● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.09.020

纳米贝氏体钢的焊接方法及接头组织分析

潘 强[1],杨 倩[2,3],王艳辉[1,3],赵雷杰[1],徐 东[3],李 丽[1]

(1. 河北工程大学 河北省智能工业装备技术重点实验室 机械与装备工程学院,河北 邯郸 056038;2. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心,河北 秦皇岛 066004;3. 河北工程大学 河北省高品质冷镦钢技术创新中心,河北 邯郸 056038)

摘 要:纳米贝氏体钢作为新一代钢种,其抗拉强度可达 2 500 MPa,断裂韧性超过 30~40 MPa·m$^{1/2}$,硬度为 600~670 HV,在工业中得到广泛应用。但由于纳米贝氏体钢中往往含有一定数量的脆性马氏体晶体结构,导致其焊接难度大,焊接接头易产生裂纹,难以达到与母材相同的强度和硬度,这就限制了其应用范围。综述了近年来纳米贝氏体钢焊接方面的研究进展,阐述了在不同焊接方法下焊接接头的显微组织变化。

关键词:纳米贝氏体钢;焊接;冷裂纹;马氏体;奥氏体

中图分类号:TG142; TG47 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)09-0825-06

Welding Method and Welded Joint Microstructure Analysis of Nanostructured Bainite Steels

PAN Qiang[1], YANG Qian[2,3], WANG Yanhui[1,3], ZHAO Leijie[1], XU Dong[3], LI Li[1]

(1. Key Laboratory of Intelligent Industrial Equipment Technology of Hebei Province, School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Hebei Technological Innovation Center for High Quality Cold Heading Steel, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: As a new generation of steel, nanobainitic steel has a tensile strength of 2 500 MPa, a fracture toughness of more than 30~40 MPa·M$^{1/2}$, and a hardness of 600 ~ 670 HV, which has been widely used in industry. However, because the nanobainite steel often contains a certain amount of brittle martensite crystal structure, it is difficult to weld, the welded joint is easy to crack, and it is difficult to reach the same strength and hardness as the base metal, which limits its application scope. In this paper, the research progress of nano-bainitic steel welding in recent years is reviewed, and the microstructure changes of welds under different welding methods are described.

Key words: nanostructured bainite; welding; cold crack; martensite; austenite

目前交通运输、航天以及诸多机械制造领域的发展趋势和技术特点是安全性、可靠性和经济性。当飞机重量降低 10%时,其安全性提高 50%;汽车重量降低 10%,尾气排放量可降低 4%~6%。在制造业中,设备轻量化具有重要的地位。实现设备轻量化的方法主要有两种:一是改善整体结构,二是选择高强度的材料减小结构的尺寸。由于钢铁材料价格低,有较好的物理化学和力学性能,是工程构件领域使用最多的材料之一[1-2]。而开发新的高强钢一直是国内外研究者讨论的热门话题[3-4]。

近年来,纳米贝氏体钢[5-8](NB 钢)成为国内外先进钢铁材料的研究热点,其组织由极细小的贝氏体型铁素体和残余奥氏体组成,具有优异的综合力学性能。当硅含量为 2%左右时[9-11],可以获得无碳化物贝氏体结构,贝氏体型铁素体板条宽度为 20~40 nm。NB 钢中的薄膜状残余奥氏体具有高碳浓度、高位错密度和高的稳定性的特点[12-15],因此比马氏体钢具有更优异的韧性,其优异的综合力学性提高了许多工业领域中结构部件的使用寿命。纳米贝氏体钢在潜艇、装甲车辆、风力发电机轴承、军用防弹背心等领域都显示出巨大的应用潜力[15-17]。但焊接困难是限制纳米贝氏体钢使用的主要问题之一,焊接时熔合区容易形成脆性马氏体、热影响区产生渗

收稿日期:2021-06-08

基金项目:国家自然科学基金(52001105);河北省自然科学基金(E2019402433);河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2021012);河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2021085);河北省高品质冷镦钢技术创新中心开放课题。

作者简介:潘 强(1994—),山东济宁人,硕士生.研究方向:先进钢铁材料.电话:15662088520,
Email: panqiang1213@163.com

