

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.11

40Cr 调质钢惯性摩擦焊工艺及接头组织性能研究

闫传贺^{1,2}, 杨 德^{1,2}, 王小鹏^{1,2}, 杨 潇^{1,2}, 梁志敏^{1,2*}

1. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018
2. 河北省材料近净成形技术重点实验室, 河北 石家庄 050018

摘要: 传统熔化焊焊接40Cr调质钢后,热影响区软化、脆化等问题导致其力学性能下降。为了避免这些问题,采用惯性摩擦焊对40Cr调质钢进行固相焊接。采用金相实验、显微硬度实验及拉伸实验的方法研究初始转速(1 200~1 800 r/min)和焊接压力(25~75 MPa)对焊接接头力学性能和微观组织影响规律。结果表明,初始转速与焊接压力通过调控界面热输入与塑性流变行为,显著影响接头焊合质量与组织。当初始转速为1 800 r/min、焊接压力为75 MPa时,焊合界面连续,焊合区域组织细小均匀,热影响区没有明显的晶粒长大,焊合区硬度最大值达到655 HV,从焊缝中央向两侧硬度逐渐降低至母材硬度260 HV,无热影响区软化现象。经过调质处理的试样拉伸性能接近于随炉试样,抗拉强度达到704 MPa,超声波探伤结果显示接头达到A级标准。本研究证实惯性摩擦焊可有效解决40Cr调质钢焊接的热影响区软化问题。

关键词: 惯性摩擦焊; 40Cr调质钢; 热影响区软化; 力学性能

中图分类号: TG453.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)02-0096-07

Study on Inertia Friction Welding Process and Joint Organisational Properties of 40Cr Tempered Steel

YAN Chuanhe^{1,2}, YANG De^{1,2}, WANG Xiaopeng^{1,2}, YANG Xiao^{1,2}, LIANG Zhimin^{1,2*}

1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China
2. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang 050018, China

Abstract: After conventional fusion welding of 40Cr tempered steel, problems such as softening and embrittlement in the heat affected zone lead to a decrease in its mechanical properties. In order to avoid these problems, the inertia friction welding of 40Cr tempered steel was carried out. Metallographic tests, microhardness tests and tensile tests were used to study the effects of initial rotational speed and welding pressure on the mechanical properties and microstructure of welded joints. The results show that when the initial rotational speed reaches 1 800 r/min and the welding pressure reaches 75 MPa, the weld interface is continuous, the weld area is fine and uniform, there is no obvious grain growth in the heat-affected zone, and the hardness of the weld area reaches 655 HV, and the hardness decreases from the centre of the weld to both sides to the hardness of the base material of 260 HV, and there is no heat affected zone softening. Under hardening and tempering treatment, the tensile properties of the specimens are close to those of the furnace-following specimens, with the tensile strength reaching 704 MPa, and the ultrasonic flaw detection results show that the joints have reached the class A standard. Appropriate increase in initial speed and welding pressure helps to improve the forming quality and mechanical properties of 40Cr inertia friction welded joints. This study confirms that inertia friction welding can effectively solve the HAZ softening problem in the welding of 40Cr tempered steel.

Keywords: inertia friction welding; 40Cr tempered steel; heat affected zone softening; mechanical property

引用格式: 闫传贺, 杨德, 王小鹏, 等. 40Cr调质钢惯性摩擦焊工艺及接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2026, 56(2): 96-102.

收稿日期: 2025-06-16 修回日期: 2025-08-11

作者简介: 闫传贺(2002—),男,硕士研究生,主要从事电子封装研究。

通讯作者: 梁志敏(1981—),男,教授,主要从事智能焊接和电子封装研究。E-mail: lianghebust@163.com。

Citation: YAN Chuanhe, YANG De, WANG Xiaopeng, et al. Study on Inertia Friction Welding Process and Joint Organisational Properties of 40Cr Tempered Steel[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 96–102.

