

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.02.005

影响惯性仪表精度长期稳定的材料学问题与对策

宫灯^{1,3}, 曹又方^{2,3}, 赵之赫³, 姜龙涛³, 武高辉³

- 中国航发控制系统研究所, 江苏无锡 214063;
- 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川绵阳 621900;
- 哈尔滨工业大学材料学院, 哈尔滨 150001)

摘要:陀螺仪和加速度计等惯性仪表的精度对零组件的尺寸变化有着极其敏感的反应。随着对惯性仪表精度及其稳定性研究的深入,发现材料的尺寸不稳定是导致精度稳定性差的主要原因之一。以多种惯性仪表构件的常用材料为例,从材料学角度系统综述了微观缺陷、第二相、晶粒和织构、内应力以及环境因素对材料尺寸稳定性的影响规律,并提出了如何从材料内禀特性出发改善惯性仪表精度长期稳定性,展望了惯性仪表材料与工艺的未来发展方向。

关键词:惯性仪表;铝基复合材料;尺寸变化;精度稳定性;微观组织

中图分类号:V41

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2024)02-0046-11

Material science issues and strategies for long-term stability of inertial instrumentation accuracy

GONG Deng^{1,3}, CAO Youfang^{2,3}, ZHAO Zhihe³, JIANG Longtao³, WU Gaohui³

- Aero Engine Control System Institute, Aero Engine Corporation of China, Wuxi, Jiangsu 214063, China;
- Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;
- School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The accuracy of inertial instruments such as gyroscopes and accelerometers is extremely sensitive to the dimensional changes in the components. With the in-depth research on the accuracy and stability of inertial instruments, it is found that the dimensional instability of materials is one of the main reasons for the poor stability of accuracy. Starting from the commonly used materials for inertial instrument components, a systematic review of the influence of microscopic defects, the second phase, grain and texture, internal stress and environmental factors on the dimensional stability is presented from the perspective of materials science, and the way to improve the long-term stability of inertial instrumentation accuracy is proposed from the material endowment characteristics, and the future direction of inertial instrumentation materials and process development is prospected.

Key words: Inertial instrumentation; Aluminium matrix composites; Dimensional changes; Precision stability; Microstructure

收稿日期:2024-02-06;修订日期:2024-02-21

基金项目:国家自然科学基金(U1637201)

作者简介:宫灯(1994—),男,博士,工程师,主要从事传感器设计方面的研究。

通信作者:姜龙涛(1972—),女,博士,教授,主要从事惯性仪表材料方面的研究。

0 引言

近年来,随着航空航天领域的迅速发展,对陀螺仪和加速度计等精密仪器仪表的精度及长期稳定性的需求越来越迫切,已有研究表明,材料的尺寸不稳定是导致惯性仪表精度和稳定性差的主要原因之一^[1-2]。尺寸稳定性不同于热膨胀或热循环性能,它是精密机械零件材料的主要性能指标,是指在某一特定环境下,零件保持其原始尺寸和形状不变的能力。随着对惯性仪表精度要求的不断提高, 10^{-4} 乃至 10^{-6} 数量级的微小不可逆变形也成为不可忽略的误差源^[3-4]。惯性仪表构件材料主要有四类,一是金属(如铝及铝合金、不锈钢、铜及铜合金、钛合金、铍材、金等)及其复合材料;二是功能材料(如铁镍软磁合金、钐钴硬磁合金、铝镍钴硬磁合金等);三是有机高分子(如聚四氟乙烯、橡胶、环氧树脂等);四是无机非金属材料(如石英玻璃、可加工陶瓷等),其中用量较大的是金属及其复合材料。

以往大多数观点认为残余应力是引起惯性仪表精度漂移的主导因素,并简单归结为由加工或装配应力释放引起。近年来,我国在高精密加工制造、低/无应力装配技术等方面均取得了突破性进展,但仍会发现在仪表交付后,出现精度的缓慢漂移,无法实现长期稳定。实际上,在结构设计、零件加工及装配工艺确定后,仪表精度长期稳定性取决于材料的内禀特性^[5-6]。

材料的内禀特性(如微观缺陷、第二相、晶粒度、织构等)直接影响材料的尺寸稳定性。此外,仪表材料在与外部环境交互作用下(应力场、温度场和时间等)也会发生不可逆的尺寸变化^[7]。图 1 为惯性仪表精度与服役条件、材料微观组织和尺寸变化的关系。以陀螺仪和加速度计为例,其工作条件与贮存环境对材料尺寸稳定性均有影响,即使陀螺仪有温控系统,如果材料本身微观组织结构不稳定、存在亚稳第二相,或装配过程中存在宏/微观残余应力,均会引发仪表的精度漂移。

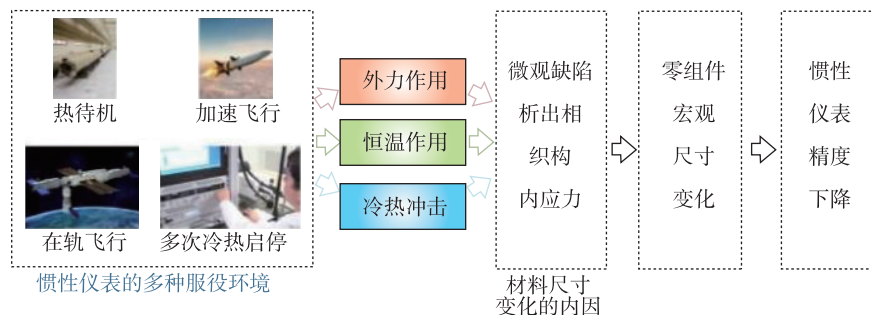


图 1 惯性仪表精度与服役条件、材料微观组织和尺寸变化的关系

Fig. 1 The relationship among the accuracy of inertial instruments, service conditions, microstructure and dimensional changes

综上所述,惯性仪表在精度及其长期稳定性方面的突破,是以掌握材料尺寸变化规律,明确其与环境作用机理为前提的,通过精细化组织与性能调控实现尺寸稳定性,提供给惯性仪表以高稳定性的基础。本文以精密惯性仪表中的常见零组件为例,针对其在惯性仪表中的服役条件,给出影响其尺寸变化的因素,以及提高尺寸稳定性的相应策略,同时展望了未来惯性仪表材料的发展,为相关技术研究和产品开发提供参考。