通讯作者:王艳辉(1986—),河北邢台人,博士,硕导,副教授.研究方向:先进钢铁材料.电话:18832007039,
Email: wangyanhui@hebeu.edu.cn

碳体沉淀和冷裂纹[18],使焊接接头力学性能降低。

1 纳米贝氏体钢焊接方法

过去几年，国内外学者尝试焊接纳米贝氏体钢,表 1 总结了多种纳米贝氏体钢的焊接工艺和焊接方法。

从表 1 和已发表的诸多文献[27-28]看,高碳贝氏体钢的焊接都可采用 TIG 方法。焊接参数对微观组织和力学性能有显著影响。由于碳含量较高,在焊接接头中会形成马氏体,易产生冷裂纹。方等人[29-30]提出采用再纳米化技术进行焊接,再纳米化技术是在炉中进行的,将焊接接头冷却至 BS 和 MS 之间,并在此温度下进行长时间的退火,从而获得贝氏体组织和粗大的残余奥氏体[31]。焊缝和奥氏体化区的强度几乎与母材相当,但再纳米化处理后的整个焊接接头强度不如母材。

为了加速贝氏体相变，缩短再纳米化时间,采用旋转冲击跟踪焊(RITW)工艺[21,32]。图 1 为 RITW 工艺的示意图,该焊接工艺方法包括一个旋转冲击头,冲击头位于一个电动冲击钻上,冲击头与焊枪一起移动。当头部撞击焊接接头时,会在焊接金属表面紧紧旋转,压缩变形和剪切变形同时发生。旋转冲击头放置在焊枪后面 30 mm 处,距离焊接中心线左侧 5 mm 处,撞击区的温度约为 600 ℃,RITW 焊后必须进行热处理(再纳米化)。RITW 工艺可以减少变形奥氏体区贝氏体相变所需的时间，但所用的再纳米化时间不足以完成相变。此外,相变前奥氏体的变形影响了贝氏体的形态，贝氏体型铁素体板条沿变形方向排列。

经过双道焊的纳米贝氏体钢使奥氏体晶粒得到细化[22],晶粒细化会加速贝氏体相变,缩短再纳米化时间,降低热处理成本。图 2 为冲击跟踪焊(ITW)示意图。第一次焊接过程中,将旋转冲击头放置在焊枪后面 30 mm 处,以冲击焊接热影响区,变形温度为 1 000 ℃左右,冲击头的旋转频率约为 8 Hz,冲击频率约为 25 Hz，距离焊接中心线左侧 5 mm 的位置，第二个焊枪位于第一个焊枪后面 60 mm 处[33]。ITW 工艺的关键是在第一焊接过程中热影响区获得大变形,并在下一次焊接过程中使其再结晶。ITW 焊后也必须进行再纳米化处理，焊缝再纳米化分为两个阶段。从 ITW 焊后组织来看,再结晶粗晶区的贝氏体分数远高于原始粗晶区，这也证实了贝氏体相变时间和再纳米化时间的缩短。

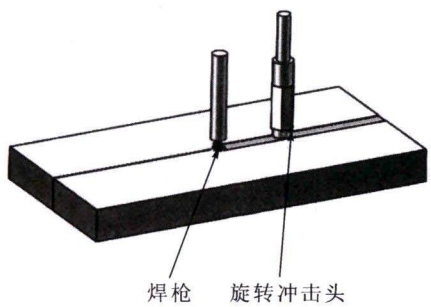


图 1 旋转冲击跟踪焊(RITW)示意图

Fig.1 Schematic diagram of rotary impact tracking welding (RITW)

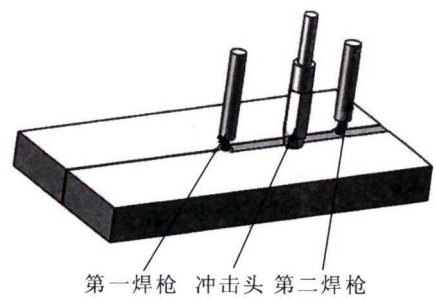


图 2 冲击跟踪焊(ITW)示意图

Fig.2 Schematic diagram of impact tracking welding (ITW)