0 引言

40Cr 调质钢是广泛使用的中碳结构钢钢种, 具有较好的综合力学性能, 常被用来制成机床齿轮、轴、连杆、螺母等, 也常被用于钢拉杆产品的加工制作。但由于其碳当量较高, 熔化焊时易产生冷裂纹、热影响区软化、脆化等问题, 虽然可以采用焊前预热、焊后保温的措施来减少此类问题, 但 40Cr 材料的焊接性能依然较差。

惯性摩擦焊具有固相焊的无熔化和低热输入的特点, 使得热影响区极小, 同时焊接速度快, 金属加热时间短, 并且焊接时依靠摩擦使母材焊接融合, 不需要增加额外的焊材, 适用于对焊接热输入敏感的金属^[1-6]; 惯性摩擦焊无需填充金属, 能较好地保证工件的尺寸精度^[7]。如今许多惯性摩擦焊接产品已经广泛用于航空航天、石油、汽车等领域^[8-12]。

近年来, 国内外学者围绕中碳调质钢的焊接技术开展了大量研究。林杨等^[13]利用光纤激光焊对调质态和热轧态的 42CrMo 钢进行了焊接, 结果表明, 调质态焊缝显微硬度显著高于母材且热影响区存在软化现象。陈大军^[14]和 Ding^[15]等通过惯性摩擦焊实现了 42CrMo 钢与 K418 镍基高温合金的异种金属连接, 结果表明 42CrMo 钢侧接头未出现传统熔化焊中常见的裂纹与热影响区软化问题, 验证了惯性摩擦焊接中碳调质钢时减少此类问题的可行性。目前, 针对中碳调质钢同种金属的惯性摩擦焊接后微观组织演化和力学性能研究还较少, 本文采用惯性摩擦焊技术对调质态 40Cr 钢进行焊接, 以期解决接头热影响区软化的问题, 研究焊后微观组织及焊后接头力学性能变化规律, 为后续中碳调质钢惯性摩擦焊的研究提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料选用 $\varnothing 30\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的 40Cr 调质钢圆棒, 其化学成分见表 1。焊接前使用车床对圆棒端面进行车削加工, 使用乙醇溶液对车削后的端面

进行清洁处理。试验设备为 C20-SF 旋转摩擦焊机 (见图 1)。惯性摩擦焊工艺参数组合见表 2, 不同参数组合命名为: IFW 初始转速-压力。焊接完成后, 将焊接试样与母材随炉比试样进行同炉调质处理后机械加工去除飞边, 使用万能电子材料试验机测试接头抗拉强度。采用线切割机切取焊缝横截面并使用 400#、800#、1200# 碳化硅砂纸打磨后抛光, 使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 8 s 后使用金相显微镜观察接头显微组织。使用 MHVS-1000Z 型显微硬度计测量接头硬度值, 硬度测试点位置如图 2 所示。

表 1 40Cr 钢的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 40Cr steel (wt. %)

C	Si	Mn	Cr	Fe
0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	Bal.



图 1 C20-SF 旋转摩擦焊机

Fig. 1 C20-SF rotary friction welding machine

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding Process Parameter

实验编号	初始转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	压力/MPa
IFW1200-25	1 200	25
IFW1500-25	1 500	25
IFW1800-50	1 800	50
IFW1200-75	1 200	75
IFW1500-75	1 500	75
IFW1800-75	1 800	75

2 试验结果与讨论

2.1 40Cr 惯性摩擦焊接头拉伸性能及超声波探伤

图 3 为 40Cr 调质钢惯性摩擦焊接头的拉伸断

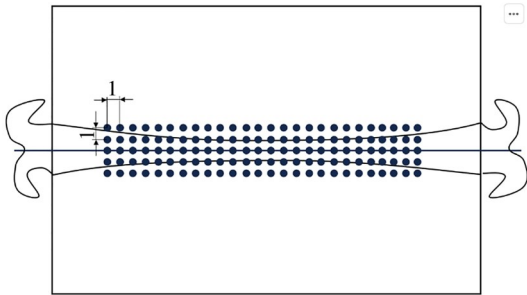


图2 硬度测试点位置(单位:mm)
Fig. 2 Hardness test point (unit:mm)

