损量急剧增加或减小,从而影响其摩擦磨损性能.由于非晶合金的结构特点和摩擦磨损过程的特性,关于非晶合金与相应晶态材料摩擦磨损性能的对比研究,以及热处理和摩擦诱导晶化结构对块体非晶合金材料摩擦性能的影响研究中均存在矛盾性结论,需进一步研究非晶合金的结构与其摩擦磨损行为之间的关系,探究非晶合金磨损机制与转变规律,进而探索提升非晶合金耐磨性能的方法与途径.

收稿日期:2020-05-06

基金项目:河南省科技攻关项目(212102210446);河南省高等学校重点科研项目(19B430013)

作者简介:王艳(1988—),女,河南省商丘市人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方面为非晶合金、复合材料成形工艺及摩擦学行为.

Abstract: By analyzing the characteristics of the friction and wear process of bulk amorphous alloys, the main influencing factors of its friction and wear performances were summarized. The research status of the friction and wear performances of bulk amorphous alloys were also described from three aspects; the comparison of the friction and wear performances of amorphous alloys and the corresponding crystalline alloys, the heat treatment and friction-induced crystallization structure. It was pointed out that the main factors affecting the friction and wear performances of bulk amorphous alloys were heat transfer factors, counter-face materials and friction conditions, and the different influencing factors were interrelated and affected each other. The thermal properties of the counter-face materials determined export rate of the friction heat, and affected the friction process by affecting the friction surface temperature. When the friction conditions change, the stability of amorphous alloy materials was changed and the amount of wear increased or decreased sharply, thereby affecting its friction properties. Due to the characteristics of the structure and the friction and wear process of amorphous alloys, there were contradictory conclusions in research of the comparative study on the friction properties of amorphous alloys and corresponding crystalline materials, the effect of heat treatment and friction-induced crystallization structure on the friction properties of bulk amorphous alloy materials. It is necessary to further study the relationship between the structure of amorphous alloys and its tribological behaviors, explore the wear mechanism and its transformation laws. Then the methods and approach of improving the wear resistance of amorphous alloys were obtained.

0 引言

块体非晶合金是一类原子排列呈短程有序、长程无序,并处于热力学亚稳相结构的材料^[1-2]。近年来,随着对块体非晶合金成分、结构与性能研究的不断深入,人们越来越认识到块体非晶合金具有优异的理化性能、力学性能及精密成型性等特点,未来将会成为支撑精密机械、航空航天器件、国防工业等高新技术的关键材料^[3-5]。特别是1990年代以来,研究者们成功制备了大量的块体非晶合金,发现其优异的性能与独特的结构使其在航空航天器件、精密机械、医疗与体育器材等领域可以部分取代传统合金,这开启了其应用领域的大门。然而,当非晶合金用作相对运动的部件时,会出现摩擦与磨损问题,这掀起了研究其摩擦学行为的热潮。但是,在对非晶合金性能进行差异研究时,所采用的摩擦条件与环境存在差异,即不同摩擦体系呈现不同的摩擦学行为,因此,对其摩擦学行为的研究并未获得突破性进展,仍处于基础阶段^[7]。造成这一困境的原因是目前缺乏

全新的、更为科学的理论指导体系。非晶合金材料与传统合金材料不同,其摩擦过程同时发生基础摩擦与晶化两种行为,这使得关于其摩擦磨损性能的研究更为复杂。鉴于此,本文拟在分析块体非晶合金摩擦磨损性能主要影响因素的基础上,对块体非晶合金摩擦磨损性能的研究现状进行综述,以期探索减少块体非晶合金材料部件磨损的途径与方法,进而提升块体非晶合金的性能,拓宽其潜在应用领域提供参考。

1 块体非晶合金摩擦磨损性能的主要影响因素

通常,块体非晶合金具有较高的强度与硬度^[6-9],推测其在摩擦过程中应该呈现优越的耐磨性能,但近年来关于其耐磨性能的报道结论并不统一。由于摩擦性能与摩擦系统及摩擦实验进行时的环境和参数紧密相关,因此,影响块体非晶合金摩擦磨损性能的因素很多,主要分为传热因素、配副材料和摩擦条件3个方面。

