

搅拌摩擦加工研究进展

朱永成, 左立生, 顾胜宇, 左敦稳

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘要: 搅拌摩擦加工 (FSP), 是一种新型的材料塑性变形加工方法, 它是在搅拌摩擦焊 (FSW) 的基础上提出的。从发明至今, 研究者已经成功将 FSP 用于铸造金属微观组织细化、超塑性材料的制备、材料表面改性以及各种复合材料的制备中。搅拌摩擦加工工艺与搅拌摩擦焊接工艺基本相同, 工艺参数对搅拌摩擦加工材料质量有很大的影响。综述了搅拌摩擦加工近年来的研究进展, 主要包括不添加增强相的 FSP 和添加增强相的 FSP 两大类。其中不添加增强相的 FSP 主要有铸造金属微观组织细化和超塑性材料制备, 添加增强相的 FSP 主要有材料表面改性和复合材料制备。搅拌摩擦加工制备复合材料根据添加相是否与基体反应生成增强相, 又分为非原位合成法制备复合材料与原位合成法制备复合材料。文中对以上内容分别进行了总结与评述, 最后指出了 FSP 今后发展应用的方向。

关键词: 搅拌摩擦加工; 工艺参数; 不添加增强相的 FSP; 添加增强相的 FSP

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)04-0221-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.04.033

Research Progress in Friction Stir Processing

ZHU Yong-cheng, ZUO Li-sheng, GU Sheng-yu, ZUO Dun-wen

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: Friction stir processing (FSP) is a new type of plastic deformation processing method and proposed on the basis of Friction Stir Welding (FSW). Since it was invented, researchers have succeeded in applying FSP to refine microstructure of casting metal, prepare superplastic material, modify surface characteristic of materials, and prepare composite materials. The processes of friction stir processing and friction stir welding are basically the same and the process parameters on the friction stir processing has a great impact on material quality. The summarized research progress of friction stir processing in recent years mainly includes two categories: FSP without reinforcing phase and FSP with reinforcing phase. FSP without reinforcing phase mainly consists of casting microstructure refinement and superplastic material preparation. FSP with reinforce phase mainly includes surface modification of materials and preparation of composite materials. Friction stir processing of composite materials is divided into non-situ synthesis of composite materials and in-situ synthesis of composite materials according to whether the added phase reacts with the substrate to produce enhanced phase,. The paper summarizes and comments on the above contents respectively, and finally points out the direction of future development and application of FSP.

收稿日期: 2017-11-20; 修订日期: 2018-01-29

Received: 2017-11-20; **Revised:** 2018-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675270); 南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金项目 (kfjj20170502)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675270) and the Graduate Innovation Base (Laboratory) Open Foundation of NUAA(kfjj20170502)

作者简介: 朱永成 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工。

Biography: ZHU Yong-cheng (1994—), Male, Master, Research focus: precision manufacturing.

通讯作者: 左敦稳 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工、智能加工。

Corresponding author: ZUO Dun-wen (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision manufacturing, intelligent manufacturing.

KEY WORDS: friction stir processing; process parameters; FSP without reinforcing phase; FSP with reinforcing phase

1991 年,英国焊接研究所(TWI)发明了一种新型的固相焊接技术——搅拌摩擦焊(Friction stir welding, 简称 FSW)^[1]。自发明以来,学者们对它做了大量的研究,与传统的焊接方式相比,FSW 具有绿色无污染、焊缝力学性能优良、节能等优点,已成功应用于航空航天、汽车制造、船舶、轨道交通等领域^[2]。基于搅拌摩擦焊的原理,Mishra 博士^[3-4]于 1999 年提出了一种新型的材料加工方法,搅拌摩擦加工(Friction Stir Processing, 简称 FSP)。FSP 的基本原理是利用搅拌头剧烈的搅拌作用,造成加工区材料发生剧烈塑性变形、混合、破碎和热暴露,实现材料微观组织的细化、均匀化和致密化^[5]。自 1999 年 Mishra 博士提出搅拌摩擦加工技术以来,人们对 FSP 在超塑性材料制备、铸造金属微观组织细化、材料表面改性以及复合材料制备等方面的应用进行了深入研究。

本文对搅拌摩擦加工工艺进行了介绍,主要对 FSP 近年来的研究进展进行了综述。根据是否外加增强相可以将 FSP 分为:不添加增强相的 FSP 和添加增强相的 FSP。最后,根据目前搅拌摩擦加工遇到的问题,指出了 FSP 今后研究和发展的方向。

1 搅拌摩擦加工工艺

FSP 的原理同 FSW 的原理基本相同,它是利用一个热硬度很高的搅拌头与材料发生剧烈的搅拌、摩擦作用,搅拌区的材料在搅拌针的作用下产生剧烈的塑性变形、动态再结晶,从而组织变得细密化、均匀化。图 1 为搅拌摩擦加工制备颗粒增强铝基复合材料的过程示意图。加工前,在母材中打排孔预置增强相颗粒,在搅拌头的作用下,增强相颗粒分散到母材中,从而得到铝基复合材料。

一般条件下,FSP 的搅拌头和 FSW 的搅拌头具

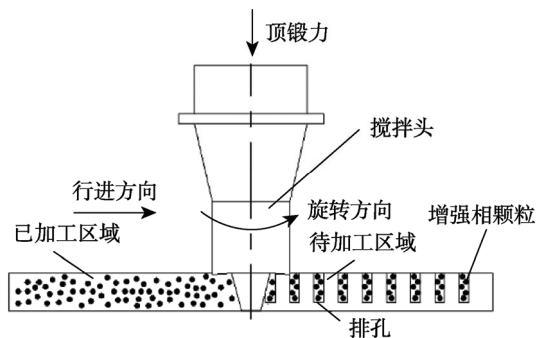


图 1 FSP 制备颗粒增强铝基复合材料示意图
Fig.1 Schematic of FSP preparing particle reinforced aluminum matrix composites