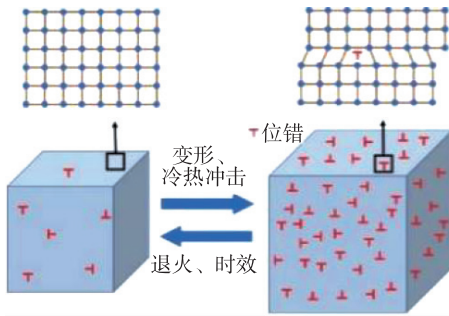
1 惯性仪表材料服役条件下尺寸变化的影响因素

惯性仪表材料的内禀特性主要有微观缺陷、第二相、晶粒、织构及内应力等,外部环境因素主要是通过内禀特性产生交互作用,进而引发尺寸变化。因此,了解服役条件下尺寸变化的影响因素,有利于建立微观组织与尺寸变化的定性及半定量关系,从而为惯性仪表的设计以及精度补偿提供理论依据。

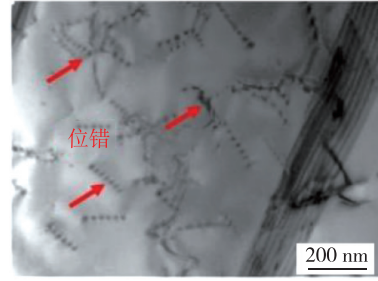
1.1 微观缺陷密度和形态

金属与合金中的微观缺陷包括空位、位错、孪晶及晶界等^[8],其中位错是最典型的微观缺陷形式,是指在规则排列的晶体中,原子不规则排列形成的缺陷,如刃型位错的半个原子面的缺失或增加,由于位错在完美晶体中引入了自由体积,进而引起材料尺寸变化,如图 2 所示。无位错区域原子排列规则,然而在原子数量相同的情况下,位错的存在使得原子周围出现了自由体积,宏观体现为使合金尺寸增加。

在石英加速度计的构件中存在上述使材料尺寸变化的行为,以稳定磁路的磁极片材料 G1J50M 合金为例,如图 3(a)所示,其为单相(γ -Fe,Ni)固



(a) 位错引发自由体积变化示意图

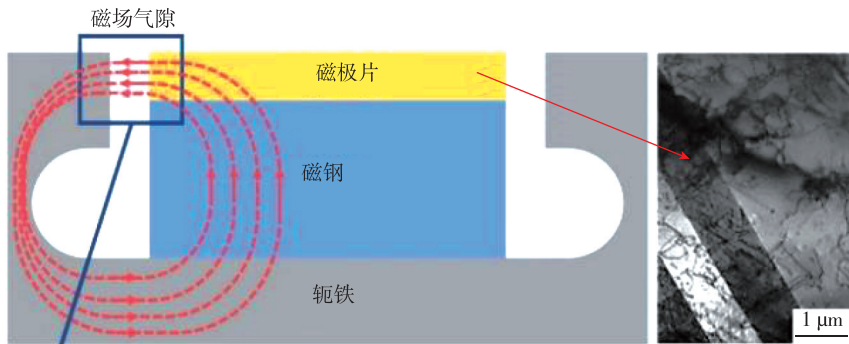


(b) G1J50M 合金中的位错^[9]

图 2 材料的微观缺陷密度对体积影响的示意图

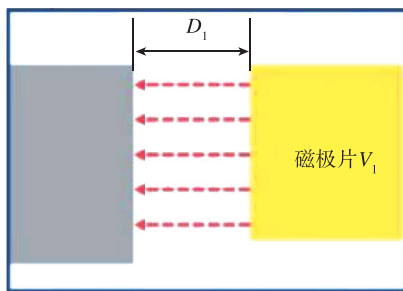
Fig. 2 Schematic of the effect of the microscopic defects density in materials on the dimension of the material^[9]

溶体,主要的微观缺陷形式是位错。退火处理前的 1J50 合金位错分布混乱无序,相互缠结,处于不稳定状态,如图 3(b)所示,并且存在短小相互分离的位错,在外力情况下容易开动,因此尺寸稳定性较差。当磁极片尺寸不稳定,磁极片和轭铁之间磁场气隙宽度 D 将因此改变,导致标度因数稳定性下降,如图 3(c)和(d)所示。尤其是磁极片与磁钢采用粘接形式,组件在升温过程中热膨胀系数差引起的热失配会进一步引发尺寸变化,进而改变磁场气隙,因此在改善加速度计精度稳定时,这些因素均应综合考虑。

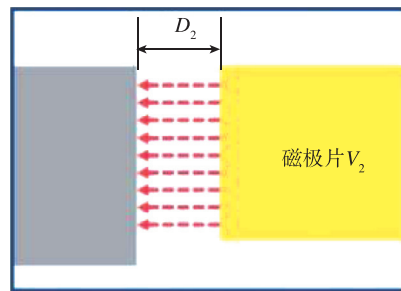


(a) 石英加速度计力矩器剖面图

(b) G1J50M 合金的位错组织



(c) 距离为 D_1 时的磁场气隙示意图



(d) 距离为 D_2 时的磁场气隙示意图

图 3 石英加速度计力矩器、磁极片结构示意图及其 G1J50M 合金微观组织^[9]

Fig. 3 Schematic structure of quartz accelerometer torque converter, magnetic pole piece and the microstructure of its G1J50M alloy

1.2 第二相对稳定性的影响

在金属和合金中的第二相有弥散型和沉淀型两大类。以铝合金为例,2024Al 合金是典型的析出强化合金,含一定量 Cu 和 Mg 元素,主要的析出相包括稳定 S 相(Al_2CuMg)、 θ 相及其相应的亚稳相。图 4 给出了铝合金脱溶析出后的体积变化原理图。以铝合金脱溶析出 S' 相(Al_2CuMg) 的过程为例,由于 Al_2CuMg 的比容小于铝,铝基体周边晶格收缩,材料的体积减小。表 1 给出了 2 系铝合金中可能出现的析出相与初生相的比容值以及与铝的差异。研究表明,时效过程的 2024Al 合金的尺寸变化受固溶体过饱和度、合金元素的扩散速率、析出相/固溶体的共格程度和体积分数因素的影响^[10]。在析出过程中,溶质原子 Cu 和 Mg 的脱溶析出会导致材料基体晶格常数的变化,且形成的稳定相(S 相)、亚稳相(S' 相)与铝基体三者之间的晶格常数也存

