

## 表面摩擦磨损与润滑

Ni60/铝青铜喷涂后定向凝固涂层的  
微观结构与耐磨性杨效田<sup>a,b</sup>, 付小月<sup>a</sup>, 段军灵<sup>a</sup>, 李秀倩<sup>a</sup>, 魏亨利<sup>a</sup>, 李文生<sup>a,b</sup>(兰州理工大学 a.材料科学与工程学院, b.省部共建有色金属先进加工与  
再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** **目的** 为有效提高涂层的耐磨性能, 提出制备定向结构复合涂层, 通过评估其性能及结构特征, 探索定向结构在涂层制备中的应用。**方法** 以 Ni60/铝青铜为研究对象, 采用感应重熔+强制冷却技术对预制涂层进行处理, 制备定向凝固复合涂层。借助销盘式摩擦试验机、OM、SEM、XRD、显微硬度计对其摩擦学行为、微观组织形貌、显微硬度进行表征研究。**结果** 摩擦磨损试验表明, 相对于预制涂层, 在载荷分别为 50、100、150 N 时, 重熔涂层的体积磨损率分别降低了 85%、80%、82%, 而定向凝固涂层的体积磨损率分别降低了 93%、84%、86%, 定向凝固涂层具有更好的耐磨性能。微观结构分析表明, 重熔涂层和定向凝固涂层与基体均形成了牢固的冶金结合, 而定向凝固涂层组织基本控制了晶粒沿着热流方向生长, 并形成硬质相包裹枝晶的壳层结构。定向凝固涂层随载荷的升高, 摩擦系数保持稳定。**结论** 通过感应重熔+强制冷却技术制备了定向凝固 Ni60/铝青铜复合涂层, 其定向结构的形成使涂层具有更加优越的耐磨性能。

**关键词:** 感应重熔; 强制冷却; 定向凝固涂层; 微观结构; 摩擦磨损**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0182-09**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.024Microstructure and Friction Properties of Directional Solidification  
Coatings Formed by Ni60/Aluminium Bronze after SprayingYANG Xiao-tian<sup>a,b</sup>, FU Xiao-yue<sup>a</sup>, DUAN Jun-ling<sup>a</sup>, LI Xiu-qian<sup>a</sup>, WEI Heng-li<sup>a</sup>, LI Wen-sheng<sup>a,b</sup>(a.College of Materials Science and Engineering, b.State Key Laboratory of Advanced Processing and  
Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**ABSTRACT:** To improve the wear resistance of coatings effectively, prepare the directional solidification composite coatings and explore the application of directional structure in coating preparation by evaluating performance and structural characteristics. Ni60/aluminum bronze was taken as the research material, the directional solidification composite coatings were prepared by induction remelting + forced cooling technology. The tribological behavior, microstructure morphology and microhardness were characterized by pin plate friction testing machine, OM, SEM, XRD and microhardness tester. The friction and wear test showed that, compared with prefabricated coatings, when the load was 50, 100 and 150 N, the volumetric wear rate of the induction remelting coating was decreased by 6.7 times, 5 times and 6.5 times, while that of the directional solidification coating was reduced by

收稿日期: 2018-06-20; 修订日期: 2018-09-10

Received: 2018-06-20; Revised: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51365024); 国家国际科技合作项目 (2015DFR51090); 浙江省自然科学基金 (LGG19E010003)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51365024) and National International Science and Technology Cooperation Foundation (2015DFR51090) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation (LGG19E010003)

作者简介: 杨效田 (1971—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为表面工程。邮箱: 978575878@qq.com

Biography: YANG Xiao-tian(1971—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: surface engineering. E-mail: 978575878@qq.com

12.9 times, 6.8 times and 7.5 times. Therefore, the directional solidification coating had better wear resistance. The microstructure analysis showed that the strong metallurgical bond was formed in the remelting coating and the directional solidification coating, and the directional solidification coating controlled the growth of the grain along the direction of heat flow, and formed the shell structure of hard phase wrapping the dendrites. The directional solidification coating exhibited stable friction coefficients along with the elevated loads. The directional solidification Ni60/aluminum bronze composite coating is prepared by induction remelting + forced cooling technology, and the formation of directional structure makes the coating have better wear resistance.

**KEY WORDS:** induction remelting; forced cooling; directional solidification coating; microstructure; friction and wear

随着科学技术的日益发展, 工件表面的保护在日常生活中变得越来越重要, 制备耐磨耐蚀性能优良的涂层成为表面工程领域关注的一个重要问题<sup>[1]</sup>。Ni60 因其具有优良的耐磨、耐蚀、抗氧化和抗高温磨损等综合性能而被用于零件表面的保护和修复<sup>[2]</sup>。随着涂层发展到第三代技术, 研究者试图通过向涂层添加硬质强化物相或具有自润滑性能的减摩材料来改善 Ni 基合金的综合性能, 但这种第二相的添加, 存在其和基质涂层材料嵌合性和顺应性的问题, 往往导致涂层存在微观界面缺陷, 在使用过程中容易产生裂纹, 且硬质相容易脱落<sup>[3]</sup>。如何克服复合涂层制备过程中的上述缺陷, 笔者课题组提出将具有不同功效、冶金相容性较好的多组复合材料 Ni60 和铝青铜合金混合, 使其在涂层制备过程中发生冶金反应, 制备多元复杂合金复合涂层。研究表明, 采用超音速等离子喷涂的 Ni60/铝青铜合金多元复合涂层较单一合金涂层显示出更加优越的综合性能<sup>[4]</sup>。由于等离子喷涂固有的特征, 喷涂层在形成层状结构过程中, 两种复合材料冶金反应不充分, 分层现象明显。这种分层现象尽管能使涂层达到某些梯度涂层的性能, 但导致涂层性能不均匀, 涂层与基体也未能达到冶金结合, 界面结合强度不高。为克服上述涂层存在的问题并有效提高涂层性能, 本文提出通过控制结构取向进行涂层性能的研究。