有互换性,在进行材料表面改性时,FSP 还可以使用无针搅拌头对材料表面进行加工。图 2 为 FSP 所使用的几种搅拌头形貌,其中 a、b 为带有搅拌针的搅拌头,c、d 为无针搅拌头。在材料的表层组织细化以及表面层改性时,可以使用 c、d 所示无针搅拌头进行加工。



图 2 不同的搅拌头形貌^[5]

Fig.2 Different shape of tools^[5]: (a) conical threaded with smooth concave(b)threaded cylindrical with smooth concave(c)scrolled profiled, and(d)three semi-spherical with smooth concave

在搅拌摩擦焊接中,工艺参数对焊接效果有很重要的影响,工艺参数的选择合理与否,决定着能否得到无缺陷的焊缝。同样在 FSP 中,也需要注重工艺参数的选取,合适的工艺参数,才能获得内部无缺陷、力学性能优良的加工材料。

搅拌摩擦加工的工艺参数主要包括搅拌头参数和加工过程参数,如图 3 所示,只有这两个参数同时选择恰当,才能加工出性能优良的材料。刘峰超等^[6]对铸态 7075Al 进行 FSP,研究了不同搅拌头尺寸和不同加工过程参数条件下,母材在搅拌摩擦加工后的组织性能。结果发现,采用较高的转速和较小的搅拌头尺寸,可以得到分散均匀的显微组织结构,母材中原有的疏松、孔洞等缺陷也被消除。FSP 可以消除铸造合金的内部缺陷,加工后的材料晶粒细小,组织性能优良。

一般使用锥形螺纹搅拌针进行 FSP 可以获得较好的加工效果^[7],因为锥形螺纹搅拌针使材料的轴向流动性增加。在一定条件下,提高转速或降低焊速,

使材料在相同的时间内经历更多次的搅拌作用, 更有利于材料晶粒的破碎和均匀化。但当转速继续增大时, 会使热输入过多, 晶粒变得粗大, 使得材料的力学性能降低。

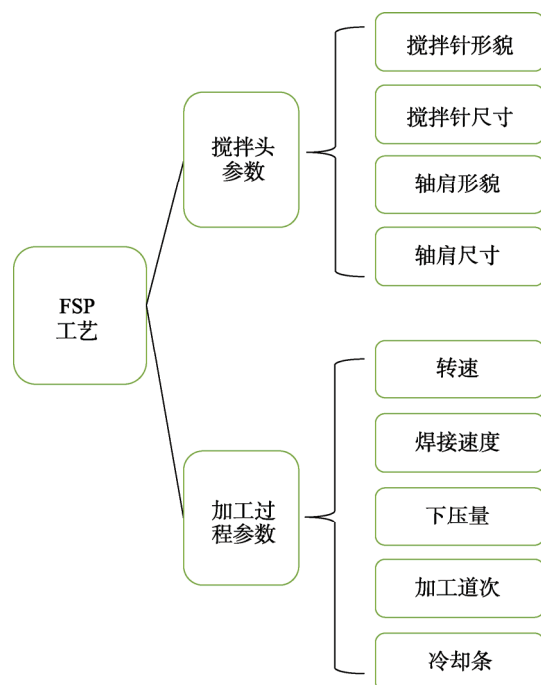


图3 FSP工艺参数分类

Fig.3 Classification of FSP process parameters

目前, 研究者对镁合金、铝合金的 FSP 研究比较深入全面, 最近研究者对熔点较高的铜^[8-9]、钢^[10-12]、钛合金^[13-15]以及生物材料^[16-17]的研究也逐渐增多。赵红星^[18]采用 FSP 进行了 Cr12MoV 模具钢超细晶表面层的制备, 成功制备出了晶粒尺寸为 4~8 μm 的超细晶表面层, 随着转速从 200 r/min 增大到 1000 r/min, 晶粒尺寸先增大后减小。与常规的氮化处理相比, 经过 FSP 后的 Cr12MoV 模具钢的磨损性能有很大的提升。Wang Liqiang 等人^[19]使用钨钢材料搅拌头对 Ti-35Nb-2Ta-3Zr 进行了搅拌摩擦加工, 加工后的表层组织晶粒细小, 增强相分散均匀, 证明了 FSP 可以作为钛合金表面改性的方式之一。刀具磨损是 FSP 中最关键的问题, 所以开发出新型的高强度、耐高温、耐磨损的搅拌头是高熔点材料搅拌摩擦加工的关键。

2 不添加增强相的 FSP

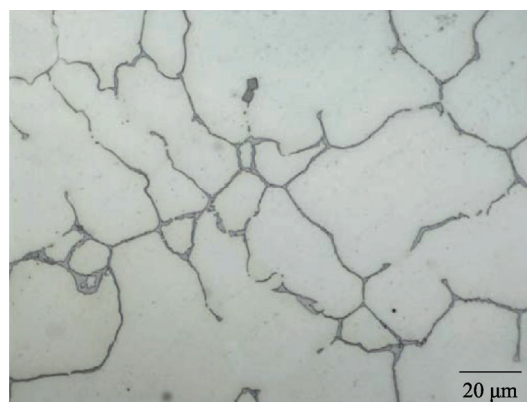
2.1 铸造金属微观组织细化

铸造合金通常具有气孔、疏松、裂纹等缺陷, 力学性能较差。通过搅拌摩擦加工可以消除铸造合金内部的缺陷, 搅拌针将铸造合金中粗大的组织破碎, 得到晶粒细密的组织结构, 从而大大提高了材料的力学性能。

