DOI: 10.3901/JME.2015.22.001

钢搅拌摩擦焊接及加工研究进展*

李艺君^{1,2} 付瑞东^{1,2}

(1. 燕山大学亚稳材料科学与技术国家重点实验室 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学材料科学与工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 自搅拌摩擦焊发明至今,国内外开展了大量的有关搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)技术的研究与开发工作,并且已在轻合金结构制造领域得到大量实际应用。此外,基于搅拌摩擦焊原理发展而来的另一项技术——搅拌摩擦加工也得到广泛关注,并且在金属材料组织改性及复合材料制备方面显示了独特的优势。然而,由于受到高温搅拌头材料的限制,对钢铁材料搅拌摩擦焊接及加工的研究相比铝合金要少了很多。本研究对钢铁材料搅拌摩擦焊接及加工的研究进展进行简要概述,总结同质钢铁材料搅拌摩擦焊接、异质钢铁材料搅拌摩擦焊接、钢铁材料搅拌摩擦加工以及高温焊接工具材料等几方面的研究成果,指出其中存在的重要科学及技术问题,并对钢铁材料搅拌摩擦焊接以及搅拌摩擦加工的发展趋势及值得关注的问题进行展望。

关键词: 搅拌摩擦焊接; 搅拌摩擦加工; 钢铁材料; 高温搅拌头

中图分类号: TG4

Friction Stir Welding and Processing of Steels

LI Yijun^{1,2} FU Ruidong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. College of Materials Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Since the invention of the friction stir welding(FSW), a large number of researches and developments of FSW have been carried out. And now, it has been widely used in the manufacture of light alloy structure. In addition, friction stir process(FSP) which based on the FSW technology has received wide attention. And it shows a unique advantage in the preparation of metal materials and composite materials. However, due to the limit of the high temperature tool materials, the level of activity in research on the friction stir welding of steels is dwarfed when compared with that on aluminium alloys. The current state of the researches on the FSW/FSP of steels is briefly summarized. The research works about the homogeneous and dissimilar FSW of steel, FSP of steels and the tool materials used at high temperature are presented. Furthermore, the trends and the key issues of FSW/FSP of steels are prospected.

Key words: friction stir welding; friction stir processing; steel materials; high temperature stir tools

0 前言

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是1991年由英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)发明的一项全新的固态焊接技术^[1],著名学者DAVID在1992年发表的一期《Science》中评价“FSW是20世纪焊接领域中继激光焊之后的又一项革命性焊接技术”^[2]。从该技术发明至今,国内外开展了

大量的有关FSW技术的研究与开发工作,并且已在轻合金结构制造领域得到大量实际应用^[3]。此外,基于FSW原理发展而来的另一项技术——搅拌摩擦加工(Friction stir processing, FSP)也得到广泛关注,并且在金属材料组织改性及复合材料制备方面显示了独特的优势^[4]。在国内外已开展的有关FSW/FSP的研究及应用报道中,绝大部分是针对铝、镁、铜等低熔点合金,而对于钢铁材料、钛合金等高熔点合金的研究还相对较少,其主要原因是受到高温搅拌头材料的限制^[5]。尽管如此,基于钢铁材料在金属焊接结构中所占有的巨大比例,以及

* 河北省自然科学基金资助项目(E2013203370)。20150429 收到初稿, 20150922 收到修改稿

近年来各种先进钢铁材料对于焊接技术需求的日益增加,有关钢铁 FSW/FSP 的研究正呈现逐年上升趋势。图 1 为美国工程索引(EiCompendexWeb)数据库基于近 15 年发表论文的年度统计,可以看到有关钢铁 FSW/FSP 的研究由 2000 年的 2 篇/年到 2014 年的 219 篇/年,呈现快速增长趋势。截至目前,由 TWI 主办的搅拌摩擦焊国际会议已举行了十届,每届会议中有关高熔点合金 FSW/FSP 的报告数量也呈现逐年递增趋势。国外最早开展钢铁 FSW 研究的是英国 TWI^[6],之后的研究工作主要集中在日本的大阪大学 FUJII 研究组^[7]和美国的杨百翰大学的 NELSON 研究组^[8]。国内最早开展高熔点合金 FSW 研究的是哈尔滨工业大学^[9],之后甘肃理工大学^[10]、燕山大学^[11-13]、中国科学院沈阳金属研究所^[14]、北京科技大学^[15]等单位也开展了相关研究。

