

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2021.02.007

热喷涂用 NiCrCoAlY-MoSi₂ 纳米复合粉体制备与表征

吴姚莎¹, 陈伟文¹, 刘名涛²

(1. 中山火炬职业技术学院 装备智造学院, 广东 中山 528436;

2. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640)

摘要:以 MoSi₂ 粉和 NiCrCoAlY 粉为原料, 氩气做保护气, 采用高能球磨技术成功制备了 NiCrCoAlY-MoSi₂ 纳米金属陶瓷复合粉体。利用 X 射线衍射仪(XRD)、激光粒度分析仪、扫描电子显微镜(SEM)、振实密度仪和松装密度仪等对粉体的微观组织、晶粒尺寸和性能进行了表征和分析。结果表明: NiCrCoAlY-MoSi₂ 粉体高能球磨 30 h, 纳米级强化相 MoSi₂ 均匀弥散分布在粘结相 NiCrCoAlY 上, 平均晶粒尺寸为 25 nm。该粉体由大量椭圆形颗粒和少量细小团聚颗粒组成, 流动性能明显改善, 可稍加过筛后直接用于热喷涂。

关键词: MoSi₂; 高能球磨; 纳米晶粒; 热喷涂; 金属陶瓷

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2021)02-0048-07

Preparation and Characterization of NiCrCoAlY-MoSi₂ Nanostructured Composite Powders for Thermal Spraying

WU Yaosha¹, CHEN Weiwen¹, LIU Mingtao²

(1. Institute of Intelligent Equipment Manufacturing, Zhongshan Torch Polytechnic, Zhongshan 528436, China;

2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: NiCrCoAlY-MoSi₂ nanostructured composite powders were synthesized by high energy ball milling with NiCrCoAlY and MoSi₂ in an argon atmosphere. The microstructure, grain size and properties of the nanocomposite powders were characterized and analyzed by X-ray diffraction (XRD), laser scattering, SEM, tap-density tester and apparent density tester. The results show that the average grain size of NiCrCoAlY-MoSi₂ powders after 30 h milled is 25 nm, and the hard phase nano-MoSi₂ is distributed uniformly on the NiCrCoAlY phase. Moreover, the milled powders have excellent fluidity within large number of ellipsoidal particles, which can be directly thermal spraying after sieving.

Key words: MoSi₂; high energy ball milling; nano-crystal; thermal spray; metallic ceramic

收稿日期: 2020-05-15

基金项目: 广东省普通高校青年创新人才类项目(2018GkQNCX058, 2020KTSCX327)

Fund: Supported by Young Innovative Talents Project in Guangdong Province(2018GkQNCX058, 2020KTSCX327)

作者简介: 吴姚莎(1984—), 男, 博士后, 副教授, 主要从事纳米材料制备、材料表面与界面防护研究。

通信作者: 陈伟文(1968—), 男, 本科, 讲师, 主要从事材料及机械设计研究。

引用格式: 吴姚莎, 陈伟文, 刘名涛. 热喷涂用 NiCrCoAlY-MoSi₂ 纳米复合粉体制备与表征[J]. 有色金属工程, 2021, 11(2): 48-54.

WU Yaosha, CHEN Weiwen, LIU Mingtao. Preparation and Characterization of NiCrCoAlY-MoSi₂ Nanostructured Composite Powders for Thermal Spraying[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(2): 48-54.

镍基合金因在高温条件下具有高的强度和优异的耐腐蚀性能,被广泛用于燃气涡轮发动机等高温结构部件^[1-4]。随着科学技术的不断进步,开发大功率和高推力的涡轮发动机已成必然趋势,而这必然要求镍基合金承受更高的温度。单纯的镍基合金不能同时兼顾高温强度和耐高温腐蚀性能,国内外的研究、运用已表明,采用热喷涂在其表面制备高温防护涂层处理是一种高效、经济的方法^[5-7]。目前,镍基合金表面制备的高温防护涂层主要包括铝化物涂层^[8]、MCrAlY 涂层^[9]、热障涂层^[10]等,但这些涂层优点突出,缺点也很明显。FLEISCHER^[11]在总结大量高熔点化合物的基础上,认为 MoSi₂ 是最具发展潜力的高温涂层候选材料之一。因其高熔点(2 030 ℃)、低密度(6.24 g/cm³)和优异的高温稳定性能,被大量用于 C/C 复合材料、难熔合金等的高温防护^[12-14]。但 MoSi₂ 的一些本征缺陷,如低温脆性和高温韧性、中低温“Pesting”现象等限制了它的应用^[15]。此外,MoSi₂ 涂层还存在热膨胀系数与镍基合金相差大、热应力大、膜基结合强度低、易开裂等缺点。基于此,人们开展了广泛的基础性研究,寻找解决之道。研究结果表明,合金化是改善 MoSi₂ 涂层综合性能的最佳方案:一方面,合金化可提高 MoSi₂ 涂层致密度,有效缓解甚至消除“Pesting”现象;另一方面,通过与其它金属合金化,可实现 MoSi₂ 涂层的低温增韧和高温补强,提高涂层性能。作为一种典型的高温防护合金,NiCrCoAlY