控制晶粒结构的演变对于通过加工来优化材料性能是至关重要的<sup>[5]</sup>。由于定向结构晶粒能很大程度上消除横向晶界, 使得晶粒按照特定方向生长, 利用结构取向的各向异性, 有效改善材料的纵向物理性能和力学性能<sup>[6-8]</sup>, 因而在合金制备中受到特殊关注, 但目前定向结构在涂层中的应用并未受到关注, 制备具有定向结构的涂层对涂层微结构及性能研究具有重要的科学意义及应用价值。本文提出采用高频感应重熔+强制冷却的技术对超音速等离子喷涂制备的 Ni60/高铝青铜合金多元复合涂层进行处理, 控制涂层结构取向, 从而制备性能优异的定向凝固涂层, 研究定向结构涂层摩擦学行为以及涂层的微观结构特征, 对涂层技术的发展具有重要意义。

# 1 实验

## 1.1 实验材料及预制涂层

基体材料选用 45<sup>#</sup>钢, 尺寸为 100 mm×100 mm×

13 mm, 喷涂材料为 Ni60 和铝青铜合金混合粉末, 其中铝青铜的质量分数为 20%, 利用机械混料的方法将配好的粉末均匀混料 4 h。两种粉末的成分见表 1 和表 2。喷涂前对基体表面进行喷砂粗化处理, 再用丙酮清洗表面进行除锈、除油。采用 DH-2080 超音速等离子喷涂系统在基体表面预制 Ni60/高铝青铜复合涂层, 试样涂层厚度均为 0.7 mm。喷涂电压为 150 V, 喷涂电流为 315 A, 送粉电压为 10 V, 喷枪工作距离为 125 mm, 主气为 Ar 气, 次气为 H<sub>2</sub>。喷涂完成后冷却至室温, 线切割成  $\phi$ 30 mm 的待处理试样。

表 1 Ni60 合金粉体化学成分  
Tab.1 Compositions of Ni60 alloy powder

wt/%					
Cr	B	Si	Fe	C	Ni
15~17	3.0~4.0	3.5~5.0	≤15	0.6~1.2	Bal.

表 2 铝青铜合金粉体化学成分  
Tab.2 Compositions of the aluminum bronze powder

wt/%					
Cu	Al	Fe	Mn	Ni	Co
70~80	12~16	2.0~4.0	0.5~2.0	0.2~0.5	0.2~0.5

## 1.2 感应重熔涂层及定向凝固涂层

采用深圳双平公司生产的 SPG-30B 高频感应加热设备对截取的  $\phi$ 30 mm×13 mm 试样进行感应重熔处理, 感应加热功率选用 3.2 kW, 频率为 175 kHz, 平面薄饼线圈与工件间隙为 3~4 mm。涂层位于感应端面, 感应重熔后将试样置于沙中冷却。

采用高频感应加热设备和自行设计的定向强制冷却装置对喷涂涂层进行处理, 感应加热时参数与制备感应重熔涂层一致。强制冷却时水流量为 80 L/h, 让水均衡地从基体流向涂层, 使得试样快速冷却, 即制得定向凝固涂层。

## 1.3 摩擦磨损实验

摩擦磨损实验在 MMW-1A 立式万能摩擦磨损实验机上进行, 对偶摩擦盘选取 Gr15 不锈钢, 尺寸为  $\phi$ 70 mm×5 mm。根据设备要求, 摩擦试样制备成  $\phi$ 4.8 mm×13 mm 的销状试样, 摩擦条件: 室温, 摩擦时间为 10 min, 转速为 100 r/min, 载荷分别为 50、

100、150 N。

## 1.4 分析测试方法

采用MEF3A金相显微镜观察涂层表面及截面的金相组织,采用Quanta FEG 450场发射扫描电镜(SEM)观察涂层微观组织及摩擦形貌。采用电子探针针对涂层进行区域元素分析和截面元素分布状态分析。采用D/MAX2500PC型X射线衍射仪对涂层表面进行物相分析,扫描速度为5(°)/min,扫描范围为10°~100°,加速电压为40 kV,电流为30 mA。采用维氏硬度仪HV-1000测量涂层截面微观硬度值,加载载荷为300 g,保载时间为5 s。

## 2 涂层的摩擦学行为

图1为三种结构涂层的摩擦学曲线。考虑到摩擦过程中塑性变形对涂层耐磨性的影响,对不同载荷条件下三种组织结构涂层的体积磨损率进行分析,结果如图1a所示。随着载荷的增加,三种结构涂层的体积磨损率均呈现先增大后减小的趋势,定向凝固涂层在不同载荷下均表现出最小的体积磨损率。相对于预制涂层,载荷为50 N时,感应重熔涂层的体积磨损率降低了85%,定向凝固涂层降低了93%;载荷为100 N时,感应重熔涂层的体积磨损率降低了80%,定向凝固涂层降低了84%;载荷为150 N时,感应重熔涂层的体积磨损率降低了82%,定向凝固涂层降低了82%。由此可知,感应重熔结构使涂层体积磨损率大大降低,而定向结构的形成使涂层体积磨损率进一步降低,说明定向凝固涂层具有更好的耐磨性能。

对三种涂层摩擦系数进行对比分析,如图1b所示。预制涂层的平均摩擦系数低于其他两种结构涂层,说明经感应重熔以及强制冷却使涂层组织结构取向发生改变,显著增大了涂层的摩擦系数。定向结构涂层随载荷变化,摩擦系数稳定性较好,结合涂层体积磨损率的变化,可见定向结构取向的涂层组织能显著增强涂层的耐磨性能,使涂层显示出耐磨阻磨效应<sup>[9]</sup>。

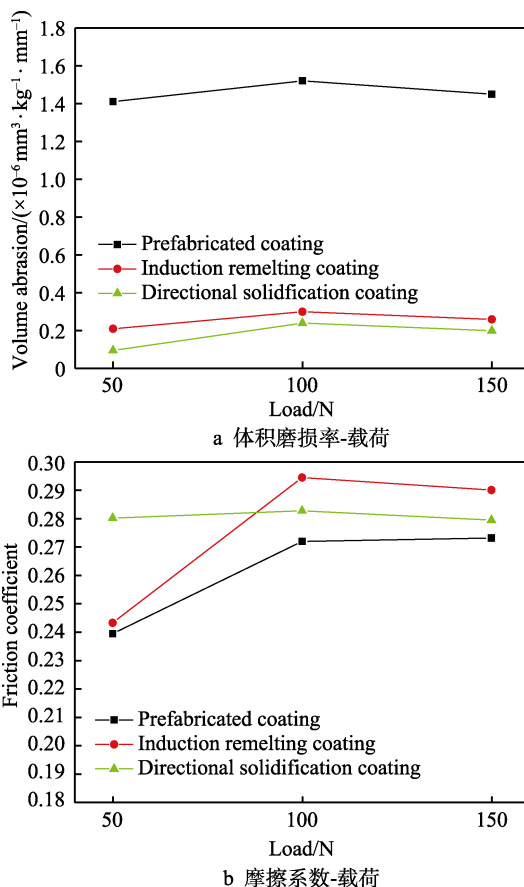


图1 不同结构涂层的摩擦学曲线

Fig.1 Tribological curves of different structural coatings: a) volume abrasion rate vs load; b) friction coefficient vs load

