

引用格式:郭国林,张伟,熊龙婷,等. 430/304 不锈钢搅拌摩擦焊搭接接头的组织和力学性能[J]. 热加工工艺, 2024, 53(1): 35-38.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220248

http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

430/304 不锈钢搅拌摩擦焊搭接接头的组织和力学性能

郭国林, 张伟, 熊龙婷, 周晟, 陈烘明, 魏佳丽

(常熟理工学院 汽车工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘要:采用搅拌摩擦焊技术,以 1200 r/min 的搅拌转速对 1 mm 厚的 430 和 304 不锈钢板进行焊接,研究焊接速度对搭接接头组织和力学性能的影响。结果表明:随着焊接速度增加,接头界面两侧 Hook 钩尺寸减小,过渡层厚度减小,界面由锯齿状逐步转变为平直状。所有试样均断裂于焊缝附近的 430 不锈钢母材上,焊接速度为 50 mm/min 焊接接头的剪切强度最大,搭接接头界面区的冶金反应起主导作用,机械连接起促进作用。

关键词:搅拌摩擦焊;430/304 不锈钢;搭接接头;组织;力学性能

中图分类号:TG456.7

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2024)01-0035-04

Microstructure and Mechanical Property of 430/304 Stainless Steels Friction Stir Welded Lap Joint

GUO Guolin, ZHANG Wei, XIONG Longting, ZHOU Sheng, CHEN Hongming, WEI Jiali

(School of Automotive Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

Abstract:The 1 mm thick 430 and 304 stainless steel sheets were welded by friction stir welding technology with rotational speed of 1200 r/min and the effects of welding speed on the microstructure and mechanical property of the lap joint were studied. The results show that with the increase of welding speed, the size of "hook" groove at both sides of the interface decreases and the thickness of the transition layer decreases, and the interface gradually changes from serrated structure to straight structure. All samples are fractured at the 430 stainless steel near the weld. The shear strength of the welded joint is the highest when the welding speed is 50 mm/min. The metallurgical reaction at the interface of the lap joint plays a leading role and mechanical connection plays a promoting role.

Key words:friction stir welding; 430/304 stainless steels; lap joint; microstructure; mechanical property

不锈钢薄板被广泛应用于车辆、汽车和家电设备等行业。焊接是必不可少的加工方法。在薄板焊接过程中,热输入难以控制,容易被焊穿,焊接变形量大,接头强度低,因此,不锈钢薄板焊接是传统熔化焊的难点^[1-2]。

搅拌摩擦焊作为一种固相连接技术,热输入量低,能有效避免焊接过程中薄板焊接的变形问题^[3-4],在薄板焊接领域有着广阔的前景。本文以 430 和 304 不锈钢薄板为研究对象,研究搅拌摩擦焊搭接接头的宏观形貌与界面结构,焊接过程中的材料流动行为以及焊接接头的力学性能。

1 实验材料及方法

实验材料为 1 mm 厚的 430 铁素体不锈钢和 304 奥氏体不锈钢,其尺寸为 150 mm×65 mm×1 mm。430 和 304 不锈钢的化学成分见表 1。

表 1 430 和 304 不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of 430 and 304 stainless steels (wt%)

材料	C	Cr	Si	Ni	Mn	P	S	Fe
430	0.12	17.2	1.02	0.06	1.00	0.040	0.03	余量
304	0.075	18.12	1.02	9.08	1.10	0.031	0.03	余量

根据板材厚度,为了使搅拌针扎入到下板,确保界面形成可靠的连接,本次实验搅拌针的长度设计为 1.3 mm,搅拌针根部和端部直径分别为 6、5 mm。由于 430 不锈钢的热导率大,传热快,因此焊接过程中将 430 板置于上方,304 板置于下方,焊接过程示意图如图 1 所示。通过多次试验,焊接参数确定为:

收稿日期:2022-01-28

基金项目:江苏省高等学校大学生创新训练项目(202110333060Z)