同时兼顾优异的高温氧化性能和耐腐蚀性能,且其与 MoSi₂ 之间润湿性良好,热膨胀系数适中(Ni 基合金 > NiCrCoAlY > MoSi₂)^[16]。通过 NiCrCoAlY 与 MoSi₂ 的复合,增加 MoSi₂ 的致密性,降低因热膨胀系数产生的热应力,提高膜基结合强度,实现 MoSi₂ 对高温镍基合金的防护。

晶粒细化尤其是晶粒纳米化不仅能大幅度提高涂层致密性,还可提高涂层的膜基结合强度和力学性能^[17-20]。作为一种极具前景的纳米粉末制备方法,高能球磨技术已广泛应用于制备各类热喷涂用纳米结构粉体^[21]。结合高能球磨技术和热喷涂技术使涂层纳米化,降低涂层孔隙率,提高涂层综合性能。

本文利用高能球磨技术,对 NiCrCoAlY 粉和 MoSi₂ 进行复合,制备 NiCrCoAlY-MoSi₂ 纳米复合粉体。结合 X 射线衍射仪(XRD)、激光粒度仪、HYL-101 斯科特松装密度仪、HY-100D 型振实密度仪和扫描电子显微镜(SEM)等设备对纳米复合粉的微观组织、晶粒尺寸和性能进行表征与分析。

1 实验材料与方法

高能球磨所用粉末原料分别为高纯 MoSi₂ (>99.9%、约 5 μm)和 NiCrCoAlY(25~45 μm),其形貌见图 1。其中,图 1(a)为 MoSi₂ 粉,颗粒细小且大小分布不均,易团聚,流动性差;图 1(b)为 NiCrCoAlY 粉,大部分为类球状,表面较光滑,具有较好的流动性。

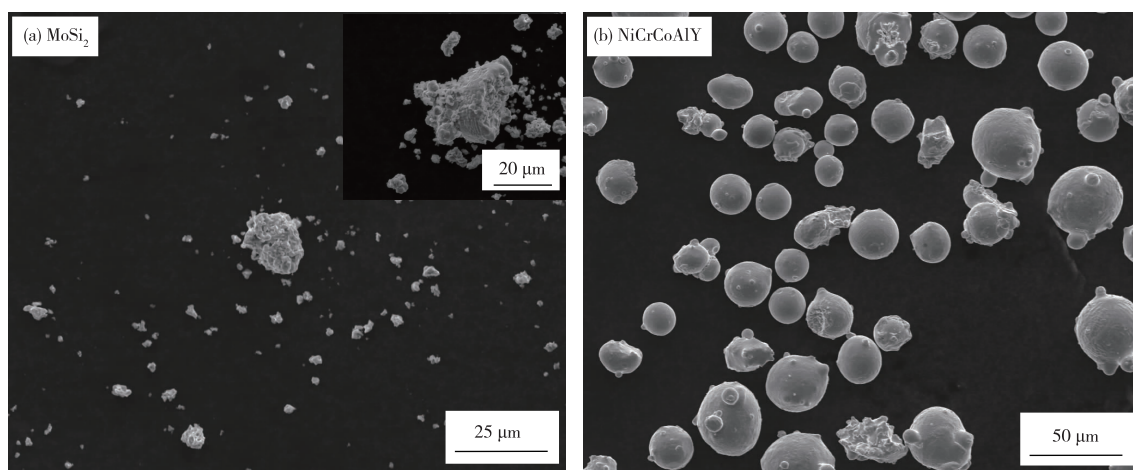


图 1 MoSi₂ 和 NiCrCoAlY 粉末 SEM 图像

Fig. 1 SEM morphology of (a) MoSi₂ and (b) NiCrCoAlY powders

高能球磨所用设备为 V-0002 型高效混合机和 QM-3SP2 型行星式球磨机,具体流程如图 2 所示。1)预混:MoSi₂ 粉和 NiCrCoAlY 粉按质量 1:1 的比

例置于混合机中预混 12 h。2)球磨:取预混好的 NiCrCoAlY-MoSi₂ 复合粉 50 g、硬脂酸 1 g 和 GCr15 钢球 750 g 置于球磨罐中高能球磨。球磨转速