在差异。因此,在铝合金中固溶元素脱溶析出、形成亚稳相,以及向稳定相过渡时,其与 Al 基体的比容差也在不断变化,导致尺寸变化持续发生,这是影响长期热待机状态下惯性仪表精度稳定性的主要因素。

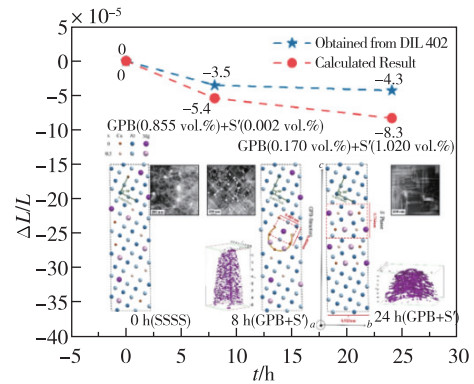


图 4 铝合金 Cu 和 Mg 原子脱溶析出后体积变化原理图^[10]

Fig. 4 Schematic of the volume change of Cu, Mg atoms in aluminium alloys after desolvation and precipitation^[10]

表 1 2024 铝合金与第二相的关系

Tab. 1 The relationships between the 2024 Al alloys and the second phases

基体/析出相/初生相	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	比容/($g^{-1} \cdot cm^3$)	与标准 2024 铝的比容差/%	对尺寸变化的影响
2024 铝	2.78	0.360	0	—
Al_2CuMg (S 相)	3.55	0.282	-21.734	使尺寸减小
Al_2Cu (θ 相)	4.35	0.230	-36.048	使尺寸减小
Mg_2Si (β 相)	1.94	0.515	+43.299	使尺寸增加
$Al_3Cu_2Mg_9Si_7$ (Q 相)	2.64	0.379	+5.303	使尺寸增加
$Al_{20}Cu_2Mn_3$ (T 相)	3.96	0.253	-29.816	使尺寸减小

1.3 晶粒和织构对稳定性的影响

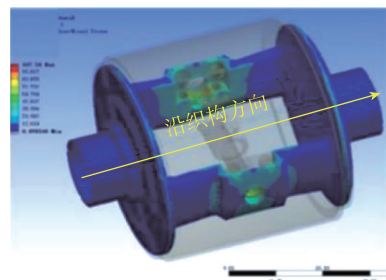
Brown 和 Lukens 系统研究了在外加应力 σ 作用下,金属或合金发生的应变 ϵ ,与材料晶粒尺寸 d 、可动位错密度 ρ 、第一个位错开动所需应力 σ_0 和材料的切变模量 G 之间的关系,得出了关系式^[11]

$$\epsilon = \frac{c\rho d^3(\sigma - \sigma_0)^2}{G\sigma_0} \quad (1)$$

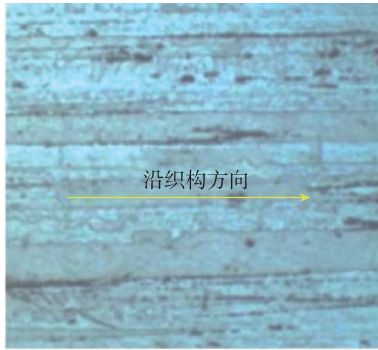
从式(1)可知,晶粒细化可以减小产生的应变,这也是稳定化处理过程中显微组织调控的指导方向。

此外,在实际生产中,采用挤压棒材和轧制板材加工精密仪表构件时,还需关注材料的各向异性,如图 5 所示。以机械陀螺框架用 2024Al 合金为例,图 5(a)中框架一般采用挤压态 2024 铝合金棒材,由于大塑性变形会使晶粒出现择优取向形成织

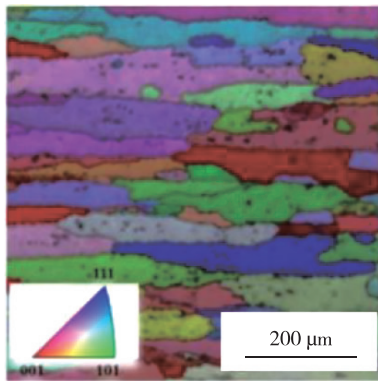
构,如图 5(b)和(c)所示,织构是指多晶材料处于晶体取向明显偏离随机分布的状态。杨峰等^[12]的研究表明,在同种热处理工艺条件下,沿织构方向和垂直织构方向的变形量相差 14 倍,尽管加工态的金属材料具有很高的微屈服强度,但棒材或板材沿不同方向的应变各向异性对陀螺质心稳定无疑是十分不利的。



(a) 陀螺框架中的织构方向示意图



(b) 2024Al 棒材织构的金相照片



(c) 2024Al 棒材织构的背散射衍射 (EBSD) 照片

图 5 机械陀螺框架用 2024Al 合金棒材的显微组织

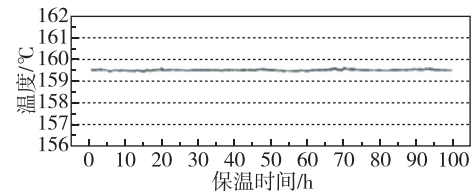
Fig. 5 Microstructure of 2024Al alloy rod for mechanical gyroscope frames

1.4 内应力对稳定性的影响

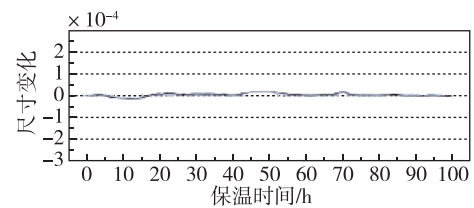
无论宏观残余应力还是微观残余应力,应力的存在均会使材料处于较高能量状态。对于金属材料,材料的机械加工、塑性变形、表面处理、环境变化、载荷变化及相变过程等均会影响残余应力的改变,如温度梯度导致的热应力、高温下的回复行为和热错配导致的应力释放等。利用热处理调整合金的显微组织,则可以影响残余应力的释放进而影响其尺寸稳定性^[13-14]。