陆常翁等^[20]对过共晶 Al-Si-Fe 合金进行 FSP, 加工后的材料具有优良的力学性能, 较未经 FSP 处理前提高许多。王快社等^[21]用 FSP 技术加工铸态 AZ31 镁合金, 母材中粗大的脆相 β -Mg₁₇Al₁₂ 被打碎, 搅拌区内组织为等轴再结晶晶粒, 晶粒尺寸细小。周海龙等^[22]对铸态铝铁合金进行多道次 FSP 加工, FSP 加工后, 母材中粗大的第二相 Al₃Fe 在搅拌针的作用下破碎为细小的粒状, 成为分布均匀的增强相。加工后的铸态铝铁合金的延伸率显著增大, 断裂形式为韧性断裂机制。

Yaobin Wang 等^[23]采用 FSP 加工铸态 Mg-6Zn-1Y-0.5Zr 合金, 结果表明, 增加焊速, 动态再结晶晶粒变小, 第二相在基体中的分散更均匀。图 4 为相同放大倍数下 FSP 前后的组织, 图 4a 中铸态合金的组织晶粒粗大, 而经过 FSP 后的显微组织 (如图 4b 中) 很细小。经搅拌摩擦加工后的铸态 Mg-6Zn-1Y-0.5Zr, 屈服强度、极限抗拉强度和断后延伸率相对于未经 FSP 加工前, 分别提高了 93.1%、53%和 151.4%。

对于铸态合金, 第二相在基体中的分布都不均匀, 而且铸造的冷却过程中会产生许多内部缺陷, 大大减弱了其力学性能。利用 FSP 技术加工铸造合金



a 母材



b FSP后

图4 铸态合金 FSP 前后微观组织^[23]

Fig.4 The microstructure of cast alloy before and after FSP^[23]: a) base metal, b) after FSP

时,一方面搅拌针能够使合金中的第二相分散在基体中;另一方面搅拌头在轴向压力的作用下,轴肩下形成了一密闭的压力空间,对加工区材料具有挤压锻造作用,可以消除内部缺陷。

2.2 细晶超塑性材料制备

超塑性是指材料在拉伸条件下表现出异常高的延伸率,也不产生缩颈与断裂现象,当延伸率大于100%时,即可称为超塑性^[24]。超塑性的特点为:有大延伸率,无缩颈,小应力,易成形^[25]。由搅拌摩擦的加工原理可知,FSP是制备细晶材料的方法之一,超塑性材料通常都具有细小的晶粒尺寸特点。研究者发现,经FSP处理后的铝合金、镁合金等材料具有超塑性。这对于铝合金和镁合金的使用,有了更进一步的扩展。

Mishra 博士^[26]使用 FSP 技术加工 7075-T651 铝合金,加工后的晶粒大小仅为 3.8 μm ,在 480 $^{\circ}\text{C}$ 时最大延伸率达到了 1250% 以上,具有超塑性。Yoshimasa Takayama 等^[27]对 AZ80 镁合金进行了 FSP,加工后的 AZ80 试样表现出超塑性,延伸率是未经加工试样的 10~30 倍。

张大童等^[28]采用 FSP 技术加工了 AZ31 镁合金,加工后,镁合金的平均晶粒大小由原来的 92.0 μm 细化到 11.4 μm ,伸长率在温度为 723 K 和应变速率为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的条件下达到 1050%,表现出高温超塑性。

除了以上提到的搅拌摩擦加工后的合金具有细晶超塑性行为外,研究者发现,经过搅拌摩擦加工后的材料还具有高应变速率超塑性、低温超塑性等^[29]。

3 添加增强相的 FSP

3.1 添加相

通过外加增强相的 FSP,利用搅拌头将微米或纳米级增强相搅拌分散到基体材料中,分散均匀的增强相可以对基体起到强化作用,从而能够得到性能优良的复合材料。添加的增强相一般具有高熔点、高硬度特性,包括 SiC、SiO₂、Al₂O₃、富勒烯、多壁碳纳米管、NiTi、Ni 粉以及 B₄C 等。添加相根据是否与基体发生反应生成增强相可以分为两类,一类如 SiC、SiO₂、Al₂O₃、富勒烯等直接作为增强相,一方面在 FSP 动态再结晶过程中,这些硬质点可以作为再结晶的形核中心,有利于产生细小晶粒;另一方面,增强相颗粒可以起到晶间强化的作用,分布在晶界上的增强相起到“钉扎”效应,阻碍晶体的位错移动,使材料不易断裂,提高其力学性能。另一类如 NiTi、Ni 粉等,这类添加相是通过与基体发生快速原位反应而生成

增强相,如 Al 和 Ni 在 FSP 条件下发生快速原位反应,生成细小的 Al₃Ni,硬质的 Al₃Ni 微粒对基体材料起到了强化作用。

除了以上常见的增强相外,最近一些研究者还成功地将稻壳灰 Rice husk ash (RHA)^[30]、钼颗粒 (Mo)^[31]、316L 不锈钢颗粒^[32]、AlN^[33]以及 TiO₂^[34-35]等作为添加相,成功制备出各种复合材料。表 1 为最近研究者成功使用 FSP 制备各种复合材料及其力学性能的对比。

3.2 材料的表面改性

一些材料在使用时仅对材料的表面性能有较高的要求,如要有高的表面硬度、表面耐磨性、抗腐蚀能力等。搅拌摩擦加工可以通过增强相的添加,制备出具有高表面硬度、耐磨损的表面复合层材料。

S. Saravanakumar 等^[33]使用 AlN 作为增强相,在纯铜板上加工出深度为 4 mm、宽度不同的凹槽,通过槽宽的变化制备出不同体积分数的 AlN/Cu 表面复合层。随着 AlN 颗粒的体积分数的增加,表面复合层的磨损机理从微切削转变为磨损,并使得磨损碎屑尺寸减小。除了通过在待加工材料表面开槽的方式添加增强相外,还可以通过在材料表面打孔的方式来添加增强相,改变孔径的大小和孔间距,从而得到不同增强相体积分数的表面复合层^[34]。