1.1 传热因素

当两个物体发生相对运动时,界面上的摩

擦力会对摩擦界面做功,该摩擦功一部分消耗于磨损表面的塑性变形,另一部分则转化成热能,促使摩擦界面温度升高,且用于该部分的摩擦功在总功中占有较大的比例,导致摩擦过程中产生摩擦热^[10-12],并发生热量的消耗与传递.一般来说,摩擦表面产生的热量最多,如果该热量不能被及时有效地扩散和消耗,将会在摩擦表面形成热积累,促使其表面温度升高,使材料发生相变或熔化,最终影响其摩擦磨损性能.当接触表面温度升高时,摩擦热向温度较低的配副材料传导,热传导速率很大程度上影响接触表面温度.在该热传导过程中,配副材料内部会形成温度梯度,因此热传导速率主要取决于配副材料的热物理性能,如导热率、热扩散系数等.另外,磨屑脱离摩擦表面时会带走大量的摩擦热.对于特定的摩擦系统,其传热因素通过影响摩擦表面温度对摩擦过程产生影响.

1.2 配副材料

摩擦学行为对摩擦系统具有很强的依赖性,其中,配副材料的力学性能和热性能是影响摩擦过程的主要因素^[13-14].配副材料的力学性能在很大程度上决定了摩擦配副的基本配副关系,而配副材料的热性能决定了摩擦表面产生摩擦热的导出速率,通过影响摩擦表面材料所处温度状态对摩擦过程产生影响.例如,以陶瓷材料为配副材料时,由于其热传导系数较低,大量的摩擦热未能经配副耗散,导致材料摩擦表面温度升高,从而影响其摩擦磨损性能,尤其是对处于亚稳相的非晶合金,大量摩擦热保留在非晶试样表面及次表面,很大程度上导致非晶合金的晶化,表现出不同的摩擦磨损行为.P. Y. Tian 等^[14]采用金属\陶瓷和聚合物3种不同材料分别与Zr基非晶合金进行摩擦实验,发现Zr基非晶试样的摩擦系数强烈依赖于摩擦配副材料,其中与聚合物摩擦时的摩擦系数最小,且随着载荷与速度的增加,摩擦系数呈减小

趋势.E. Fleury 等^[15]指出,材料磨损表面的形貌依赖于摩擦配副材料,不同的摩擦配副导致非晶合金材料的摩擦学行为明显不同,即摩擦配副是影响摩擦磨损性能的主要因素.相反地,X. Y. Fu 等^[16]分别采用52100钢和Zr基非晶态合金为摩擦配副,研究了该非晶合金的摩擦学行为,其结果表明,改变摩擦配副,该非晶合金的摩擦学性能变化不明显.这种矛盾性的结论,引发研究者们不断引入不同的摩擦配副材料,探索块体非晶合金的摩擦磨损性能与机理.

1.3 摩擦条件

摩擦条件主要包括摩擦接触方式、载荷与速度、摩擦环境等.从摩擦接触方式来看,环/环端面接触方式与销/盘接触方式是不同的,前者的接触表面保持连续接触,而后者的接触表面虽保持连续接触,但是盘与待测试样之间为间歇式接触,所以相同材料在不同接触方式下其摩擦性能的可比性较差.载荷与速度是摩擦实验中的重要参数,不同体系对载荷与速度的依赖性不同.此外,材料的摩擦特性与摩擦系统的工作环境有密切关系.因此,本文主要从摩擦载荷与速度、摩擦环境两方面进行介绍.

1.3.1 摩擦载荷与速度

摩擦过程中,动态界面膜的形成与破坏均取决于载荷与速度,当载荷与速度均超过某临界值时,磨损量急剧增加或减小,磨损机制发生转变.对于热力学亚稳相的非晶合金而言,载荷与速度直接影响摩擦接触界面的温度升高,从而对体系摩擦学行为产生影响.H. Zhong 等^[17]将 $Zr_{41}Ti_{14}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ 非晶合金在100 N、125 N和150 N 3种不同摩擦载荷下进行摩擦实验,发现摩擦速度为0.09 m/s时,随着载荷的增加,Zr基非晶试样的摩擦系数与磨损率均增加;此外,固定载荷为125 N,研究0.06 m/s、0.09 m/s和0.13 m/s 3种不同摩擦速度时该非晶合金的摩擦磨损性能,结果表明,

随着摩擦速度的增加其摩擦系数与磨损率均增大. P. J. Tao 等^[18]研究了不同摩擦速度下 $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 非晶合金的摩擦学行为,发现随着速度的增加摩擦系数与磨损率均变大,且摩擦后非晶材料仍保持非晶结构. M. L. Rahaman 等^[19]研究了 Ti 基非晶合金在 0.13 m/s, 0.52 m/s 和 0.90 m/s 3 种不同摩擦速度下的摩擦学行为,发现不同速度时的摩擦系数变化不大,呈现先增加后下降趋势. 可以看出,载荷与速度是摩擦测试中的重要参数,它们的改变显著影响体系的摩擦磨损性能.