图2是不同结构Ni60/铝青铜复合涂层在载荷为150 N时的微观磨损形貌。从图2a可以看出,等离子喷涂的预制涂层摩擦表面上磨痕清晰,涂层粘着磨损较为严重,摩擦过程中塑性变形流动残留的痕迹明显,涂层表层有因粘着磨损过程使涂层表面疲劳而出现的疲劳裂纹(图2a中A),整体表现为粘着和疲劳的磨损特征。从图2b可以看出,感应重熔涂层经摩擦后,摩擦表面粘着许多细小的磨粒,这是涂层在轻微粘着磨损过程中发生的细小磨屑的迁移。涂抹在

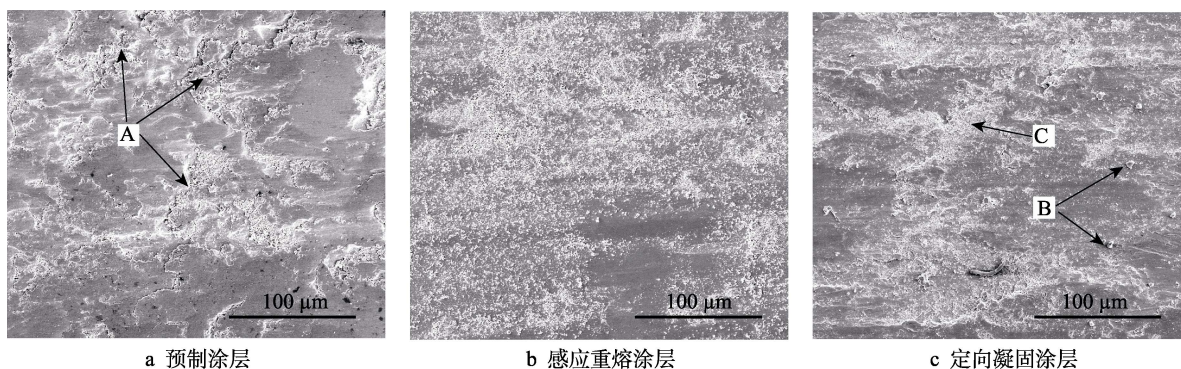


图2 150 N载荷下不同结构涂层的微观磨损形貌

Fig.2 Wear morphologies of different structural coatings under 150 N: a) prefabricated coating; b) induction remelting coating; c) directional solidification coating



摩擦表面留下的痕迹,涂层主要表现为粘着涂抹的磨损方式。从图 2c 可以看出,定向凝固涂层在摩擦过程中产生粘着的颗粒状磨屑(图 2c 中 A)和磨屑的堆积(图 2c 中 B)。这也是在摩擦过程中摩擦表面粘着塑性变形,脱落的磨屑迁移以及受到定向组织结构取向影响而聚集的现象。

为进一步分析摩擦表面状态,选取 150 N 载荷下定向结构涂层的磨损表面,对其主要元素分布进行分析,结果如图 3 所示。可以看出,涂层表面氧元素含

量较多,说明涂层在摩擦过程中发生了磨粒的氧化。从元素分布区域结合涂层元素和氧的亲和能力,认为主要为 Cr 元素的氧化和 Cu 元素的氧化,形成的氧化物在摩擦过程中位于涂层与对磨件之间,相当于一层润滑剂,起到一定的减摩效果。结合图 2 可知,这些生成的氧化物主要在晶界处聚集,部分在主枝晶表面,优先和对偶件接触,起到很好的减摩作用的同时,降低了主轴和对偶件接触的几率,降低了涂层整体磨损率。

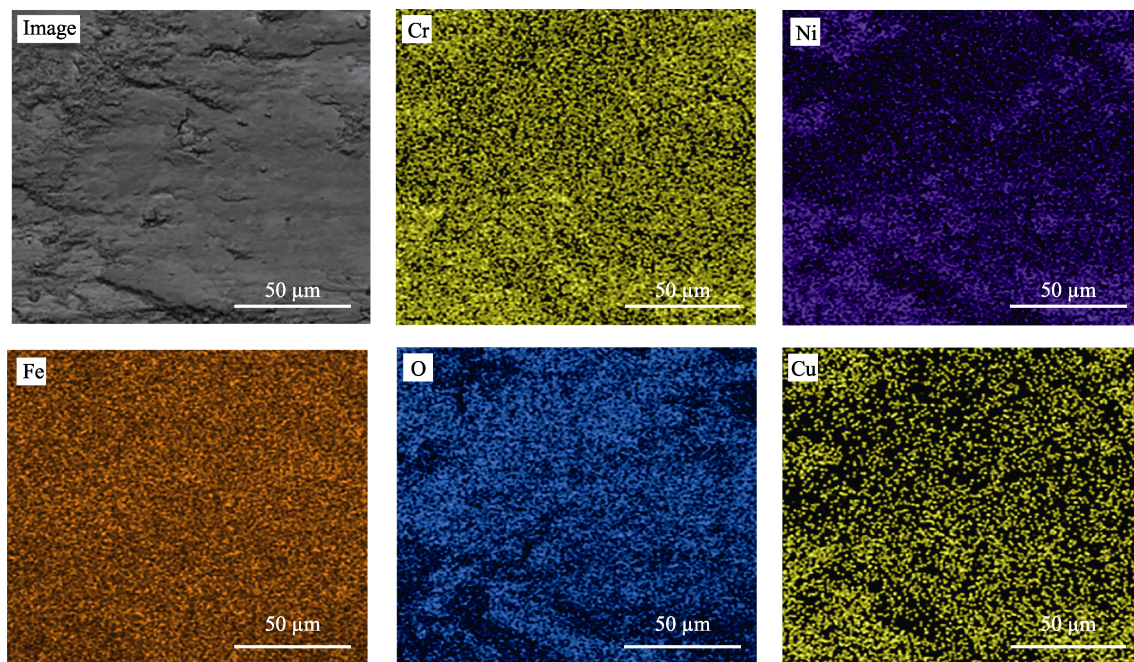


图 3 150 N 载荷下定向结构涂层磨痕区域面能谱分析

Fig.3 EDS plane scanning analysis of wear scar of directional solidification coating under 150 N