作者简介:郭国林(1976-),男,山西晋城人,副教授,博士,主要从事异种金属连接方面的研究;E-mail:gguolin@163.com

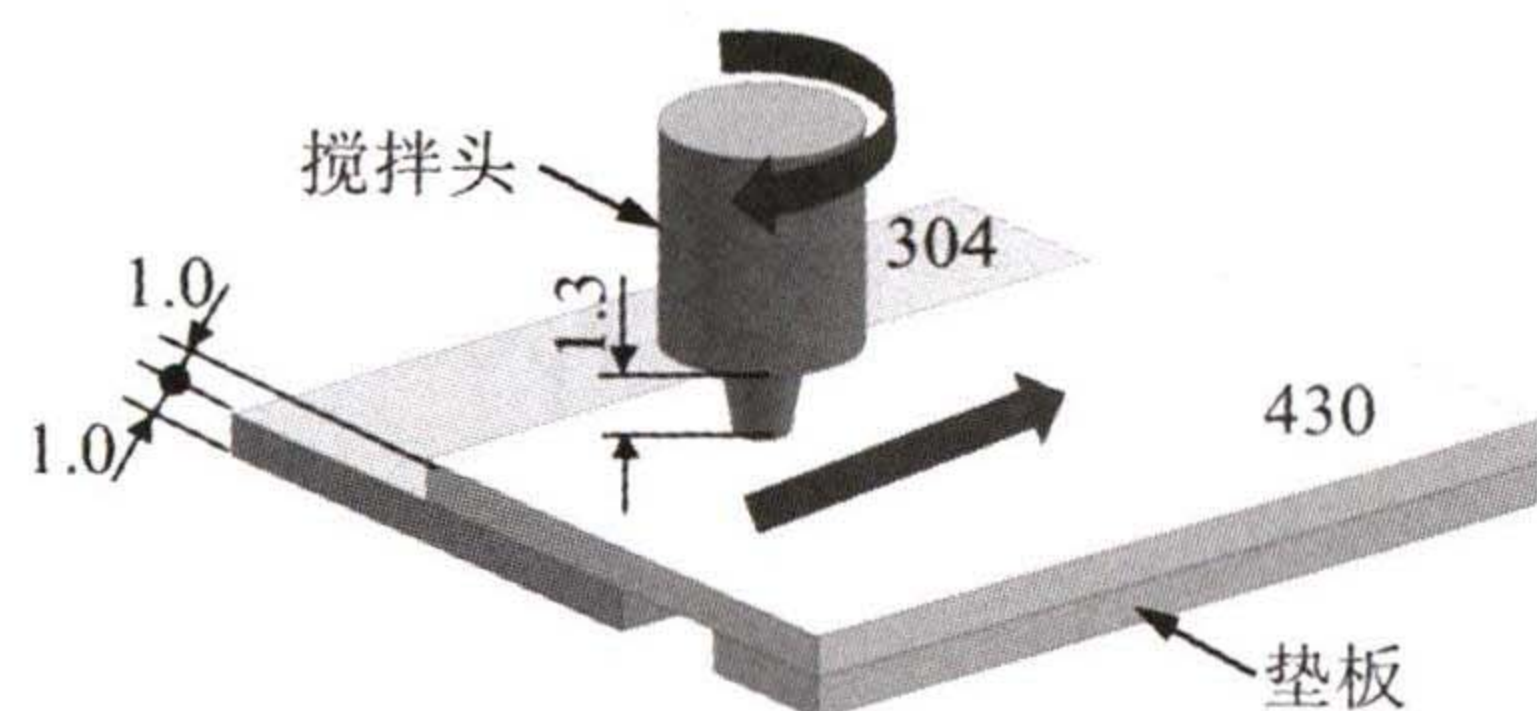


图1 搅拌摩擦搭接焊示意图

Fig.1 Schematic map of friction stir lap welding

旋转速度 1200 r/min, 焊接速度 30~90 mm/min, 下压量 0.1 mm, 倾角 0°, 预热时间为 5 s。焊接时, 利用红外热像仪检测焊缝区温度, 不同焊接速度下焊缝的峰值温度如图 2 所示(彩图见电子版)。

