

超声辅助激光熔覆Ni₃Al基涂层高温摩擦学性能研究

袁建军, 崔译丹, 李祥, 潘光浩, 张晟铭, 朱瑞贤, 卢宏图

(山东科技大学 智能装备学院, 山东 泰安 271000)

摘要 本文以摩尔比为3:1的Ni粉、Al粉和不同质量分数的Si₃N₄和SiC(质量分数为1:1)粉末为反应粉末,采用超声振动辅助激光熔覆工艺在碳钢表面原位制备了Ni₃Al基复合材料涂层,系统对比研究了超声振动对Ni₃Al复合涂层的显微组织、显微硬度及600℃下摩擦学性能的影响。结果表明:复合涂层主要由Ni₃Al、NiAl、Si₃N₄、SiC等相组成,施加超声振动辅助后,涂层的宏观裂纹明显改善,显微组织更细,平均显微硬度达到446HV_{0.2}~559HV_{0.2},比同成分的涂层硬度最高增加了约23%。当Si₃N₄+SiC陶瓷粉末质量分数为5%时,涂层呈现出最低的摩擦因数(0.39)、磨损率(5.1×10⁻⁵ mm³/N·m)。磨损表面均呈现氧化磨损,但采用超声振动后,Ni₃Al复合涂层表面由严重的磨粒磨损和塑性变形转变为轻微的塑性变形和磨粒磨损。

关键词 激光熔覆;Ni₃Al/Si₃N₄/SiC复合涂层;超声振动;高温摩擦学性能

中图分类号 TG178

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2025)05-0025-10

DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20250519.002

Study on high-temperature tribological properties of Ni₃Al-based coatings by ultrasound-assisted laser cladding

YUAN Jianjun, CUI Yidan, LI Xiang, PAN Guanghao, ZHANG Shengming, ZHU Ruixian, LU Hongtu

(School of Intelligent Equipment, Shandong University of Science and Technology, Taian 271000, China)

Abstract In this paper, Ni₃Al-based composite coatings were prepared in-situ on the carbon steel surface by using ultrasonic vibration-assisted laser cladding process using Ni powder with a molar ratio of 3:1, Al powder, and different mass fractions of Si₃N₄ and SiC (mass fraction of 1:1) powder as the reactive powder, and the effect of ultrasonic vibration on microstructure, microhardness, and tribological performance of the Ni₃Al-based composite coatings at 600℃ was systematically and comparatively investigated. The effect of ultrasonic vibration on the microstructure, microhardness and tribological properties of Ni₃Al composite coatings at 600℃ was investigated. The results show that the composite coating is mainly composed of Ni₃Al, NiAl, Si₃N₄, SiC and other phases. After the application of ultrasonic vibration, the macro-crack of the coating are significantly improved, and the microstructure of the coating is more refined. The average microhardness of the coating can reach 446HV_{0.2}-559HV_{0.2}, which is about 23% higher than the maximum hardness of the coating with the same composition. When the mass fraction of Si₃N₄+SiC ceramic powder was 5%, the coating presents the lowest coefficient of friction (0.39), and wear rate (5.1×10⁻⁵ mm³/N·m). The results also show that the wear surfaces all exhibits oxidized wear, but the Ni₃Al composite coating surface is transformed from severe abrasive wear and plastic deformation to slight plastic deformation and abrasive wear after using ultrasonic vibration.

Keywords laser cladding; Ni₃Al/Si₃N₄/SiC composite coating; ultrasonic vibration; high temperature tribological properties

一般来说,Ni-Al系金属化合物都具有高温抗氧化性强、耐腐蚀等优良的性能,在工业中是一种非常重要的高温结构材料^[1-2]。其中,Ni₃Al合金具有优异的耐腐蚀性能、高温热稳定性强等优点,有进一步发展的潜力和满足应力的需求^[3-4]。激光熔覆技术制备的涂层能够提高所用材料的综合性能^[5-6],但是由于残余应力、温度梯度大等缺点,经常会出现微裂纹和气泡等缺陷^[7-8]。超声振动产生的空化效应及声流作用能够

使组织均匀化,显微组织细化,在激光熔覆过程中利用超声振动可以提升涂层的耐磨损和耐腐蚀性能^[9-10]。靳继波^[11]采用了不同熔覆工艺制备的熔覆层进行摩擦磨损实验,实验表明,超声振动辅助激光熔覆制备的Ni基涂层表面硬度增加,熔覆层的显微组织细化明显,具有更小的磨损系数。LI等^[12]制备了Ni-WC-CaF₂复合涂层,发现在激光熔覆过程中施加超声振动辅助可以有效改善WC颗粒的聚集程度。王传玉^[13]发现激光熔覆中

收稿日期:2024-08-03;修回日期:2025-01-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52174145);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC1271);

山东省自然科学基金(ZR2020KE013)

第一作者:袁建军,男,博士,副教授。E-mail:yjj502@126.com。

使用超声波,其高频振动能够提高激光熔覆IN718涂层的硬度和耐磨性。

诸多研究都能证明,向 Ni_3Al 金属间化合物中添加第二强化相(如氮化物、硼化物与碳化物等)可以进一步提高涂层的硬度、耐磨及耐腐蚀性^[14-16]。 Si_3N_4 和 SiC 都具有优异的力学性能、抗热冲击性能、抗蠕变性能,被广泛应用于冶金、化工等高温领域,将二者组合使用可以利用它们的复合效应, SiC 的硬度可以增强涂层的表面硬度,减少摩擦和磨损,而 Si_3N_4 则可以帮助抵抗裂纹扩展和增强涂层的韧性,二者作为1种组合材料具有很强的优势,延长使用寿命^[17-18]。采用激光熔覆制备复合材料涂层,由于原位反应会导致涂层存在大量的孔洞和裂纹。为了提高涂层的表面形貌和耐磨性,部分研究者通过优化激光熔覆工艺参数、采用预热或后处理等手段来改善涂层质量^[19-21]。传统激光熔覆法制备的复合涂层存在涂层表面成形质量差、内部缺陷及陶瓷晶粒分布不均等问题,仅通过优化工艺参数无法改善晶粒分布及涂层质量。超声振动辅助激光熔覆用在复合涂层原位反应中能够引起熔池内金属材料的微流动,改善涂层的微观结构,形成更加均匀、致密的晶粒结构,提高涂层硬度、耐磨性和抗腐蚀性等。而超声振动辅助激光熔覆制备 $\text{Ni}_3\text{Al}-\text{Si}_3\text{N}_4-\text{SiC}$ 复合涂层的研究鲜有报道。故为提高涂层的摩擦学性能,本文作者在原有实验的基础上,采用有、无超声振动辅助激光熔覆的方法在碳钢表面制备4组不同质量分数的 $\text{Ni}_3\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ 复合材料涂层,通过对显微组织和摩擦磨损性能的对比分析,研究超声振动对复合材料涂层高温摩擦学性能的影响,为该涂层在高温耐磨领域的使用奠定理论基础。

1 试验与方法

1.1 试样制备

本文以 Ni 粉(质量分数为99.5%,粒径为25~40 μm ,下同)、 Al 粉、 Si_3N_4 粉、 SiC 粉为实验原始材料进行激光熔覆原位合成 Ni_3Al 、 Si_3N_4 、 SiC 粉末。将无超声振动辅助激光熔覆制备的涂层标为A1,A2,A3,A4,有超声振动辅助激光熔覆制备的涂层标为B1,B2,B3,B4,实验中的材料构型在表1中列出。在实验前,用200~600粒度的 SiC 砂纸对基体表面进行初步研磨,然后用丙酮溶液进行洗涤,以确保基体表面干净无污染,提高激光吸收率并去除表面杂质。将实验用到的粉末提前放入烘干箱中,在150 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干1~2 h,以防止粉末中的水分引起团聚现象。将粉末反应物放置于球磨罐中充分混合均

表1 涂层原料混合物的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of coating raw material mixture (mass fraction/%)

涂层	Ni_3Al	Si_3N_4	SiC	Ni/Al 摩尔比
A1	100	0.0	0.0	3:1
A2	97	1.5	1.5	3:1
A3	95	2.5	2.5	3:1
A4	93	3.5	3.5	3:1
B1	100	0.0	0.0	3:1
B2	97	1.5	1.5	3:1
B3	95	2.5	2.5	3:1
B4	93	3.5	3.5	3:1

匀,球磨罐内填充不锈钢球,低速(<35 r/min)球磨1 h后倒出备用。

图1为超声振动辅助激光熔覆技术原理图。实验用YLS-6000型光纤激光器,激光功率(P)和扫描速度(v)是决定熔覆涂层质量的2个最关键的因素。根据课题组以往经验,确定实验最佳参数:激光功率为2.0 kW、扫描速度为500 mm/min。用预铺重熔法进行超声振动辅助涂层的制备。为了研究超声振动对熔覆层质量的影响,将超声振动频率设置为20 kHz,振幅为25 μm ,单道持续时间15 s,超声振动辅助激光熔覆加工所需参数与上面常规熔覆参数保持一致。激光熔覆完后将制备的所有样品放入烤箱中干燥,干燥完后放入烘干机中备用。