### 3 涂层的微观结构特征

#### 3.1 涂层的微观结构及其与摩擦学耦合机制

图 4 为预制涂层、感应重熔涂层和定向凝固涂层的微观结构照片。由图 4a 超音速等离子喷涂预制涂层的截面金相组织可以看出,其呈现典型的层流状结构特征,截面微观结构具有半月状特点,由变形铺展的混合扁平粒子、未熔颗粒、熔合粒子构成,各粒子之间夹杂有氧化物、气孔等缺陷。涂层与基体间主要以镶嵌、咬合的机械连接形式为主,只是在局部部位出现少量的冶金结合<sup>[10-11]</sup>。图 4b 为感应重熔涂层的截面金相组织,对比图 4a 可以发现,重熔使基体与涂层之间形成明显白亮带——扩散过渡带,涂层与基体间形成良好的冶金结合,其结合强度得到极大的提高<sup>[12]</sup>。同时,感应重熔涂层纵截面组织呈现细小的十字状等轴晶、颗粒状等轴晶和杂乱的树枝晶特征,靠近基体附近具有晶粒粗大的树枝晶。这主要是由于涂层与基体结合界面处温度较高,处于熔融状态的时间较长,晶粒在界面处开始形核长大,形成具有短距离

方向特征的胞状树枝晶。随着涂层向表面推进,由于表面的散热效应,涂层冷却强度逐渐增大,组织结构得到细化。分析认为,感应重熔通过对涂层的熔化、再结晶,消除了涂层中由于喷涂形成的应力、扁平化颗粒、氧化物杂质、气孔等缺陷,优化了涂层的组织结构,降低或消除了涂层孔隙率,提高了组织结构致密度,使得涂层组织结构细化。并且区域具有短程定向结构生长特征,晶粒结构的致密化能有效减小晶界效应对摩擦学性能的不利影响,使重熔的涂层耐磨性能大大提高。图 4c 为定向凝固涂层截面金相组织,对比分析感应重熔涂层的组织结构,可以发现,涂层与基体的界面部位也出现了一条明显的白亮色结合带。晶粒的柱状胞晶结构特征表现非常明显,而且涂层组织基本控制了晶粒沿着热流方向的生长。在胞晶的前沿位置,溶质析出元素聚集明显,正是析出的溶质元素在生长的晶粒前沿聚集,造成较大的成分过冷,阻碍了晶粒向前的发展,从而使胞状晶前沿具有细化现象,并迫使平行于热流方向定向生长的晶粒向横向扩展,抑制并吞并了二次枝晶,使局部区域形成排列整齐的胞状晶结构。纵向生长的



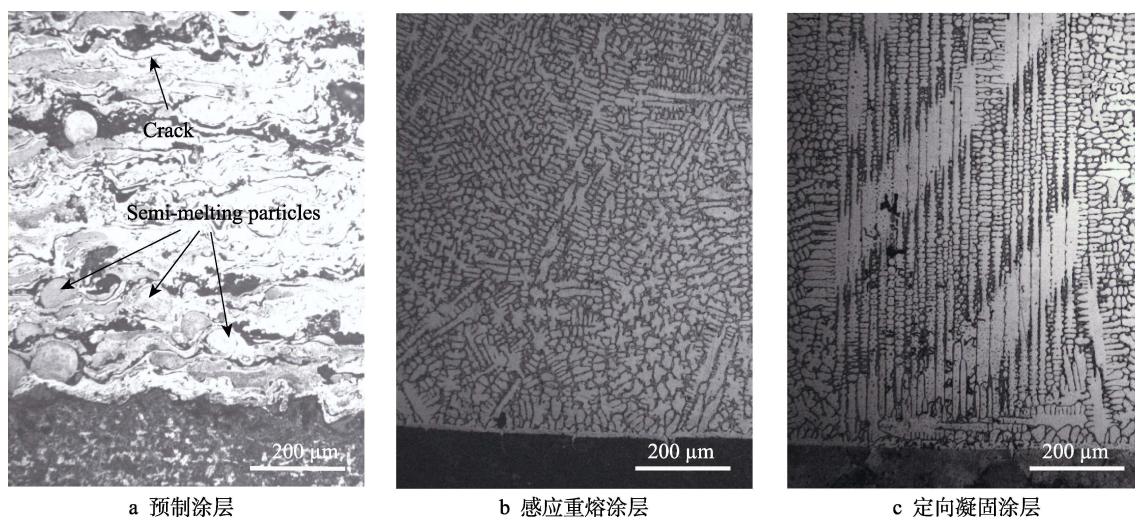


图4 不同结构涂层的截面金相组织

Fig.4 The section metallograph of different structural coatings: a) prefabricated coating; b) induction remelting coating; c) directional solidification coating

结构取向能有效阻挡沿横向的摩擦剪切力,形成结构取向的阻挡效应,从而一定程度上提高了涂层的耐磨性能<sup>[13]</sup>。

对定向凝固涂层纵截面主要元素面分布进行分析,并和感应重熔涂层进行对比,如图5和图6所示。可以发现,感应重熔涂层和定向凝固涂层的晶粒部位主要富集Ni、Fe、Cu元素,形成以Ni元素为主的晶粒构架。可以认为,微观结构照片反映的等轴晶粒、平面晶、树枝晶主轴,主要为Fe、Ni合金化合物或固溶体结构以及Cu与Ni的新相化合物。再结晶过程中,析出的Cr、C、B等溶质元素在晶界富集,形成陶瓷性质的强化物相,对晶粒进行包裹,起到支撑和