长期的工程经验认为,材料的内应力越小越好,往往在去应力处理时大量采用退火工艺,使微屈服强度降低,这对材料的尺寸稳定不利。图 6 为退火态 SiC/2024Al 复合材料在 160 °C 保温(图 6(a,b)) 和 20~150 °C 温度冲击 15 次(图 6(c)) 的尺寸变化^[15]。可见,经退火后, SiC/2024Al 复合材料在恒温条件下保持,应变可以保持不变,退火对去应力作用明显,但经历 130 °C 温差的循环后,如图 7(b) 所示,尺寸一直在变化。对两种状态下的微屈

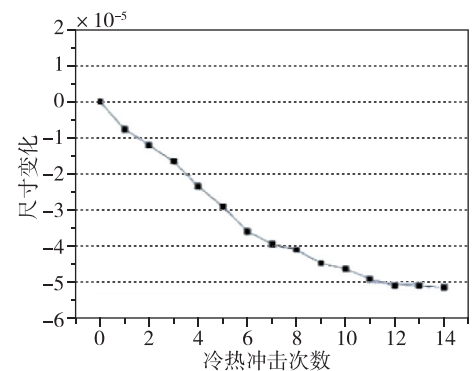
服强度测试表明,退火态 SiC/2024Al 复合材料微屈服强度为 150 MPa,仅为稳定化处理后的 42%,在经历温度冲击时,已发生微屈服,产生不可逆变形。



(a) 100 h 恒温尺寸变化过程的温度监测



(b) 100 h 恒温尺寸变化过程的尺寸变化



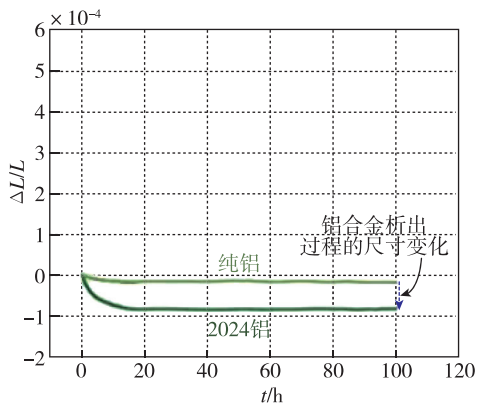
(c) 20 °C ~ 150 °C 循环 15 次的尺寸变化

图 6 退火态 SiC/2024Al 复合材料在 160 °C 保温和经历 20 °C ~ 150 °C 循环 15 次的尺寸变化^[15]Fig. 6 Dimensional changes of annealed SiC/2024Al composite materials after insulation at 160 °C and 15 cycles from 20 °C to 150 °C^[15]

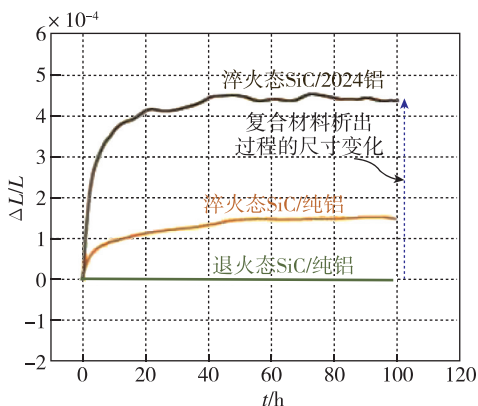
1.5 环境对材料尺寸稳定性的影响

通常,惯性仪表要在大过载、振动冲击、温度循环等条件下长期保持精度稳定,对材料的显微组织和性能提出了更为苛刻的稳定化要求。以仪表级 SiC/2024Al 复合材料为例,在惯性仪表结构件制造环节,配合稳定化工艺实现长期尺寸稳定。研究表明^[16], SiC/纯铝复合材料恒温保温过程(仅内应力对尺寸变化起作用)引起的尺寸变化幅度($\sim 1.5 \times 10^{-4}$) 大于铝合金恒温保温过程(仅时效析出对尺寸变化起作用)的尺寸变化幅度($\sim -0.8 \times 10^{-4}$)。当基体变为 Al 合金后,复合材料内应力对尺寸变化

的效应会进一步放大^[17],如图 7 所示。此外,在不同的服役环境下,同种材料的内应力变化趋势不同,甚至会呈现相反的尺寸变化趋势。例如,SiC/2024Al 复合材料在恒温 190 °C 下产生压应力释放,尺寸增加,而在-196~190 °C 冷热冲击 500 次下则表现为拉应力释放,尺寸减小^[18]。



(a) 铝合金在恒温时效过程的尺寸变化



(b) 复合材料在恒温时效过程的尺寸变化

图 7 铝合金和复合材料在恒温时效过程的尺寸变化^[17]

Fig. 7 Dimensional changes in aluminium alloys and composites during constant temperature aging^[17]

因此,在设计和使用铝基复合材料时,要充分验证其服役的温度载荷、初始的应力状态以及基体材料种类。目前,基于应力稳定的工艺设计思路是进行覆盖其服役温度范围的冷热冲击,释放内应力,使复合材料内部形成大量稳定的位错结构,并促进大量二次析出。

2 提高零组件尺寸稳定性的对策

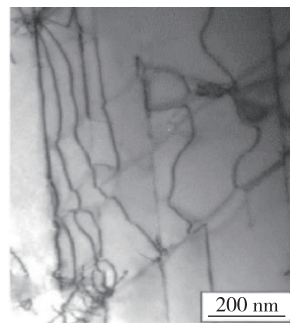
2.1 微观缺陷的调控与优化

以前述石英加速度计中的磁极片为例,现有的

国标(GB/T 15001-1994)仅基于磁性能这一项指标对软磁合金进行了热处理工艺的指导,无法兼顾精密仪表零组件长期尺寸稳定性的要求。如果要获得磁性能和尺寸稳定性综合性能兼优的软磁合金,必须在国标的基础上缩小工艺窗口摸索。研究表明^[9],存在兼具优异的磁性能和尺寸稳定性的 G1J50M 合金的工艺窗口。图 8(a)为对同种软磁合金分别用 9 种不同的热处理工艺所得到的尺寸稳定性和磁性能测试结果,优选出 7 号热处理工艺。图 8(b)为 7 号工艺热处理后的位错组态,可以看到与原始态组织图 3(b)内存在大量可动位错相比,热处理后基体出现了平行位错钉扎的位错组态,该种位错组态提高了材料的微屈服强度和冷热冲击下的尺寸稳定性,如图 8(a)红框所示,同时也兼顾了合金的磁性能。