图 1 2000—2015 年发表钢铁材料论文统计

与传统的熔化焊相比,FSW 接头焊缝组织为细小的等轴晶;焊接热输入较低,对热影响组织的粗化作用小;同时不存在熔合区,上述特点决定了 FSW 接头的组织均优于熔化焊接头。尽管如此,由于受复杂的装卡及焊接位置的限制,FSW 在普通碳钢、低合金钢焊接中并不具备明显优势,但在一些难焊金属材料的焊接中则具有不可替代的地位。因此,国内外有关钢铁 FSW 的研究多集中于高氮钢、高强钢、双相不锈钢、氧化物弥散强化(Oxide dispersion strengthened, ODS)钢、高碳钢、高合金钢以及异质钢铁材料焊接等。此外,利用 FSP 技术来细化钢铁材料的组织,控制相变产物类型及分布,以及制备金属基复合材料等方面的研究,展示了 FSP 在钢铁材料中潜在的应用前景^[16]。本文仅从钢铁材料的同质和异质 FSW、FSP 以及高温焊接工具材料等方面的研究进展做简要概述,并对钢铁材料 FSW/FSP 未来的发展趋势及值得关注的问题进行展望。

1 同质钢铁材料的搅拌摩擦焊

在同质钢铁材料 FSW 接头中,焊缝两侧金属为同一材质,并可进行对接、角接、搭接以及点焊等接头形式的焊接。目前,采用 FSW 焊接的钢铁材料多为一些难焊金属材料,利用 FSW 是固态焊接的特点,有效避免了这些材料在传统熔化焊中易出现的气孔、热裂纹、成分偏析等冶金问题。表 1 列举了 FSW 在部分典型同质钢铁材料焊接中的应用。

根据被焊材料的成分特点及组织类型,同质钢铁材料的焊接可分为两种情况。

(1) 室温下为单相组织的钢。典型的钢种如奥氏体不锈钢、高氮钢等。此类钢 FSW 接头中焊核区和热机械影响区的组织多呈现完全或部分再结晶特征,晶粒发生显著细化。最新研究表明,含氮奥氏体钢焊缝区组织中存在大量的亚晶界和小角度晶界,这明显不同于铝合金焊核组织特征。图 2、图 3 为 AISI 316L 不锈钢焊核区组织特征及统计结果^[29]。从图 2、3 中可见焊核区高角度晶界比例较低,而小角度晶界及孪晶界的比例较大。此类奥氏体钢的层错能较低,其高温热变形机制及再结晶行为不同于铝合金,详细机制还有待进一步研究。

图 2 AISI 316L 钢 FSW 接头组织 EBSD 晶界分布图

此外,因高温下钢的流动性和导热能力均比铝合金差,因此,焊核区中的组织不均匀性更为明显。图 4 为 Fe-18Cr-16Mn-2Mo-0.85N 钢 FSW 接头的组织,可以看到,虽然焊核区的组织已经明显细化,但是在焊核区的上下部位组织间不仅存在尺度差异,同时其特征晶界比例也差别很大^[12]。

表 1 FSW 在同质钢铁材料焊接中的应用

	被焊材料	板厚/mm	转速/(r/min)	行进速度/(mm/min)	搅拌头材料	参考文献
高氮钢	32Mn-7Cr-1Mo-0.3N	3	600	80	钨基合金	[11]
	Fe-18Cr-16Mn-2Mo-0.85N	3	800	50	钨基合金	[12]
	Fe-18.4Cr-15.8Mn-2.1Mo-0.69N-0.04C	2	800	100	PCBN	[17]
	Fe-23Cr-0Ni-1Mo-1N	2	400	50, 100, 200, 300	Si ₃ N ₄ 基合金	[18]
高强钢	HSLA-65	3	300~600	50, 127	PCBN	[19]
	HT1180	1.6	200~600	100~600	钨基合金	[20]
	M190	1	1 000	50~300	钨基合金	[21]
	(API) X80 (双面焊)	11	正面: 350~725 背面: 550~725	正面: 80~285 背面: 70~230	PCBN	[22]
	DH36	6	200~700	100~500	钨基合金-PCBN	[23]
	DP590	1.4	600~1 000	120~420	Si ₃ N ₄ 基合金	[24]
双相不锈钢	S32205	10	200	100	PCBN-钨钛合金	[25]
	SAF 2205	2	600	50~250	钨基合金	[26]
	SAF 2507	4	450	60	PCBN	[27]
	GX2CrNiMoN26-7-4	5	300	100, 200	PCBN	[28]
奥氏体不锈钢	AISI 316L	2	200, 315	60	钴基合金	[29]
	AISI 304L	6	550	80	PCBN	[30]
铁素体不锈钢	AISI 409M	4	800~1 200	30~110	钨基合金	[31]
	AISI 430	3	560~1 400	80~200	钴基合金	[32]
	15Cr-ODS 铁素体钢	1.5	300	50	钨基合金	[33]
	MA956	4	300~500	25~100	PCBN	[34]
	14YWT NFA	2.86	300	80	PCBN	[35]
	PM2000 铁素体钢	2	600	50	钨基合金	[36]
高碳钢	SK4 (w _C =1%)	2	100	100~400	钨基合金	[37]
	SUJ2 (w _C =1.02%)	2.3	400~800	80	PCBN	[38]
	SK5 (w _C =0.84%)	4	700	80	钴基合金	[39]
	AISI 1080(液态 CO ₂ 冷却)	2	100	100	钨基合金	[40]
高合金钢	AISI D2	3	400~800	385	钴基合金	[41-42]