晶间强化的作用。定向结构的晶粒在韧性较好的主轴周围包裹一层硬质结构,形成内韧外硬的晶粒结构形式,具有垂直取向的晶界强化物相在摩擦过程中能起到首先承受切向摩擦力和垂直载荷的作用,保护了枝晶主轴的磨损,对涂层的横向摩擦学性能起到很好的强化作用。同时,向外生长形成的定向结构组织消除了横向晶界的影响,使涂层能够在总体保持低硬度的情况下具有很好的耐磨性能<sup>[14]</sup>。从元素分布图片还可看出,在界面形成过程中,感应重熔涂层和定向凝固涂层元素均沿着基体晶界持续向基体内部延伸,形成涂层在基体上的“钉扎效应”,有效增强了涂层与基体冶金结合的可靠性。

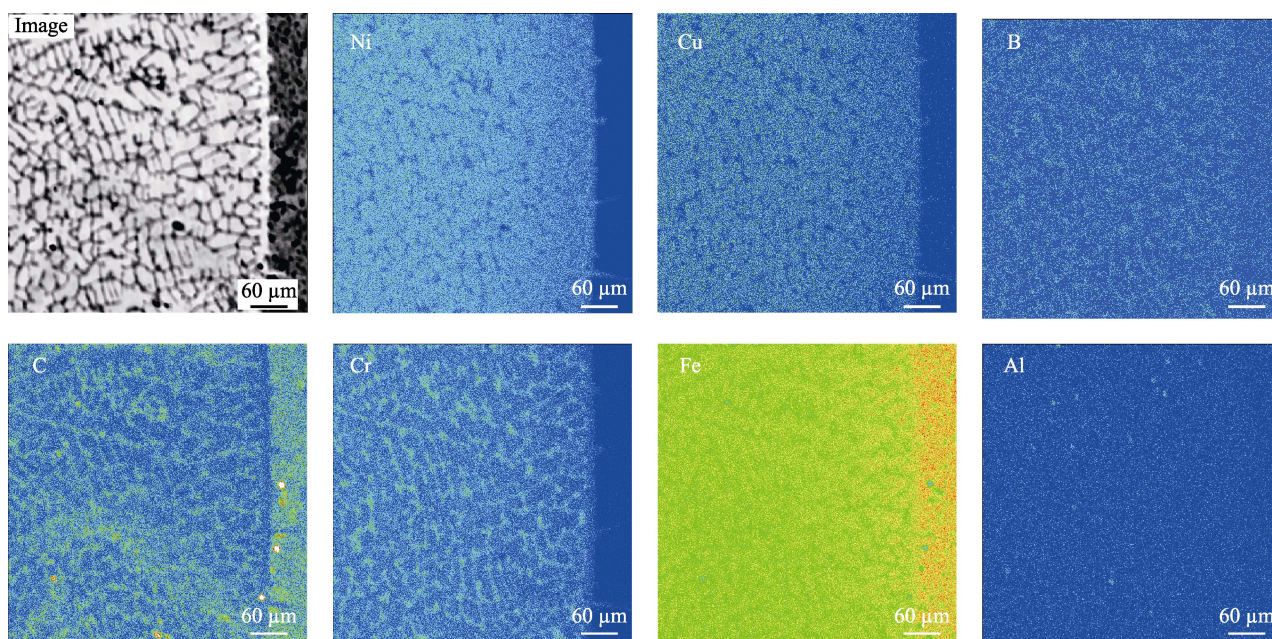


图5 感应重熔涂层截面元素面分布

Fig.5 Element distributions of induction remelting coating section



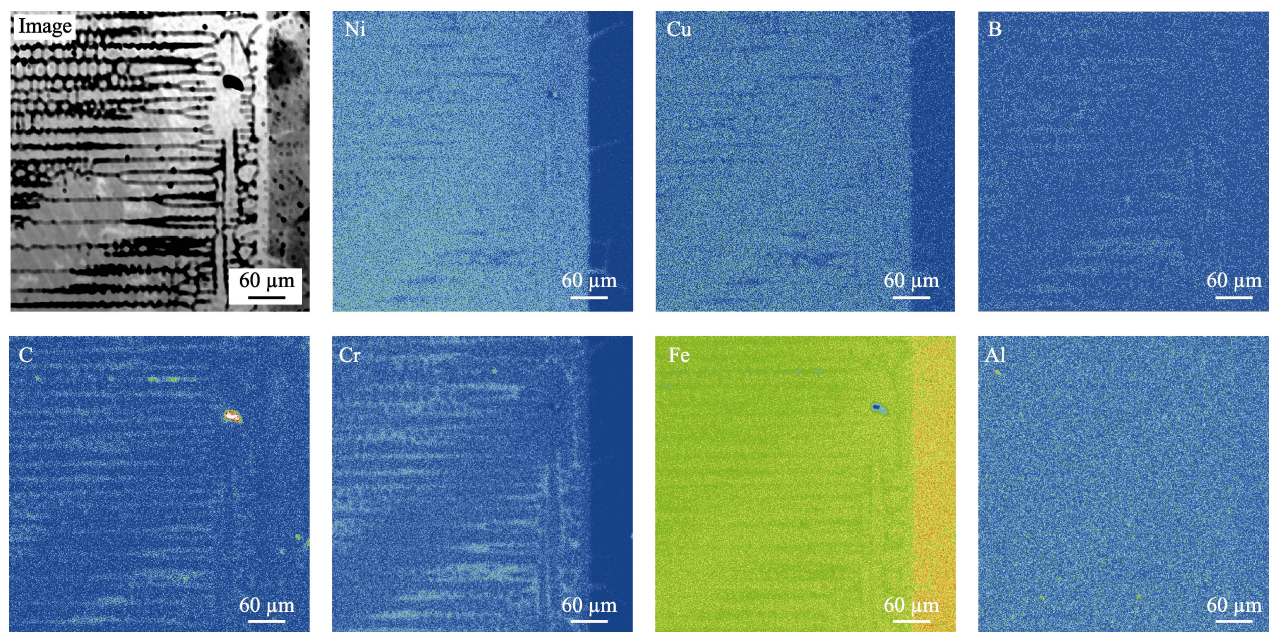


图 6 定向凝固涂层截面元素面分布

Fig.6 Element distributions of directional solidification coating section

### 3.2 涂层物相的演变及其对涂层摩擦学性能的影响

图 7 是涂层的 XRD 物相分析结果, 由分析结果可知, 重熔涂层与定向凝固涂层的物相基本相同, 如图 7b、7c 所示。相对于喷涂涂层, 重熔再结晶过程中, 由于元素的再分配, 在主要物相保留的基础上, 形成新的物相  $\gamma$ -(Fe,Ni)、 $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ , 而未检测到  $\gamma$ -Ni 相。相对于重熔涂层, 定向凝固涂层在强制冷却过程中形成新的物相  $\text{Cr}_2\text{B}$ , 而未检测出  $\text{FeNi}_3$  相, 但结合金相照片与元素分布分析, 总体可以印证重熔涂层和定向凝固涂层中的等轴晶粒、平面晶、树枝晶枝干主要为 Fe、Ni 合金化合物或固溶体, 以及 Cu 与 Ni 的新相化合物。同时, 在感应重熔以及强制冷却的过程中, 添加的铝青铜的主元素进入枝干, 而 Cu 原子在重熔过程中无限扩散到晶粒内部, 与 Ni 元素在高温下形成  $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$  立方晶型结构的新相<sup>[15]</sup>。具有面心点阵的  $\alpha$ -Cu 固溶体能够起到保持合金的韧性和支持、连接过渡硬质相的作用, 同时还可以使硬质相承受的压力分散, 这在一定程度上能够对组织的致密化和涂层的减摩性起到重要作用<sup>[16]</sup>。从图 7 中还可看出, 重熔后, 衍射峰有向大角度偏移的现象, 根据布拉格方程, 说明涂层晶面间距变小, 晶面上的阵点排列随之变稀疏, 并发生晶格类型的转变, 从而使涂层性能产生重要影响。