300 r/min, 每球磨 30 min 后停机休息 10 min(散热以避免晶粒长大), 直至到达设定球磨时间。3) 球磨过

程结束后在真空手套箱中取出粉体, 过筛得到粒径为 18~45 μm 的 NiCrCoAlY-MoSi₂ 纳米复合粉体。

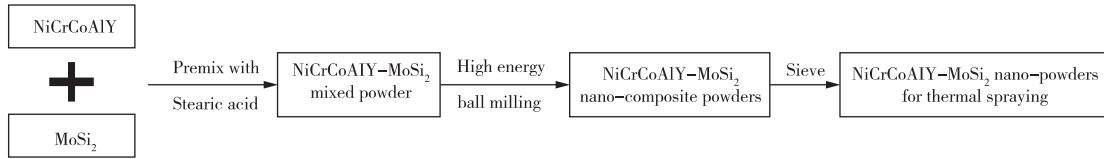


图 2 NiCrCoAlY-MoSi₂ 纳米复合粉体制备流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fabrication procedure of NiCrCoAlY-MoSi₂ powders for thermal spraying

用 Nano430 型扫描电子显微镜、Philips X Pert Pro M 型 X 射线衍射仪和 BT-9300S 型激光粒度仪等对粉末的形貌、粒径和物相等进行表征。

为了更好地表征粉末的流动性能, 利用 Hausner 公式计算粉末振实密度与松装密度比值, 即 HR 值。一般而言, HR 值与粉末的流动性能成反比: HR 值越小, 粉末流动性越好。具体对应关系如表 1 所示。

表 1 粉末流动性与 HR 值之间的关系^[22]

Table 1 The relationship between flow-ability and HR value ^[22]				
HR value	<1.2	1.2—1.4	1.4—2.0	>2.0
Flow-ability	Excellent	Good	Poor	Fail