表1 多种纳米贝氏体钢焊接方法

Tab.1 Various welding methods for nanometer bainite steel

焊接方法	母材的化学成分 w(%)	工艺参数
TIG 焊[19]	0.82C,1.2Si,2.5Mn,0.8Mo,1.8Cr,1.5Al,1.0Ni,余量 Fe	电流:160 A 电压:16 V 速度:22 mm/min
TIG 焊+再纳米化处理[20]	0.76C,1.0Si,1.3Cr,1.0Mn,余量 Fe	电流:140 A 电压:20 V 速度:185 mm/min 样品:2 mm×40 mm×100 mm 再纳米化时间:250 ℃/5 天
TIG 焊+旋转冲击+再纳米化处理[21]	0.87C,1.2Si,1.5Mn,0.3Mo,0.5Ni,1.1Al,余量 Fe	电流:140 A 电压:18 V 速度:90 mm/min 样品:10 mm× 80 mm×100 mm 再纳米化:250 ℃/1.5 h
T IG 焊+双通冲击头+再纳米化处理[22]	0.87C,1.2Si,1.5Mn,0.3Mo,0.5Ni,1.1Al,余量 Fe	电流:220 A 电压:18 V 速度:120 mm/min 样品:10 mm× 80 mm×100 mm
激光焊接+焊后快速热处理[23]	0.78C,1.0Si,1.5Mn,余量 Fe	焊接接头接近 Ms 点时,在 10 s 内快速加热到低于 A_1 的温度
激光焊+再纳米化处理[20]	0.82C,1.7Si,2.0Mn,0.2Cr,0.4Mo,1.1Ni,余量 Fe	输入能量:60 kJ/m 速度:100 mm/min 板材厚度:2 mm 再纳米化:250 ℃/5 天
搅拌摩擦焊[24-26]	0.34C,1.8Mn,1.5Si,0.9Cr,余量 Fe	搅拌速度:80、100、150、200 rpm 进给量:35 mm/min

纳米贝氏体钢的另一种焊接方法是搅拌摩擦焊(FSW)[24-26,34],焊接过程在固态下进行。与传统焊接技术相比,搅拌摩擦焊期间的峰值温度比被焊接材料的熔化温度低得多。由于焊接材料不涉及熔化、凝固和冷却,大大减少了与热收缩相关的变形和缺陷的形成[35]。搅拌摩擦焊的原理如图 3 所示,搅拌头受轴向压力旋转插入焊接处。由于搅拌针与焊接表面摩擦,产生大量的热量使接头软化[36]。经过一定的停留时间,焊接开始横向移动,焊接完成后,搅拌头从钢板上拔出,留下一个典型的匙孔。随着旋转速度的增加,搅拌区的硬度提高,与热力影响区(TMAZ)和母材相比,在最低转速下获得的硬度也很高。在相变诱发塑性(TRIP)的影响下形成了马氏体组织,增加了焊接表面硬度,焊后也需进行热处理。

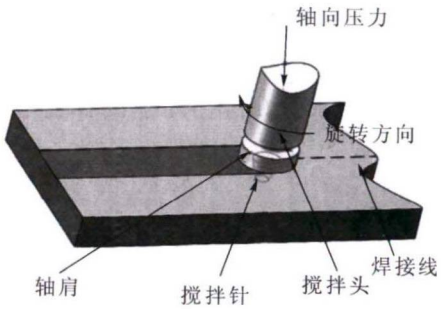


图 3 搅拌摩擦焊(FSW)示意图

Fig.3 Schematic diagram of friction stir welding(FSW)

Hong 等人[23]对成分 w(%)为 Fe-0.78C-1.03Si-1.54Mn-1.83Si 的纳米贝氏体钢采用焊后快速热处理的激光焊接,克服了在焊接过程中冷裂纹和脆性马氏体的产生。当焊缝冷却到 T_L(<M_S),然后在 10 s 内加热到 T_u(>Ac_1),最后冷却至室温,热影响区组织为铁素体、残余奥氏体和渗碳体,焊缝中没有发现冷裂纹,试样硬度降到 350 HV,焊缝组织与母材比较接近。焊后快速热处理方法能有效地防止纳米贝氏体钢焊缝中出现冷裂纹,细化了热影响区和熔合区中的脆性马氏体结构,但渗碳体的析出破坏了接头的力学性能,使得接头的强度不如母材的强度高。