根据物相的转变, 感应重熔涂层及定向凝固涂层均生成了具有良好塑性和韧性的  $\gamma$ -(Fe,Ni) 固溶体, 使原来的格点发生结构畸变, 提高了材料的强度, 能一定程度地阻碍外力对材料引起的形变<sup>[17]</sup>。定向凝固涂层中, Cr、C、B 等溶质元素在晶界富集, 形成陶瓷

性质的强化物相构成灰色区域 (如图 4c 所示), 对晶粒进行包裹, 起到支撑和强化晶粒作用, 形成内韧外硬的晶粒结构形式, 将对涂层摩擦性能产生重要影响。因此可以认为, 正是由于组织结构的细化、结构取向以及物相转变的综合作用, 使重熔及定向凝固涂层尽管显示出较低的硬度, 但耐磨性能却大大提高。而在强制冷却过程中, 涂层凝固速度快, 形成结构取向明显的定向晶粒结构, 消除横向晶界, 提高了纵向力学性能, 使得定向凝固涂层的耐磨性进一步提高。

### 3.3 涂层的显微硬度分布特征

图 8 为三种结构涂层的截面显微硬度分布, 可以看出, 涂层硬度都高于基体的硬度。预制涂层中, 从靠近基体处向表面测得的各点硬度值分布不均匀, 靠近基体附近的硬度高于靠近涂层表面处。这是因为在超音速等离子喷涂的过程中, 后一道喷涂沉积粒子对前一道沉积粒子有夯实效应, 靠近基体一侧的涂层受到后续粒子的击打以及本身在沉积过程中碰到较硬基体, 使其具有冲击硬化效应, 且涂层组织致密度较高 (这和涂层组织结构特征相符合), 而外层部分沉积到前续较软的已沉积涂层上, 相对冲击硬化效应较弱, 使外表涂层部分相对于界面附近硬度较低。结合图 8a 中涂层组织结构可以看出, 预制涂层组织含有气孔、杂质、未熔颗粒等较大的缺陷, 相区分布不均匀, 造成涂层各点的硬度相差较大<sup>[18]</sup>。

感应重熔涂层中基体硬度比预制涂层稍高, 这是由于重熔使基体表面具有自然淬火硬化的原因, 涂层由内向外硬度整体呈线性缓慢增长, 靠近涂层表面的硬度达到最高, 涂层表面与界面硬度相差较大。分析

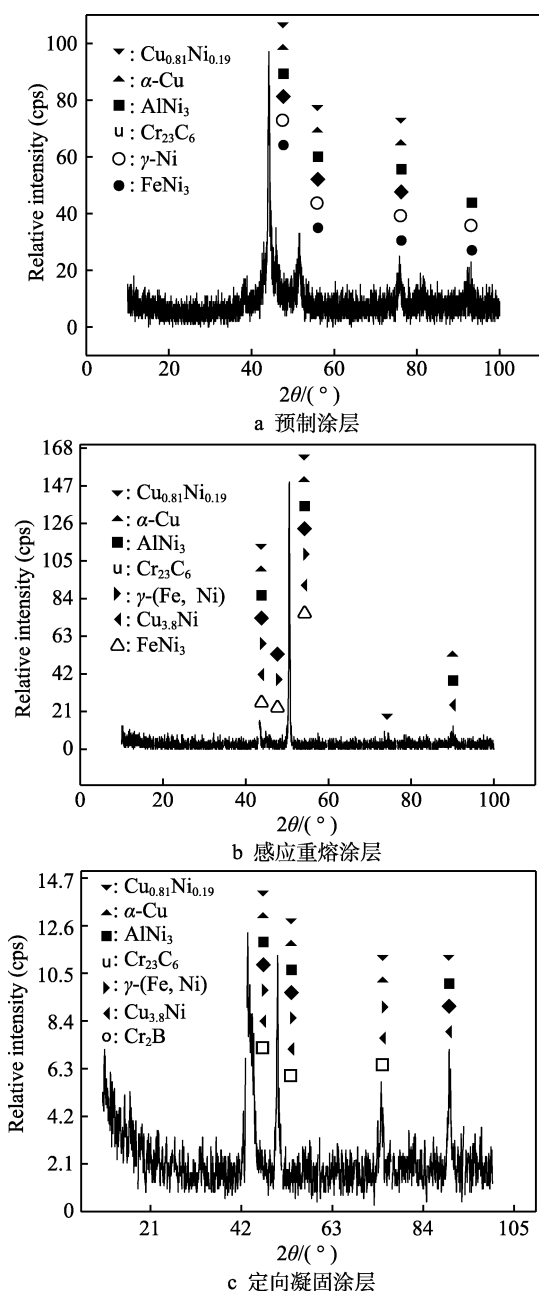


图7 不同结构的涂层表面 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of different structural coatings surface:  
a) prefabricated coating; b) induction remelting coating;  
c) directional solidification coating