除以上添加方式外,黄永宪^[35]等利用无针中空搅拌头在材料表面直接进行 FSP,加工示意图如图 5 所示。增强相沿中空送料通道进入搅拌头与被加工材料作用界面,得到的表面复合材料中的增强相分布均匀,无团聚现象,表面复合层晶粒细小,显微硬度和耐磨性较母材提高许多。这种方法可以省去加工前的打开通槽等工艺,提高了加工效率,具有很好的借鉴性。

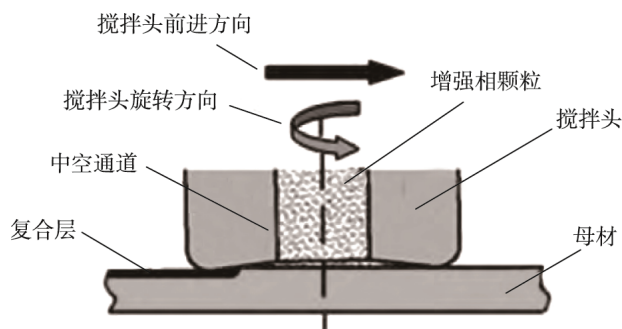


图 5 无针中空搅拌头表面 FSP 示意图^[35]
Fig.5 Schematic illustration of hollow tool in FSP^[35]

表 2 为最近一些研究者通过 FSP 进行表面改性时所使用的不同增强相添加方式。通过热喷涂+FSP、激光熔覆+FSP 等方式进行材料表面改性,能够方便地得到晶粒细小的表面改性层,同时也消除了热涂覆过程中产生的缺陷。

表 1 添加增强相的 FSP
Tab.1 FSP with reinforcing phase

母材/添加相	转速/ (r·min ⁻¹)	焊速/ (mm·min ⁻¹)	加工 道次	晶粒尺寸/μm		力学性能	参考 文献
				FSP 前	FSP 后		
纯铜/B ₄ C	800	40	1		5	显微硬度达 198HV，磨损率仅 1.57×10 ⁻³ mm ³ /m	[8]
钛板/氮气	1250	35	1			Ti/TiN 表面复合层显微硬度为 1024HV，为母材的 6.4 倍，摩擦系数为 0.46	[13]
AA6061/RHA	1600	60	1	31.6	6.8	铝基体的 UTS 为 220 MPa，制备的铝基复合材料的 UTS 为 285 MPa	[30]
Al6082/Mo	1600	60	1	100	31.66	FSP 前，UTS 为 222 MPa，EL 为 24%；FSP 后，UTS 为 305 MPa，EL 为 14%	[31]
纯铜/AlN	1000	40	1	28.6	2.8	显微硬度由原来的 64HV 提高到 109HV，表面磨损率由 2.48×10 ⁻³ mm ³ 减小为 1.74×10 ⁻³ mm ³	[33]
Al5059/Al ₂ O ₃	454	20	3	几十微米	<1	YS 为 277 MPa，UTS 为 375 MPa，EL 为 6.5%，显微硬度由 85HV 提高到 170HV	[36]
AA5052/SiC	1200	100	5	6.3	1.4	FSP 后，显微硬度、屈服强度和极限抗拉强度分别提升了 140%、75%和 60%	[37]
AA5052-O/SiC	1000	50	1	36	5	添加 SiC 后，显微硬度明显提高；1 道次的 FSW 使得 SiC 出现聚集，力学性能较差	[38]
铸造镁/ ZrSiO ₄ +Al ₂ O ₃	800	50	4			显微硬度提高了 47%，表面磨损率也提高许多，不同的加工顺序，磨损率也有所不同	[39]
5083-O/B ₄ C	1000	25	3	49.85	3.98	FSP 前，显微硬度为 82HV，UTS 为 310 MPa，表面磨损率为 0.0057 mg/m；FSP 后，显微硬度为 124.8HV，UTS 为 360 MPa，表面磨损率为 0.003 27 mg/m	[40]
Cu/B ₄ C	1000	40	1	13	2	显微硬度由 80HV 提高到 195HV，表面磨损率由 2.48×10 ⁻³ mm ³ /m 降为 1.74×10 ⁻³ mm ³ /m	[41]
AZ31 镁合金/ ZrO ₂	1250	20	4	40	3	显微硬度由 54HV 提高到 87HV，最大的剪切应变率由 69S ⁻¹ 提高到 88S ⁻¹	[42]

注：表中 UTS 为极限抗拉强度，YS 为屈服强度，EL 为伸长率

表 2 FSP 表面改性时增强相的不同添加方式
Tab.2 Different addition modes of reinforcements in surface modification of FSP

母材	添加相	添加方式	参考文献
Cu	AlN	开凹槽	[33]
7075 铝合金	TiN	打排孔	[34]
AZ31 镁合金	SiC	无针中空搅拌头	[35]
Q235 钢	镍铬铝涂层	表面热喷涂	[43]
AZ31B 镁合金	Cu、Si、Al	表面激光熔覆	[44]
AZ31B 镁合金	铝	直接放置表面	[45]

3.3 金属基复合材料的制备

根据添加相是否与基体发生反应生成增强相，搅拌摩擦加工法制备复合材料可分为非原位合成复合

材料制备和原位合成复合材料制备两种。

3.3.1 非原位合成复合材料制备

非原位合成 FSP 制备复合材料时，添加的微粒直接作为增强相，如 B₄C、SiC、Al₂O₃ 颗粒等。通过 FSP，这些颗粒分散在基体中，硬质颗粒对基体起到强化作用，从而得到力学性能优良的复合材料。涂文斌等^[46]采用 FSP 制备出了多壁碳纳米管（MWCTs）增强铝基复合材料。添加相 MWCTs 与铝基体结合良好，晶粒为细小的等轴晶结构，铝基复合材料的硬度值随着 MWCTs 的含量增大而上升。