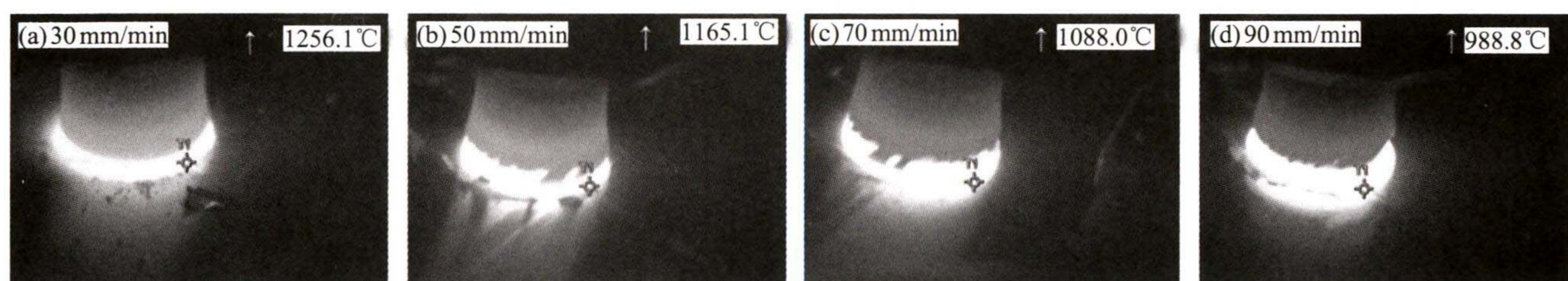


图2 不同焊接速度下焊缝的峰值温度

Fig.2 Peak temperature of the welds at different welding speeds

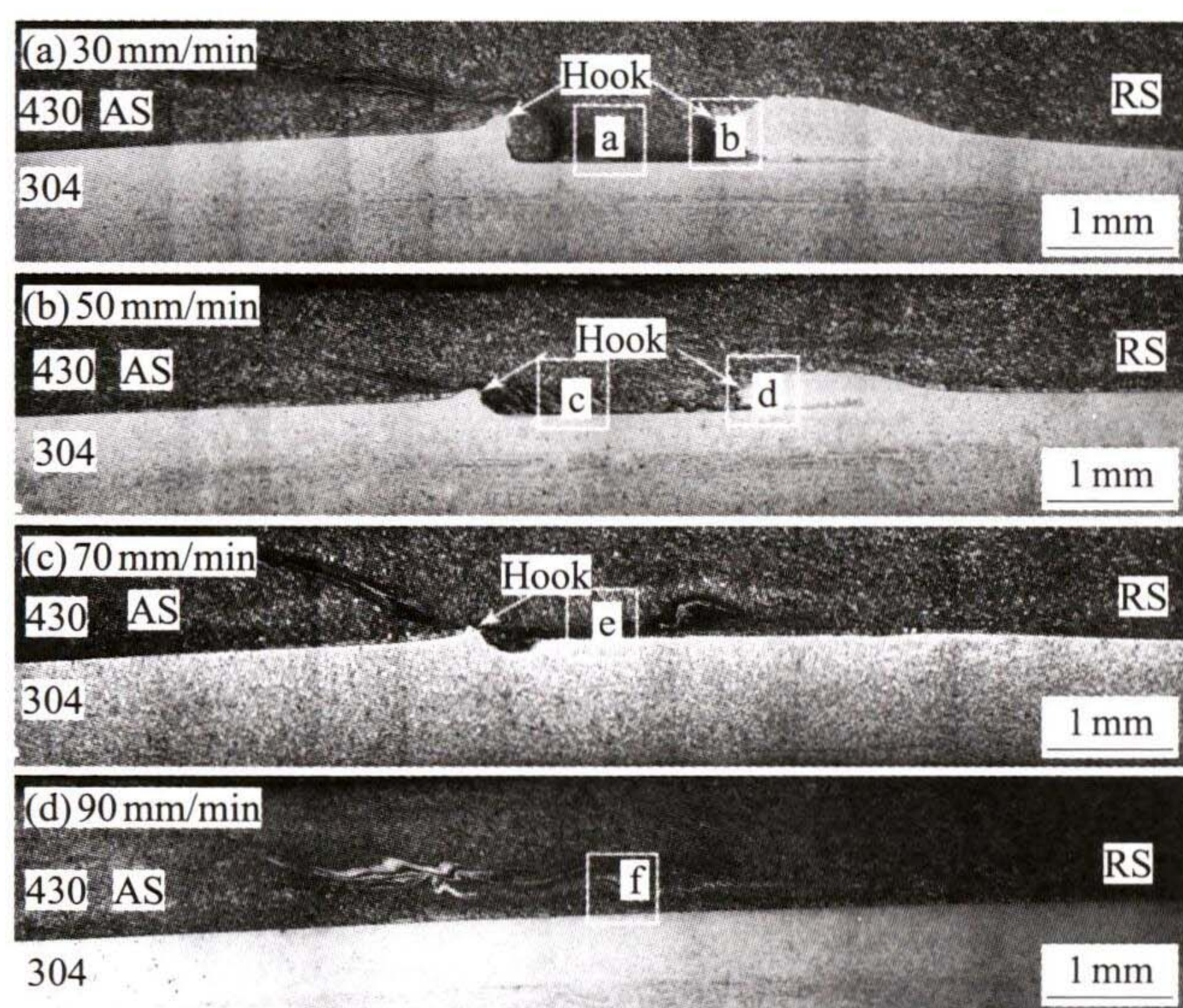


图3 不同焊接速度下接头的横截面宏观形貌

Fig.3 Macromorphologies of transverse section of the FSW joints at different welding speeds

河流花样, 搭接接头界面两侧呈现向上弯曲或向下弯曲的钩状结构。在搅拌摩擦搭接焊中, 将前进侧向上或者向下弯曲的搭接界面称为钩状结构(Hook), 将后退侧向上或者向下弯曲的搭接界面称为冷搭接缺陷, 也称为 Hook 钩。

柯黎明等^[5]认为这种结构主要产生于搅拌针针尖平面两侧, 焊接过程中下层软化程度较低的材料