由于激光熔覆的低热输入、低稀释度和较小的热影响区,袁等人[37]采用激光熔覆和随后的等温保持方法制备出可以在较短时间内完全转变的纳米贝氏体涂层。纳米贝氏体型铁素体和富碳残余奥氏体在涂层中分布均匀,涂层中没有观察到孔隙和裂纹。在 300 ℃下,贝氏体转变在 6 h 内完全完成,显微组织中有较多的残余奥氏体,在 250 ℃下,贝氏体在 12 h 内完全完成转变,并获得了更高的硬度和更精细的纳米贝氏体涂层[38],由于在激光熔覆过程中获得的细小的原奥氏体晶粒加速贝氏体转变,贝氏体完成转变使用的时间更短。虽然它是一种制备纳米贝氏体的方法,但也可以作为激光焊焊后热处理。

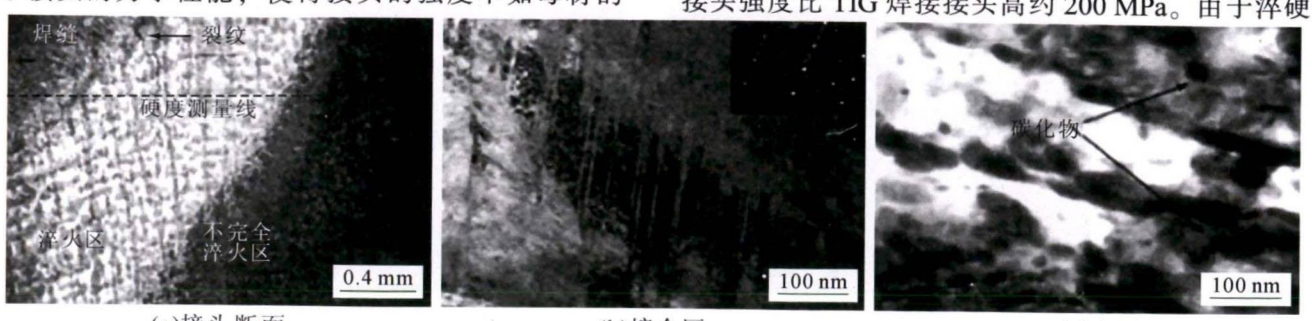
2　焊接接头显微组织

2.1　TIG 焊

图 4 为 NB 钢 TIG 焊接接头的微观组织。图 4(a)为焊接接头断面形貌,可看出裂纹出现在焊趾位置。焊缝和淬火区为孪晶马氏体(图 4(b)),说明 NB 钢焊接接头中奥氏体化的组织完全转变为高碳孪晶马氏体[29]。不完全淬火区主要是贝氏体和马氏体的回火组织,回火区有碳化物析出(图 4(c)),腐蚀后呈黑色[19]。经过 TIG 焊接的纳米贝氏体钢,焊接接头的伸长率为 0.35 %,断裂强度只有 250 MPa,与母材相比,焊接接头远远达不到母材的性能。

2.2　激光焊

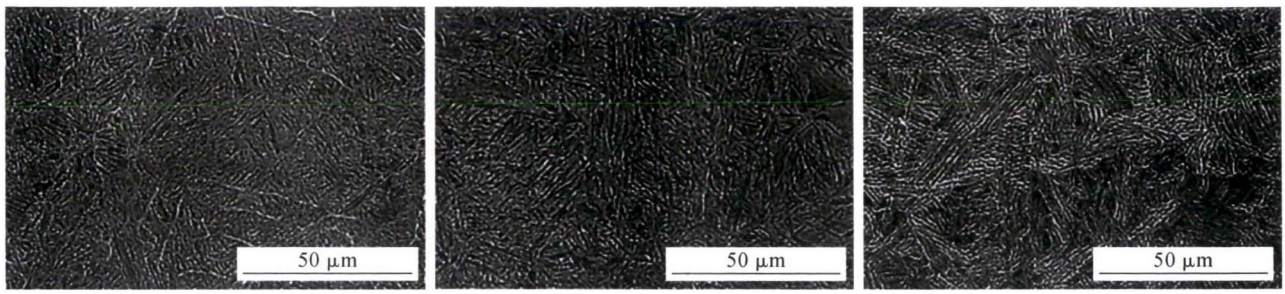
与 TIG 焊接接头相似,激光焊焊接接头由三个区域组成,即焊缝区、淬火区和回火区,接头形状为钉子形[39]。图 5(a)为焊缝区显微组织,经过激光焊焊接的接头,组织内几乎没有形成贝氏体,主要以马氏体为主,这是激光焊热输入低导致的。图 5(b)和 5(c)分别为焊接接头淬火区和回火区组织。与 TIG 焊相比,具有较好的耐腐蚀性能,由于焊接热输入减少,回火区纳米贝氏体的回火程度不高,原始形态基本无变化,显微组织和母材组织相似。激光焊接后的接头强度比 TIG 焊接接头高约 200 MPa。由于淬硬