2 结果与讨论

2.1 球磨粉末形貌与组织结构

图 3 为球磨后的 NiCrCoAlY-MoSi₂ 复合粉形貌

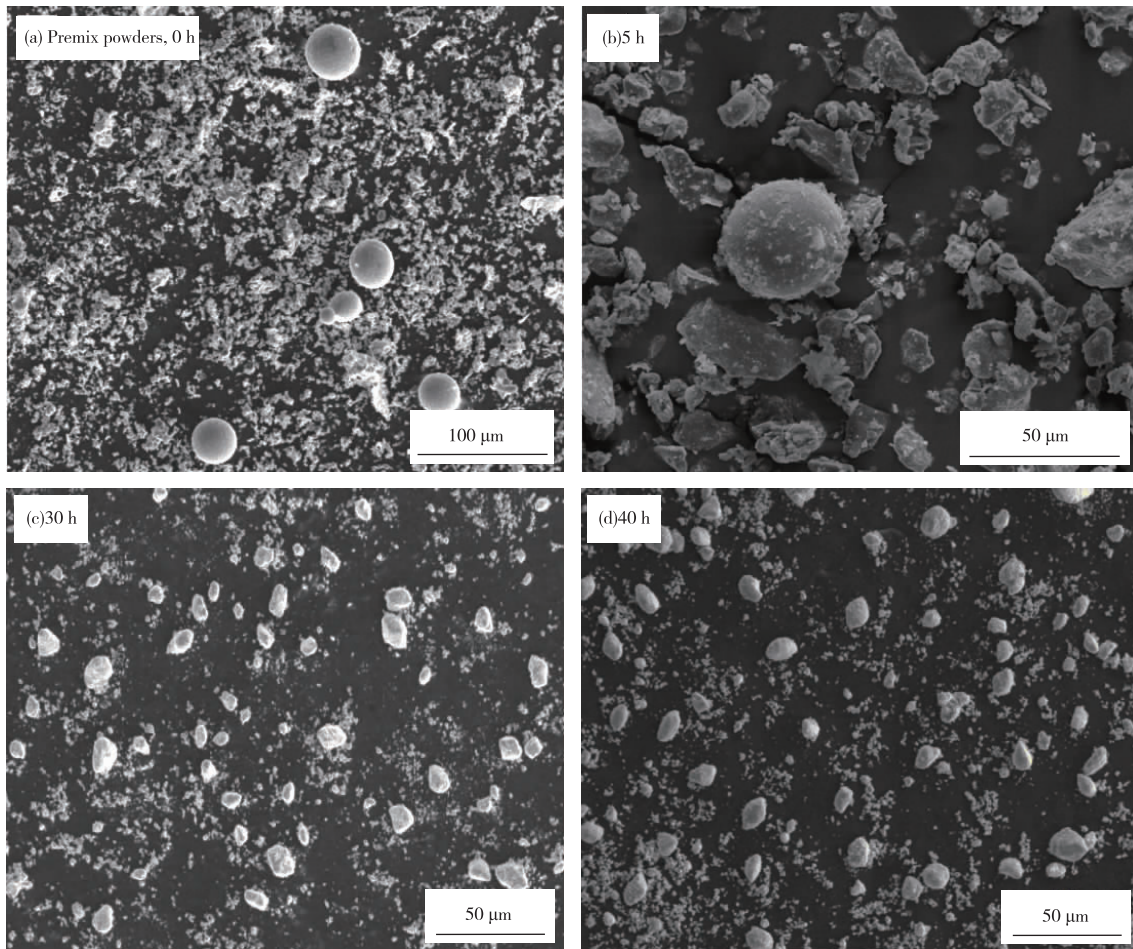


图 3 不同球磨阶段粉末形貌

Fig. 3 SEM images of NiCrCoAlY-MoSi₂ powders with different ball milling times

SEM 图像。其中,图 3(a)为预混粉,图 3(b)~(d)分别为球磨 5、30 和 40 h 后的复合粉末 SEM 图像。预混粉由大的球状 NiCrCoAlY 粉和细小的不规则的 MoSi₂ 粉组成;经 5 h(图 3b)高能球磨后,大部分球状 NiCrCoAlY 粉破碎成多棱角小颗粒,颗粒表面附着或被嵌入细小的团聚颗粒,此外还有一些大的团聚颗粒单独(约 10 μm)出现;当球磨时间增加至 30 h(图 3c),颗粒形态与初始类似:多棱角颗粒消失,大量类球形的椭圆颗粒粉末和少量细小团聚颗粒出现,但类球形颗粒尺寸明显小于初始的 NiCrCoAlY 颗粒;球磨时间增加至 40 h 时,如图 3(d)所示,颗粒外形和尺寸大小与图 3(c)相比变化不大。

高能球磨是指磨球与粉末颗粒长时间不间断发生激烈的碰撞和冲击,粉末颗粒反复产生冷焊和断裂,导致粉末颗粒原子间彼此扩散,获得均匀分布的超细或纳米粉末的一种技术^[23]。球磨过程中,由于磨球连续高频率地与粉末碰撞和冲击,使得球磨粉体发生巨大变化:MoSi₂ 脆性颗粒迅速的被破碎、细化,部分细小锋利的 MoSi₂ 颗粒随磨球高速撞击到 NiCrCoAlY 塑性颗粒并嵌入进去。NiCrCoAlY 颗粒则在磨球和 MoSi₂ 颗粒共同作用下产生形变强化。当其形变达到临界值时,裂纹萌生并不断扩展直至断裂破碎。如此反复,直至整体体系完全碎片化且碎片颗粒尺寸不断减小,最终达到纳米级别。颗粒粒径越小,比表面积越大,表面能也随之增大。随着球磨过程的不断进行,颗粒尺寸不断减小,比表面积和表面能快速增加,颗粒之间的吸附力急剧增大,加上颗粒之间的机械咬合,冷焊效果加强,团聚数量和团聚尺寸也得以增大。当颗粒破碎能力与结合能力达到动态平衡时,颗粒尺寸不再变化,即达到球磨极限值。

球磨形貌结果表明,NiCrCoAlY-MoSi₂ 体系在当前球磨参数下的最佳球磨时间是 30 h。

图 4 为球磨 NiCrCoAlY-MoSi₂ 复合粉 XRD 图谱。由图 4 可知,不同球磨阶段粉末的物相组成基本无变化,即衍射峰峰形走势基本相同,但峰强不同,衍射峰峰位整体略微右偏。其中,预混粉(0 h)主要由 MoSi₂ 相、γ-(CoNi)、β-(CoNi)Al 相和少许 Mo₅Si₃ 相构成。球磨 5 h 后,衍射峰峰型宽化、峰强

降低,部分弱的 MoSi₂ 和 Mo₅Si₃ 衍射峰消失。继续增加球磨至 30 h 后,衍射峰峰型继续宽化、峰强继续降低,预混粉中出现的弱峰及全部的 Mo₅Si₃ 峰完全消失。

随着球磨增加,粉末衍射峰峰强降低、峰型宽化和整体微右偏的主要原因在于:球磨过程产生的长时间剧烈的碰撞和冲击使得被磨粉体迅速破碎、细化和生成大量位错、畸变等缺陷,晶体有序程度不断降低,晶粒尺寸不断减小直至纳米晶,晶格参数发生改变。