焊接后, 垂直于试板焊接方向切取金相试样, 配制 5 mL FeCl₃+5 mL HCl+15 mL H₂O 溶液进行腐蚀, 然后用清水和酒精清洗试样表面, 吹干后采用型号 OLYMPUS GX51 的倒置显微镜观察接头横截面的宏观形貌和微观组织。利用 UTM5305 型电子万能材料试验机测试焊接接头的剪切强度, 加载速率为 0.5 mm/min, 载荷设为 4900 N, 记录应力应变数据。

2 实验结果与分析

2.1 接头宏观形貌

不同焊接速度下焊缝横截面的宏观形貌如图 3 所示。通过腐蚀观察到焊缝前进侧出现较为明显的

向上挤压软化程度较高的上层材料, 弯曲形成钩状结构, 并由此提出“抽吸-挤压”理论。Liu 等^[6]通过对 7B04-T74 铝合金搅拌摩擦搭接焊的研究发现, 在搅拌针旋转移动过程中的剪切和挤压作用下形成钩状缺陷, 而冷搭接的形成是在轴肩与搅拌针的共同作用下产生的。无论哪种形成理论, 均与焊接过程中不同区域材料软化程度不同有关。前进侧和后退侧形成的弯曲搭接界面形貌对有效板厚与有效搭接宽度有着决定性作用, 进而影响接头的力学性能。本试验采用圆锥形结构的搅拌针, 很大程度上促进了这些弯曲界面的产生, 下面讨论不同焊接速度下搭接接头的宏观形貌和界面微观结构。