赵霞等^[47]以工业纯铝 1060 铝板为基体，制备出了碳纳米管增强铝基复合材料。经过多次 FSP，碳纳米管均匀分布于基体材料中且与基体结合良好。制备的碳纳米管增强铝基复合材料的拉伸强度为母材

的 2.2 倍, 断口呈现韧性断裂特征。

R. Sathiskumara 等^[41]将粒度为 4 μm 的 B_4C 颗粒作为增强相添加到纯铜板中进行 FSP, 成功制备出了 $\text{B}_4\text{C}/\text{Cu}$ 复合材料。由于动态再结晶和增强相 B_4C 钉扎效应的作用, 复合层晶粒细小, 显微硬度增大。

C. J. Lee 等^[48]使用 FSP 制备出了 SiO_2 增强镁基复合材料。添加的 SiO_2 粒度为 20 nm, 通过预先在待加工镁板上开槽, 向其中填充 SiO_2 。先用无针搅拌头加工表面封住焊缝, 使得 SiO_2 粉末在加工过程中不会被挤出, 然后再使用有针的搅拌头进行多道次 FSP。经过 4 道次的 FSP 后, SiO_2 分布均匀, 复合材料组织晶粒细小, 力学性能比母材高出许多, 具有超塑性。

3.3.2 原位合成复合材料制备

原位合成 FSP 是通过添加相与基体发生快速原位反应生成增强相, 从而制备出复合材料。通常来说, 只要添加相和基体能在焊接温度条件下快速反应生成增强相即可, 如利用 Al 和 Ni 在 FSP 条件下能发生反应生成 Al_3Ni 颗粒的原理, 可以制备出 Al_3Ni 增强的铝基复合材料。

熊江涛等^[49]利用 Al 和 Ni 之间能够发生快速原位反应生成 Al_3Ni 的原理, 通过在铝合金 1100-H14 中添加微米级 Ni 粉, 再进行 FSP, 成功制备出 Al_3Ni -Al 复合层。复合层的平均硬度值达 818.3 MPa, 为基体的 2.4 倍。

Zhang Q. 等^[50]利用 Al-Ti-X(Cu, Mg) 体系, 通过将一定量的铝粉、钛粉分别和铜粉、镁粉充分搅拌混合, 经过热压烧结后, 再经过搅拌摩擦加工制备出了铝基复合材料。Cu、Mg 添加相与基体发生反应, 生成了多种增强相 (如 Al_3Ti 、 Al_2Cu 、 $\text{Ti}_2\text{Mg}_3\text{Al}_{18}$), 材料强度得到了提升。图 6 为不同添加相得到的复合材料的 TEM 图像, 图中给出了不同反应体系下生成的各种增强相。

FSP 在复合材料的制备方面已有深入研究, 但在制备复合材料时, 增强相在基体中易团聚, 如图 6b 中虚线圈出的部分为增强相的团聚处。目前研究者大多采用增加加工道次的方法来改变增强相在基体中的分散程度。增强相在晶体中的分布有三种形式^[51]: 完全分布在晶体内、完全分布在晶界、部分分布在晶体内和部分分布在晶界上。增强相分布在晶体内越多, 强化效果越好。所以改善加工工艺, 使纳米增强

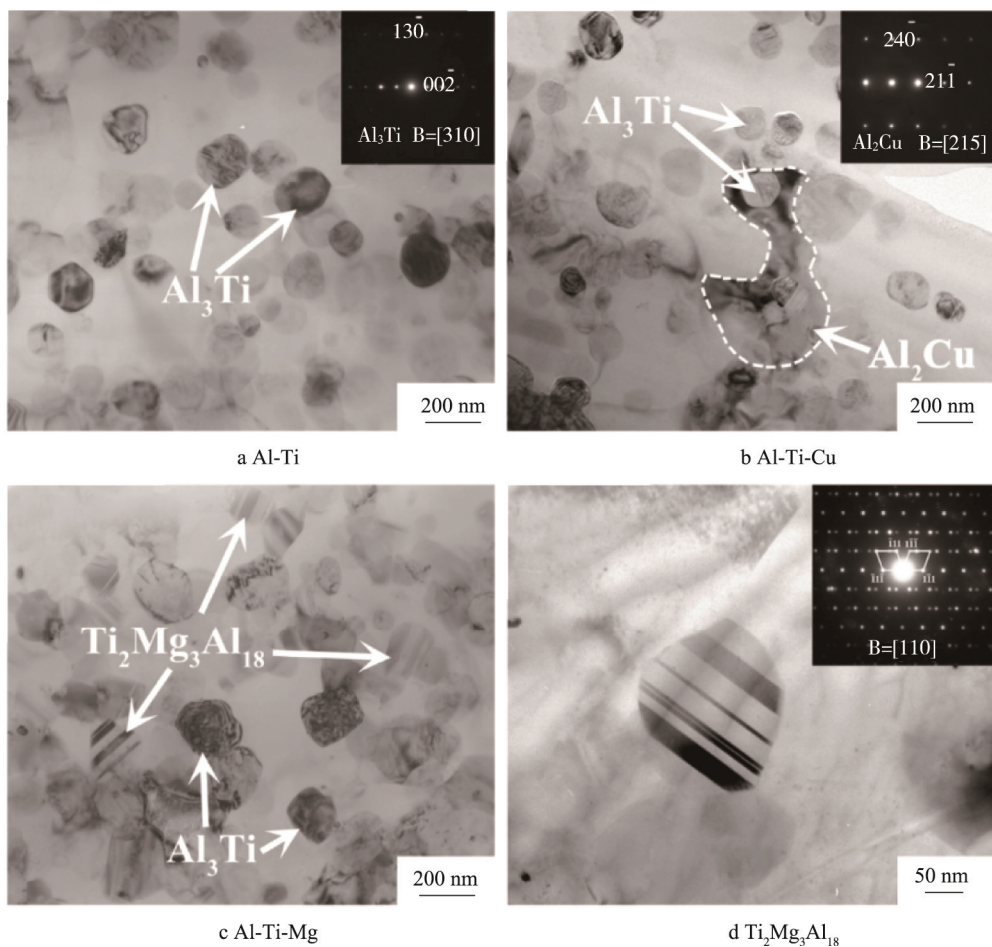


图 6 FSP 后的试样 TEM 图^[50]
Fig.6 TEM diagrams of sample after FSP^[50]