1.3.2 摩擦环境

目前,在非晶合金摩擦学的研究领域中,涉及的环境因素主要包括温度、气氛与腐蚀性溶液等. M. L. Rahaman 等^[19]研究了 $Ti_{40}Zr_{25}Ni_3Cu_{12}Be_{20}$ 块体非晶合金在不同温度下的摩擦学行为,发现环境温度越高,其耐磨性越好. H. Wu 等^[20]在氧气、空气和氩气 3 种不同气氛中对 $Zr_{52.5}Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}Ti_5$ 块体非晶合金进行了销盘式滑动摩擦实验,结果表明,非晶试样的磨损率随环境中氧含量的增加迅速增大. 此外,研究者们还研究了非晶合金在不同腐蚀溶液中的耐磨损性能,例如, H. T. Duan 等^[21]研究了 $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ 块体非晶合金在不同溶液中的摩擦学行为,结果表明,干摩擦时体系的摩擦系数最小,在质量分数为 60% 的 H_2O_2 溶液中摩擦系数最大;其耐磨损性在干摩擦时较好,而在质量分数为 30% 的 H_2O_2 溶液中的磨损最大. 这一结论与 2011 年该课题组对 $Ti_{40}Zr_{25}Ni_8Cu_9Be_{18}$ 块体非晶合金的研究结果一致,即干摩擦时材料表现出较好的耐磨减摩特性,在质量分数为 30% 的 H_2O_2 溶液中磨损最大^[22]. 综上可知,摩擦副总是处于特定的环境中,所处环境的温度、气氛、湿度,以及非晶材料所含的化学元素等因素均影响其磨损机理,从而对材料的摩擦性能产生显著的影响.

2 块体非晶合金摩擦磨损性能研究现状

当非晶合金处于热力学亚稳状态时,会自发或在加热条件下向能量较低的亚稳态或稳定态转变. 当温度较低时,这种转变很慢,而在较高的温度下,原子能克服位垒进行重新排列,即发生晶化行为^[23-25]. 非晶合金发生晶化后,其微观结构将发生改变,导致其硬度、强度、塑性等性能随之变化. 非晶合金在摩擦磨损实验过程中,会释放大量的摩擦热,导致接触表面温度的升高,这对非晶合金的热稳定性提出了更高要求. 正是这一不确定因素的存在,研究者们对非晶合金摩擦学行为主要进行了以下 3 个方面的研究: 1) 块体非晶合金与相应晶态材料摩擦磨损性能的对比研究; 2) 对块体非晶合金进行退火处理,研究不同晶化程度对其摩擦磨损性能的影响; 3) 改变摩擦环境与条件,研究非晶合金摩擦层是否晶化及对摩擦磨损性能的影响.

2.1 块体非晶合金与晶态材料摩擦磨损性能的对比研究

块体非晶合金摩擦学行为的报道存在相互矛盾的结论,部分报道称块体非晶合金的耐磨性能远高于相同成分的晶态材料与传统结构材料^[26-27]. 例如,肖华星等^[28]对 Fe 基块体非晶合金的摩擦磨损性能进行研究,结果表明,Fe 基块体非晶合金的耐磨性能优于成分相同的晶态合金. X. L. Ji 等^[29]对比研究了 $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 块体非晶合金与 AISI 304 不锈钢在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的摩擦学行为,指出,非晶合金磨损量较少,具有良好的耐腐蚀、耐磨性能,同时配副材料的磨损也显著降低. 相反地,也有一些研究^[30]表明,块体非晶合金的耐磨性能比预期明显差很多,远远低于其退火后的合金及传统的晶体合金. 例如, C. Y. Tam 等^[31]研

究了 $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$ 块体非晶合金的摩擦学行为,发现纯非晶合金的耐磨性能优于晶化分数为 50% 的合金,但劣于晶化分数为 30% 的合金。