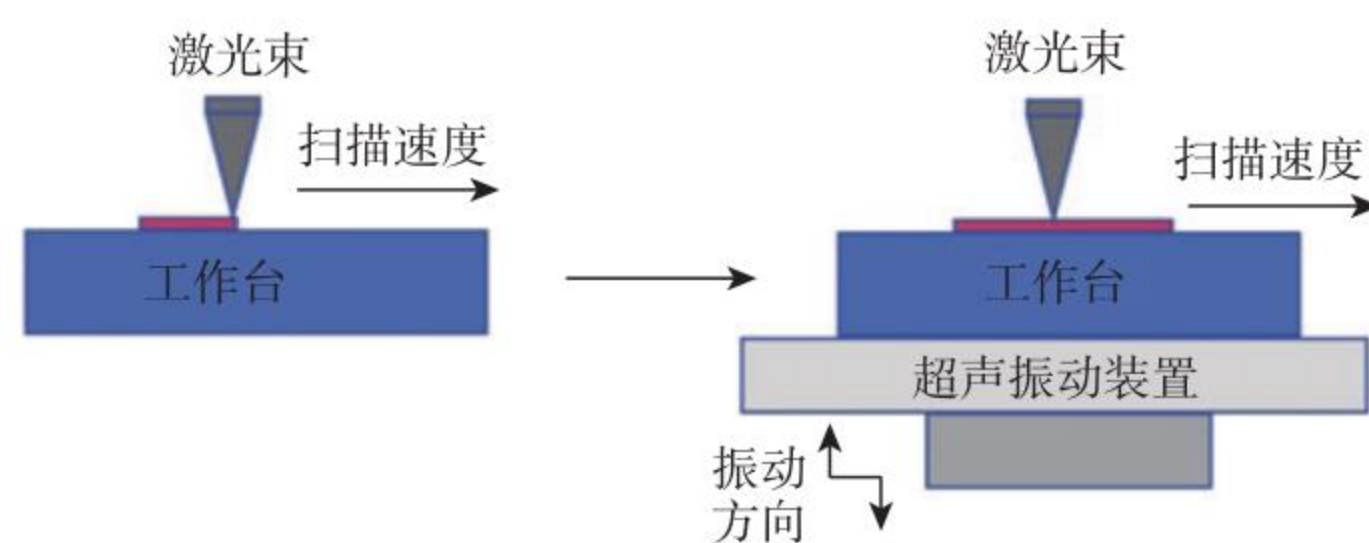


图1 超声振动辅助激光熔覆原理图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted laser cladding

1.2 试验方法

将涂层分别经过切割、研磨、抛光与腐蚀后制成20 mm×20 mm×10 mm的小长方体块状,进行标注后分析所有试样块,腐蚀液采用 $V_{\text{HC}}:V_{\text{HNO}_3}=3:1$ 的王水溶液。用DX-2700型XRD衍射仪和 $\text{Cu K}\alpha$ 辐射分析复合涂层的相组成。用DM2700M型金相显微镜观察分析试样横截面组织。用型号为NanoSEM450扫描电镜观察试样显微组织、摩擦磨损及结合层面等形貌。用HORIBA EX-250型能谱仪(EDS)分析涂层表面成分。用维氏显微硬度计(Q10M, Oness GmbH),施加0.98 N的测试

载荷5 s,测量涂层横截面显微硬度。每个试件涂层选取相同深度的3个点测量其显微硬度,求取平均值作为最后结果。将涂层表面抛光后,用HT-1000型高温摩擦磨损试验机对不同试样进行磨损特性测试,测试温度为600 ℃,摩擦方式为旋转。摩擦因数由计算机自动测量并实时记录。在磨损实验结束后,将样品放置于OLYMPUS LEXT OLS 4000激光共聚焦装置中进行激光分层扫描成像,以测量摩擦磨损痕迹的大致轮廓。高温摩擦磨损实验参数如表2所示。

表2 摩擦磨损实验参数

Table 2 Experimental parameters of friction and wear

滑动速度/ (m·s ⁻¹)	接触载荷/ N	直径/ mm	摩擦半径/ mm	测试温度/ ℃	测试时间/ min
2.94	20	5	20	600	30

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌

图2为有、无超声振动辅助制备涂层的典型宏观形貌图。由图2a、b可见,未经超声振动处理的涂层表面不光滑,存在气孔和裂纹。由图2c、d可以看出,相对而言,经过超声振动处理的B3和B4涂层宏观外观更为光滑,气孔和裂纹的数量明显减少,这表明超声振动能够显著提升涂层的外观质量。这可能是因为超声波的流化作用促进了金属液的稳定流动,有效搅拌增加了金属液的扩散,从而改善了激光熔覆层的形成。此外,超声振动引入的热效应和振动作用提高了激光熔覆过程中的热输入,使陶瓷粉末充分熔化^[22]。

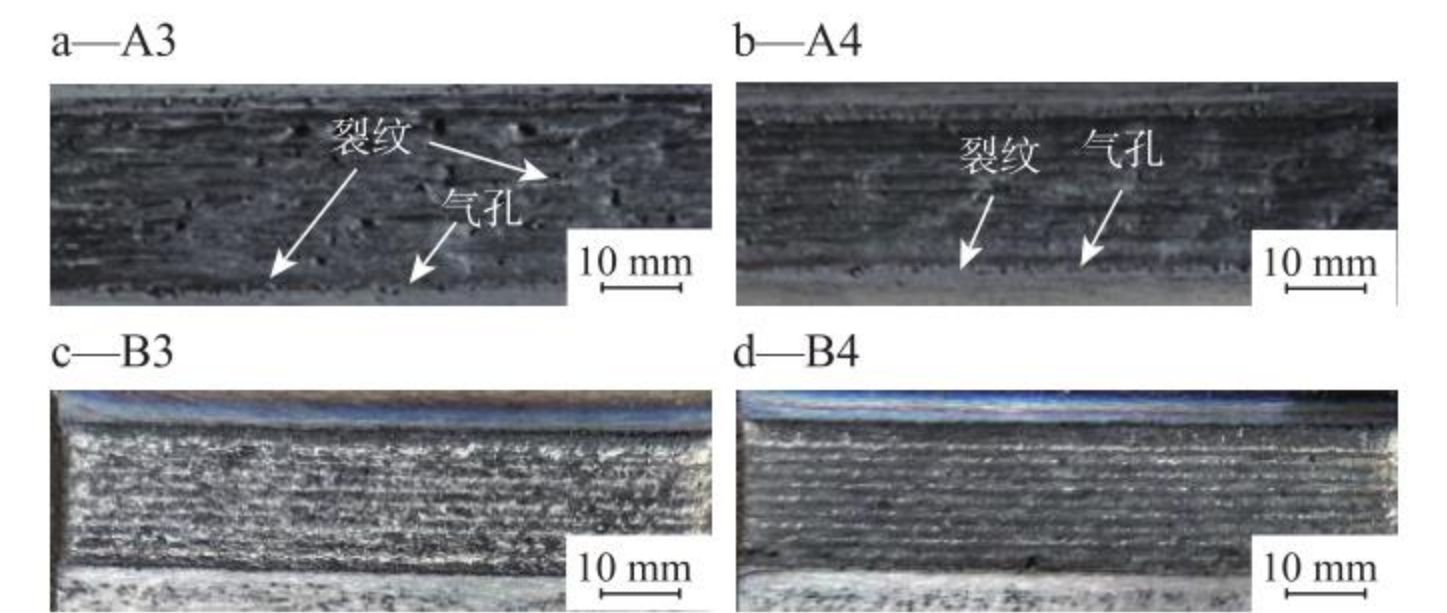


图2 有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层宏观形貌图

Fig.2 Macro-morphology diagrams of Ni₃Al composite coatings with and without ultrasonic vibration assistance

2.2 物相组成

图3为有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层X射线衍射图。由图3可见,特征峰主要以Ni₃Al、NiAl、Si₃N₄和SiC为主,同时含有少量Ni₂Si和AlN相,未发现其他相的存在,物相含量反映在衍射峰强度上。由于在高能激

光的作用下,混合金属粉末在熔覆过程中形成高温熔池,Ni、Al发生原位反应生成Ni₃Al、NiAl金属间化合物。由于Si₃N₄和SiC在高温和氧化条件下具有较强的稳定性,在高温熔池中较难分解,因此仅有少部分Si₃N₄和SiC分解重新生成了Ni₂Si和AlN。有、无超声振动条件下涂层的衍射图无明显差异,说明超声振动作为辅助外场,在熔池熔凝过程中并未改变元素组成。施加超声振动后,Ni₃Al相衍射峰值变低,由于超声振动导致晶体中的位错运动和晶格畸变,从而改变了晶体的有序性和晶面的取向,导致峰变宽,进而使Ni₃Al相的衍射峰强度变低。