图 3(a)为焊接速度 30 mm/min 的搭接焊缝横截面宏观结构。由于焊接速度较低, 产生大量的摩擦热和变形热, 焊缝区峰值温度达到 1256°C, 界面处的材料得到充分软化, 下层软化程度较低的奥氏体不锈钢向上挤压, 以“钳形”结构嵌入上层软化程度较高的铁素体不锈钢中, 在前进侧和后退侧的界面区域分别产生向上弯曲和向下弯曲的 Hook 钩, 尺寸较大, 使焊缝的有效厚度减小, 会降低接头的强度。当焊接速度增加到 50 mm/min 时, 焊缝区峰值温度为 1165°C, 界面两侧 Hook 钩的嵌入深度均有所

减小,后退侧的钩状头部向下弯曲与界面贴合,减小了应力集中程度,界面结合紧密,形成机械咬合与冶金结合的复合结构,如图 3(b)所示。图 3(c)为焊接速度 70mm/min 的接头横截面宏观形貌,仅在前进侧界面形成 Hook 结构,弯曲的深度较小,后退侧界面平滑,说明热输入略显不足,机械咬合作用下降。尤其当焊接速度为 90mm/min 时,焊缝界面平直,没有形成 Hook 沟,如图 3(d)所示;此时峰值温度仅为 988℃,说明热输入不足,界面处金属没有充分软化,针尖端位于 430 不锈钢中,界面仅靠元素的扩散产生冶金反应,对搭接接头起到连接作用。

2.2 接头显微组织

图 4 为旋转速度 1200r/min,不同焊接速度下接头界面区域的微观结构特征。图 3(a)中“a”区域焊缝中心界面的微观结构特征如图 4(a)所示,430 不锈钢侧受到搅拌针端部的搅拌、摩擦和挤压综合作用,晶粒发生破碎,为再结晶晶核的形成提供了外在能量,增加了再结晶形核的核心,形成细晶粒亚层。同时细晶粒层向上方延伸出细柳条状层状结构,这是由于焊接时界面附近的 430 钢达到了热塑性状态

以及搅拌针的高速旋转综合作用形成的。这些微观组织的形成与界面处高温和大形变量有着密切的关系,也促使界面区元素发生扩散,获得了一定宽度的扩散层。图 4(b)显示了图 3(a)中“b”区域后退侧界面的结构特征,发生塑性变形的奥氏体被挤入搅拌针后部的瞬时空腔,因此钩状结构的奥氏体向焊缝中心弯曲,嵌入到铁素体基体中,发生机械混合。但由于后退侧的温度较低,下侧没有发生塑性变形的奥氏体钢与上侧塑化的混合金属形成冷搭接界面,界面冶金反应较弱,这种钩状结构尺寸越大,界面越长,越不利于搭接接头强度的改善。

焊接速度 50mm/min 的焊缝中心界面结构如图 4(c)所示,界面处结合致密,形成大约 1.8 μm 的过渡层;离界面较远的铁素体区形成了叠层结构,由于各区域塑性变形程度存在差异,组织经历了不同程度的动态再结晶,叠层结构是由不同大小的晶粒组成的,对接头的结合强度有提高作用。后退侧界面特征如图 4(d)所示,向下侧弯曲的奥氏体在搅拌针外侧冷金属的挤压下与界面下侧的奥氏体钢贴合,合适的热输入使界面获得冶金结合。