2.2 热处理对块体非晶合金摩擦磨损性能的影响

由于块体非晶合金存在结构弛豫现象^[32-35],且在发生结构弛豫时,非晶材料仍保持非晶结构,但是结构弛豫会对其力学性能和物理性能产生影响。此外,非晶合金在部分晶化或者全部晶化后,其相应的性能也会发生改变,进而影响其耐磨性能。因此,有研究者试图通过对块体非晶合金进行热处理来改善其摩擦磨损性能。梁松等^[36]研究了热处理对 $\text{Zr}_{57}\text{Nb}_5\text{Cu}_{15.4}\text{Ni}_{12.6}\text{Al}_{10}$ (玻璃化转变温度 $T_g = 673 \text{ K}$, 晶化温度 $T_x = 733 \text{ K}$) 块体非晶合金硬度及摩擦磨损性能的影响,发现 $\text{Zr}_{57}\text{Nb}_5\text{Cu}_{15.4}\text{Ni}_{12.6}\text{Al}_{10}$ 块体非晶合金的耐磨性能优于部分晶化与完全晶化的合金,且当退火温度低于并接近玻璃化转变温度时,其耐磨性能最好。唐明奇等^[37]研究了不同退火温度下 $\text{Ti}_{41.5}\text{Zr}_{2.5}\text{Hf}_5\text{Cu}_{42.5}\text{Ni}_{7.5}\text{Si}_1$ 块体非晶合金的耐磨性能发现,随着退火温度的升高,该非晶合金的硬度增加,且退火后材料的耐磨性能不同于非晶态,其中,退火温度为 750 K 时其耐磨性能最优,退火温度为 705 K 时其耐磨性能次之,非晶态时其耐磨性能最差。

由以上研究可知,块体非晶合金经退火处理后,其硬度及摩擦磨损性能均发生了改变,退火处理对其摩擦磨损性能的影响出现矛盾的结果,这主要与块体非晶合金在退火过程中呈现的结构转变密切相关。为提升块体非晶合金的耐磨性能,很多研究者开始关注非晶合金晶化行为与耐磨性能的关系,尝试通过调控退火温度达到控制晶化相结构、晶粒数量、尺寸及分布等目的,从而获得耐磨性能优异的非晶合金材料^[38-39]。

2.3 摩擦诱导晶化结构对块体非晶合金摩擦磨损性能的影响

目前,有关摩擦诱导非晶合金晶化行为的文献尚不多见,在现有的研究中,关于摩擦诱导晶化行为对其耐磨性能的影响规律并不统一。例如, H. Wu 等^[20]研究发现, Zr-Cu-Ni-Al-Ti 非晶合金摩擦层纳米晶的形成提升了其耐磨性能,而 H. W. Jin 等^[40]研究发现, Zr-Ti-Cu-Ni-Be 非晶合金摩擦层晶化相的形成降低了其耐磨性能。Y. Wang 等^[13]选用导热性较差的陶瓷作为摩擦配副,在一定载荷与速度下,对 Cu-Zr-Al 非晶合金摩擦层晶化行为进行了研究,发现摩擦层晶化相结构与尺寸的差异影响了其耐磨性能。由此可知,非晶合金的耐磨性能与摩擦层晶化行为密切相关,晶化相结构、尺寸变化复杂,受摩擦参数影响显著,限制了其在工程领域中的应用。

3 结语

本文主要分析了影响块体非晶合金摩擦磨损性能的传热因素、配副材料和摩擦条件 3 个主要因素,发现,传热因素和配副材料通过影响摩擦表面温度对摩擦过程与性能产生影响,而摩擦条件是通过影响块体非晶合金的稳定性和磨损量影响其摩擦磨损性能。在现有关于非晶合金与相应晶态材料摩擦磨损性能的对比研究,以及热处理和摩擦诱导晶化结构对块体非晶合金材料摩擦性能的影响研究中,均存在相互矛盾的结论,这与非晶合金的结构特点和摩擦磨损过程的特性有关。因此,深入研究非晶合金的结构与其摩擦磨损行为之间的关系,探究非晶合金磨损机制与转变规律,揭示其摩擦磨损机理,探索提升非晶合金耐磨性能的方法与途径等问题仍是块体非晶合金摩擦磨损性能的研究热点与重点。随着研究方法 with 理论不断深入,关于非晶合金摩擦磨损性能的研究将会为其在耐磨材料领域的实际应用提供理论和技术支撑。

参考文献:

- [1] WANG W H, DONG C, SHEK C H. Bulk metallic glasses[J]. *Materials Science & Engineering R: Reports*, 2004, 44 (2/3): 45.
- [2] LAI L M, DING K L, LIU T H, et al. Ternary Co-W-B bulk metallic glasses with ultrahigh strength[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, 544: 120194.
- [3] RASHIDI R, MALEKAN M, GHOLAMIPOUR R. Microstructure and mechanical properties of a Cu-Zr based bulk metallic glass containing atomic scale chemical heterogeneities[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 729: 433.
- [4] KHAN M M, NEMATI A, RANMAN Z U, et al. Recent advancements in bulk metallic glasses and their applications: a review [J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2018, 43: 233.
- [5] HUA N B, CHEN W Z, WANG W G, et al. Tribological behavior of a Ni-free Zr-based bulk metallic glass with potential for biomedical applications [J]. *Materials Science and Engineering C*, 2016, 66: 268.
- [6] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性[J]. *物理学进展*, 2013, 33(5): 177.
- [7] ZHAI W, NIE L H, HUI X D, et al. Ultrasonic excitation induced nanocrystallization and toughening of $Zr_{46.75}Cu_{46.75}Al_{6.5}$ bulk metallic glass [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 45: 157.
- [8] WANG T, SI J J, WU Y D, et al. Two-step work-hardening and its gigantic toughening effect in Zr-based bulk metallic glasses [J]. *Scripta Materialia*, 2018, 150: 106.
- [9] AIHEMAITI N, LI Q, LI M C, et al. Preparation and properties of CoFeMoPB bulk metallic glasses [J]. *Intermetallics*, 2020, 123: 106834.
- [10] LIU Y, PANG S J, YANG W, et al. Tribological behaviors of a Ni-free Ti-based bulk metallic glass in air and a simulated physiological environment [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2018, 766: 1030.
- [11] ZHOU K, CHEN C, LIU Y, et al. Effects of lutetium addition on formation, oxidation and tribological properties of a Zr-based bulk metallic glass [J]. *Intermetallics*, 2017, 90: 81.
- [12] JIANG X F, SONG J J, FAN H Z, et al. Sliding friction and wear mechanisms of $Cu_{36}Zr_{48}Ag_8Al_8$ bulk metallic glass under different sliding conditions: dry sliding, deionized water, and NaOH corrosive solutions [J]. *Tribology International*, 2020, 146: 106211.
- [13] WANG Y, CHEN W, WANG T, et al. Crystallization behavior of sub-surface in $(Zr, Cu)_{95}Al_5$ bulk metallic glass induced by different counterface materials [J]. *Materials & Design*, 2016, 111: 213.
- [14] TIAN P Y, KHUN N W, SHU B T, et al. Tribological behavior of Zr-based bulk metallic glass sliding against polymer, ceramic, and metal materials [J]. *Intermetallics*, 2015, 61: 1.
- [15] FLEURY E, LEE S M, AHN H S, et al. Tribological properties of bulk metallic glasses [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2004, 375 (1): 276.
- [16] FU X Y, KASAI T, FALK M L, et al. Sliding behavior of metallic glass (Part I): experimental investigations [J]. *Wear*, 2001, 250: 409.
- [17] ZHONG H, CHEN J, DAI LY, et al. Tribological behaviors of Zr-based bulk metallic glass versus Zr-based bulk metallic glass under relative heavy loads [J]. *Intermetallics*, 2015, 65: 88.