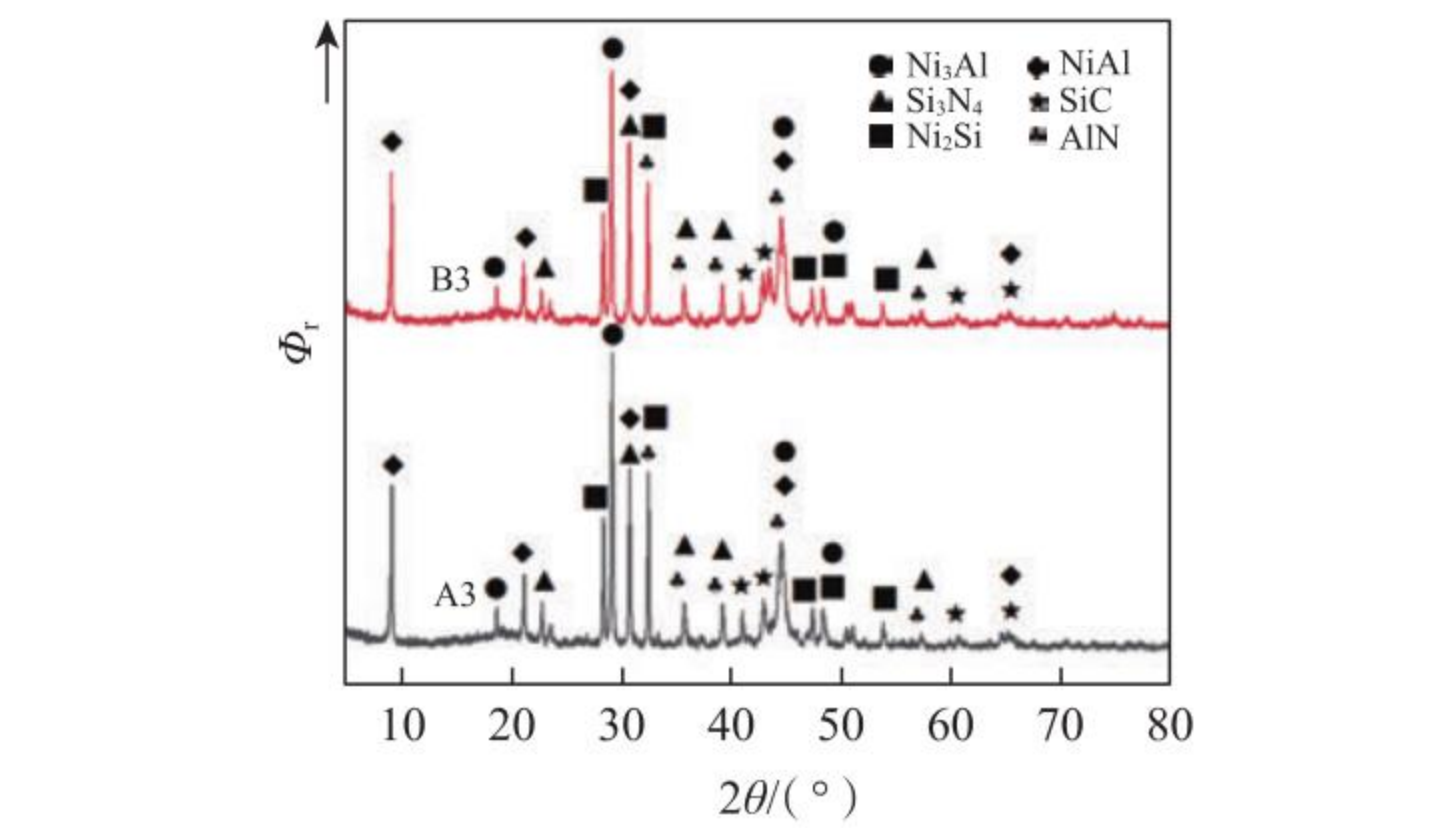


图3 有、无超声振动辅助95%Ni₃Al复合涂层的X射线衍射图

Fig.3 X-ray diffraction of 95%Ni₃Al composite coating with and without ultrasonic vibration assistance

2.3 显微组织

图4为有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层截面显微镜图。由图4可见,有、无超声振动的涂层均呈现出较好整体形貌,涂层和基材之间的过渡均匀,说明选择的激光工艺参数较适中。涂层与基体界面处有1条明显的界面线,这是涂层与基体元素互扩散形成的,说明涂层与基体之间形成良好的冶金结合^[23]。图4a涂层截面有轻微的裂纹和气孔,激光熔覆过程中由于冷却速度快,熔池温度梯度高,应力集中,导致热裂纹的形成,并且保护气体无法及时逸出,导致涂层内部出现了细小的气孔^[24-25]。图4b涂层具有优良的涂层质量,界面

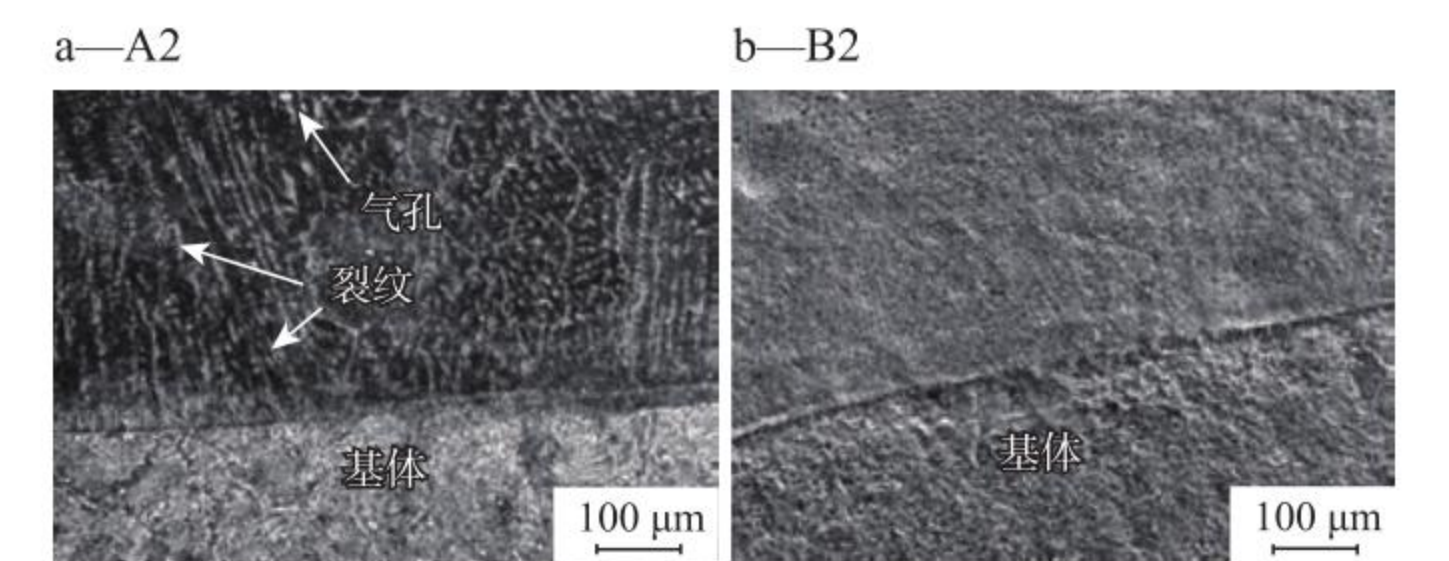


图4 有、无超声振动辅助97%Ni₃Al复合涂层截面显微镜图

Fig.4 Microscopic cross-sectional view of 97%Ni₃Al composite coating with or without ultrasonic vibration

处无裂纹、气孔等其他缺陷。说明超声振动可以有效改善熔池的流动特性,利用超声振动可以得到均匀组织、细化晶粒、减少涂层缺陷的效果,并且可以帮助气体从熔池中逸出,减少气孔的形成。此外,在超声振动作用下制备的涂层均表现出更加均匀致密的微观结构^[26-27]。

图5为有、无超声振动辅助下制备复合涂层的SEM图。由图5a、b可见,无超声振动时,组织由多数粗大的胞状晶和少量生成的树枝晶构成,枝晶形态粗大,晶界呈不连续状态,存在大量的陶瓷颗粒聚集区且分布非常不均匀。与未施加超声振动的涂层相比,图5c、d施

加超声振动涂层的晶体尺寸明显减小,组织主要由“梅花状”枝晶构成,枝晶组织排列更细小紧密,陶瓷颗粒分布更为均匀。由于超声振动空化、声流效应产生的搅拌作用使激光熔池的流场更加均匀,流体流动速度更快,使陶瓷颗粒在涂层中分布更均匀,晶粒更细化^[28-29]。同时,空化泡在破裂瞬间能够产生足够的高温,使已经形成的晶粒重新熔化并二次生长,从而形成更细小的晶粒组织,并且能够使粗柱状枝晶破碎细化,复合涂层表面相对比较致密,无裂纹、气孔等明显缺陷^[30]。由此可见,超声振动处理能明显细化金属组织的晶体分支,获得细小均匀的凝固组织。

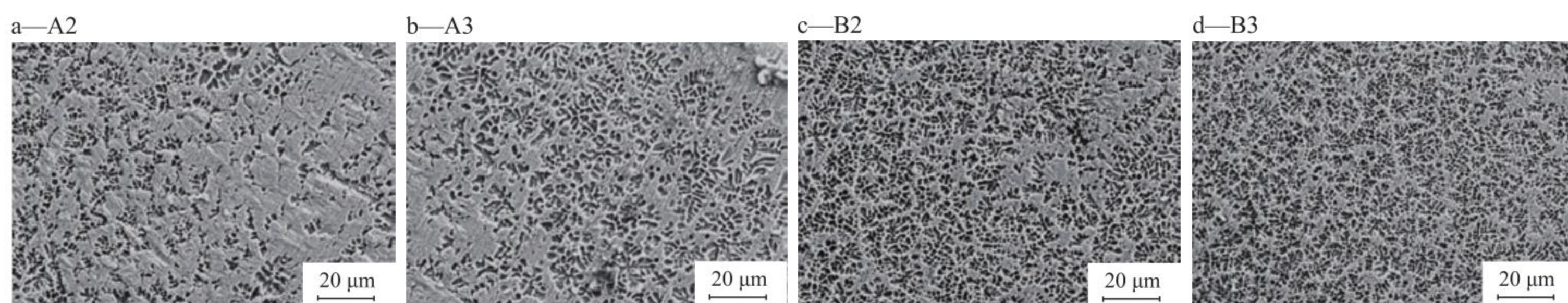


图5 有、无超声振动辅助97%Ni₃Al、95%Ni₃Al复合涂层的SEM图

Fig.5 SEM of 97%Ni₃Al and 95%Ni₃Al composite coatings with and without ultrasonic vibration assistance