工艺号	尺寸稳定性		磁性能				
	微屈服强度 / MPa	尺寸变化量 / 均值 / × 10 ⁻⁶	$\mu_m /$ (mH · m ⁻¹)	$H_c /$ (A · m ⁻¹)	$B_{100} /$ T	$B_{200} /$ T	$B_r /$ T
1	70.06	3.42	49.10	6.34	1.175	1.483	0.734
2	70.43	2.64	49.10	6.32	1.175	1.487	0.725
3	65.26	1.42	51.70	6.10	1.177	1.478	0.767
4	84.71	3.30	60.70	4.97	1.184	1.483	0.756
5	83.04	4.92	61.60	4.91	1.183	1.485	0.751
6	78.39	3.39	63.20	4.75	1.181	1.476	0.745
7	81.96	3.64	65.60	4.59	1.185	1.482	0.784
8	80.00	3.00	72.10	4.21	1.181	1.475	0.802
9	79.20	4.38	72.40	4.10	1.177	1.467	0.788

(a) 不同热处理工艺下 G1J50M 合金的尺寸稳定性与磁性能



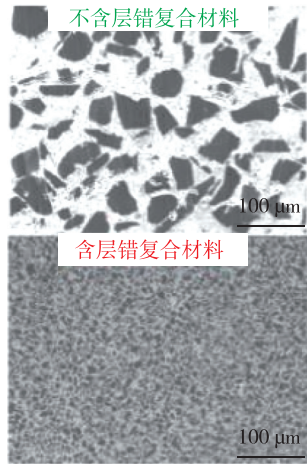
(b) 热处理优化后的位错组态

图 8 基于磁性能和尺寸稳定性的软磁合金热处理工艺优化^[9]

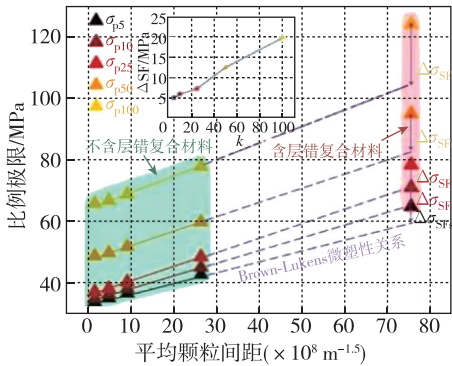
Fig. 8 Heat treatment process optimization of soft magnetic alloy based on magnetic properties and dimensional stability

此外,优选新材料体系也是调控微观缺陷的有效办法。例如,选用仪表级 SiC/Al 复合材料,SiC 陶瓷颗粒钉扎铝基体中的位错,降低可动位错密度,或者改变金属中的缺陷类型。以 SiC/Al 复合材

料为例,研究表明^[19],当复合材料中的陶瓷颗粒平均间距减小至 250 nm 时,可以制备出含层错的复合材料,该种复合材料弹性极限较不含层错复合材料高 50%,如图 9 所示。



(a) 两类复合材料形貌



(b) 铝基复合材料比例极限与平均颗粒间距的关系

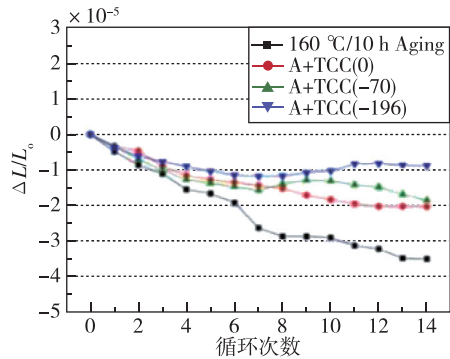
图 9 基于微观缺陷种类的微塑性变形抗力提升^[19]
 Fig. 9 Improvement of microplastic deformation resistance based on microscopic defect types^[19]

需要指出的是,在制定组织调控的工艺路线时,还需要结合惯性仪表服役环境下的应力条件和工作温度范围,选择合适的材料体系和冷热冲击工艺参数。以往选择材料体系和工艺参数依靠经验和大量性能数据,由于没有微观组织的支撑,导致工艺设计的理论依据不足。近年来,随着分析测试技术的不断发展进步,借助 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜和透射电子显微镜等手段,可实现对微观缺陷密度和形态的定量或半定量评估,这为材料体系优化和工艺筛选提供了技术支撑。

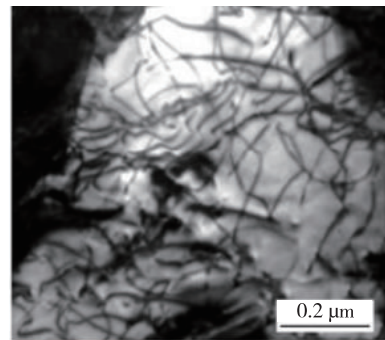
2.2 对第二相的调控

第二相对尺寸稳定性的作用同样是降低材料的可动位错密度,提高位错开动的临界切应力,因此形成细小弥散分布且热力学稳定的第二相是提高材料尺寸稳定性的有效方法。以铝合金为例,目前的时效热处理工艺经优化后发展出分级时效、预应变时效以及应力时效等。例如对 Al-Cu-Mg 合金进行先低温后高温的两阶段时效处理,使原子充分扩散,形成高密度均匀的析出相形核位点^[20-22],或采用时效同时施加应力的方法(应力时效)加速析出相析出,两种方法均达到了提高析出相的细小弥散分布的目的^[23]。预应变时效工艺则是通过预应变使材料内部产生更多的空位及位错,为析出相成核提供更多的位点,提升微屈服强度^[24-25]。

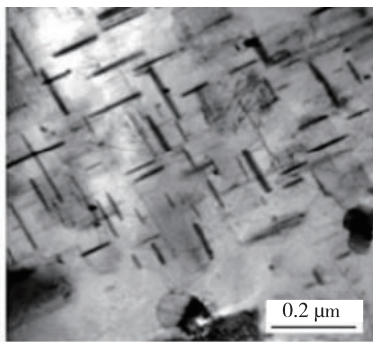
此外,采用基体合金化+尺寸稳定化工艺可以进一步提高铝基复合材料的尺寸稳定性,图 10 为经不同稳定化处理后 SiC/2024Al 复合材料的显微组织。其可能的尺寸稳定化工艺包括时效(A)和时效+冷热冲击(A+TCC)。研究表明^[26],不同的尺寸稳定化工艺会得到不同的显微组织和尺寸稳