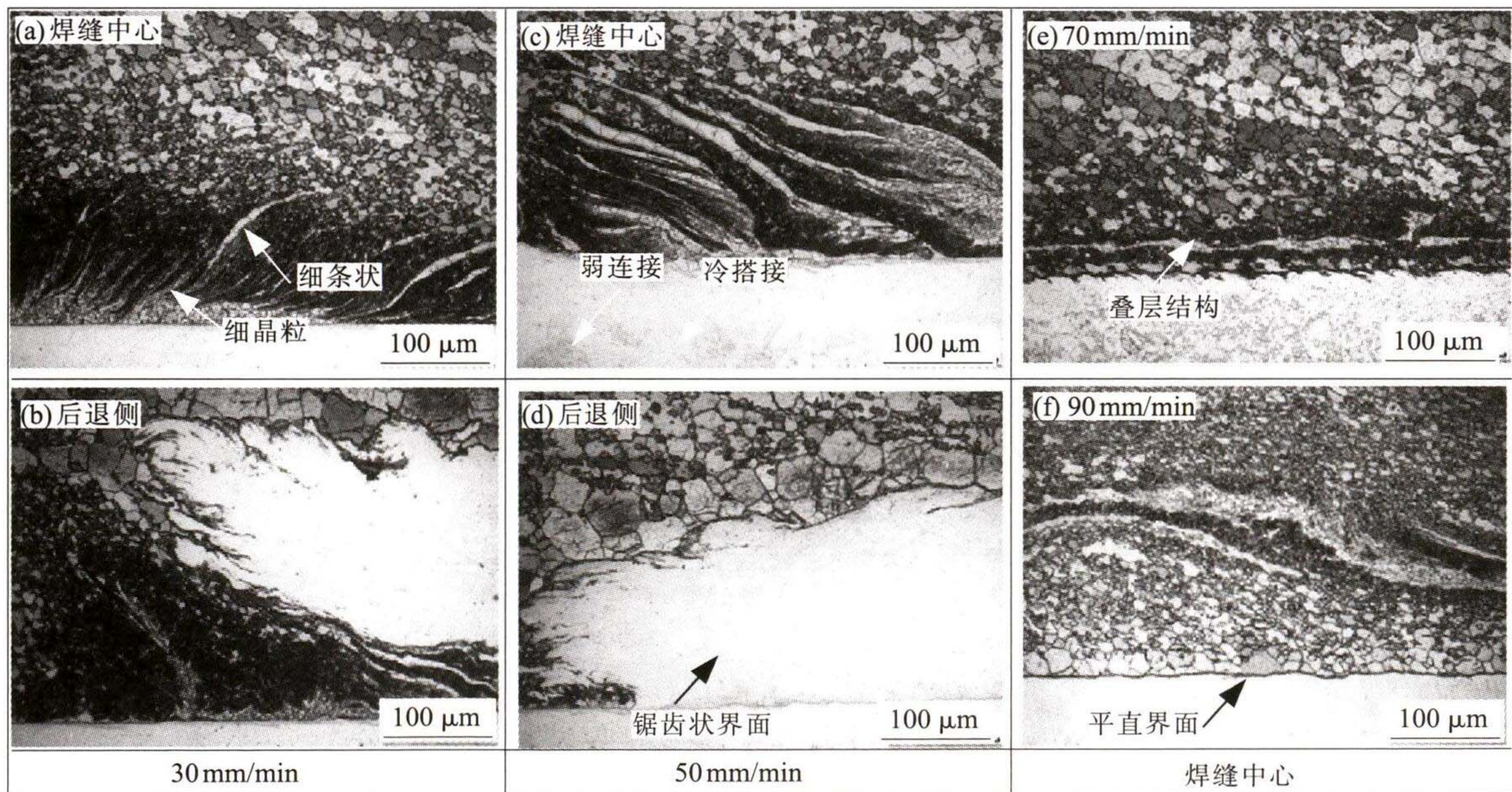


图 4 不同焊接速度下接头界面的微观结构

Fig.4 Microstructure of interface of the joints at different welding speeds

焊接速度 70 mm/min 的接头界面结构如图 4 (e)所示,界面处呈现锯齿状结构,证实了界面区域发生了剧烈的塑性变形,焊接过程中母材间发生了元素的相互扩散,界面形成了大约 1.2 μm 的过渡层,晶粒大小与母材相近,界面近域的铁素体区流线