相均匀地分布在晶体内, 是获得高性能金属基复合材料的关键。

4 总结与展望

FSP 作为一种新型的材料加工方法, 具有绿色环保、低能耗、可操作性强等优点。FSP 自发明以来, 在复合材料制备、材料表面改性、细晶超塑性材料制备、铸造合金的微观改性等方面有着深入的研究。本文对近年来 FSP 的发展进行了概述, 根据目前相关的研究状况, 提出了未来 FSP 可能研究的重点方向:

1) 耐高温耐磨损的搅拌头研制。FSP 中最关键的问题是搅拌头的磨损, 尤其在制备复合材料时, 硬质增强相对搅拌头的磨损尤为严重。在加工高熔点的钢、钛合金材料时, 要求搅拌头在高温条件下仍具有很高的硬度, 这对于搅拌头材料有很高的要求。目前加工这类高熔点材料的搅拌头材料有 PCBN、W-Re 合金、WC-Co 基合金、依基合金等。但这些材料不仅价格昂贵, 而且加工和设计难度较大。所以, 这也给研究搅拌摩擦加工高熔点的钛合金以及复合材料等带来了困难。研制出具有耐高温、耐磨损的搅拌头是 FSP 发展的关键。

2) 增强相分散性改进技术。使用 FSP 制备金属基复合材料时, 如何使增强相在基体中分散均匀是影响复合材料性能的关键因素之一。增强相的团聚也是制约 FSP 应用的瓶颈之一。目前, 研究者普遍通过增加搅拌道次来提高增强相在基体中的分散程度, 但这却大大降低了加工效率。如何改善工艺, 使增强相在基体中分散均匀, 是制备高性能复合材料的关键。

3) FSP 应用技术研究。FSP 在材料表面改性方面具有很大的应用前景, 它更容易从实验室走到实际生产应用中。对于一些仅对材料表面性能有特殊要求的材料, 可以通过 FSP 来提高材料表面的相关性能。如何高效地制备出所需的表面层材料, 是今后研究的重点方向。

参考文献:

- [1] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Improvements Relating to Friction Welding: United Kingdom, EP0615480B1[P]. 1992-11-27.
- [2] 薛鹏, 张星星, 吴利辉, 等. 搅拌摩擦焊接与加工研究进展[J]. 金属学报, 2016, 52(10): 1222-1238.
XUE Peng, ZHANG Xing-xing, WU Li-hui, et al. Research Progress in Friction Stir Welding and Machining [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(10): 1222-1238.
- [3] MISHRA R S, MAHONEY M W, MCFADDEN S X, et al. High Strain Rate Superplasticity in a Friction Stir Processed 7075 Al Alloy[J]. Scripta Mater, 2000(42): 163-168.
- [4] MA Z Y, MISHRA R S, MAHONEY M W. Superplastic Deformation Behavior of Friction Stir Processed 7075Al Alloy[J]. Acta Materialia, 2002, 369: 4419-4430
- [5] 黄春平, 柯黎明, 邢丽, 等. 搅拌摩擦加工研究进展及前景展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(1): 183-188.
HUANG Chun-ping, KE Li-ming, XING Li, et al. Research Process and Prospect of Friction Stir Processing[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2011, 40(1): 183-188.
- [6] 刘峰超, 马宗义. 搅拌摩擦加工对铸态 7075 铝合金显微组织的影响[J]. 金属学报, 2008, 44(3): 319-324.
LIU Feng-chao, MA Zong-yi. Effect of Friction Stir Processing on the Microstructure of AS-Cast 7075 Aluminum Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(3): 319-324.
- [7] 李文龙, 夏春, 邢丽, 等. 搅拌针形状对搅拌摩擦加工制备 CNTs/铝基复合材料均匀性的影响[J]. 材料工程, 2014(1): 75-78.
LI Wen-long, XIA Chun, XING Li, et al. Influence of Pin Shape on Homogeneity of CNTs Distribution in CNTs/Al Composite Fabricated by Friction Stir Processing[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(1): 75-78.
- [8] SATHISKUMAR R, DINAHARAN I, MURUGAN N. Influence of Tool Rotational Speed on Microstructure and Sliding Wear Behavior of Cu/B₄C Surface Composite Synthesized by Friction Stir Processing[J]. T Nonferr Metal Soc, 2015, 25(1): 95-102.
- [9] XUE P, WANG B B, CHEN F F, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Processed Cu with an Ideal Ultrafine-grained Structure[J]. Materials Characterization, 2016, 121: 187-194.
- [10] SELVAM K, AYYAGARI A, GREWAL H S, et al. Enhancing the Erosion-corrosion Resistance of Steel Through Friction Stir Processing[J]. Wear, 2017, 386-387: 129-138.
- [11] SELVAM K, PRAKASH A, GREWAL H S, et al. Structural Refinement in Austenitic Stainless Steel by Submerged Friction Stir Processing[J]. Mater Chem Phys, 2017, 197: 200-207.
- [12] PERUMAL G, AYYAGARI A, CHAKRABARTI A, et al. Friction Stir Processing of Stainless Steel for Ascertaining Its Superlative Performance in Bioimplant Applications[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(42): 36615-36631.
- [13] SHAMSIPUR A, KASHANI-BOZORG S F, ZAREI-HANZAKI A. Surface Modification of Titanium by Producing Ti/TiN Surface Composite Layers via FSP[J]. Acta Metall Sin-Engl, 2017, 30(6): 550-557.
- [14] FATTAH-ALHOSSEINI A, VAKILI-AZGHANDI M, SHEIKHI M, et al. Passive and Electrochemical Response of Friction Stir Processed Pure Titanium[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 704: 499-508.
- [15] FATTAH-ALHOSSEINI A, VAKILI-AZGHANDI M, HAGHSHEENAS M. On the Passive and Electrochemical