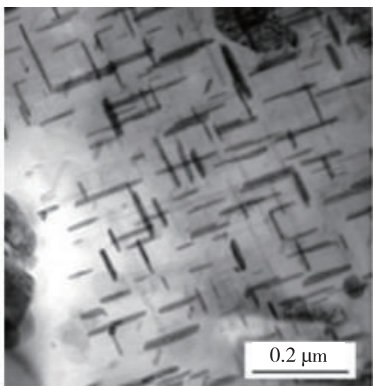
(a) 时效+不同冷热冲击工艺参数对冷热冲击尺寸稳定性的影响



(b) 固溶淬火态基体组织



(c) 160 °C / 10 h 时效



(d) A+TCC(-196 °C)

图 10 经不同稳定化处理后的 SiC/2024Al 复合材料的显微组织^[26]

Fig. 10 The microstructure of SiC/2024Al composite material after different stabilization treatments^[26]

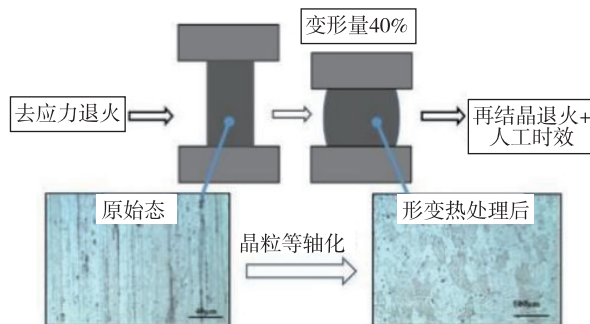
定性,当冷热冲击的下限温度越低,降低残余应力效果越显著,对基体时效析出的促进作用越大,复合材料的尺寸变化越小且越稳定。时效+冷热冲击工艺延长了上限温度的保温时间,强化相的析出更加充分,减小了时效析出对尺寸变化的影响。冷热冲击可以降低复合材料中的残余应力,缓和应力集中。冷热冲击的下限温度越低,效果越显著。

随着惯性仪表精度及其稳定性的不断提升,材料在 10^{-5} 甚至更小量级的尺寸变化也不被允许。考虑到析出相对尺寸变化的影响规律,在选择内部有亚稳或者稳态析出相的惯性仪表材料时,需要确认合金元素成分占比以及初始的热处理状态,这样可以更准确地预测惯性仪表在长期温度载荷下材料的尺寸变化趋势。

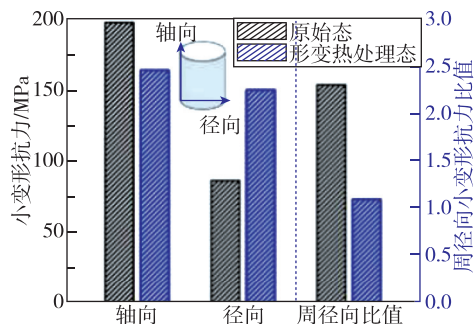
2.3 对晶粒与织构的调控

织构对尺寸稳定性的影响是导致尺寸变化的各向异性。如前所述,陀螺仪框架在轴向和径向上

有极其严格的垂直度要求,加工误差要求控制在微米量级,以避免造成陀螺质心偏移。为此,将 2024Al 挤压棒材做了形变热处理。图 11 给出了挤压态 2024 铝合金在轴向发生 40% 压缩变形量的金相照片和热变形前后的微观组织照片。形变热处理前,轴向晶粒难以统计尺寸,而经过形变热处理后,棒材边缘处的晶粒等轴度为 0.98,晶粒的等轴度明显提高。此外,从图中可以看出原始试样轴向和径向的小变形抗力相差 111.63 MPa,表现出强烈的各向异性;形变热处理后轴向和径向的小变形抗力值分别为 163 MPa 和 149 MPa,相较于原始试样,轴向和径向小变形抗力的比值由形变热处理之前的 2.3 变为 1.1,可见经过形变热处理后,材料的各向异性得到了较好地消除。



(a) 各向同性化处理示意图及组织变化



(b) 热变形处理前后的小变形抗力对比

图 11 铝合金棒材的各向同性化处理示意图、显微组织变化和性能测试

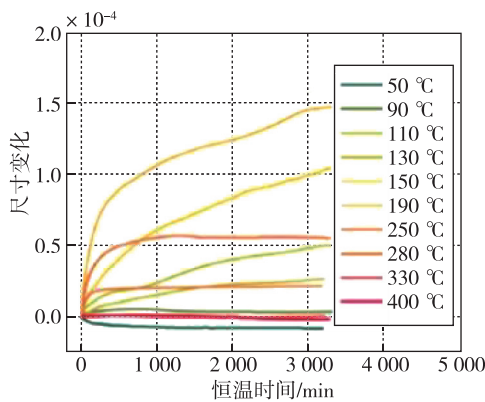
Fig. 11 Schematic diagram of isotropic treatment, microstructure changes, and performance testing of aluminum alloy rod

因此,当必须要采用铝合金棒材或板材加工惯性仪表零组件时,建议增加形变热处理环节,消除织构,获得各向同性的组织,避免出现变形的各向异性。借助扫描电镜中 EBSD、透射电镜中 TKD 或

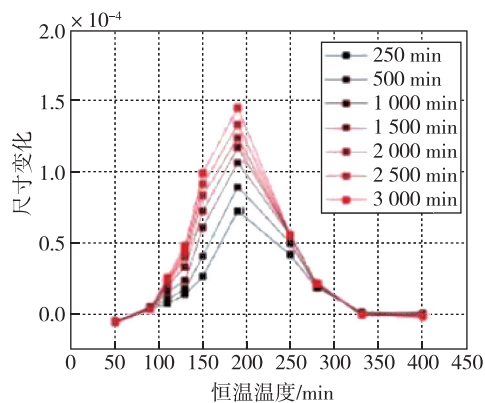
层析三维 XRD 可获得织构的统计信息,从而定量分析织构变化。

2.4 对内应力的调控

内应力对尺寸稳定性的影响规律与材料初始内应力水平和服役条件下平衡状态的内应力状态有关。在纯金属和合金中,内应力对尺寸变化的影响不是主要因素。对于金属-陶瓷两相复合的材料,由于金属和陶瓷的热膨胀系数相差 1 个数量级,在升降温过程中, SiC/Al 复合材料的基体应力状态经历显著变化,并且随时间和保温温度的变化呈现非单调的变化,如图 12 所示。当温度在 50~90 °C 范围内,内应力对复合材料的尺寸变化影响最小。