图 3 AISI 316L 钢 FSW 接头组织晶界角分布统计

值得注意的是，由于 FSW 特有的塑性金属流动行为及强热变形的作用，焊核区的组织中会出现异常相变行为。图 5 为 PARK 等^[30]在 304 不锈钢的焊核区发现的沿晶界析出的 σ 相，类似的结果被 CHEN 等^[43]在 316 不锈钢焊核区得到进一步证实。 σ 相是一种四方结构的富 Cr 相。由于奥氏体直接转

变为 σ 相的过程需要发生合金元素的再分配，因此，通常发生在较长时间的热处理过程中。而在 FSW 短暂的焊接过程中出现这个相，则归于其特殊的热变形条件，但有关机理值得深入探讨。

(2) 室温下为多相组织的钢种。此类钢在钢搅拌摩擦焊研究中所占比例较大，典型的钢种如低合金高强钢、双相钢、ODS 钢等。这些钢的 FSW 接头组织的演变较为复杂，并且与焊接参数(或焊接热输入)关系较大。除了发生动态回复和再结晶过程以外，还存在合金碳化物的回溶及再析出、应变诱发相变、机械稳定化等过程，最终导致其组织呈现多尺度、多形态的特点。图 6 是 SAF2205 双相不锈钢 FSW 焊核组织，焊核区中的双相比例基本与母材相当^[44]。由于焊核组织是热变形产物，因此，这种与母材类似比例的焊核区组织演变机制就成为值得关注的问题。

从力学性能来看，钢的 FSW 接头中焊核区的硬度多数都明显高于母材，其原因一方面来自于晶

粒的细化和大量位错亚结构的影响, 另一方面还可能是淬硬组织及固溶强化的影响, 这些因素使得钢的 FSW 接头中存在明显的组织及性能梯度。由此带来的问题是, 搅拌摩擦焊接头的强度几乎都高于母材, 但是接头的塑性却明显下降。图 7、图 8 为

AISI1080 钢接头硬度分布和拉伸性能。从图中可以看出由于晶粒细化的作用, 焊核区的硬度以及焊接接头的强度均高于母材, 但是焊接接头的塑性都低于母材^[40]。

图 4 高氮钢 FSW 接头组织特征

图 5 304 不锈钢 FSW 接头焊核区中的 σ 相

图 6 SAF2205 不锈钢 FSW 接头相组成分析

图 7 AISI 1080 钢 FSW 接头的硬度分布

图 8 AISI 1080 钢 FSW 接头的抗拉强度与伸长率

接头强度的提高, 归因于高强度的焊缝导致的内部拘束效应, 其类似于熔化焊接头中的高强匹配接头。在 高强匹配接头中, 接头的整体协调变形能力受到高强焊缝区的制约而变差。由于 FSW 接头中的组织梯度形成机制不同于熔化焊, 其对于静力载荷下的力学性能以及疲劳和断裂韧度的影响就成为重要的科学问题, 必须引起足够的重视。采用焊后热处理可有效改善具有单相组织接头的梯度特