球磨时间至 40 h 时,其物相组成与球磨 30 h 的近似一致。结合图 3 分析,原因可能是球磨至 30 h 时,球磨粉体达到动态平衡,晶体有序程度、晶粒尺寸和晶格参数基本不变。

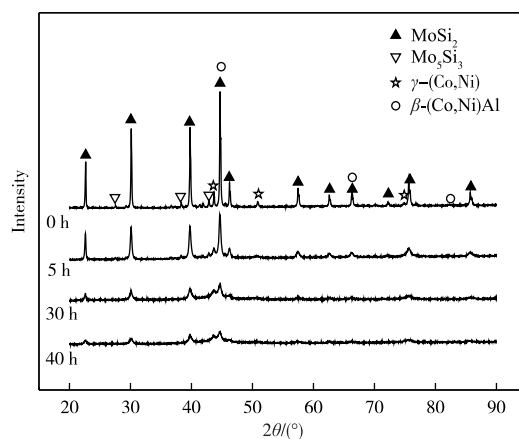


图 4 不同球磨阶段粉末 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of NiCrCoAlY-MoSi₂ powders within different ball milling times

图 5 是球磨 30 h 后再经过筛的 NiCrCoAlY-MoSi₂ 复合粉末(18~45 μm)SEM 图像。由图 5(a)可知,颗粒外形均呈类球形或椭圆形,流动性好,可直接用于热喷涂。图 5(b)为单一粉体外形图,标准类球形。对其放大(图 5c)后发现,该颗粒由大量的纳米级小颗粒团聚而成。图 5(d)为单个颗粒的截面 SEM 图像,点状深色颗粒均匀弥散于整个浅灰色基体中,分别对其进行点能谱测试,结果见表 2。结果表明,浅色区域主要为 Co、Ni 和 Cr 元素,深色区域主要为 Mo 和 Si 元素,结合 XRD 分析可知,作为强化相的 MoSi₂ 均匀弥散分布于 NiCrCoAlY 金属粘结相中,达到理想强化状态。

表 2 经 30 h 球磨后粉末的能谱结果

Table 2 EDS results of powders milled for 30 h

Composition	Co	Ni	Cr	Al	Mo	Si	/%
Light-coloured matrix	34.34	27.66	17.29	8.22	10.83	1.65	
Dark gray particle	8.74	7.09	5.17	1.46	44.26	33.27	