(a) 设置不同温度摸清内应力的作用规律



(b) 给出内应力影响尺寸变化最大的温度点

图 12 通过不同的保温温度反映内应力对尺寸变化的影响^[16]

Fig. 12 The influence of internal stress on dimensional changes reflected through different insulation temperatures^[16]

以液浮陀螺框架为例,要求其在大大过载、振动冲击、温度循环等条件下长期保持精度稳定, SiC/Al 复合材料尽管在弹性模量、微屈服强度、热膨胀

系数匹配性上综合优于铝合金,但若不对其做尺寸稳定化处理,内部的残余应力在冷热循环或者时效过程引发的尺寸变化反而比铝合金高 1 个数量级。

目前,关于提高尺寸稳定性的组织调控手段,比较公认的是恒温时效法、冷热循环法、形变热处理法和反淬法等^[27-29],且在实际生产中已经获得了大面积应用^[30-32]。但当材料体系复杂后,所要开展的组织调控手段可能存在很大差异,这与材料本身的特点和工艺状态有关^[33-35]。我国目前所使用的仪表级复合材料,通过基体合金设计和稳定化处理等手段实现了高的尺寸稳定性^[36-38]。

3 结论

以往将惯性仪表精度稳定性差的原因归结为残余应力导致的零组件变形是不到位的。在惯性仪表精度和长期稳定性要求日益提高的背景下,应更加重视所用材料的内禀特性。本文围绕惯性仪表长期精度稳定性的迫切需求,从材料学角度系统综述了尺寸稳定性的影响规律,并提出了如何从材料内禀特性出发改善惯性仪表精度长期稳定性,展望了惯性仪表材料与工艺的未来发展方向,总结如下:

1) 惯性仪表材料的内禀特性主要有微观缺陷、第二相、晶粒、织构、内应力等,外部环境因素主要通过与内禀特性产生交互作用,进而引发尺寸变化。

2) 针对影响尺寸变化的每种因素给出了优化策略,如降低可动位错密度、提高析出相细弥散度、晶粒各向同性化处理、热处理稳定工艺等。

3) 惯性仪表材料与工艺未来应朝着开发新材料体系、实施精细化的材料组织调控的方向发展,以材料学策略实现仪表精度的长期稳定。

参考文献

- [1] 亨金(苏), 洛克申(苏). 精密机械制造与仪器制造中金属与合金的尺寸稳定性 [M]. 蔡安源, 杜树芳, 译. 北京: 科学出版社, 1981: 19-30.
М Л Хенкин, И Х Локшин. Dimensional stability of metals and alloys in precision mechanical manufacturing and instrument manufacturing [M]. CAI A Y, DU S F, translated. Beijing: Science Press, 1981: 19-30 (in Chinese).
- [2] MOHN W R, VUKOBRATOVICH D. Recent applications of metal matrix composites in precision instruments and optical systems [J]. Optical Engineering, 1988, 10: 225-235.

- [3] 武高辉, 宫灯, 乔菁, 等. 惯性仪表精度漂移的材料问题与尺寸稳定性复合材料设计 [J]. 导航与控制, 2020, 19(Z1): 237-245.
WU Gaohui, GONG Deng, QIAO Jing, et al. Material problem of inertial instrument precision drift and the design of high dimensional stability composites[J]. Navigation and Control, 2020, 19(Z1): 237-245(in Chinese).
- [4] 武高辉, 乔菁, 姜龙涛. Al 及其复合材料尺寸稳定性原理与稳定化设计研究进展[J]. 金属学报, 2019, 55(1): 33-44.
WU Gaohui, QIAO Jing, JIANG Longtao. Research progress on principle of dimensional stability and stabilization design of Al and its composite materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(1): 33-44(in Chinese).
- [5] 武高辉, 姜龙涛, 陈国钦, 等. 仪表级复合材料在惯性仪表中的应用进展 [J]. 导航定位与授时, 2014, 1(1): 63-68.
WU Gaohui, JIANG Longtao, CHEN Guoqin, et al. The application progress of instrument grade composite materials in inertial instruments[J]. Navigation Positioning and Timing, 2014, 1(1): 63-68(in Chinese).
- [6] 武高辉, 姜龙涛, 修子扬, 等. 仪表级 SiC/Al 复合材料的应用研究与实践 [J]. 导航与控制, 2010, 9(1): 66-70+28.
WU Gaohui, JIANG Longtao, XIU Ziyang, et al. Application research and practice of instrument grade SiC/Al composite materials[J]. Navigation and Control, 2010, 9(1): 66-70+28(in Chinese).
- [7] 武高辉. 金属基复合材料设计引论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
WU Gaohui. Introduction to design of metal matrix composite materials[M]. Beijing: Science Press, 2016 (in Chinese).
- [8] ANDERSON P M, HIRTH J P, LOTHE J. Theory of dislocations [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [9] 王军锋, 宫灯, 王晓光, 等. 基于磁性能和尺寸稳定性的 G1J50M 合金综合性能优化[J]. 金属热处理, 2019, 44(12): 148-153.
WANG Junfeng, GONG Deng, WANG Xiaoguang, et al. Optimization of comprehensive properties of G1J50M alloy based on magnetic properties and dimensional stability[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(12): 148-153(in Chinese).
- [10] CAO Y, JIANG L, GONG D, et al. Quantitative study of dimensional stability mechanism and microstructure evolution during precipitation process of 2024Al alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 90: 85-94.
- [11] BROWN N, LUKENS JR K F. Microstrain in polycrystalline metals [J]. Acta Metallurgica, 1961, 9(2): 106-111.
- [12] 杨峰, 武高辉, 孙东立, 等. 2024 铝合金微变形各向异性消除工艺研究 [J]. 金属热处理, 2000(3): 20-21+48.
YANG Feng, WU Gaohui, SUN Dongli, et al. Study on eliminating micro deformational anisotropy of aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2000(3): 20-21+48(in Chinese).
- [13] FEI W D, WANG L D. Thermal expansion behavior and thermal mismatch stress of aluminum matrix composite reinforced by β -eucryptite particle and aluminum borate whisker[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 85(2-3): 450-457.
- [14] CHEN N, ZHANG H, MU G, et al. The effect of internal stress on the thermal expansion coefficient of Al/SiC_p composite[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(22): 2691-2699.
- [15] 王秀芳. SiC_p/2024Al 复合材料的尺寸稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
WANG Xiufang. Study on dimensional stability of SiC_p/2024Al composite materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003(in Chinese).
- [16] GONG D, ZHU M, CAO Y F, et al. Revealing the mechanism of internal stress on dimensional stability in SiC/Al composites under long-term thermal exposure[J]. Vacuum, 2023, 209: 11786.
- [17] GONG D, CAO Y F, QIAN J R, et al. Microstructural evolution and dimensional stability of 45vol. % SiC/Al composites under long-term aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 938: 168536.
- [18] GONG D, CAO Y F, DENG X B, et al. Revealing the dimensional stability mechanisms of SiC/Al composite under long-term thermal cycling[J]. Ceramics International, 2022, 48(10): 13927-13937.
- [19] GONG D, ZHU M, YOU Z S, et al. In-situ TEM study on the effect of stacking faults on micro-plasticity and proportional limit in SiC/Al composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 244: 110180.
- [20] SONG Y F, DING X F, XIAO L R, et al. Effects of two-stage aging on the dimensional stability of Al-Cu-Mg alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701: 508-514.
- [21] TORSTER M, HASTING H S, LEFEBVRE W, et al. The influence of composition and natural aging on cluste-