征,进而可以大幅度恢复接头的强韧性^[11-12]。但是,对于具有复杂组织类型的接头,如何调整其 FSW 接头的梯度特性,还有待深入研究。截止目前,有关钢同质 FSW 实际应用的产品还不多,较早有 X80 管线钢的 FSW 焊接、国外某舰艇高强钢甲板焊接的实际应用报道。此外,由 FSW 衍生的一种摩擦塞焊修补裂纹技术已在海洋管线修复中得到应用。

2 异质钢铁材料的搅拌摩擦焊

由于 FSW 过程中不发生金属熔化的特点,决

定了 FSW 技术在异质焊接中具有独特的优势。焊接过程中被热塑化的异质金属之间发生严重的挤压和机械混合,焊核区的组织多呈现层状结构。相比于传统熔化焊的凝固组织,这种热变形组织虽能有效降低金属间化合物的不利影响,但未能根本消除脆性金属间化合物的出现,导致其焊核区异质界面处仍是接头的薄弱部位。因此,针对异质钢 FSW 接头的研究中,有关异质界面结构及表征、焊接工艺的优化等方面是研究的重点。表 2 列举了 FSW 在一些异质钢铁材料焊接中的应用。

表 2 FSW 在钢铁异质焊材料焊接中的应用

	被焊材料	接头形式	板厚/mm	转速/(r/min)	行进速度/(mm/min)	参考文献
钢和铝合金	低碳钢/6061 铝	点焊	1(铝上板)	600, 700	—	[45]
	St12 钢/5083 铝	搭接	3(铝-上板) 1(钢-下板)	750	230	[46]
	304 不锈钢/3003 铝	搭接	11(铝-上板) 12(钢-下板)	900	300	[47]
	TRIP 780/800 钢/6061 铝	对接	1.5(铝) 1.4(钢)	1 200, 1 800	30~120	[48]
	St 52 钢/5186 铝	对接	3	355	14~80	[49]
钢和镁合金	镀锌低碳钢/AZ31 镁	点焊	3(镁) 1(钢)	1 100~1 500	—	[50]
	HSLA 钢/AZ31 镁	搭接	2.3(镁-上板) 1.5(钢-下板)	500	100	[51]
	302 不锈钢/AZ31 镁	搭接	3(镁-上板) 1(钢-下板)	950	60~300	[52]
钢和钛合金	低碳钢/商业纯钛	搭接	1(钛-上板) 3.2(钢-下板)	400	50	[53]
	304 不锈钢/Ti-6Al-4V	搭接	1.6(钛) 1(钢)	600~1 100	25~100	[54]
	304 不锈钢/商业纯钛	搭接	1(钛-上板) 3(钢-下板)	150~450	25~100	[55]
	SUS 409L 不锈钢/低碳钢	点焊	1.2	1 400	—	[56]
异质钢	氧化物弥散强化钢/430 不锈钢	点焊	2	1 200	—	[57]
	氧化物弥散强化钢/F82H 钢	搭接	2.9	200~350	76.2	[58]
	S31603 奥氏体不锈钢/S32750 超级双相不锈钢	对接	6	100~300	100	[59]
	304 不锈钢/St37 钢	对接	3	600	50	[60]
	304 不锈钢/F82H 钢	对接	1.5	100	100	[61]

从整体上看,异质钢铁材料 FSW 焊接可分为两种情况。

(1) 活泼金属与钢铁材料间的异质焊接。已报道的此类异质材料 FSW 焊接主要有 Al/Fe、Mg/Fe、Cu/Fe、Ti/Fe 等。根据这些活泼金属与铁的二元相图可知,上述几种异质金属之间都极易形成金属间化合物,并且有些化合物的形成温度较低。因此,在 FSW 过程中完全避免化合物形成的难度非常大。图 9 为 Al/Fe 异质搅拌摩擦焊典型的对接接头界面特征,可以明显看到在原始界面附近有大量的金属

间化合物存在^[49]。从图 10 中 Al/Fe 异质搅拌摩擦焊接头的拉伸试样断裂位置可知,断裂发生在两种金属界面处^[62]。

图 9 St52 低碳钢和 5186 铝合金 FSW 异质焊接界面

图 10 304 不锈钢和 6061 铝合金 FSW 异质焊
接头拉伸断裂位置

值得指出的是,对于异质接头而言,接头形式对其成形质量及接头力学性能的影响很大。相比较而言,点焊或搭接接头的异质 FSW 比较容易实现,且接头强度多介于被焊的异质材料母材强度之间。而对接接头的异质 FSW 焊接较为困难。由于热塑性温度差别大导致接头成形质量较差,并且断裂多位于异质界面处,存在低应力失效的问题。为消除或减小上述存在于这些异质界面的问题,人们尝试采用各种方法,如水冷^[63]、搅拌头偏移^[64]等减少金属间化合物的形成,并收到了一定的效果。