(a)接头断面　(b)熔合区　(c)回火区

图 4 NB 钢 TIG 焊接接头的微观组织[19]

Fig.4 Microstructure of the TIW welds of NB steel



(a)焊缝区　(b)淬火区　(c)回火区

图 5 NB 钢激光焊接接头的微观组织[29]

Fig.5 Microstructure in laser welding welds NB steel

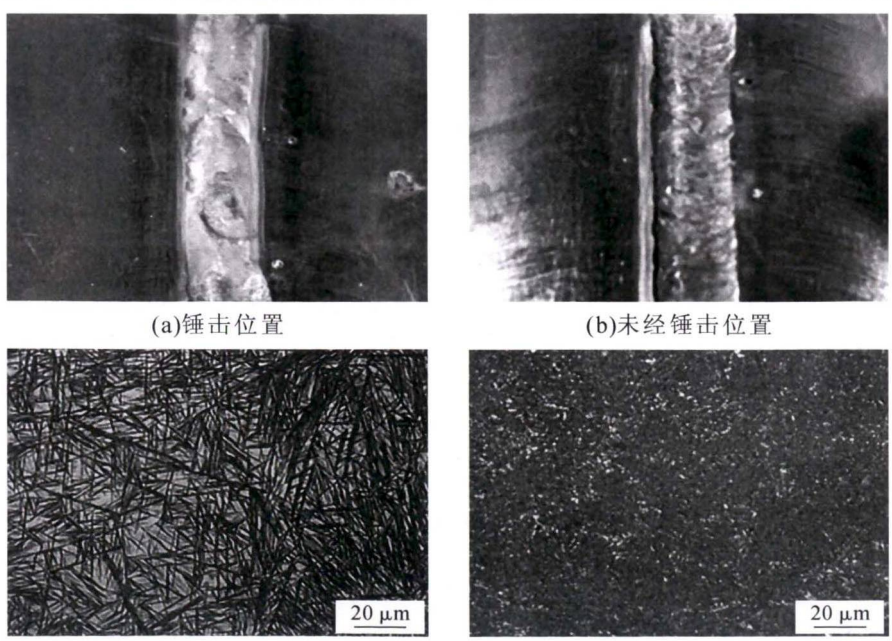
的高碳孪晶马氏体存在很多缺陷,激光焊接后的接头性能相对母材的性能仍有很大的差距。

2.3 旋转冲击焊(RITW)

图 6 为纳米贝氏体钢 RITW 的焊缝宏观和微观组织照片,其中图 6(a)和(b)分别为焊缝上经锤击与未经锤击的位置照片,可见焊缝区经锤击后有较大的塑性变形，并且焊缝两侧塑性变形不对称。图 6(c)和(d)分别为经过锤击的和未经锤击焊缝熔合区的显微组织,它们在 250 ℃下等温 2.5 h,进行再纳米化处理。再纳米化过程通过 RITW 的塑性变形显著加速。经过锤击的焊缝熔合区贝氏体体积分数达到 80%,未经过锤击熔合区贝氏体体积分数只有 40%左右。从图 6(c)可以看出,经锤击,纳米贝氏体组织细化较显著。此外,溶质偏析是该材料存在的一个严重问题,导致贝氏体转变不均匀。未转变的奥氏体在再纳米化后进一步转变为脆性马氏体,出现冷裂纹[21]。RITW 工艺可以降低焊接偏析程度,降低未转变的奥氏体的体积分数,降低脆性马氏体的数量，有效地解决了高碳钢中几乎不可避免的冷裂纹问题。