- ring during preaging in Al-Mg-Si alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(7): 073527.
- [22] SONG Y F, DING X F, ZHAO X J, et al. The effect of stress-aging on dimensional stability behavior of Al-Cu-Mg alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 718: 298-303.
- [23] ZHANG Z Q, XU H H, WU S N, et al. Effects of combined pre-straining and pre-aging on natural aging and bakehardening response of an Al-Mg-Si alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2013, 25(3): 340-344.
- [24] ZHAO Y L, YANG Z Q, ZHANG Z, et al. Double-peak age strengthening of cold-worked 2024 Aluminum alloy[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(5): 1624-1638.
- [25] ZUIKO I S, KAIBYSHEV R. Ageing response of cold-rolled Al-Cu-Mg alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 781: 139148.
- [26] 王秀芳, 武高辉, 姜龙涛, 等. 冷热循环处理对 SiC_p/2024Al 尺寸稳定性的影响[J]. *材料热处理学报*, 2006, 27(1): 23-27+131.
WANG Xiufang, WU Gaohui, JIANG Longtao, et al. The effect of cold and hot cycling treatment on the dimensional stability of SiC_p/2024Al[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2006, 27(1): 23-27+131(in Chinese).
- [27] MARSCHALL C W, MARINGER E. Dimensional instability—an introduction [M]. Oxford: Pergamon Press, 1977.
- [28] YANG F, WU G, SUN D, et al. Study on isotropy treatment process of hot extruded LY12 Al alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 280(1): 50-53.
- [29] YANG F, WU G, SUN D. A study on micro-plastic deformation behavior of 2024Al alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, 13(2): 502-507.
- [30] FU L, WU G, ZHOU C, et al. Effect of microstructure on the dimensional stability of extruded pure Aluminum [J]. *Materials(Basel)*, 2021, 14(17): 4797.
- [31] 武高辉, 张强, 姜龙涛, 等. 金属基复合材料尺寸稳定性检测方法 冷热循环法: GB/T 41739-2022[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2022.
WU Gaohui, ZHANG Qiang, JIANG Longtao, et al. Test method for dimensional stability of metal matrix composites-thermal-cold cycling method; GB/T 41739-2022[S]. Beijing: National Standardization Administration, 2022(in Chinese).
- [32] 武高辉. 金属基复合材料尺寸稳定性设计[C]// 第三届中国国际复合材料科技大会摘要集-分会场 1-5. 杭州: 中国复合材料学会, 2017: 1.
WU Gaohui. Dimensional stability design of metal matrix composite materials[C]// Summary of the 3rd China International Conference on Composite Materials Technology-SubVenues 1-5. Hangzhou: China Composite Materials Society, 2017: 1(in Chinese).
- [33] 武高辉. 金属基复合材料性能设计——创新性思维的尝试 [J]. *中国材料进展*, 2015, 34(6): 432-438+461.
WU Gaohui. Performance design of metal matrix composite materials: an attempt of innovative thinking [J]. *Materials China*, 2015, 34(6): 432-438+461(in Chinese).
- [34] 王旭, 吴私, 王晨充, 等. 热处理工艺对 2A12 合金微观组织与尺寸稳定性的影响[J]. *材料热处理学报*, 2013, 34(S1): 41-45.
WANG Xu, WU Si, WANG Chenchong, et al. The effect of heat treatment process on the microstructure and dimensional stability of 2A12 alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34(S1): 41-45(in Chinese).
- [35] 武高辉, 修子扬, 孙东立, 等. SiC_p/2024Al 复合材料尺寸稳定化处理工艺研究[J]. *材料科学与工艺*, 2009, 17(6): 879-881+888.
WU Gaohui, XIU Ziyang, SUN Dongli, et al. Research on SiC_p/2024Al composite material size stabilization treatment process[J]. *Materials Science and Technology*, 2009, 17(6): 879-881+888(in Chinese).
- [36] 武高辉. 国内外惯性器件材料与工艺研究新进展 [C]// 2005 年惯性器件材料与工艺学术研讨暨技术交流会议论文集摘要集. 哈尔滨: 中国惯性技术学会, 2005: 10.
WU Gaohui. New progress in materials and processes research of inertial devices at home and abroad[C]// Summary Collection of Papers from the 2005 Academic Symposium and Technical Exchange Conference on Materials and Processes of Inertial Devices. Harbin: China Inertial Technology Society, 2005: 10(in Chinese).
- [37] GONG D, CAO Y, ZHAN Y, et al. Micro-creep behavior and microstructure evolution of SiC_p/2024Al composite[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 771: 138606.
- [38] GONG D, CAO Y, DENG X, et al. Higher proportional limit of SiC/Al composites with nano-scaled stacking faults [J]. *Composites Communications*, 2022, 32: 101188.

(编辑:黄利华)