认为,在感应重熔过程中,随着重熔组织的再结晶和元素的再分配,涂层的组织结构发生较大的改变。结合图 4b 可以看出,感应重熔消除了等离子喷涂涂层扁平化带来的强化应力,涂层中气孔、杂质、未熔颗粒等基本消失,从而使涂层整体具有均匀的硬度性能。感应重熔过程中,界面属于第一高温区,界面涂层处低熔点共晶率先熔化,涂层中难熔的硬质相及形成的氧化渣随着涂层由里向外熔化而逐渐上升,一直到涂层表面。涂层凝固过程中,涂层表面的过冷度较大,对表面组织有细晶强化作用,因此涂层表面硬度较高<sup>[19]</sup>。

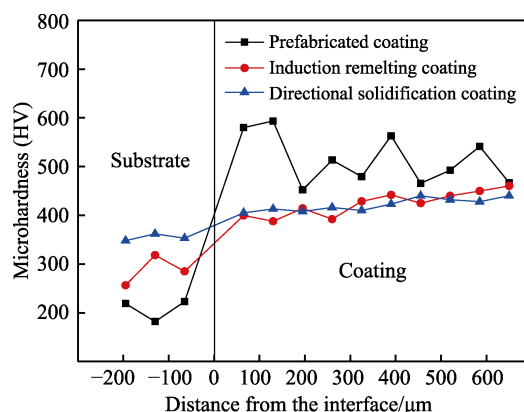


图8 不同结构涂层截面显微硬度分布

Fig.8 Microhardness distribution of different structural coatings section

定向凝固涂层的硬度变化幅度不大,从靠近基体到涂层表面,硬度有略微上升的趋势,但是定向凝固涂层硬度上升倾斜曲线的斜率小于感应重熔涂层,整体上硬度分布均匀。这是由于高温时在熔化的涂层合金底部通冷却水强制冷却的过程,相当于对基体进行强制淬火处理,使得基体硬度值远大于预制涂层及感应重熔涂层。在强制冷却时,难熔硬质相来不及上升到涂层表面而被留在涂层中,涂层在形成定向结构的过程中发生元素偏析,结合组织照片,其主要分布在定向枝晶晶界处,对枝晶起到包裹强化作用。因此,相对于感应重熔涂层来说,定向凝固涂层硬度变化较为平稳,柱状晶和灰色区域硬度值不同使得所测各点显微硬度略有差别,但整体平稳。再结合 XRD 分析,  $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$ 、 $\text{AlNi}_3$ 、 $\text{CrB}$  包裹在晶粒周围,尤其  $\text{Cu}_{3.8}\text{Ni}$  作为枝晶和晶界产物的粘结相,其强度中等,具有较好的延伸率、切削加工性能和导热性能,可以对晶粒的磨损起到有效的保护作用<sup>[20]</sup>。

由测得的硬度数据结合摩擦磨损实验数据可知,尽管预制涂层具有较高的硬度,但经过后续处理的重熔涂层和定向凝固涂层具有较好的耐磨性能,尤其定向凝固涂层耐磨性得到进一步提高。通过上述分析结合组织特征可以认为,相对于预制涂层,重熔涂层耐磨性能提高,是重熔再结晶使涂层组织结构细化和致密化的结果。而定向结构的形成尽管使硬度降低,但定向结构晶粒的取向特征以及硬质相对枝晶的包裹,使其能够抵抗横向剪切力和承受摩擦时的载荷力,这是使其耐磨性进一步提高的根本原因。由此可见,定向凝固涂层在较低硬度使其具有较好韧性的同时,表现出优良的耐磨性。相对于传统注重以高硬度提高涂层耐磨性的方法,制备定向凝固涂层具有很好的发展前途。

## 4 结论

1) 采用强制冷却技术形成的定向结构 Ni60/铝青



铜复合涂层表现出优越的耐磨性能, 其不同载荷下均有稳定的摩擦系数和较低的磨损量, 形成的定向结构组织在摩擦过程中对切向的摩擦起到阻挡效应是其耐磨性能增强的主要原因。摩擦过程中, Cu 元素和 Cr 元素发生不同程度氧化, 形成的氧化物对涂层起到一定支撑和减摩作用。

2) 通过控制涂层结构取向, 形成结构取向明显的定向晶粒结构, 消除了横向晶界, 细化了晶粒组织, 提高了涂层纵向力学性能。加入的铝青铜合金的主要元素 Cu、Al 和 Ni 基合金中的 Ni 持续扩散形成以固溶体为主的主轴, 而在扩散的过程中伴随有溶质相的析出偏聚于晶界, 弱化了对主轴的弥散强化作用, 使涂层的整体硬度降低, 一定程度上改善了涂层整体的塑性性能。Cu<sub>3.8</sub>Ni、AlNi<sub>3</sub>、CrB、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 等强化物包裹在晶粒周围, 使取向结构的枝晶形成内韧外硬的包裹结构, 从而使摩擦过程中晶界强化物相能够进一步抵抗横向剪切力以及承受摩擦时的载荷力, 有效保护枝晶不被快速磨损。