2.4 冲击跟踪焊(ITW)

图 7 为纳米贝氏体钢经 ITW 后的焊接区显微组织。图 7(a)是 ITW 焊接接头左侧的微观组织,第二条焊缝在第一条焊缝右侧 2.7 mm 处。第一条焊缝的原始粗晶区位于两条红线之间，冲击跟踪焊接在原始粗晶区(Ⅰ区)产生了大的变形,位于虚线的左测,右侧的一部分(Ⅱ区)几乎没有变形。图 7(b)和(c)分别是变形粗晶区和未变形粗晶区的显微组织,前者的组织比后者细小很多。图 7(d)是第二焊缝的粗晶区，可看出焊接板材表面附近的晶粒尺寸与内部的晶粒尺寸几乎相同。第一道焊缝变形粗晶区的晶粒细化是由于第二道焊接时发生了再结晶。原始粗晶区晶粒尺寸为 106±42 μm，而再结晶后的晶粒尺寸为 36±13 μm;此外变形粗晶区的贝氏体体积分数(55%)远高于未变形粗晶区(20%),这是由于变形粗晶区通过再结晶发生了显著的晶粒细

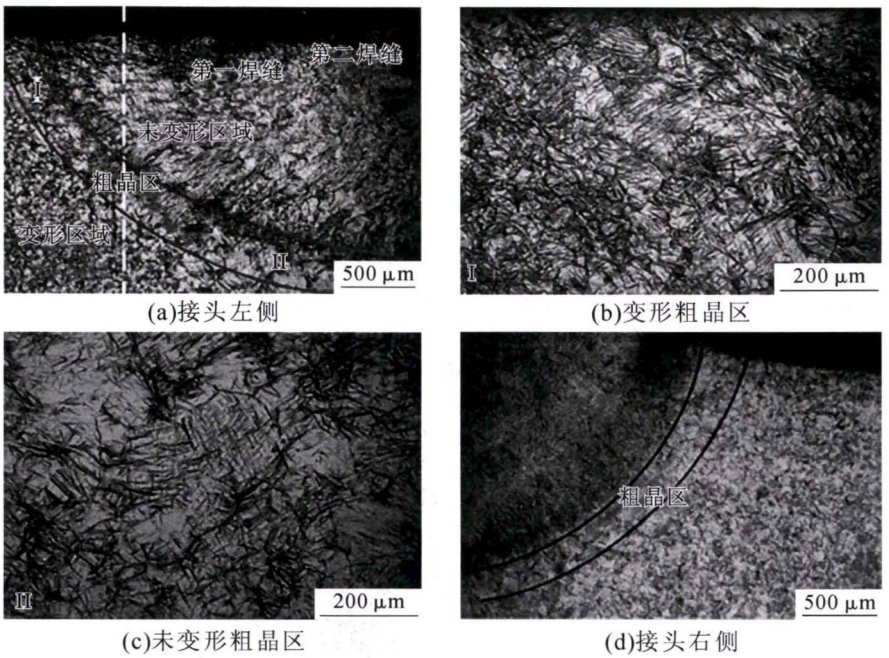


(a)锤击位置　(b)未经锤击位置

(c)锤击位置　(d)未经锤击位置

图 6 NB 钢 RITW 的焊缝宏观和微观组织[32]

Fig.6 Macro and microstructure of the RITW welds of NB steel



(a)接头左侧　(b)变形粗晶区

(c)未变形粗晶区　(d)接头右侧

图 7 Microstructure of the ITW welds of NB steel[22]

Fig.7 Microstructure of welding zone of nanostructured bainitic steels after ITW[22]

化[22]。可见纳米贝氏体钢经过 ITW 焊接,再结晶粗晶区的贝氏体分数远高于原始粗晶区,静态再结晶大大缩短了纳米贝氏体再纳米化时间。

3 结束语

(1)纳米贝氏体钢焊接进行预热时具有良好的抗冷裂纹性能,高碳钢的焊接需要更强的焊接金属材料,因此开发设计强度更高的焊接金属材料,包括碳含量更高的焊接金属,将会使纳米贝氏体钢的焊接变得更容易。