- Behavior of Severely Deformed Pure Ti through Friction Stir Processing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 90(1-4): 991—1002.
- [16] ZHANG C J, DING Z H, XIE L C, et al. Electrochemical and In-vitro Behavior of the Nanosized Composites of Ti-6Al-4V and TiO₂ Fabricated by Friction Stir Process[J]. Applied Surface Science, 2017(423): 331-339.
- [17] VARGAS M, LATHABAI S, UGGOWITER P J, et al. Microstructure, Crystallographic Texture and Mechanical Behavior of Friction Stir Processed Mg-Zn-Ca-Zr Alloy ZKX50[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 685: 253-264.
- [18] 赵红星. Cr12MoV 模具钢搅拌摩擦加工超细晶表面层性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(2): 105-108.
ZHAO Hong-xing. Properties of Ultrafine-grained Surface Layer for Cr12MoV Die Steel by Friction Stir Processing[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(2): 105-108.
- [19] WANG L, XIE L, LV Y, et al. Microstructure Evolution and Superplastic Behavior in Ti-35Nb-2Ta-3Zr Alloy Processed by Friction Stir Processing[J]. Acta Mater, 2017, 131: 499-510.
- [20] 陆常翁, 卢德宏, 龚慧, 等. 搅拌摩擦加工对过共晶 Al-Si-Fe 合金组织及性能的影响[J]. 材料导报, 2014, 28(3): 107-110.
LU Chang-weng, LU De-hong, GONG Hui, et al. Effect of Friction Stir Processing on Microstructure and Properties of Hypereutectic Al-Si-Fe Alloy[J]. Materials Review, 2014, 28 (3): 107-110.
- [21] 王快社, 王文, 郭韡, 等. 搅拌摩擦加工铸态 AZ31 镁合金组织与性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(7): 1275-1278.
WANG Kuai-she, WANG Wen, GUO Wei, et al. Microstructure and Properties of Friction Stir Processed Cast AZ31 Magnesium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(7): 1275-1278.
- [22] 周海龙, 王快社, 王文, 等. 搅拌摩擦加工铸态铝铁合金组织和性能研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(21): 9-15.
ZHOU Hai-long, WANG Kuai-she, WANG Wen, et al. Microstructure and Properties of Friction Stir Processed Cast Al-Fe Alloy[J]. Casting Forging Welding, 2011, 40(21): 9-15.
- [23] WANG Y, HUANG Y, MENG X, et al. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Mg-Zn-Y-Zr Alloy during Friction Stir Processing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 696: 875-883.
- [24] 文九巴, 杨蕴林, 杨永顺, 等. 超塑性应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
WEN Jiu-ba, YANG Yun-lin, YANG Yong-shun, et al. Superplastic Application Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2005.
- [25] 于卫新, 李森泉, 胡一曲. 材料超塑性和超塑成形/扩散连接技术与应用[J]. 材料导报, 2009, 23(6): 8-14.
YU Wei-xin, LI Miao-quan, HU Yi-qu. Superplasticity and Application of Superplastic Forming/Diffusion Bonding Technology[J]. Materials Review, 2009, 23(6): 8-14.
- [26] MA Z Y, MISHRA R S. Cavitation in Superplastic 7075Al Alloys Prepared Via Friction Stir Processing[J]. Acta Materialia, 2003(51): 3551-3569.
- [27] YOSHIMASA T, ITSUKI T, TOSHIYA S, et al. Superplasticity in Friction Stir Processed AZ80 Magnesium Alloy[J]. Key Engineering Materials, 2010, 433: 241-246.
- [28] ZHANG Da-tong, XIONG Feng, ZHANG Wei-wen, et al. Superplasticity of AZ31 Magnesium Alloy Prepared by Friction Stir Processing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 1911-1916.
- [29] 高雪, 张郑, 王快社, 等. 搅拌摩擦加工镁合金超塑性最新研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(3): 138-142.
GAO Xue, ZHANG Zheng, WANG Kuai-she, et al. The Latest Research Situation of Superplasticity of Magnesium Alloys Prepared by Friction Stir Processing[J]. Materials Review, 2014, 28(3): 138-142.
- [30] DINAHARAN I, KALAISELVAN K, MURUGAN N. Influence of Rice Husk Ash Particles on Microstructure and Tensile Behavior of AA6061 Aluminum Matrix Composites Produced Using Friction Stir Processing[J]. Composites Communications, 2017(3): 42-46.
- [31] SELVAKUMAR S, DINAHARAN I, PALANIVEL R, et al. Characterization of Molybdenum Particles Reinforced Al6082 Aluminum Matrix Composites with Improved Ductility Produced Using Friction Stir Processing[J]. Materials Characterization, 2017, 125: 13-22.
- [32] SELVAKUMAR S, DINAHARAN I, PALANIVEL R, et al. Development of Stainless Steel Particulate Reinforced AA6082 Aluminum Matrix Composites with Enhanced Ductility Using Friction Stir Processing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 685: 317-326.
- [33] SARAVANAKUMAR S, GOPALAKRISHNAN S, DINAHARAN I, et al. Assessment of Microstructure and Wear Behavior of Aluminum Nitrate Reinforced Surface Composite Layers Synthesized Using Friction Stir Processing on Copper Substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 322: 51-58.
- [34] 张敏敏, 肖长源, 李达, 等. 多次搅拌下 TiN 颗粒增强铝基复合层组织与性能[J]. 热加工工艺, 2017, 46(6): 132-139.
ZHANG Min-min, XIAO Chang-yuan, LI Da, et al. Microstructure and Properties of Al/TiN Surface Composite Using Multi-pass Friction Stir Processing[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(6): 132-139.
- [35] 黄永宪, 王天昊, 吕世雄, 等. 镁合金表面搅拌摩擦原位复合材料化的新方法[J]. 焊接学报, 2013, 34(12): 25-28.
HUANG Yong-xian, WANG Tian-hao, LYU Shi-xiong, et al. A Novel Method of In-situ Fabrication of Mg Surface Composites by Friction Stir Process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(12): 25-28.
- [36] SAHRAEINEJAD S, IZADI H, HAGHSHEENAS M, et al.