裂试样宏观形貌。6组试样中,4个断裂位置位于母材,2个断裂于焊缝,断裂区域可观察到明显的宏观塑性变形,表明试件发生韧性断裂。

力学性能测试结果如表3、表4所示,所有焊件的断后伸长率(A)及断面延伸率(Z)与母材随炉对比试样(平均值分别为23.1875%、65.125%)相近,说明焊接过程没有明显降低材料塑性。在焊接压力低于75 MPa的焊接试样中,IFW1500-25试样的抗拉强度达699 MPa,为母材的96.0%;IFW1200-25试样和IFW1800-50试样抗拉强度分别为663 MPa、674 MPa,显著低于母材随炉对比试样。当焊接压



图3 40Cr 惯性摩擦焊接头拉伸断裂试样
Fig. 3 Fractured specimen of 40Cr inertia friction welded joints after tensile test

力达到75 MPa时,接头强度明显提升,IFW1200-75试样为710 MPa,达到母材随炉对比试样的97.5%;IFW1800-75试样的抗拉强度为704 MPa,达母材随炉对比试样的96.7%。超声波探伤检测结果表明,各接头质量等级均符合GB/T 4162—2022 B级及以上,其中IFW1800-75试样接头达到A级标准。

表3 焊件各项力学性能参数及超声波探伤结果

Table 3 Mechanical properties and ultrasonic flaw detection results of welded joints

序号	焊接转速 $/(r \cdot \min^{-1})$	焊接压力 $/\text{MPa}$	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$	超声波探伤结果 (GB/T 4162—2022)
IFW1200-25	1200	25	525	663	24.5	65	合格(B级)
IFW1500-25	1500	25	538	699	23	65	合格(B级)
IFW1800-50	1800	50	507	674	22	64	合格(B级)
IFW1200-75	1200	75	559	710	24.5	68	合格(B级)
IFW1500-75	1500	75	532	698	23	61	合格(B级)
IFW1800-75	1800	75	530	704	23	64	合格(A级)

表4 母材随炉对比试样力学性能参数

Table 3 Mechanical properties of base metal furnace-following specimens

序号	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$
1	568	722	23.5	65
2	610	760	22.0	62
3	597	754	23.5	69
4	654	780	23.0	57
5	550	695	24.5	66
6	649	770	23.0	65
7	492	631	23.0	71
8	551	714	23.0	66
平均值	583.875	728.25	23.187 5	65.125

综合分析可知,初始转速过低会导致结合界面的温度过低,塑性流动金属量减少;焊接压力过低则会加快冷却速度,增大脆硬倾向,使得焊缝内缺陷增多,两者共同导致接头抗拉强度降低。适当地提高初始转速和焊接压力,可减少接头内部缺陷,使抗拉强度更接近于母材随炉对比试样。

2.2 40Cr 惯性摩擦焊接头的微观组织及显微硬度

2.2.1 40Cr 惯性摩擦焊接头宏观形貌

图4为焊接试样的宏观形貌。当焊接压力一定时,对比大压力下的图4c、4d试样,结果表明随着初始转速的升高,焊接飞边尺寸的显著增大且飞边更

加圆滑;在初始转速一定时,分别对比中转速下的图4a、4c、高转速下的图4b、4d试样,结果表明焊接压力的增加也会使得飞边略有增大,但影响程度弱于初始转速。原因是随着热输入和热功率的增大,塑性变形层显著增厚^[16],焊缝被挤压出更多的塑性流动金属,而塑性金属的产生量主要由初始转速决定的热输入主导。



(a)IFW1500-25;(b)IFW1800-50;(c)IFW1500-75;(d) IFW1800-75

图4 焊接试样宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphology of welded specimens

焊接接头切面宏观形貌如图5所示,惯性摩擦焊接头分为焊缝、热力影响区、热影响区、母材区4个区域。焊后产生的飞边近似对称,原因是采用同种材料焊接时,两侧金属受热条件相当,温度差异很小,两侧金属在塑性流变阶段产生的金属量基本相等,在焊缝两侧形成了几乎一致的焊接飞边。