(2)纳米贝氏体钢焊接件通过等温淬火获得纳米晶结构之后,由于焊缝和基体材料的完全再结晶、热影响区渗碳体的析出,焊接接头的最高力学性能可以在软化状态下焊接获得,但这需要额外的热处理工艺过程。然而,由于实际工件尺寸的原因,并非所有焊接结构都可以进行额外热处理。

(3)纳米贝氏体钢的高强度源于其细小的组织,而不是溶解的碳。从焊接缺陷方面考虑,设计低碳纳米贝氏体、合理降低含碳量,从而保证钢具有良好的焊接性是未来的一个发展趋势。此外,通过向纳米贝氏体钢中添加微合金元素,进行不同类型的叠加强化,以此获得良好的焊接性能也是一个发展方向。

(4)纳米贝氏体钢焊接接头需要较长的再纳米化时间才能完成纳米贝氏体相变。为缩短时间,需要进一步研究基础材料和焊接金属的化学成分设计,改进形变过程(奥氏体回火),优化再纳米化参数和相变动力学。

(5)随着国内外学者对纳米贝氏体钢焊接问题的不断深入研究,希望科学家们逐渐征服纳米贝氏体钢焊接的不足之处。另外,还有关于纳米贝氏体钢焊接的基础性问题,比如有关纳米贝氏体钢焊接接头的残余应力、服役于疲劳状态下的焊接接头的疲劳性能等等都需要进一步的研究。

参考文献:

[1] 牛华,卢可欣,罗芙蓉. 第三代汽车钢合金化热浸镀锌层的组织与性能研究[J]. 热加工工艺,2021,50(4):93-97,101.

[2] 纪宏超,李轶明,龙海洋,等. 镁合金在汽车零部件中的应用与发展[J]. 铸造技术,2019,40(1):122-128.

[3] 孟祥海,王伟,李孟星,等. 船体高强钢焊接接头质量控制的研究现状[J]. 铸造技术,2019,40(1):101-105.

[4] 许云波,候自勇,陈礼清,等. 1 000 MPa 级经济型高韧性工程机械用钢的研究开发[J]. 中国冶金,2013,23(4): 27-30.

[5] YANG Z N, CHU C H, JIANG F, et al. Accelerating nano-bainite transformation based on a new constructed microstructural predicting model [J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 748: 16-20.

[6] 郭建良,程巨强,麻以林. 水-空冷热处理贝氏体钢液冷时间对其组织性能的影响[J]. 铸造技术,2021,42(3):216-219.

[7] KUMAR A, SINGH A. Microstructural effects on the sub-critical fatigue crack growth in nano-bainite[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 743: 464-471.

[8] KUMAR A, SINGH A. Mechanical properties of nanostructured bainitic steels[J]. Materialia, 2021, 15: 101034.

[9] ZHAO J L, LV B, ZHANG F C, et al. Effects of austempering temperature on bainitic microstructures and mechanical properties of a high-C high-Si steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 742: 179-189.

[10] WEGLOWSKI M S, MARCISZ J, GARBARZ B. Technological

properties and applications of high-carbon Nanobainitic steels[J]. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2018, 62(3): 29-43.

[11] 徐士新,余伟,李舒笳,等. 预变形温度对纳米贝氏体相变动力学及组织的影响[J]. 金属学报,2018,54(8):1113-1121.

[12] 陈光辉,徐光,胡海江,等. 1.6 GPa 级中碳高强贝氏体钢残余奥氏体调控机理[J]. 钢铁,2021,56(2): 110-116.

[13] 程彦,程巨强,李振飞. 奥氏体化保温时间对无碳化物贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 铸造技术,2019,40(4):365-367,371.

[14] WANG Y H, YANG Z N, ZHANG F C, et al. Microstructures and properties of a novel carburizing nanobainitic bearing steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 777: 139086.

[15] BHADESHIA H K D H. Nanostructured Bainite[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2010, 446(3): 3-18.

[16] ZHANG F C, YANG Z N. Development of and perspective on high-performance nanostructured bainitic bearing steel [J]. Engineering, 2019, 5(2): 319-328.

[17] BHADESHIA H K D H. Bainite in Steels [M]. 3rd ed, Maney Publishing: United Kingdom, 2015.