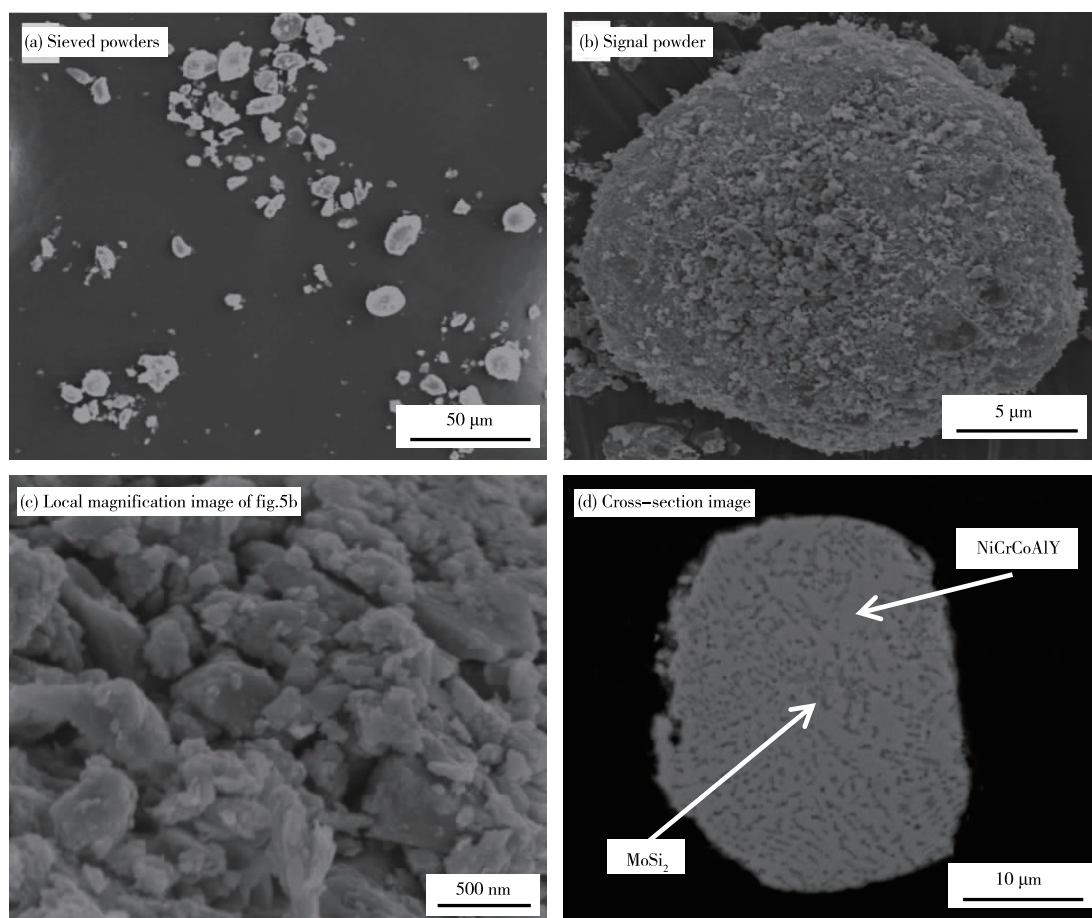


图 5 球磨 30 h 后过筛粉末形貌

Fig. 5 SEM images of the sieved powders after ball milling 30 h

2.2 球磨粉末粒径分布和晶粒尺寸

图 6 为球磨 NiCrCoAlY-MoSi₂ 复合粉颗粒粒径分布。预混粉粒径分布为典型的双峰分布,峰尖对应的粒径刚好匹配 MoSi₂ 粉和 NiCrCoAlY 粉的中值。球磨 5 h 的粉末粒径分布图仍呈双峰结构,但峰值对应粒径值减小,此外高峰对应频率值降低,低峰对应频率值也降低且峰宽增大,即经 5 h 高能球磨后粉体整体颗粒被破碎细化,大颗粒平均粒径和比例减少,小颗粒比例增加、平均粒径减小。当球磨时间增加至 30 h 时,粒径分布由双峰结构变为单峰结构,峰值继续左移,意味着随着粉末破碎的程度加剧,颗粒粒径不断减小。颗粒比表面积与粒径成反比:粒径越小,比表面积越大,表面原子活性越大,颗粒之间的吸附力也随之急剧增大,细小的颗粒团聚成大颗粒,细小颗粒频率值减小。当团聚速度与破碎速度相当时,体系处于平衡状态,峰值维持不变。40 h 球磨粉末的粒径分布图与 30 h 的相当,单峰结构,峰值对应粒径值基本相(D_{50} 值从 30 h 的 9.5 μm 变为 40 h 的 9.4 μm)。

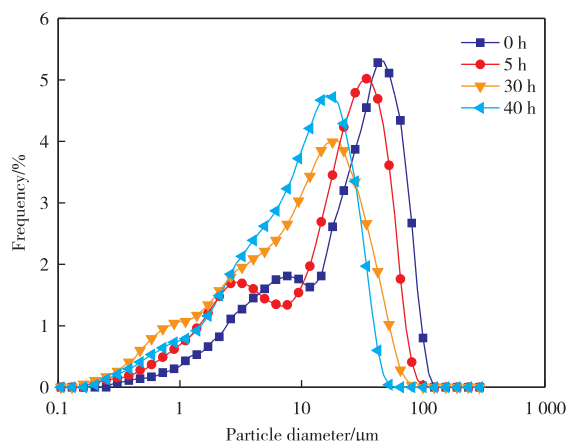


图 6 不同球磨阶段粉末粒度分布

Fig. 6 Particle size distribution of NiCrCoAlY-MoSi₂ powders within different ball milling times

表 3 为不同球磨阶段粉末的振实密度、松装密度和 HR 值。由表 3 可知,随着球磨时间的增加,粉末振实密度不断增大,松装密度则呈现先减后加的趋势。两者比值即 HR 值随球磨时间的走势与松装密度相反,呈先增后减趋势,在 40 h 时最小,为

1.191, 流动性能优异。经 30 h 球磨后, 其 HR 值为 1.194, 与 40 h 相比相差甚小, 同样具有很好的流动性能。实验结果表明, 随着颗粒尺寸的增加, 粉末振实密度与松装密度差值减小, HR 值也随着减小, 流动性能更好。NiCrCoAlY-MoSi₂ 预混粉(0 h)由两种粒径相差巨大的颗粒构成, MoSi₂ 细小且不规则, HR 值偏大, 粉末整体流动性能较差。粉末经球磨

5 h 后, 结合粉末形貌图(图 3b)和粒度分布图可知, 该粉体的粒径比预混粉更细小, HR 值增加, 流动性变差。继续增加球磨时间至 30 h, 粉体粒径分布由双峰结构变单峰结构, 小颗粒大量减少, 大颗粒增加且外形呈类球形, HR 值大幅度减小, 流动性大幅度提高。球磨至 40 h, 粉末形貌与粒径分布与 30 h 的类似, HR 值接近, 流动性能变化小。