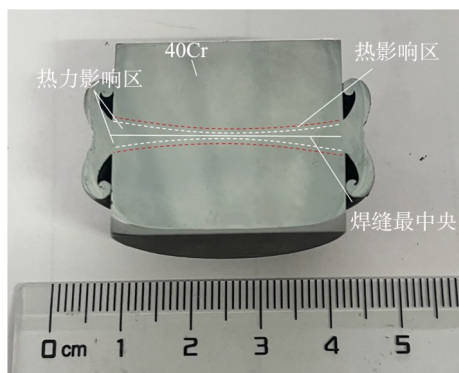


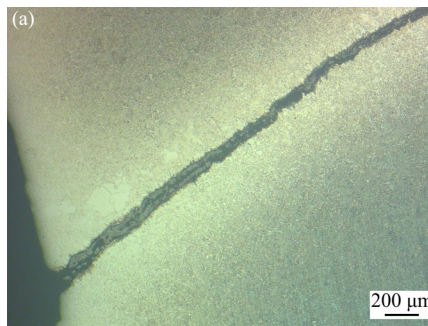
图5 焊接接头切面宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphology of welded joint section

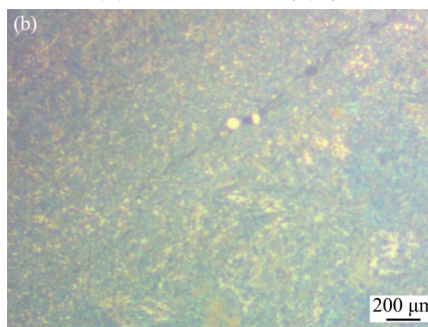
2.2.2 40Cr 摩擦焊接头微观组织

图6为IFW1200-25、IFW1500-25试样焊接缺陷金相图。IFW1200-25试样(见图6a)存在明显裂纹,IFW1500-25试样(见图6b)则同时出现气孔与

裂纹,表明焊接压力不足时,接头中的气孔和裂纹等缺陷无法被充分挤压排出,与超声波探伤结果一致。图7为IFW1800-50试样的显微组织,可见接头存在未焊合缺陷,原因是焊前端面未车削平整,导致界面接触摩擦产热不均匀,加之杂质残留进一步阻碍端面金属充分接触,最终造成接头未焊合。



(a)IFW1200-25 试样裂纹



(b)IFW1500-25 试样气孔和裂纹

图6 焊接试样的缺陷

Fig. 6 Defects in welded specimens

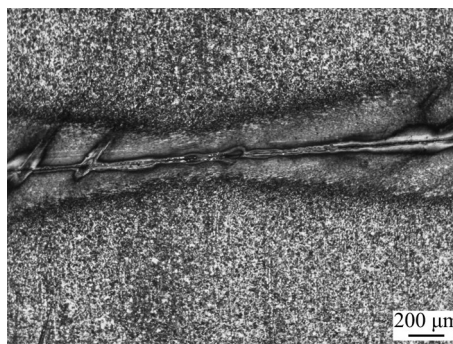


图7 IFW1800-50试样焊接接头的显微组织

Fig. 7 Microstructure of IFW1800-50 welded joint

图8为IFW1200-75和IFW1800-75试样的焊接接头微观组织金相组织。可以看出,焊接压力达到75 MPa后,接头在热-力复合作用下各区域分布明显,可明确划分为焊合区、热力影响区与母材区。IFW1200-75试样焊接后出现焊合不连续,是因为:

在摩擦过程中,其端面外圆区域线速度大,摩擦产热充足,形成大量塑性流变金属;而圆心区域线速度小,摩擦产热不足,塑性流动金属量较少,中心温度不足导致圆心区域组织没有充分发生再结晶,晶粒被拉长成长条状或丝状,并发生加工硬化。这种加工硬化效应阻碍了外圆侧高温塑性金属的进一步挤压排出,使得两端焊合区域持续积热,焊接界面温度急剧升高,促使该区域塑性变形金属动态再结晶,在较快的冷却速度下,晶粒来不及长大从而细化^[17],最终形成了两端为焊合区、中心为变形晶