[18] WU H, ZHAO B, GAO H, et al. Microstructure and fatigue fracture of spot welded trip800 steel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 789-790: 15-19.

[19] 方坤,宋奎晶,杨建国,等. 纳米贝氏体钢 TIG 焊接头组织和性能[J]. 焊接学报,2013,34(8):13-16.

[20] FANG K, YANG J G, SONG K J, et al. Study on tempered zone?in nanostructured bainitic steel welded joints with regeneration [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19: 572-577.

[21] FANG K, YANG J G, SONG K J, et al. Acceleration of regeneration treatment for nanostructured bainitic steel by rotary impacting trailed welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(12): 2935-2940.

[22] SONG K J, FANG K, YANG J G, et al. Acceleration of regeneration treatment for nanostructured bainitic steel welding by static recrystallisation [J]. Materials Science and Technology, 2015, 31 (7): 835-842.

[23] HONG S G, CHO M H, LEE J S. Effects of post weld rapid heat treatment on microstructural evolution in high-carbon bainitic steel welds[C]. In Proceedings of the 63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding, Istambul, Turkey, 2010: 47-54.

[24] SMARR V, GAUTAM J P, REEDY G M, et al. Recent advances in welding of high-strength bainitic steel for automotive applications [M]. Advanced High Strength Steel, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2018: 79-85.

[25] RAMAKRISHNA R, RAO K B S, REEDY G M, et al. Friction stir welding of advanced high strength (bainitic) steels for automotive applications [J]. Materials today: proceedings, 2018, 5 (9): 17139-17146.

[26] WEGLOWSKi M S, GROBOSZ W, MARCISZ J, et al. Characteristics of fusion welded and friction welded joints made in high-carbon nanobainitic steels[J]. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2018, 62: 7-15.

[27] FANG K, YANG J G, SONG K J, et al. Microstructure and mechanical properties of nanostructured bainite weld with regeneration[J]. Metals and Materials International, 2014, 35(5): 923-928.

[28] KIRBIS P, VUHERER T, IRGOLIC T, et al. Metallographic analysis of kinetically activated bainite (KAB) Welds[J]. Metallography Microstructure & Analysis, 2015, 4(6): 570-578.

[29] 方坤. 纳米贝氏体钢焊接接头再纳米化强化方法与加速机制[D]. 哈尔滨工业大学,2014.

[30] FANG K, YANG J G, LIU X S, et al. Regeneration technique for welding nanostructured bainite [J]. Materials & Design, 2013, 50 (9): 38-43.

[31] KRÓ LICKA A, RADWAŃ SKI K, JANIK A, et al. Metallurgical Characterization of Welded Joint of Nanostructured Bainite: Regeneration Technique versus Post Welding Heat Treatment[J]. Materials, 2020, 13(21): 4841.

[32] 赵德龙. 纳米贝氏体钢随焊冲击旋转挤压加速再纳米化的研究[D]. 哈尔滨工业大学,2013.

[33] MA R, FANG K, YANG J G, et al. Grain refinement of HAZ in multi-pass welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(5): 1131-1135.

[34] MENG X C, HUANG Y X, CAO J, et al. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding [J]. Progress in Materials Science, 2021, 115: 100706.

[35] KRÓ LICKA A, AMBROZIAK A, ZAK A. Welding capabilities of nanostructured carbide-free bainite: review of welding methods, materials, problems, and perspectives [J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 3798.

[36] 任赛男. 高熔点搅拌摩擦焊搅拌头材料的设计与制备 [D]. 湘潭大学,2019.

[37] 袁琳,李铸国,黄坚,等. 激光熔覆纳米贝氏体涂层的组织与性能[J]. 中国表面工程,2011,24(1):40-43,48.

[38] GUO Y, LI Z, YAO C, et al. Microstructure evolution of Fe-based nanostructured bainite coating by laser cladding [J]. Materials and Design, 2014, 63(21): 100-108.

[39] SMRR V, GAUTAM J P, REDDY G M, et al. Laser welding of Ultrafine bainitic steels [J]. Indian Welding Journal, 2019, 52 (3): 52-56.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。



地址:杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址:长兴县林城镇午山岗开发区
联系人:丁为兵
电话:15088362822
传真:0572-6087688
邮箱:dwb150@163.com