- Fabrication of Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing with Different Particles and Processing Parameters[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 626: 505-513.
- [37] KHODABAKHSHI F, GERLICH AP, ŠVEC P. Fabrication of a High Strength Ultra-fine Grained Al-Mg-SiC Nanocomposite by Multi-step Friction Stir Processing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 698: 313-325.
- [38] BODAGHI M, DEGHANI K. Friction Stir Welding of AA5052: The Effects of SiC Nano-particles Addition[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 88(9-12): 2651-2660.
- [39] SHARIFITABAR M, KASHEFI M, KHORSHAHIAN S. Effect of Friction Stir Processing Pass Sequence on Properties of Mg-ZrSiO₄-Al₂O₃ Surface Hybrid Micro/Nanocomposites[J]. *Materials & Design*, 2016, 108: 1-7.
- [40] YUVARAJ N, ARAVINDAN S, VIPI N. Fabrication of Al5083/B₄C Surface Composite by Friction Stir Processing and Its Tribological Characterization[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2015, 4(4): 398-410.
- [41] SATHISKUMAR R, MURUGAN N, DINAHARAN I, et al. Characterization of Boron Carbide Particulate Reinforced In-situ Copper Surface Composites Synthesized Using Friction Stir Processing[J]. *Materials Characterization*, 2013, 84: 16-27.
- [42] NAVAZANI M, DEGHANI K. Fabrication of Mg-ZrO₂ Surface Layer Composites by Friction Stir Processing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229: 439-449.
- [43] 朱理奎, 周小平, 方铎泽. Ni-Cr-Al 涂层搅拌摩擦加工的作用机制[J]. *表面技术*, 2015, 44(6): 59-64.
ZHU Li-kui, ZHOU Xiao-ping, FANG Ying-ze. Friction Stir Processing Mechanism of Ni-Cr-Al Coating Layer[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(6): 59-64.
- [44] 刘奋军, 孟庆森, 李增生. AZ31B 镁合金表面激光熔敷+搅拌摩擦加工改性层结构与性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(9): 2419-2423.
LIU Fen-jun, MENG Qing-sen, LI Zeng-sheng. Microstructure and Properties of Modified Layers for AZ31B Magnesium Alloys by Laser Cladding+Friction Stir Processing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(9): 2419-2423.
- [45] 赵亚东, 丁志敏, 沈长斌, 等. 搅拌摩擦加工制备镁基铝覆层材料的组织与性能[J]. *焊接学报*, 2017, 38(1): 82-86.
ZHAO Ya-dong, DING Zhi-min, SHEN Chang-bin, et al. Microstructure and Properties of Mg Based Al Cladding Material Prepared by Friction Stir Processing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(1): 82-86.
- [46] 涂文斌, 柯黎明, 徐卫平. 搅拌摩擦加工制备 MWCNTs/Al 复合材料显微结构及硬度[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(6): 142-147.
TU Wen-bin, KE Li-ming, XU Wei-ping. Microstructure and Hardness of MWCNTs/Al Composite by Friction Stir Processing[J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2011, 28(6): 142-147.
- [47] 赵霞, 柯黎明, 徐卫平, 等. 搅拌摩擦加工法制备碳纳米管增强铝基复合材料[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(2): 185-190.
ZHAO Xia, KE Li-ming, XU Wei-ping, et al. Carbon Nanotubes Reinforced Aluminum Matrix Composites by Friction Stir Processing [J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2011, 28(2): 185-190.
- [48] LEE C, HUANG J, HSIEH P. Mg Based Nano-composites Fabricated by Friction Stir Processing[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54: 1415-1420.
- [49] 熊江涛, 张赋升, 李京龙, 等. 搅拌摩擦加工制备 Al₃Ni-Al 原位反应复合体[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(1): 139-143.
XIONG Jiang-tao, ZHANG Fu-sheng, LI Jing-long, et al. In-Situ Synthesized Al₃Ni-Al Composites by Friction Stir Processing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(1): 139-143.
- [50] ZHANG Q, XIAO B L, MA Z Y. In-situ Formation of Various Intermetallic Particles in Al-Ti-X(Cu, Mg) Systems during Friction Stir Processing[J]. *Intermetallics*, 2013, 40: 36-44.
- [51] 何广进, 李文珍. 纳米颗粒分布对镁基复合材料强化机制的影响[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(2): 105-110.
HE Guang-jin, LI Wen-zhen. Influence of Nano Particle Distribution on the Strengthening Mechanisms of Magnesium Matrix Composites [J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2013, 30(2): 105-110.