组织的非连续焊接界面。与 IFW1200-75 试样相比,IFW1800-75 试样焊接接头焊合连续,低倍观察下近似成弓形,初始转速的提升增大了热输入,使得整个焊接接头宽度明显增加,焊缝区形成细小均匀的再结晶晶粒,热力影响区的变形晶粒分布也更加均匀。由图 8b、8d 可以看出,IFW1200-75 试样焊缝中心晶粒过渡区只有变形晶区和基体晶区,而初始转速更高的 IFW1800-75 试样从焊合到两侧分别为细晶区→变形晶区→基体晶区,其细晶强化作用也从焊合区向两侧逐渐降低。

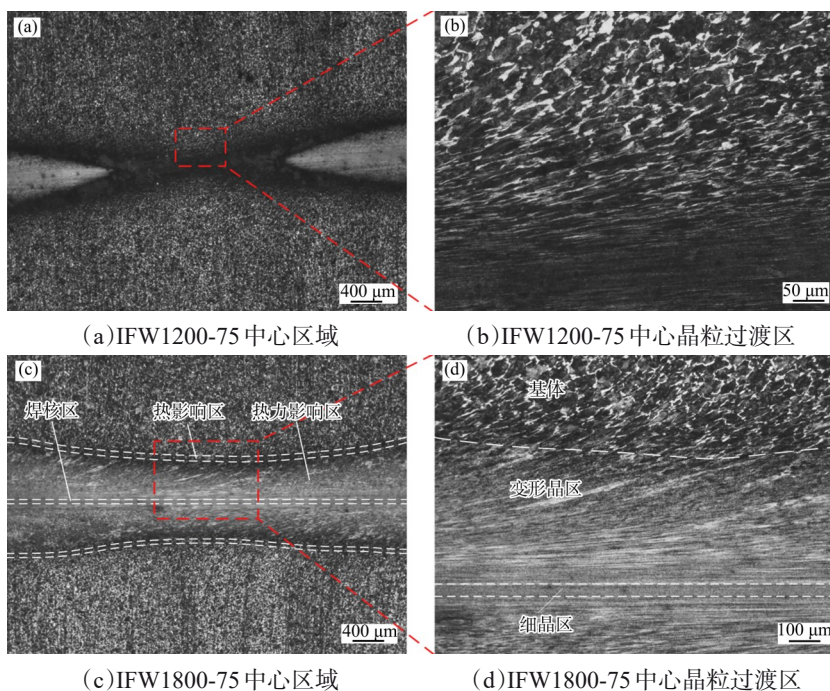


图8 惯性摩擦焊接头显微组织

Fig. 8 Microstructures of inertia friction welded joints

图9为接头 $r/2$ 处晶粒过渡区的显微组织。IFW1200-75试样(见图9a)存在明显裂纹,成因是焊接过程中两端积热导致冷却速度过快,生成淬硬组织,加之接头组织不均匀引发的应力集中,最终诱发裂纹。IFW1800-75试样(见图9b)晶粒分布与中心过渡区相似,同样分为细晶区、变形晶区和基体晶区。且焊接压力为75MPa的所有焊接接头热力影响区均未观察到晶粒长大。

2.2.3 40Cr摩擦焊接头显微硬度

采用MHVS-1000Z型显微硬度仪对IFW1200-75和IFW1800-75试样进行测试,结果如图10、图11所示。已知调质态40Cr母材硬度范围为240~

340 HV,硬度云图显示,接头从母材到焊缝中心分为三个明显的区域:焊合区(红色区域)、热力影响区(黄绿色区域)、母材区(蓝色区域)。焊合区硬度最高,IFW1200-75试样达742 HV,IFW1800-75试样为686 HV;热力影响区硬度从焊合区向母材区逐渐下降,母材区硬度约为260 HV,未出现热力影响区软化现象。

硬度分布差异的原因:焊合区晶粒最细小,且40Cr钢含碳量较高,惯性摩擦焊冷却速度快,促使组织转变为马氏体^[18],叠加细晶强化与马氏体强化,导致硬度最高。热力影响区受热量和机械力双重作用,晶粒被拉长并发生加工硬化,且越靠近母