(2) 合金成分相差较大钢种间的异质焊接。已报道的相关研究主要有不锈钢/碳钢、异质不锈钢等。此类异质钢焊接,虽然异质界面处不会形成明显的脆性金属间化合物,但是却容易出现成分偏析及淬硬组织以及耐蚀性下降等问题。图 11 为 st37 低碳钢和 304 不锈钢 FSW 接头组织特征,其中 304 一侧的焊核区由细小的奥氏体晶粒组成, st37 钢一侧的焊核区由细小的铁素体和珠光体构成,其中还有少量的魏氏体和马氏体。两种金属的界面不是弱连接区,拉伸试样断裂在低碳钢一侧的热影响区^[65]。截至目前,由于异质钢 FSW 对接接头中的界面问题仍很突出,异质钢 FSW 仅在一些搭接及点焊接头的产品中得到应用。异质钢 FSW 的另一潜在应用是复合钢板的焊接,但目前还没有相关的研究报道。

图 11 st37 低碳钢和 304 不锈钢 FSW 接头组织特征

3 钢铁材料的搅拌摩擦加工

近年来,利用 FSP 过程中的大应变、高应变速率强烈热变形条件来改善或控制一些钢铁材料的组织及性能,制备铁基复合材料,以及其中涉及的特殊相变行为及机制等内容已得到关注。图 12、图 13 为 CUT 等^[66]对普通低碳钢在两相区加工后获得的组织及性能结果。通过控制变形条件,使得性能得

图 12 S50C 钢当转速为 400 r/min 时不同焊接速度条件下
焊核中心热循环

图 13 不同碳钢当转速为 400 r/min 时 FSW 接头抗拉强度

到大幅度提高。这项工作的意义不仅在于为钢铁材料强韧化提供了新的方法,同时其潜在的应用是在钢表面制备梯度结构层(尺度梯度或组织梯度)。相比于低熔点合金 FSP,有关这方面的研究还非常少。

最近,有人针对堆焊焊缝进行了 FSP 再加工。图 14 为一种低合金高强度埋弧焊焊缝金属经 FSP 前后的组织,图 15 为其拉伸性能。可见 FSP 前焊缝组织为粗大的贝氏体结构,在高转速 FSP(峰值温度高于 A_{c3})加工后,焊核区为细晶的贝氏体组织;在低转速 FSP(峰值温度低于 A_{c1})加工后,焊核区为细晶的铁素体组织。显微组织的改变提高了接头的强度,同时塑性也保持在较高的程度,甚至略高于原始埋弧焊焊缝^[67]。

4 高温搅拌头材料的研究

如前所述,FSW/FSP 在钢铁材料焊接中的关键技术瓶颈是高温搅拌头材料。从表 1 可以看到,目前用于高熔点合金 FSW/FSP 的搅拌头材料主要有钨钼合金、钨钨合金、钴基合金以及 PCBN(聚晶立方氮化硼)。其中,由于钨系合金中添加了高比例的

图 14 FSP 前后焊缝区的组织特征

图 15 FSP 前后焊缝区的拉伸性能

稀有贵重金属铌和钽, 价格相对较高, 限制了其大规模工业化应用。同时, 搅拌头的磨损及材料转移导致金属钨残留于焊缝中, 还会显著影响接头组织及其力学行为。相比于钨系合金材料, PCBN 的耐磨性及高温强度较高, 且不存在材料转移问题。然而, 此类材料的脆性较大, 对设备主轴的同轴度要求高。尽管如此, 此类材料仍将是今后高温搅拌头材料研制的重要方向。

5 结论

本文就钢搅拌摩擦焊接加工的研究进展进行

了简要概述, 同时指出了该技术潜在的应用领域。相比于低熔点合金 FSW 的研究, 以及钢铁材料组织演变的复杂性和多样性, 要全面推广钢 FSW/FSP 技术, 仍有很多问题需要探讨和解决。为此, 应在如下几方面开展研究。