结构不明显,后退侧未出现钩状结构。图 4(f)为焊接速度 90mm/min 的焊缝界面微观结构,430 不锈钢侧塑性变形程度显著降低,界面区热量累积导致形成晶粒粗大的铁素体层,界面平直结合致密,由于搅拌针行进速度过快,预热时间短,两母材结合面形

成了小于 $1\mu\text{m}$ 的过渡层。

2.3 接头的剪切性能

对不同焊接速度下的搭接接头进行剪切试验,断裂试样和剪切失效载荷如图 5 所示。如图 5(a)所示,所有试样均断裂在焊缝附近的 430 不锈钢上,表明焊缝界面处获得了良好的结合。如图 5(b)所示,焊接速度 30 mm/min 接头的剪切失效载荷为 2.5 kN ,结合前面的焊缝微观结构分析,虽然界面获得了良好的冶金结合,但是通过机械混合形成的 Hook 钩尺寸较大且不连续,特别是后退侧的冷搭接界面在应力作用下容易产生应力集中,对接头的结合强度产生一定的影响。当焊接速度为 50 mm/min 时,焊接试样的剪切失效载荷最高,为 2.69 kN ,说明在此焊接参数条件下热输入合适,430 与 304 不锈钢界面处通过元素的相互扩散形成了一定厚度的扩散层,同时 Hook 钩的尺寸合适,加强了机械互锁作用,这种机械混合和冶金结合的复合连接方式对搭接接头的结合强度有显著的提高作用。随着焊接速度的增加,焊缝的热输入减少,界面处的元素扩散不够充分,过渡层厚度下降。另外,界面处形成的 Hook 尺寸较小,焊缝中的机械作用减弱,尤其是焊接速度为 90 mm/min 时,没有产生钩状界面,仅仅获得了冶金结合,剪切强度降低。