图6为有超声振动辅助Ni₃Al复合涂层EDS分析。由图6可见,涂层由浅灰色区域和白色区域2部分组成。此外,涂层中的元素分布均匀,说明超声振动促进了涂层中组织的均匀分布。白色区域主要含有N,Si,C,说明

白色区域主要由Si₃N₄和SiC颗粒组成。浅灰色不规则区域主要由Si,N,C,Ni,Al组成。分析可知, Si₃N₄和SiC颗粒在实验过程中被部分熔化,能够均匀分布在涂层中。Ni₃Al主要分布在涂层基体中,并与基底材料形成混合物。

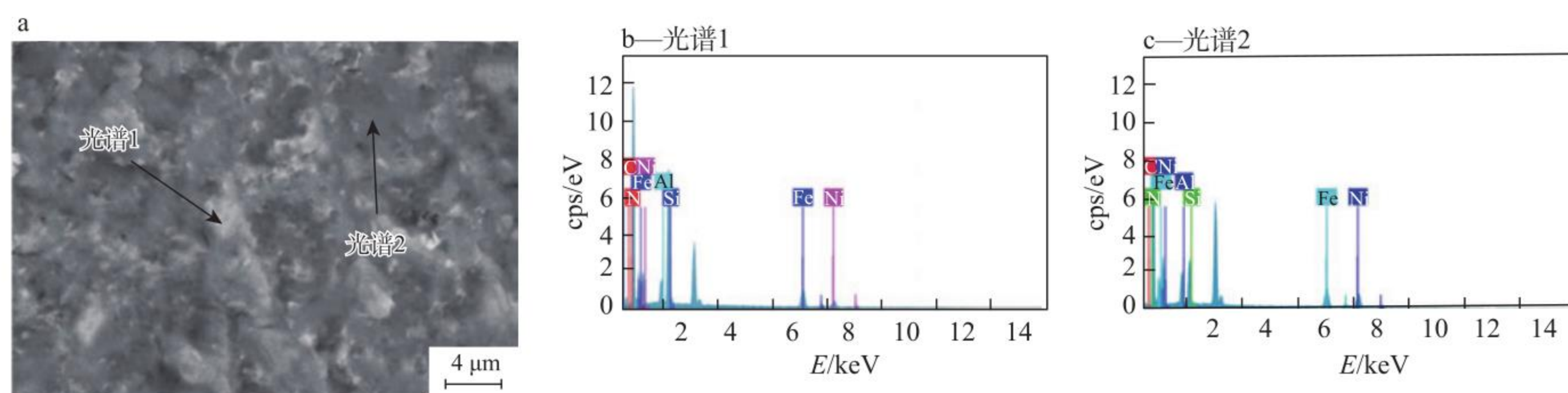


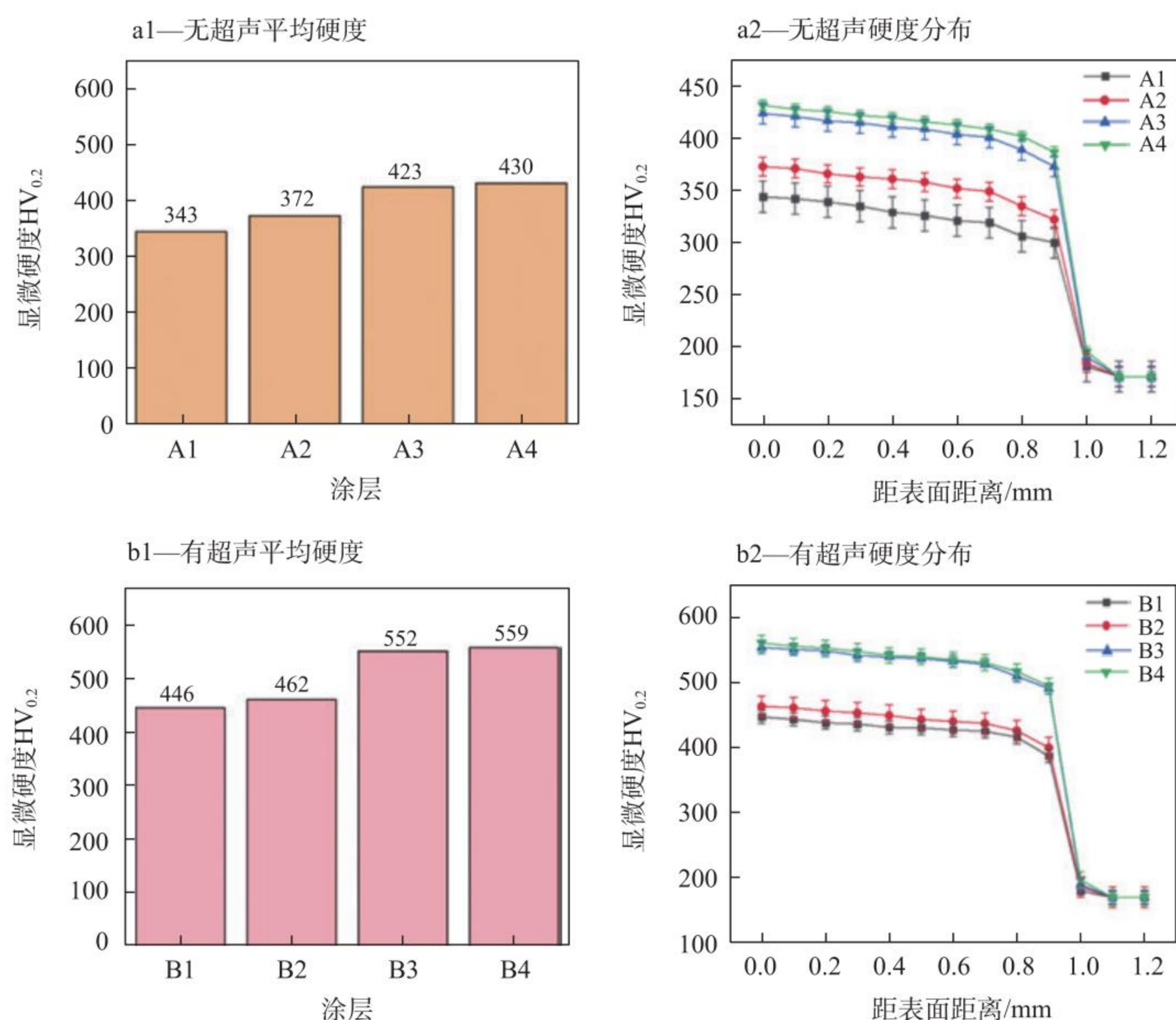
图6 有超声振动辅助97%Ni₃Al复合涂层EDS分析

Fig.6 EDS analysis of 97%Ni₃Al composite coating with ultrasonic vibration assistance

2.4 硬度分析

图7为有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层的平均硬度和硬度分布。由图7可知,复合涂层硬度分布较为均匀,从涂层区域至热影响区、基体区域硬度逐渐下降,且随着Si₃N₄和SiC陶瓷颗粒质量分数的上升,复合涂层整体硬度逐渐提高。结果表明,未施加超声振动涂层中93%Ni₃Al涂层硬度达到最高值,比100%Ni₃Al合金涂层的平均硬度高近20%,说明Si₃N₄和SiC两种硬质

相的加入能够显著提高合金涂层的硬度,因为二者都是硬度很高的陶瓷材料,它们的硬质颗粒能够有效地阻碍外界物体对涂层的刮擦和磨损,从而提高涂层的整体硬度。超声振动辅助激光熔覆制备的涂层显微硬度明显高于未施加超声振动辅助的涂层,最高硬度比未施加超声振动相同质量分数的涂层高约23%。这是由于采用超声振动处理后,涂层的显微组织变得更加致密均匀,晶粒细化和固溶强化的共同作用,使涂层的

图7 有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层的平均硬度和硬度分布Fig.7 Average hardness and hardness distribution of Ni₃Al composite coatings with and without ultrasonic vibration assistance

硬度增加,进而提高其耐磨性能^[31]。Ni₃Al涂层较高的硬度将有利于提高其在宽温域下的耐磨性。

2.5 摩擦学分析

图8为有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层摩擦因数与平均摩擦因数。由图8可知,涂层进行磨损实验时,摩擦因数有一个快速增大阶段,然后逐渐减至稳定状态。然而,一些涂层仍然存在摩擦因数波动较大的峰值,这是因为Si₃N₄和SiC等硬质相的加入,在高温摩擦环境中与磨件之间产生了较不稳定的摩擦因数。结果表明,随着陶瓷颗粒含量的增加,涂层的摩擦因数先减后增,并且波动变化,但始终低于单一Ni₃Al涂层。因为Si₃N₄和SiC硬质颗粒的添加可以分散应力,降低摩擦表面之间的接触压力。并且二者组合可以显著提高涂层的硬度和抗磨损性能,从而减小涂层摩擦因数。但随着Si₃N₄和SiC颗粒的增多,会改变涂层的表面结构和粗糙度,使复合涂层表面更为粗糙,从而导致接触材料之间产生更高的摩擦因数,后期摩擦因数升高。平均摩擦因数显示,在相同的摩擦磨损环境下,施加超声振动的B3涂层的摩擦因数最低,为0.39,表现出高温下最优的减摩性能。相比之下,未添加超声振动的A1涂层的摩擦因数最高,为0.61。在相同含量的Ni₃Al涂层中,施加超声振动辅助的涂层摩擦因数更低,这是因为