表 3 不同球磨阶段粉末振实密度、松装密度和 HR 值

Table3 Tap density, apparent density and HR value of NiCrCoAlY-MoSi ₂ powders within different ball milling times				
Milled time/h	0	5	30	40
Tap density/(g · cm ⁻³)	4.672	5.075	6.686	6.847
Apparent density/(g · cm ⁻³)	2.797	2.737	5.599	5.749
HR	1.670	1.854	1.194	1.191

以 Si 标样校正的 XRD 为基准, 根据 Hall-Scherrer 公式^[24] 计算不同球磨阶段的 NiCrCoAlY-MoSi₂ 粉末晶粒尺寸, 结果如图 7 所示。球磨初期, 晶粒尺寸快速减小, 经 5 h 球磨后其晶粒的平均尺寸降至 52 nm; 继续增加球磨时间, 晶粒尺寸持续减少, 但减少速度快速降低: 30 h 时晶粒尺寸降至 25 nm, 40 h 则降至 23 nm。结合球磨粉末形貌截面组织结构和粒径分布可判断, 随着球磨时间的增加, 粉末晶粒尺寸不断减小, 但减小幅度越来越小, 直至幅度为零, 此时粉末的晶粒平均尺寸恒定不变。

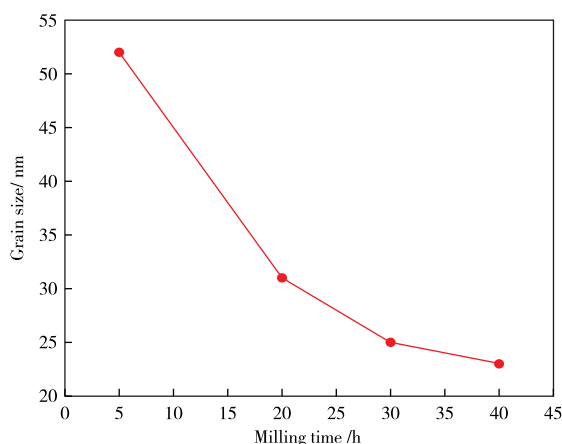


图 7 不同球磨阶段粉末晶粒尺寸分布

Fig. 7 Grain size of NiCrCoAlY-MoSi₂ powders within different ball milling times

结合球磨粉末粒径分布图和晶粒尺寸分布图可知, 本实验设计的 NiCrCoAlY-MoSi₂ 体系最佳球磨时间为 30 h, 其晶粒尺寸和粒径值均基本达到平衡状态, 继续增加球磨时间意义不大。

3 结论

1) NiCrCoAlY-MoSi₂ 复合粉经高能球磨 30 h

后, 纳米级硬质强化相 MoSi₂ 均匀弥散分布于粘结相 NiCrCoAlY 基体上, 其平均晶粒尺寸为 25 nm。继续增加球磨时间, 复合粉粒径、形貌和晶粒尺寸基本不发生改变。

2) NiCrCoAlY-MoSi₂ 复合粉经 30 h 球磨后, 由大量椭圆形颗粒和少量细小团聚颗粒组成, 其 HR 值由初始的 1.670 下降至 1.152, 流动性能明显改善, 可稍加过筛后直接用于喷涂。

参考文献:

- [1] CWALINA K L, DEMAREST C R, GERARD A Y, et al. Revisiting the effects of molybdenum and tungsten alloying on corrosion behavior of nickel-chromium alloys in aqueous corrosion[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2019, 23(3): 129-141.
- [2] 刘晓飞, 张堃, 孙冬, 等. 纳米 Al₂O₃ 对 Ni 基合金激光抛光表面光洁度的影响[J]. 有色金属工程, 2020, 10(4): 16-23.
LIU Xiaofei, ZHANG Kun, SUN Dong, et al. Effect of nano-Al₂O₃ on laser polishing surface finish of Ni-based alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(4): 16-23.
- [3] ELSTERMEYER O, CARTER F. Process parameter generation of nickel based alloys using predictive software tool[J]. IFAC Papers OnLine, 2019, 52(10): 265-269.
- [4] KEDARI L D, ARUN K P. Experimental study of hole taper in laser trepan drilling of nickel based super alloy sheet[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(11): 23994-24004.
- [5] ESPINOZAL J, EDDIE L H, LUIS A G. Development of ZrO₂ and YSZ coatings deposited by PE-CVD below 800 °C for the protection of Ni alloys[J]. Ceramics