(1) 新型高温搅拌头材料的研究与开发。钢 FSW/FSP 技术的应用技术障碍是缺乏低成本、高性能的高温工具材料。为此, PCBN 材料的增韧技术研发是未来的主要方向。此外, 不论是钨系合金, 还是 PCBN 材料, 目前都是采用整体粉末冶金技术制造, 采用复合结构形式的搅拌头设计也是未来另一发展方向。

(2) FSW/FSP 的加工过程不同于常规热加工手段如锻造、轧制、拉拔等过程, 具有特殊的强热变形条件。同时, 钢铁材料的组织演变与其热变形条件关系密切。由此不难想到, 在钢的 FSW/FSP 加工过程中, 会存在很多未知的相变热力学及动力学机制值得进一步的研究。

(3) 相比于 FSW, FSP 技术在钢铁材料表面强化领域具有更大的应用前景。特别是在传统钢铁材料的强韧化方面, FSP 技术具有一定的优势。为此, 今后应大力开展 FSP 工业化应用的可行性研究, 以及如何提高加工效率和专业设备的研制等方面的工作。

参 考 文 献

- [1] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction stir butt welding: Great Britain Patent Application No. 9125978.8[P]. 1991-12-08.
- [2] DAVID S A. Current issues and problems in welding science[J]. Science, 1992, 257(5069): 497.
- [3] ÇAM G, MISTIKOGLU S. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1936-1953.
- [4] MA Z Y. Friction stir processing technology: A review[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(3): 642-658.
- [5] RAI R, DE A, BHADESHIA H, et al. Review: Friction stir welding tools[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(4): 325-342.
- [6] KALLEE S, NICHOLAS D. Application of friction stir welding to lightweight vehicles[R]. SAE, 982362, 1998.
- [7] FUJII H, CUI L, TSUJI N, et al. Mechanical properties of friction stir welds of ultrafine grained steel and other materials[C]//ISOPE-2005: Fifteenth(2005) International Offshore and Offshore and Polar Engineering Conference.

- 2005, 1: 22-26.
- [8] NELSON T W, SU J Q, STEEL R J. Friction stir welding of ferritic steels[C/CD]//Proceedings of ISOPE-2004: Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2004.
- [9] 刘会杰, 周利. 高熔点材料的搅拌摩擦焊接技术[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 101-104.
- LIU Huijie, ZHOU Li. Progress in friction stir welding of high melting point materials[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 101-104.
- [10] WANG X J, LI B Q, ZHANG C Q. Study of friction stir spot welding of steel/magnesium[J]. Advanced Materials Research, 2011, 239: 417-421.
- [11] LI Y, FU R, DU D, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructures and properties of friction stir welded joint of 32Mn-7Cr-1Mo-0.3N steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(3): 229-235.
- [12] DU D, FU R, LI Y, et al. Gradient characteristics and strength matching in friction stir welded joints of Fe-18Cr-16Mn-2Mo-0.85 N austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 616: 246-251.
- [13] LI Y J, FU R D, DU D X, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded joints of Zr-Ti alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(7): 588-594.
- [14] WU L H, WANG D, XIAO B L, et al. Microstructural evolution of the thermomechanically affected zone in a Ti-6Al-4V friction stir welded joint[J]. Scripta Materialia, 2014, 78: 17-20.
- [15] HAN W T, WAN F R, LENG B, et al. Grain characteristic and texture evolution in friction stir welds of nanostructured oxide dispersion strengthened ferritic steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(8): 690-696.
- [16] CAN G. Friction stir welded structural materials: Beyond Al-alloys[J]. International Materials Reviews, 2011, 56(1): 1-48.
- [17] WANG D, NI D R, XIAO B L, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of friction stir welded joint of Fe-Cr-Mn-Mo-N austenite stainless steel[J]. Materials & Design, 2014, 64: 355-359.
- [18] MIYANO Y, FUJII H, SUN Y, et al. Mechanical properties of friction stir butt welds of high nitrogen-containing austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(6): 2917-2921.
- [19] YOUNG J, FIELD D, NELSON T. Material flow during friction stir welding of HSLA 65 steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(7): 3167-3175.
- [20] MATSUSHITA M, KITANI Y, IKEDA R, et al. Development of friction stir welding of high strength steel sheet[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(2): 181-187.
- [21] GHOSH M, KUMAR K, MISHRA R S. Analysis of microstructural evolution during friction stir welding of ultrahigh-strength steel[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(8): 851-854.
- [22] AYDIN H, NELSON T W. Microstructure and mechanical properties of hard zone in friction stir welded X80 pipeline steel relative to different heat input[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 586: 313-322.
- [23] TOUMPIS A, GALLOWAY A, CATER S, et al. Development of a process envelope for friction stir welding of DH36 steel-A step change[J]. Materials & Design, 2014, 62: 64-75.
- [24] KIM Y G, KIM J S, KIM I J. Effect of process parameters on optimum welding condition of DP590 steel by friction stir welding[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(12): 5143-5148.
- [25] SANTOS T F A, IDAGAWA H S, RAMIREZ A J. Thermal history in UNS S32205 duplex stainless steel friction stir welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(2): 150-156.
- [26] SAEID T, ABDOLLAH-ZADEH A, ASSADI H, et al. Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 496(1): 262-268.
- [27] SATO Y S, NELSON T W, STERLING C J, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 397(1): 376-384.
- [28] ÁLVAREZ A I, GARCIA M, PENNA G, et al. Evaluation of an induction-assisted friction stir welding technique for super duplex stainless steels[J]. Surface and Interface Analysis, 2014, 46(10-11): 892-896.
- [29] HAJIAN M, ABDOLLAH-ZADEH A, REZAEI-NEJAD S S, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L stainless steel[J]. Materials & Design, 2015, 67: 82-94.