超声振动可以促进熔融池内金属液体的流动,有助于填充表面微观不平整,提高涂层表面的光滑度,从而减少了磨球对涂层材料的磨损。并且超声振动可以帮助排除熔融池中的气体和夹杂物,减少涂层中的缺陷形成。因此,超声振动可以进一步减小涂层的摩擦因数,只是减小程度会有所不同。

图9为有无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层磨损率的变化。由图9可知,涂层的磨损率随着Si₃N₄和SiC陶瓷粉末含量的增加先降后升,但降低的幅度不大,均显示出了高耐磨性。从图中可以看出,施加超声振动后, Ni₃Al复合涂层的磨损率明显小于未经超声振动的涂层。但无论有、无超声振动,95%Ni₃Al涂层都表现出最低的磨损率。这表明Si₃N₄和SiC陶瓷颗粒具有重要的减摩作用。随着Si₃N₄和SiC粉末含量的增加,以及涂层中Ni-Al系硬质金属间化合物的存在,材料的抗疲劳性能、硬度和强度都得到提高,表面光滑度改善,从而增强了抗磨损性能。无超声振动的涂层磨损率最低为 $5.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$,而有超声振动的涂层磨损率最低为 $5.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。这主要是由于超声振动可以促进涂层材料的流动和减小涂层磨损表面的塑性变形,减少摩擦时的表面接触区域,降低局部应力集中,使得涂层磨损率下降。但当Si₃N₄和SiC的质量分数均为3.5%

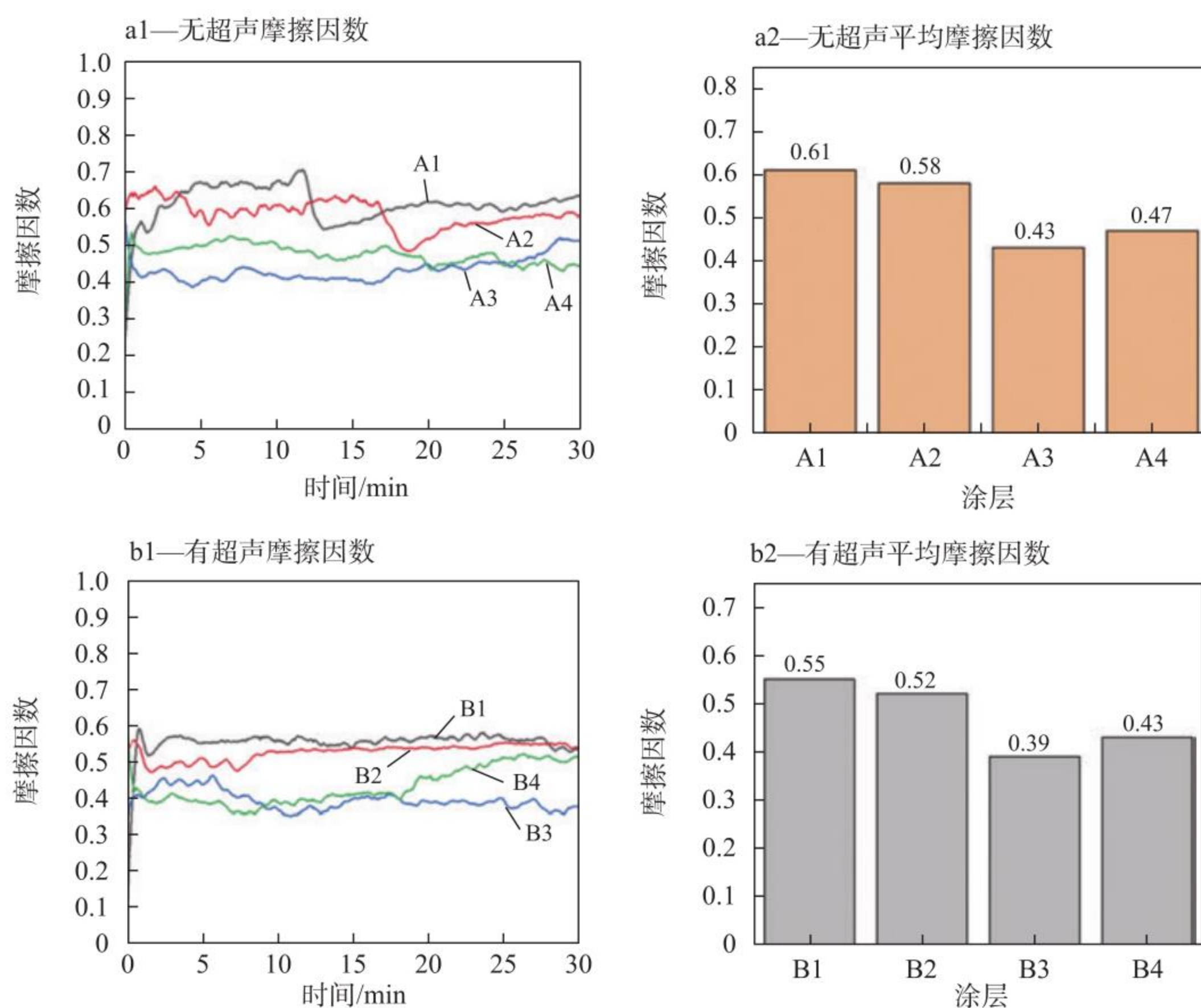


图8 有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层摩擦因数与平均摩擦因数

Fig.8 Friction coefficient and average friction coefficient of Ni₃Al composite coating with and without ultrasonic vibration assistance