- [18] TAO P J, YANG Y Z, RU Q. Effect of rotational sliding velocity on surface friction and wear behavior in Zr-based bulk metallic glass [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2010, 492 (1/2): L36.
- [19] RAHAMAN M L, ZHANG L C, RUAN H H. Effects of environmental temperature and sliding speed on the tribological behaviour of a Ti-based metallic glass [J]. *Intermetallics*, 2014, 52(4): 36.
- [20] WU H, BAKER I, LIU Y, et al. Effects of environment on the sliding tribological behaviors of Zr-based bulk metallic glass [J]. *Intermetallics*, 2012, 25(25): 115.
- [21] DUAN H T, WU Y, MENG H, et al. Tribological properties of $Zr_{41.25}Ti_{13.75}Ni_{10}Cu_{12.5}Be_{22.5}$ bulk metallic glasses under different conditions [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2012, 528 (18): 74.
- [22] DUAN H T, TU J S, DU S M, et al. Tribological properties of $Ti_{40}Zr_{25}Ni_8Cu_9Be_{18}$ bulk metallic glasses under different conditions [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (32): 4573.
- [23] SAINIS, SRIVASTAVA A P, NEOGY S. The effect of Ag addition on the crystallization kinetics and glass forming ability of Zr-(CuAg)-Al bulk metallic glass [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2019, 772: 961.
- [24] ZHOU H B, PETERLECHNER M, HILKE S, et al. Influence of plastic deformation by high-pressure torsion on the crystallization kinetics of a $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ bulk metallic glass [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2020, 821: 153254.
- [25] WU X L, LAN S, WEI X Y, et al. Elucidating the nature of crystallization kinetics in $Zr_{46}Cu_{46}Al_8$ metallic glass through simultaneous WAXS/SAXS measurements [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114: 211903.
- [26] WANG X, WEI X C, HONG X L, et al. Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 280 (9): 381.
- [27] GLORANT T. Microhardness and abrasive wear resistance of metallic glasses and nanostructured composite materials [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 316 (1): 96.
- [28] 肖华星, 陈光, 喇培清. 铁基大块非晶合金的摩擦磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2006, 26 (2): 140.
- [29] JI X L, HU B, LI Y X, et al. Sliding tribocorrosion behavior of bulk metallic glass against bearing steel in 3.5% NaCl solution [J]. *Tribology International*, 2015, 91: 214.
- [30] JIN H W, AYER R, KOO J Y, et al. Reciprocating wear mechanisms in a Zr-based bulk metallic glass [J]. *Journal of Materials Research*, 2007, 22 (2): 264.
- [31] TAM C Y, SHEK C H. Abrasive wear of $Cu_{60}Zr_{30}Ti_{10}$ bulk metallic glass [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2004, 384(1/2): 138.
- [32] WANG Y, ZHAI H T, LI Q, et al. Effect of Co substitution for Fe on the non-isothermal crystallization kinetics of $Fe_{80}P_{13}C_7$ bulk metallic glasses [J]. *Thermochimica Acta*, 2019, 675: 107.
- [33] MAKAROV A S, MITROFANOV Y P, KONCHAKOV R A, et al. Density and shear modulus changes occurring upon structural relaxation and crystallization of Zr-based bulk metallic glasses: in situ measurements and their interpretation [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 521: 119474.
- [34] LOUZGUINE-LUZGIN D V, ZADOROZHNYI M Y, KETOV S V, et al. Influence of cyclic loading on the structure and double-stage struc-

- ture relaxation behavior of a Zr-Cu-Fe-Al metallic glass [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 742:526.
- [35] AFONIN G V, MITROFANOV Y P, KOBELEV N P, et al. Relationship between the enthalpies of structural relaxation, crystallization and melting in metallic glass-forming systems [J]. *Scripta Materialia*, 2019, 166:6.
- [36] 梁松, 褚武扬, 乔利杰. 大块非晶硬度、磨损及摩擦的 SPM 研究 [C] // 中国机械工程学会. 第十一届全国疲劳和断裂学术会议. 北京: 机械工业出版社, 2002: 197.
- [37] 唐明奇, 祝庆, 李福山. Ti 基大块非晶的耐磨性研究 [J]. *铸造技术*, 2005, 26(10):941.
- [38] ZHAO J, GAO M, MA M X, et al. Influence of annealing on the tribological properties of Zr-based bulk metallic glass [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018, 481:94.
- [39] SALEHAN R, SHAHVERDI H R, MIRE SMAELI R. Effects of annealing on the tribological behavior of Zr₆₀Cu₁₀Al₁₅Ni₁₅ bulk metallic glass [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 517:127.
- [40] JIN H W, AYER R, KOO J Y. Reciprocating wear mechanisms in a Zr-based bulk metallic glass [J]. *Journal of Materials Research*, 2007, 22(2):264.
- (上接第 96 页)
- [25] MCQUEEN H J. Initiating nucleation of dynamic recrystallization, primarily in polycrystals [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1988, 101: 149.
- [26] MCQUEEN H J, RYAN N D. Constitutive analysis in hot working [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, 322:43.
- [27] MADEJ L, SITKO M, PIETRZYK M. Perceptive comparison of mean and full field dynamic recrystallization models [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2016, 16(4):569.
- [28] 杜大鹏. 基于位错密度的流动应力模型的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [29] POLLAK E I, JONAS J J. Initiation of dynamic recrystallization in constant strain rate hot deformation [J]. *ISIJ International*, 2003, 43(5):684.
- [30] PRASAD Y V R K. Recent advances in the science of mechanical processing [J]. *Indian Journal of Technology*, 1990, 28(6/7/8):435.
- [31] PRASAD Y V R K, GEGEL H L, DORAIVELU S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-6242 [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1984, 15(10): 1883.
- [32] KE B, YE L Y, TANG J G, et al. Hot deformation behavior and 3D processing maps of AA7020 aluminum alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 845:1.