- International, 2020, 46(10): 15621-15630.
- [6] ALI R, MIR S S, MEHDI K H. Cr_2O_3 nanoparticles: A promising candidate to improve the mechanical properties and corrosion resistance of Ni-Co alloy coatings[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(6): 6466-6473.
- [7] 朱红梅, 陈明慧, 唐忠锋, 等. Hastelloy N 合金表面激光熔覆 NiCoCrAlY 涂层在 LiF-NaF-KF 熔盐中的腐蚀行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(9): 2767-2774.
- ZHU Hongmei, CHEN Minghui, TANG Zhongfeng, et al. Corrosion behavior in molten LiF-NaF-KF salt of NiCoCrAlY coating prepared by laser cladding on hastelloy N[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(9): 2767-2774.
- [8] AGHAYAR Y, KHORASANIAN M, LOTFI B. High temperature behavior of diffusion aluminide coating on alloy 600 superalloy[J]. *Materials at High Temperatures*, 2018, 35(4): 343-354.
- [9] GEOFF D W, MICHAEL T P, RACHEN C T. Microstructural characterisation of oxide formation from MCrAlY coatings on nickel-based superalloys[J]. *Materials at High Temperatures*, 2009, 26(2): 161-168.
- [10] SHEN Z Y, HE L M, XU Z H, et al. LZC/YSZ DCL TBCs by EB-PVD: Microstructure, low thermal conductivity and high thermal cycling life[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(4): 1443-1450.
- [11] FLEISCHER R L. High-strength, high-temperature intermetallic compounds[J]. *Journal of Materials Science*, 1987, 22(7): 2281-2288.
- [12] MOHAMMAD E, SAEED R B, MOHAMMAD K, et al. The effect of argon shielding gas at plasma spray process on the structure and properties of MoSi_2 coating[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(3): 4529-4533.
- [13] CHEN P, ZHU X, REN X R, et al. Preparation of oxidation protective MoSi_2 -SiC coating on graphite using recycled waste MoSi_2 by one-step spark plasma sintering method[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(17): 22040-22046.
- [14] DUSAN B, JELENA M, MIA O, et al. Porous acicular mullite ceramics fabricated with in situ formed soot oxidation catalyst obtained from waste MoSi_2 [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(13): 9815-9822.
- [15] 周宏明, 柳公器, 肖来荣, 等. Si_3N_4 颗粒及 SiC 晶须强韧化 MoSi_2 复合材料的低温氧化行为[J]. *无机材料学报*, 2009, 24(5): 929-933.
- ZHOU Hongming, LIU Gongqi, XIAO Lairong et al. Low temperature oxidation behavior of MoSi_2 composites strengthened and toughened by Si_3N_4 particles and SiC whiskers[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2009, 24(5): 929-933.
- [16] KRISHNA P J, ROBERT E, LI X H, et al. Fatigue life prediction of thermal barrier coatings using a simplified crack growth model[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(5): 1869-1876.
- [17] LIU B, XIAO G Y, CHEN C Z, et al. Nanostructured hydroxyapatite coating obtained from scholizite with improved corrosion resistance[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 6928-6932.
- [18] TAO T, IN T, KAITLIN B W, et al. Hydrothermally-grown nanostructured anatase TiO_2 coatings tailored for photocatalytic and antibacterial properties[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(17): 23216-23224.
- [19] WANG Y X, ZHOU C G. Hot corrosion behavior of nanostructured Gd_2O_3 doped YSZ thermal barrier coating in presence of $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ molten salts[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, 27(4): 507-513.
- [20] ZHOU Y M, WU Y S, WANG J Z, et al. Preparation, mechanical properties and cyclic oxidation behavior of the nanostructured NiCrCoAlY-TiB₂ coating[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(16): 19362-19369.
- [21] ABU O A, WAGIH A, FATHY A, et al. Effect of high energy ball milling on strengthening of Cu-ZrO₂ nanocomposites[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5): 5866-5875.
- [22] 王记中, 车晓舟, 吴姚莎, 等. 热喷涂用纳米 NiCrCoAlY-TiB₂ 结构喂料的制备及其性能研究[J]. *材料研究学报*, 2017, 31(6): 465-471.
- WANG Jizhong, CHE Xiaozhou, WU Yaosha, et al. Properties of nano-composite powders of NiCrCoAlY-TiB₂ prepared by high energy ball milling for high velocity air fuel spraying[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2017, 31(6): 465-471.
- [23] BENJAMIN J S. Dispersion strengthened superalloys by mechanical alloying[J]. *Metallurgical and Transaction B*, 1970, 1(10): 2943-2951.
- [24] ALLEN W B, KENNETH O, THOMAS R, et al. On the estimation of average crystallite size of zeolites from the Scherrer equation: A critical evaluation of its application to zeolites with one-dimensional pore systems[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2009, 117(1/2): 75-90.