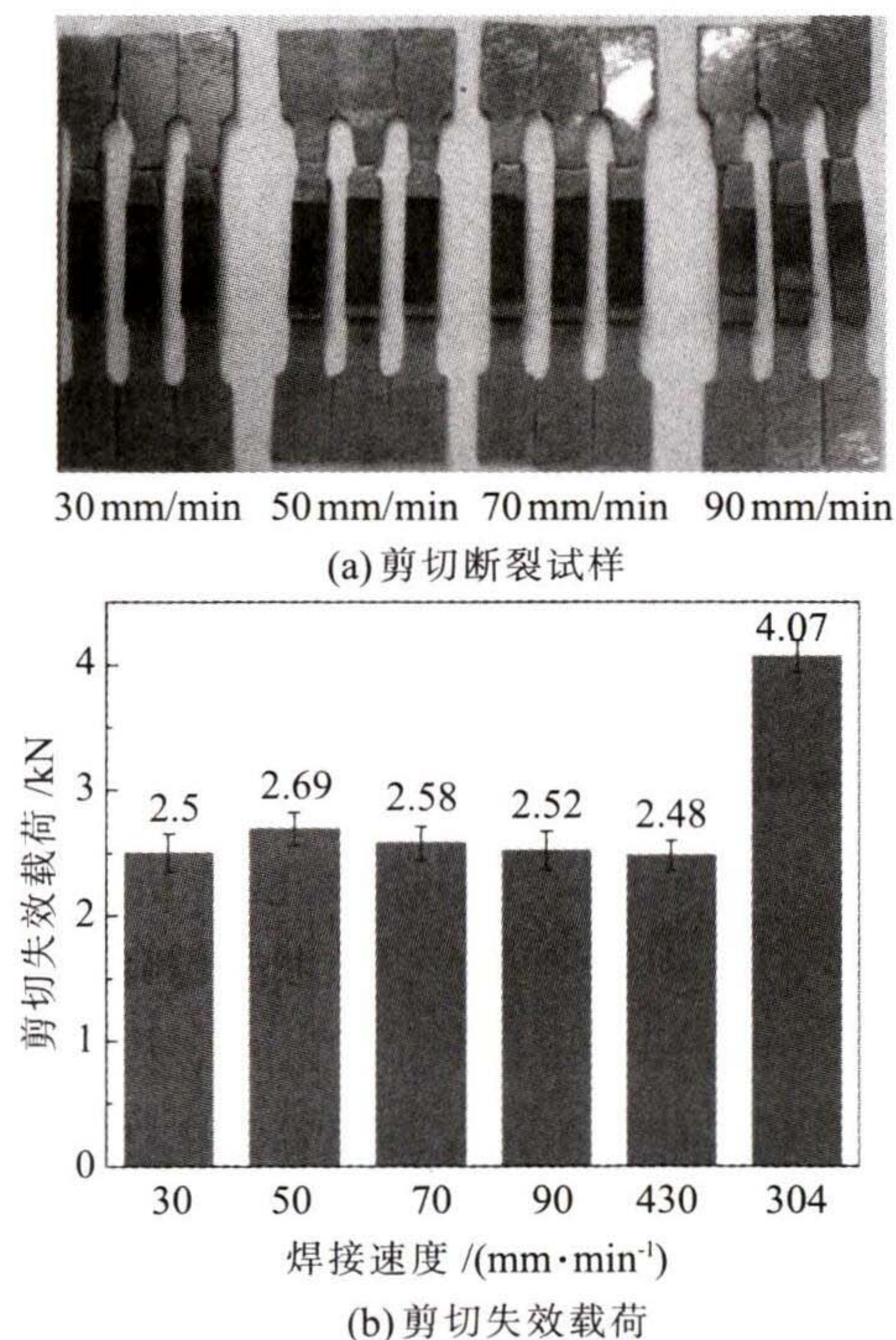


图 5 剪切断裂试样及接头的剪切失效载荷
Fig.5 Samples after shear test and shear failure load of the joints

综上所述,随着焊接速度增加,Hook 钩尺寸减小或者没有形成,机械连接作用减弱;而且元素扩散能力降低,过渡层厚度减小。但是对于焊接速度最大的焊接接头,焊缝界面仍发生冶金反应,获得一定厚度的过渡层。不管是低的焊接速度还是高的焊接速度,通过拉剪试验,断裂均发生在强度较低的 430 不锈钢母材上。因此,对于 430/304 不锈钢异种金属搭接接头,界面处的冶金反应起主要作用。

3 结论

(1) 随着焊接速度增加,搭接接头两侧的 Hook 钩尺寸逐渐减小直至消失。接头界面处铁素体不锈钢侧由于产热和塑性变形程度不同,形成由不同大小晶粒构成的条带状结构。界面处的过渡层厚度减小,界面由锯齿状逐步转变为平直状。

(2) 不同焊接速度的接头断裂均发生在焊缝附近的 430 不锈钢母材上,当焊接速度为 50 mm/min 时,接头的剪切失效载荷最大,为 2.69 kN 。异种金属搅拌摩擦搭接接头的结合强度与焊缝界面的冶金反应以及机械混合程度关系密切,界面区的冶金反应起主导作用,机械连接起促进作用。

参考文献:

- [1] Durgutlu A. Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel [J]. *Materials and Design*, 2004, 25: 19-23.
- [2] Liang W, Murakawa H. An inverse analysis method to estimate inherent deformations in thin plate welded joints [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 40(10): 190-198.
- [3] Alizadeh-Sh M, Marashi S P H, Pournavai M. Resistance spot welding of AISI 430 ferritic stainless steel: Phase transformations and mechanical properties [J]. *Materials and Design*, 2014, 56: 258-263.
- [4] Zheng Q X, Feng X M, Shen Y F, et al. Effect of plunge depth on microstructure and mechanical properties of FSW lap joint between aluminum alloy and nickel-base alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 952-961.
- [5] 柯黎明,潘际銮,邢丽,等. 搅拌摩擦焊金属塑性流动的抽吸-挤压理论 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(4): 89-94.
- [6] Liu H J, Zhao Y Q, Hu Y Y, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir lap welding joint of Al clad 7B04-T74 aluminum alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(9): 1415-1425.