- [30] PARK S H C, SATO Y S, KOKAWA H, et al. Rapid formation of the sigma phase in 304 stainless steel during friction stir welding[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 49(12): 1175-1180.
- [31] LAKSHMINARAYANAN A K, BALASUBRAMANIAN V. Process parameters optimization for friction stir welding of AISI 409M grade ferritic stainless steel[J]. *Experimental Techniques*, 2013, 37(5): 59-73.
- [32] BILGIN M B, MERAN C. The effect of tool rotational and traverse speed on friction stir weldability of AISI 430 ferritic stainless steels[J]. *Materials & Design*, 2012, 33: 376-383.
- [33] HAN W, KIMURA A, TSUDA N, et al. Effects of mechanical force on grain structures of friction stir welded oxide dispersion strengthened ferritic steel[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, 455(1): 46-50.
- [34] BAKER B W, MCNELLEY T R, BREWER L N. Grain size and particle dispersion effects on the tensile behavior of friction stir welded MA956 oxide dispersion strengthened steel from low to elevated temperatures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 589: 217-227.
- [35] YU X, MAZUMDER B, MILLER M K, et al. Stability of Y-Ti-O precipitates in friction stir welded nanostructured ferritic alloys[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(3): 236-241.
- [36] LEGENDRE F, POISSONNET S, BONNAILLIE P, et al. Some microstructural characterizations in a friction stir welded oxide dispersion strengthened ferritic steel alloy[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 386: 537-539.
- [37] KHODIR S, MORISADA Y, FUJII H. Suppression of hydrogen-induced blisters in SK4 carbon steel alloy by friction stir processing[J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(12): 4313-4320.
- [38] SATO Y S, YAMANOI H, KOKAWA H, et al. Characteristics of microstructure in ultrahigh carbon steel produced during friction stir welding[J]. *ISIJ International*, 2008, 48(1): 71-76.
- [39] CHOI D H, LEE C Y, AHN B W, et al. Hybrid friction stir welding of high-carbon steel[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, 27(2): 127-130.
- [40] FUJII H, CHUNG Y D, SUN Y F. Friction stir welding of AISI 1080 steel using liquid CO₂ for enhanced toughness and ductility[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 18(6): 500-506.
- [41] YASAVOL N, JAFARI H. Microstructure, mechanical and corrosion properties of friction stir-processed AISI D2 tool steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(5): 2151-2157.
- [42] COSTA M I, VERDERA D, VIEIRA M T, et al. Surface enhancement of cold work tool steels by friction stir processing with a pinless tool[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 296: 214-220.
- [43] CHEN Y C, FUJII H, TSUMURA T, et al. Banded structure and its distribution in friction stir processing of 316L austenitic stainless steel[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2012, 420(1): 497-500.
- [44] SAEID T, ABDOLLAH-ZADEH A, SHIBAYANAGI T, et al. On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(24): 6484-6488.
- [45] SUN Y F, FUJII H, TAKAKI N, et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique[J]. *Materials & Design*, 2013, 47: 350-357.
- [46] MOVAHEDI M, KOKABI A H, REIHANI S M S, et al. Effect of annealing treatment on joint strength of aluminum/steel friction stir lap weld[J]. *Materials & Design*, 2013, 44: 487-492.
- [47] NISHIDA T, OGURA T, NISHIDA H, et al. Formation of interfacial microstructure in a friction stir welded lap joint between aluminium alloy and stainless steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(7): 609-616.
- [48] LIU X, LAN S, NI J. Experimental study on friction stir welding of dissimilar Al 6061 to trip 780/800 steel[C]//ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2014: V002T02A072-V002T02A072.
- [49] DEHGHANI M, AMADEH A, MOUSAVI S A A. Investigations on the effects of friction stir welding parameters on intermetallic and defect formation in joining aluminum alloy to mild steel[J]. *Materials & Design*, 2013, 49: 433-441.
- [50] ZHANG Z, WANG X, WANG P, et al. Friction stir keyholeless spot welding of AZ31 Mg alloy-mild steel[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(6): 1709-1716.