#### 参考文献:

- [1] KHAN M N, SHAMIM T. Investigation of a dual-stage high velocity oxygen fuel thermal spray system[J]. *Applied energy*, 2014, 130(130): 853-862.
- [2] 肖逸锋, 曾凡检, 匡雯慧, 等. 真空烧结熔覆 Ni60 涂层的组织和性能[J]. *金属热处理*, 2017, 42(7): 83-87.  
XIAO Yi-feng, ZENG Fan-jian, KUANG Wen-hui, et al. Microstructure and properties of Ni60 coating by vacuum sintering cladding[J]. *Heat treatment of metals*, 2017, 42(7): 83-87.
- [3] HUANG K, MARTHINSEN K, Zhao Q L, et al. The double-edge effect of second-phase particles on the recrystallization behaviour and associated mechanical properties of metallic materials[J]. *Progress in materials science*, 2018, 92: 284-359.
- [4] 杨效田, 李霞, 杨晓伟, 等. Ni60/高铝青铜多元多相复合涂层制备及其微观结构特征[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(3): 461-467.  
YANG Xiao-tian, LI Xia, YANG Xiao-wei, et al. Preparation of multivariate multiphase composite coatings of Ni60/high aluminum bronze and its microstructure characteristics[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(3): 461-467.
- [5] GONG T Z, CHEN Y, CAO Y F, et al. Fast simulations of a large number of crystals growth in centimeter-scale during alloy solidification via nonlinearly preconditioned quantitative phase-field formula[J]. *Computational materials science*, 2018, 147: 338-352.
- [6] 郭建亭. 一种性能优异的低成本定向凝固镍基高温合金 DZ417G[J]. *金属学报*, 2002, 38(11): 1163-1174.  
GUO Jian-ting. A directionally solidified nickel-base superalloy DZ417G with excellent properties and low cost[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2002, 38(11): 1163-1174.
- [7] BOURBAN S, KARAPATIS N, HOFMANN H, et al. Solidification microstructure of laser remelted Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> eutectic[J]. *Acta materialia*, 1997, 45(12): 5069-5075.
- [8] JIA H M, FENG X H, YANG Y S. Effect of crystal orientation on corrosion behavior of directionally solidified Mg-4wt% Zn alloy[J]. *Journal of materials science & technology*, 2018, 34(7): 1229-1235.
- [9] 陈爱智, 张永振, 肖宏滨, 等. 耐磨涂层材料摩擦磨损特性的研究进展[J]. *洛阳工学院学报*, 2001, 22(2): 12-16.  
CHEN Ai-zhi, ZHANG Yong-zhen, XIAO Hong-bin, et al. The research development of the friction and wear properties of wear-resistant coating materials[J]. *Journal of Luoyang Institute of Technology*, 2001, 22(2): 12-16.
- [10] 王智平, 刘俊钊, 路阳, 等. 超音速等离子制备多元铝青铜合金涂层的组织[J]. *特种铸造及有色合金*, 2012, 32(1): 9-12.  
WANG Zhi-ping, LIU Jun-zhao, LU Yang, et al. Microstructure of multi-element aluminum bronze coatings prepared by supersonic plasma spraying [J]. *Special casting & nonferrous alloys*, 2012, 32(1): 9-12.
- [11] 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 等离子喷涂纳米复合陶瓷涂层的组织结构及其形成机理[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(1): 77-83.  
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, SHEN Li-da, et al. Microstructure and formation mechanism of plasma-sprayed nanostructured composite ceramic coatings[J]. *The Chinese journal of nonferrous metals*, 2009, 19(1): 77-83.
- [12] 韩桂泉, 张增志, 付跃文. 高频感应熔涂 NiCrBSi 合金涂层的组织与性能的研究[J]. *润滑与密封*, 2006(6): 95-97.  
HAN Gui-quan, ZHANG Zeng-zhi, FU Yue-wen. Study on Microstructures and properties of NiCrBSi alloy coating produced by high frequency induction cladding[J]. *Lubrication engineering*, 2006(6): 95-97.
- [13] HOUDKOVÁ Š, SMAZALOVÁ E, VOSTŘÁK M, et al. Properties of NiCrBSi coating, as spray and remelted by different technologies[J]. *Surface & coatings technology*, 2014, 253(9): 14-26.
- [14] 杨效田, 王鹏春, 李霞, 等. 复合制备 Ni 基合金涂层的组织结构及性能演变特征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 46(3): 693-698.  
YANG Xiao-tian, WANG Peng-chun, LI Xia, et al. Evolution characteristics of microstructure of Ni-based alloy coatings and their properties under complex process[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2015, 46(3): 693-698.
- [15] LIU X Z, SHEN Q W, LIU X Z, et al. Effect of heat treatment temperature on the spectral properties of Cu-Ni coating[J]. *Spectroscopy & spectral analysis*, 2015, 35(4): 1094-1098.

- [16] 杨效田, 王智平, 路阳, 等. 超音速等离子-感应复合技术制备高铝铜合金涂层特性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(7): 906-910.  
YANG Xiao-tian, WANG Zhi-ping, LU Yang, et al. Characteristics of high-aluminium copper alloy coating made by supersonic plasma spraying and induction-refusion composite technology[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(7): 906-910.
- [17] 李殿凯, 李明喜, 洪海峰.  $Y_2O_3$  对等离子喷焊高铬铁基涂层组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6): 153-157.  
LI Dian-kai, LI Ming-xi, HONG Hai-feng. Effect of  $Y_2O_3$  on microstructure and properties of high-chromium Fe-base coating produced by plasma arc cladding process[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2013, 34(6): 153-157.
- [18] 肖宏滨, 张永振, 陈跃, 等. 等离子喷涂 Ni/MoS<sub>2</sub> 涂层干滑动摩擦磨损[J]. 热加工工艺, 2004(10): 11-13.  
XIAO Hong-bin, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue, et al. Dry sliding wear and friction behavior of plasma-sprayed Ni/MoS<sub>2</sub> coating[J]. Hot working technology, 2004(10): 11-13.
- [19] 高原, 王成磊, 黄家强, 等. 高频感应熔敷 Ni60 合金组织及耐磨性的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(2): 309-312.  
GAO Yuan, WANG Cheng-lei, HUANG Jia-qiang, et al. Microstructure and wear resistance of Ni60 layer prepared by high-frequency induction cladding[J]. Rare metal materials and engineering, 2011, 40(2): 309-312.
- [20] 夏扬, 韩胜利, 崔舜, 等. 高气密性 Mo-Cu-Ni 瓷封合金[J]. 真空电子技术, 2006(4): 36-39.  
XIA Yang, HAN Sheng-li, CUI Shun, et al. Microstructure and the properties of Mo-Cu-Ni hermetic alloy[J]. Vacuum electronics, 2006(4): 36-39.