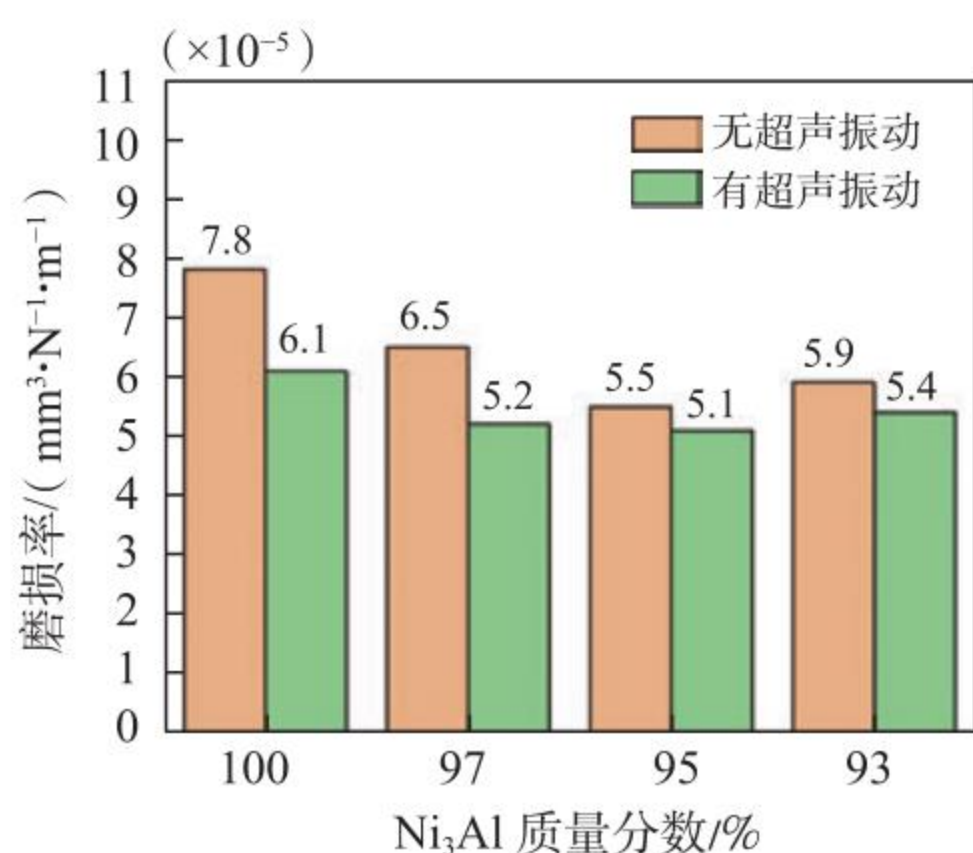


图9 有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层磨损率的变化

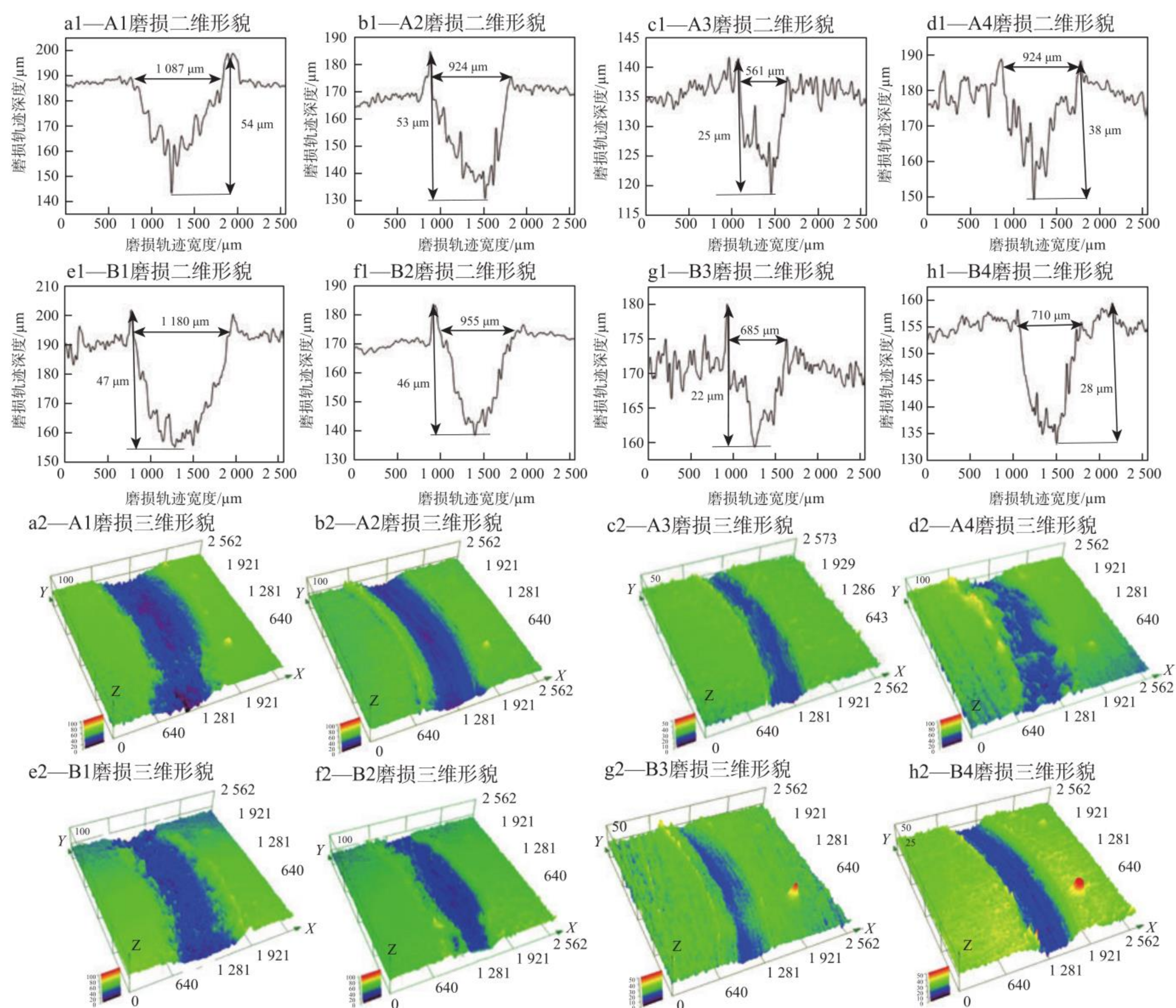
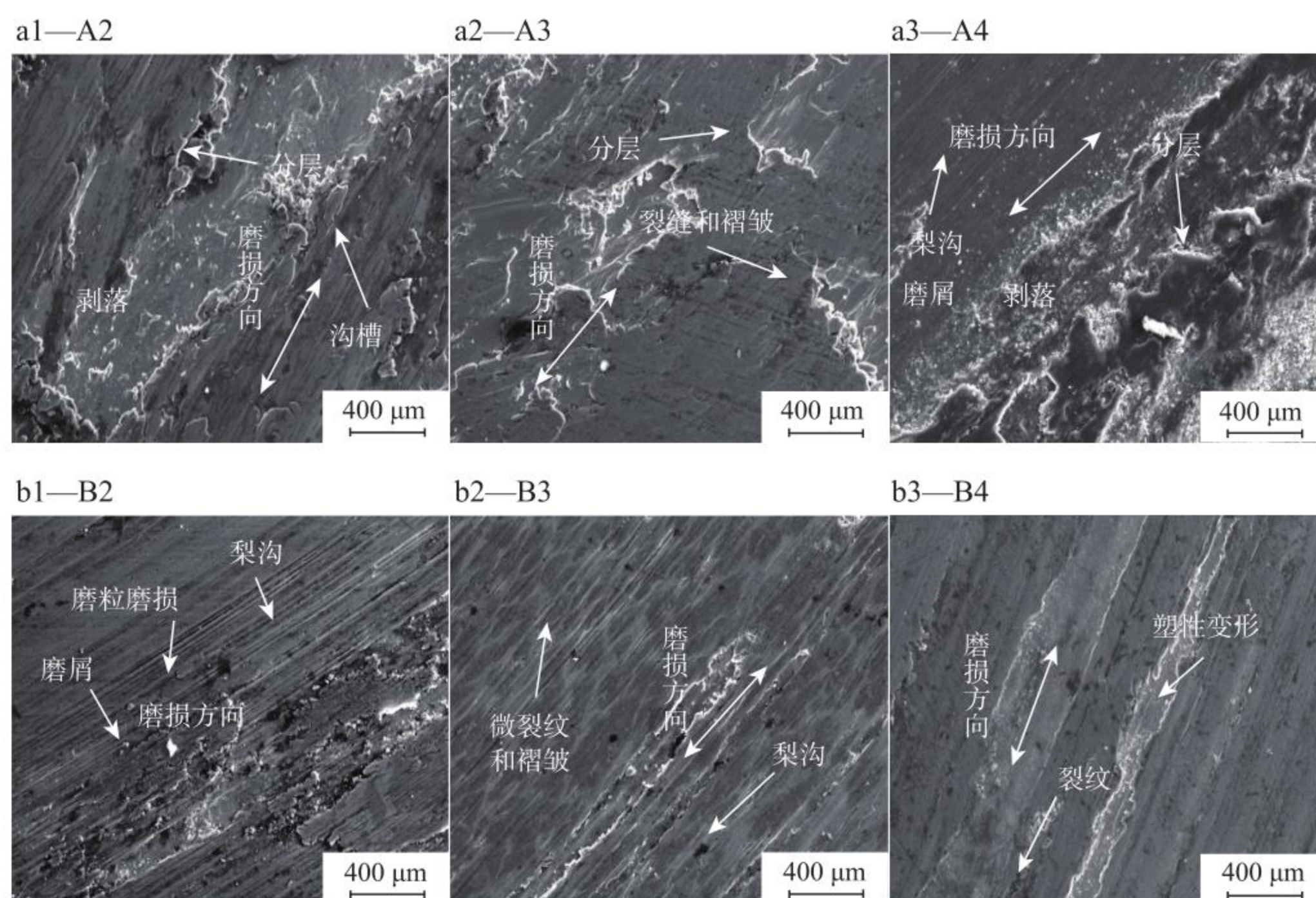
Fig.9 Change of wear rate of Ni₃Al composite coating with and without ultrasonic vibration assistance

时,涂层中颗粒分布的不均匀性增加,导致局部的摩擦磨损更严重,一些区域的磨损率高于其他区域。

图10为有、无超声振动辅助Ni₃Al复合涂层磨损表面的二维及三维磨损形貌。由图10可见,纯Ni₃Al涂层可以观察到较宽和较深的磨损轨迹(图10a1、a2),表明涂层在滑动过程中发生了严重的磨损,因为单一Ni₃Al较软,涂层表面在磨削过程中容易受到较硬的Si₃N₄球的微磨损,形成一系列磨损痕迹。加入Si₃N₄和SiC后,复合涂层的磨损划痕深度和宽度均明显低于纯Ni₃Al涂层,说明复合涂层的表面硬度和耐磨强度比纯Ni₃Al涂层高。这是由于在涂层基底上均匀分布着具有较强

抗磨损破坏能力的Si₃N₄和SiC硬质相,在实验过程中可以作为硬质质点阻碍高温磨损表面产生的塑性变形和磨损磨削,所以添加Si₃N₄和SiC的复合涂层比纯Ni₃Al涂层磨损划痕浅而窄。超声振动辅助激光熔覆制备的B3复合涂层具有最佳的耐磨性,其深度为22 μm,比无超声振动辅助制备的95%Ni₃Al涂层(25 μm)浅12%。因为采用超声振动能够提高涂层表面的润湿性,振动产生的空化、声流和机械搅拌作用增强了熔体之间的流动性,显著提高了陶瓷颗粒在涂层中的均匀分布,使涂层的显微组织晶粒更细,提高了涂层的耐磨性^[32]。同时随着Si₃N₄和SiC含量增加,更多硬质颗粒暴露在涂层表面,导致摩擦过程中涂层表面与摩擦副接触面积不均匀,使得复合涂层磨损表面呈现不同深浅的轮廓。结合涂层的显微组织可以得出,显微组织对高温摩擦性能有影响,特别是超声振动细化的枝晶组织可以提高涂层的高温耐磨性。

为了进一步分析Ni₃Al-Si₃N₄-SiC复合涂层摩擦磨损机理,通过扫描电镜对其磨损形貌进行了观察。图11为有、无超声振动辅助Ni₃Al涂层磨损表面的SEM形貌。由图11可见,图11a1~a3无超声振动辅助激光熔覆制备的涂层发生了明显的变形,且磨痕宽度大,磨损表面出现一些剥落坑、“斑块状”或“薄片状”等凹凸不平的形貌,说明磨损表面发生了比较严重的塑性变形。

图10 有、无超声振动辅助 Ni_3Al 复合涂层磨损表面的二维及三维磨损形貌(μm)Fig.10 Two-dimensional and three-dimensional wear morphologies of Ni_3Al composite coatings with and without ultrasonic vibration assistance (μm)图11 有、无超声振动辅助97% Ni_3Al 、95% Ni_3Al 和93% Ni_3Al 涂层磨损表面的SEM形貌Fig.11 SEM morphology of wear surface of 97% Ni_3Al , 95% Ni_3Al and 93% Ni_3Al coatings with and without ultrasonic vibration assistance