- [51] JANA S, HOVANSKI Y. Fatigue behaviour of magnesium to steel dissimilar friction stir lap joints[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(2): 141-145.
- [52] WEI Y, LI J, XIONG J, et al. Microstructures and mechanical properties of magnesium alloy and stainless steel weld-joint made by friction stir lap welding[J]. Materials & Design, 2012, 33: 111-114.
- [53] GAO Y, NAKATA K, NAGATSUKA K, et al. Interface microstructural control by probe length adjustment in friction stir welding of titanium and steel lap joint[J]. Materials & Design, 2015, 65: 17-23.
- [54] BUFFA G. Joining Ti6Al4V and AISI 304 through friction stir welding of lap joints: Experimental and numerical analysis[J]. International Journal of Material Forming, 2014: 1-12.
- [55] ISHIDA K, GAO Y, NAGATSUKA K, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded lap joints of commercially pure titanium and 304 stainless steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 630: 172-177.
- [56] HOSSAIN M A M, HASAN M T, HONG S T, et al. Mechanical behaviors of friction stir spot welded joints of dissimilar ferrous alloys under opening-dominant combined loads[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2014, 2014: 1-12.
- [57] CHEN C L, RICHTER A, KOGLER R, et al. Ion-irradiation effects on dissimilar friction stir welded joints between ODS alloy and ferritic stainless steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: S448-S453.
- [58] HOELZER D T, UNOCIC K A, SOKOLOV M A, et al. Joining of 14YWT and F82H by friction stir welding[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 442(1): S529-S534.
- [59] THEODORO M C, PEREIRA V F, MEI P R, et al. Dissimilar friction stir welding between UNS S31603 austenitic stainless steel and UNS S32750 superduplex stainless steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(3): 1440-1447.
- [60] JAFARZADEGAN M, ABDOLLAH-ZADEH A, FENG A H, et al. Microstructure and mechanical properties of a dissimilar friction stir weld between austenitic stainless steel and low carbon steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013, 29(4): 367-372.
- [61] CHUNG Y D, FUJII H, SUN Y, et al. Interface microstructure evolution of dissimilar friction stir butt welded F82H steel and SUS304[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(18): 5812-5821.
- [62] BANG H S, BANG H S, JEON G H, et al. Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel[J]. Materials & Design, 2012, 37: 48-55.
- [63] ETTER A L, BOZZI S, BAUDIN T. Dynamic recrystallization in similar 5182 Al/Al and dissimilar Al/Fe friction stir spot welds[C]//Materials Science Forum, 2012, 715: 152-157.
- [64] LIU X, LAN S, NI J. Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel[J]. Materials & Design, 2014, 59: 50-62.
- [65] JAFARZADEGAN M, FENG A H, ABDOLLAH-ZADEH A, et al. Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel[J]. Materials Characterization, 2012, 74: 28-41.
- [66] CUT L, FUJII H, TSUJI N, et al. Transformation in stir zone of friction stir welded carbon steels with different carbon contents[J]. ISIJ International, 2007, 47(2): 299-306.
- [67] XUE P, KOMIZO Y, UEJI R, et al. Enhanced mechanical properties in friction stir welded low alloy steel joints via structure refining[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 606: 322-329.

作者简介: 李艺君, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为高熔点金属搅拌摩擦焊接及加工。

E-mail: liyijun1987@126.com

付瑞东(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为搅拌摩擦焊接及加工, 金属热塑性变形和金属强韧化。

E-mail: rdfu@ysu.edu.cn