尽管 Si_3N_4 和 SiC 的加入提升了复合涂层的硬度,但磨损表面仍然显示出明显的塑性变形,这种反复循环的塑性变形导致了碎屑的生成。随着涂层硬度的增加,碎屑的数量逐渐减少。此外,在磨损表面观察到了明显的分层现象,出现了大量的磨屑和犁沟,表现出明显的磨粒磨损特征。磨损表面有松散的碎屑层。在磨损过程中,松散的碎屑层脱落,变成磨损碎屑,加速了涂层的磨损,从而导致高摩擦因数。涂层磨损表面的一些微隆起和磨损碎屑被挤压到基材表面形成褶皱,从而形成宽而深的沟槽。因此,无超声振动涂层的磨损机制主要是严重的磨粒磨损和塑性变形。与无超声振动辅助的涂层相比,图11b1~b3施加超声振动辅助制备的涂层表现出更为平滑的磨损面,表面更均匀,剥落和磨损碎片较少,沟槽减少,磨损面上仅有细微的划痕和犁沟。这归因于超声振动使得涂层中增强剂的分布更加均匀,减少了残余应力,同时制备的涂层组织致密且

显微硬度高,未出现气孔和裂纹等缺陷,有效提升了其抵抗磨损的能力,特别是对抗磨球的磨损,增加了粘着阻力。因此,施加超声振动涂层的磨损机制主要是轻微的塑性变形和磨粒磨损。

图12为有超声振动辅助 Ni_3Al 复合涂层磨损表面EDS分析。为B2复合涂层磨损表面的EDS谱图,可以看出,磨损表面致密,主要由O、Ni、C、N、Si、Al、Fe元素组成,各主要元素在涂层中的分布相对均匀,没有明显的元素偏析。此外,从图中可以看出有大量的O,O的存在表明在高温摩擦过程中发生了氧化磨损,形成了氧化物润滑层。超声振动使涂层具有更高的硬度,能够承载这些氧化物润滑层,证明了氧化磨损是 Ni_3Al 涂层的主要磨损机制。氧化磨损是由于磨损过程中材料表面产生大量的摩擦热,在空气中加速氧化反应,形成氧化膜,使能谱上某些区域的氧元素富集^[33]。EDS分析表明,摩擦膜主要由氧化铝、氧化镍、氧化铁为主的氧化物组成。

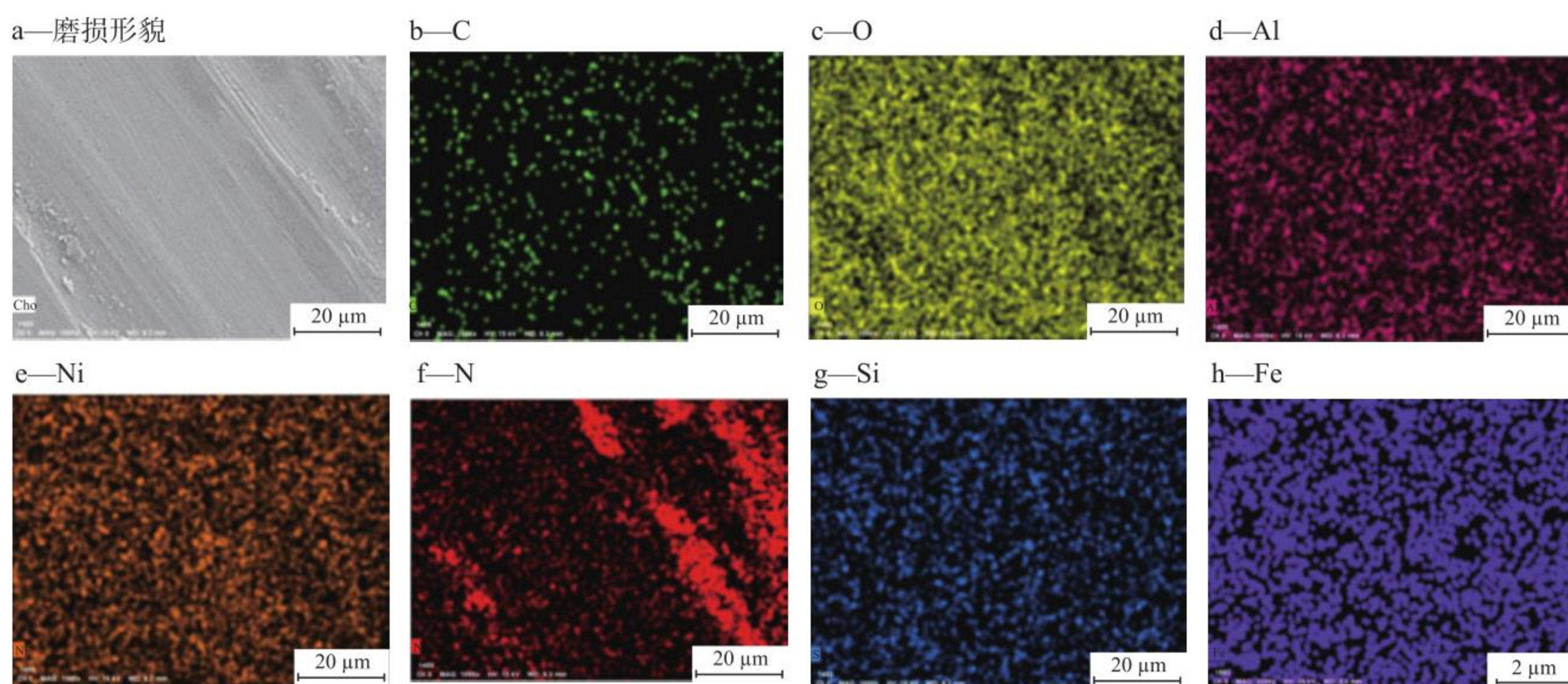


图12 有超声振动辅助97% Ni_3Al 复合涂层磨损表面EDS分析

Fig.12 EDS analysis of wear surface of 97% Ni_3Al composite coating with ultrasonic vibration assistance

图13为超声振动辅助激光熔覆制备的 Ni_3Al - Si_3N_4 - SiC 涂层在600℃时的摩擦原理示意图。在此温度下,磨损表面氧化反应更加活跃,形成的氧化膜连续致密,并与润滑膜协同作用,实现自润滑效果。氧化膜和润滑膜的共同作用提升了复合涂层在600℃时的摩擦

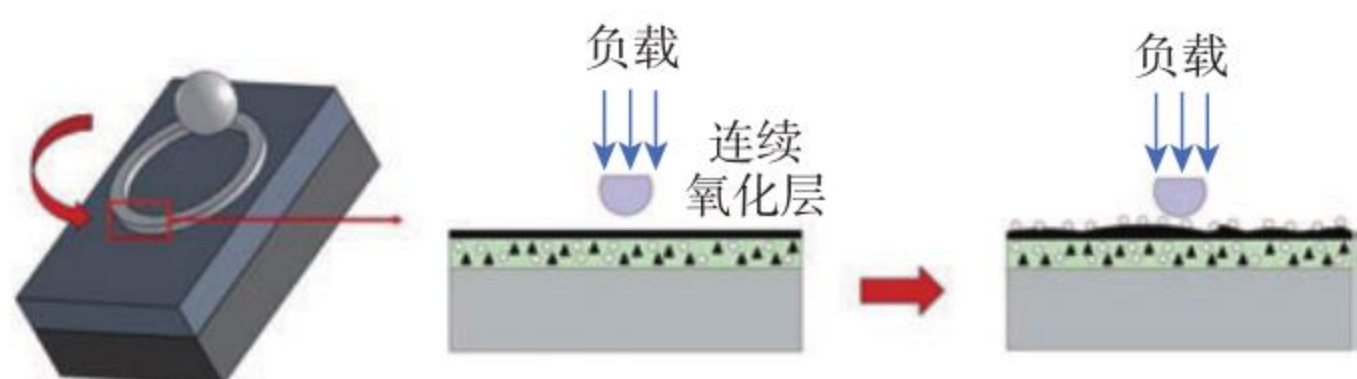


图13 600℃时有超声振动辅助 Ni_3Al - Si_3N_4 - SiC 复合涂层磨损机理示意图

Fig.13 Schematic diagram of wear mechanism of Ni_3Al - Si_3N_4 - SiC composite coating with ultrasonic vibration assistance at 600 °C

学性能,同时有效阻止了涂层的进一步氧化和磨损^[34]。

3 结论

以Ni粉、Al粉、 Si_3N_4 粉和 SiC 粉为原始材料,用有、无超声振动辅助激光熔覆制备4种不同含量 Ni_3Al - Si_3N_4 - SiC 复合涂层。对涂层的相组成、显微组织和耐磨性进行了研究,得出:

1) 超声振动显著改善了涂层表面形貌。涂层受超声振动产生的空化效应、流化效应和机械振动效应的综合作用,可以细化晶粒,促进陶瓷颗粒的分解。但随着 Si_3N_4 和 SiC 陶瓷颗粒的增加,涂层的表面形貌质量先提高后下降。

2) 涂层的显微硬度和耐磨性随超声振动加入而

提高。超声振动增强了熔体的流动性,显著改善了陶瓷颗粒的空间分布,使涂层的显微组织更细。由于晶粒细化和固溶强化的共同作用,硬度增加,涂层的摩擦因数减小。因此,施加超声振动辅助激光熔覆的B3复合涂层具有最高的硬度(559HV_{0.2})、最低的摩擦因数(0.39)和最低的磨损率($5.1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$)。

3) 施加超声振动的涂层具有很强的磨损性能。随着超声振动的加入,涂层更光滑,表面只存在轻微的划痕和犁沟。超声振动辅助激光熔覆B3复合涂层的磨损划痕最浅最窄,并且磨损表面形貌最好。说明超声振动可以降低粘着磨损,磨损机制转变为轻微塑性变形和磨粒磨损。

4) 实验证明,Si₃N₄和SiC能显著提高Ni₃Al复合涂层的高温耐磨性。然而,摩擦因数结果显示,部分复合涂层的摩擦因数还是较高。因此,未来将考虑加入固体润滑剂、稀土金属氧化物等进一步提高复合涂层高温耐磨性和增强涂层的自润滑性能。

4 参考文献

- [1] 蒋淑英,李世春. Ni-Al系金属间化合物价电子结构与性能分析[J]. 材料导报, 2010, 24(9): 72-75.
JIANG Shuying, LI Shichun. Analysis on valence electron structures and properties of intermetallic compounds in NiAl system[J]. Materials Review, 2010, 24(9): 72-75. (in Chinese)
- [2] 张艳梅,刘晶,易俊东,等. Ni₃Al金属间化合物激光熔覆层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2017, 42(3): 133-137.
ZHANG Yanmei, LIU Jing, YI Jundong, et al. Microstructure and properties of laser clad Ni₃Al intermetallic compound coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(3): 133-137. (in Chinese)
- [3] 宫声凯,尚勇,张继. 我国典型金属间化合物基高温结构材料的研究进展与应用[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1067-1076.
GONG Shengkai, SHANG Yong, ZHANG Ji. Research progress and application of typical intermetallic compound based high-temperature structural materials in China[J]. Journal of Metals, 2019, 55(9): 1067-1076. (in Chinese)
- [4] 江涛,万海荣,王园园,等. Ni₃Al金属间化合物材料的制备工艺和研究发展现状[J]. 科技创新导报, 2014, 34(18): 31-32.
JIANG Tao, WAN Hairong, WANG Yuanyuan, et al. Preparation technology and research and development status of Ni₃Al intermetallic compound materials[J]. Science and Technology Innovation Review, 2014, 34(18): 31-32. (in Chinese)
- [5] 陈礼俊,廖广刚,杨朋飞,等. 电机转子动平衡去重技术的工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2019, 12: 113-114.
CHEN Lijun, LIAO Guanggang, YANG Pengfei, et al. Research on the dynamic balance de-weight technology of motor rotor[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019, 12: 113-114. (in Chinese)
- [6] 陈冠秀,安立周,王硕,等. 激光熔覆技术的研究概况及其发展趋势[J]. 机电产品开发与创新, 2022, 35(5): 15-18.
CHEN Guanxiu, AN Lizhou, WANG Shuo, et al. Research overview and development trend of laser cladding technology[J]. Mechatronic Products Development and Innovation, 2022, 35(5): 15-18. (in Chinese)
- [7] XIE S Y, LI R D, YUAN T C, et al. Laser cladding assisted by friction stir processing for preparation of deformed crack-free Ni-Cr-Fe coating with nanostructure[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 99: 374-381.
- [8] WENG Z K, WANG A H, WU X H, et al. Wear resistance of diode laser-clad Ni/WC composite coatings at different temperatures[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 304: 283-292.
- [9] 张梁,林晨,徐欢欢,等. 超声辅助工艺对激光熔覆涂层组织性能影响[J]. 应用激光, 2022, 42(3): 15-20.
ZHANG Liang, LIN Chen, XU Huanhuan, et al. Effect of ultrasonic assisted technology on microstructure and properties of laser cladding coating[J]. Applied Laser, 2022, 42(3): 15-20. (in Chinese)
- [10] 杜波. 超声辅助激光熔覆TiC增强CrMnFeCoNi高熵合金涂层组织与性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
DU Bo. Microstructure and properties of ultrasonic assisted laser cladding tic reinforced crmnfeconi high entropy alloy coating[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [11] 靳继波. 超声辅助激光熔覆Ni60涂层工艺研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2021.
JIN Jibo. Study on ultrasonic assisted laser cladding of Ni60 coating[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [12] LI M Y, HAN B, WANG Y, et al. Investigation on laser cladding high-hardness nano-ceramic coating assisted by ultrasonic vibration processing[J]. Optik, 2016, 127: 4596-4600.
- [13] 王传玉. 超声振动辅助激光熔覆IN718涂层数值模拟和实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
WANG Chuanyu. Numerical simulation and experimental research of IN718 coating fabricated by ultrasonic vibration-assisted laser cladding[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [14] 屈岳波,刘振波,韩伟,等. Ni₃Al基合金激光熔覆组织特征与耐磨性能[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(5): 68-73.
QU Yuebo, LIU Zhenbo, HAN Wei, et al. Microstructure and wear resistance in laser cladding of Ni₃Al based alloy[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(5): 68-73. (in Chinese)
- [15] YUAN J P, YU Y G, SHEN J. Cermet composite coating with a ductile Ni₃Al binder phase and an in-situ Cr₇C₃ augmented

- phase[J]. *Intermetallics*, 2021, 138: 107300.
- [16] FAN X J, LI W S, YANG J, et al. Effect of Cr_3C_2 content on microstructure, mechanical and tribological properties of Ni_3Al -based coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2023, 466: 129597.
- [17] 董博, 余超, 祝洪喜, 等. 氮化硅结合碳化硅复合材料性能优化的研究进展[J]. *中国陶瓷工业*, 2021, 28(1): 22–26.
DONG Bo, YU Chao, ZHU Hongxi, et al. Research progress on performance optimization of silicon nitride bonded silicon carbide composites [J]. *China Ceramic Industry*, 2021, 28(1): 22–26. (in Chinese)
- [18] HU J, FANG L, ZHONG P W, et al. Preparation and properties of Ni-Co-P/nanosized Si_3N_4 electroless composite coatings [J]. *Surface and Interface Analysis*, 2012, 44: 450–455.
- [19] RASOOL S, REZA S R, SAEED R B, et al. Optimization and characterization of laser cladding of NiCr and NiCr-TiC composite coatings on AISI 420 stainless steel [J]. *Ceramics International*, 2021, 47: 4097–4110.
- [20] FAN P F, ZHANG G. Study on process optimization of WC-Co50 cermet composite coating by laser cladding [J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2020, 87: 105133.
- [21] LIU H, LIU J, LI X, et al. Effect of heat treatment on phase stability and wear behavior of laser clad $\text{AlCoCrFeNiTi}_{0.8}$ high-entropy alloy coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 392: 125758.
- [22] ZHONG Y B, WU C S, PADHY G K. Effect of ultrasonic vibration on welding load, temperature and material flow in friction stir welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 239: 273–283.
- [23] 王月祥, 潘雄飞, 沈晓辉, 等. 激光熔覆Stellite6-60WC复合涂层工艺及高温耐磨性[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 40(4): 394–400.
WANG Yuexiang, PAN Xiongfei, SHEN Xiaohui, et al. Laser cladding Stellite6-60WC composite coating process and high temperature wear resistance [J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 40(4): 394–400. (in Chinese)
- [24] ZHANG M N, WANG D F, HE L J, et al. Microstructure and elevated temperature wear behavior of laser-cladded AlCrFeMnNi high-entropy alloy coating [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 149: 107845.
- [25] LI Y L, GU D D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder [J]. *Materials and Design*, 2014, 63: 856–867.
- [26] ZHAO Y, WU M F, HOU J C. Microstructure and high temperature properties of laser clad WTaNbMo refractory high entropy alloy coating assisted with ultrasound vibration [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 920: 165888.
- [27] NING F D, CONG W L. Microstructures and mechanical properties of Fe-Cr stainless steel parts fabricated by ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping process [J]. *Materials Letters*, 2016, 179: 61–64.
- [28] OH Y K, PARK S H, CHO Y I. A study of the effect of ultrasonic vibrations on phase-change heat transfer [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(23): 4631–4641.
- [29] BISWAS S, ALAVI S H, SEDAI B, et al. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser surface melting and texturing of Ti-6Al-4V ELI alloy on surface properties [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35: 295–302.
- [30] 俞晓文. 超声振动在激光熔覆成形中的作用机制及其建模方法[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
YU Xiaowen. Mechanism and modeling method of ultrasonic vibration in laser cladding forming [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [31] XUAN H F, WANG Q Y, BAI S L, et al. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni-Cr-B-Si coating prepared by laser cladding [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 244(15): 203–209.
- [32] MA G Y, YAN S, WU D J, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of ultrasonic assisted laser clad yttria stabilized zirconia coating [J]. *Ceramics International*, 2017, 43: 9622–9629.
- [33] HASHEMI N, MERTENS A, MONTRIEUX H M, et al. Oxidative wear behaviour of laser clad high speed steel thick deposits: Influence of sliding speed, carbide type and morphology [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 315: 519–529.
- [34] ZHAI W, SHI X, YAO J, et al. Synergetic lubricating effect of WS_2 and Ti_3SiC_2 on tribological properties of Ni_3Al matrix composites at elevated temperatures [J]. *Tribology Transactions*, 2015, 58: 454–466.