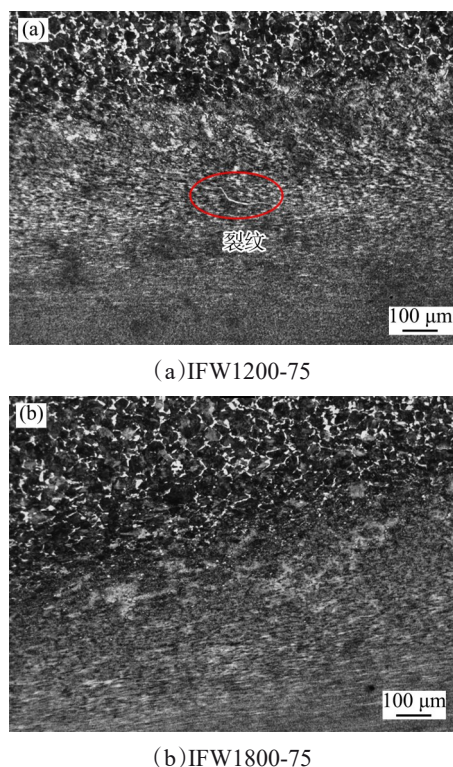
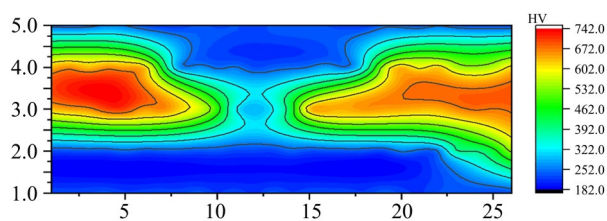
图9 惯性摩擦焊接头 $r/2$ 处晶粒过渡区的显微组织Fig. 9 Microstructures of grain transition zone at $r/2$ of inertia friction welded joints

图10 IFW1200-75焊接接头硬度

Fig. 10 Hardness diagram of IFW1200-75 welded joints

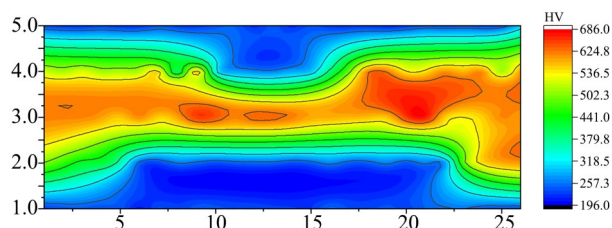


图11 IFW1800-75焊接接头硬度

Fig. 11 Hardness diagram of IFW1800-75 welded joint

材,高温影响越弱,马氏体含量减少且铁素体的含量更高^[19],硬度逐渐降低。对比可知,IFW1200-75试样焊缝中心区域硬度略有提升但不明显,两侧焊合区硬度高于IFW1800-75试样,表明焊接时IFW1200-75试样时焊合上的温度峰值更高,细晶

强化更明显且生成的马氏体更多,接头整体硬度分布极度不均匀。适当提高初始转速至1 800 r/min,焊接接头的硬度分布将更加均匀。

3 结论

针对40Cr中碳调质钢采用惯性摩擦焊开展固相焊接试验,探究了初始转速(1 200~1 800 r/min)与焊接压力(25~75 MPa)对焊接接头微观组织、力学性能及成形质量的影响规律,结论如下:

(1)焊接热输入和热功率不足会导致界面结合质量的下降,当初始转速 $\leq 1\,500$ r/min、焊接压力 ≤ 50 MPa时,热输入不足导致界面峰值温度低于动态再结晶阈值,塑性金属流动不充分,焊缝区出现气孔和裂纹缺陷,抗拉强度较母材下降8.9%。当工艺参数到达1 800r/min+75 MPa后,热输入量提升使界面动态再结晶充分进行,抗拉强度升高。

(2)在1 200~1 800 r/min的初始转速范围内,随初始转速增大,界面焊合逐渐连续,其峰值温度高散热快,细晶组织增多,热力影响区中被拉长的变形晶粒分布更均匀,热影响区没有明显的晶粒长大。显微硬度最大值达655 HV,较母材提升173%,硬度从焊合区到母材呈逐渐下降分布,热影响区未发现明显的接头软化现象。

(3)研究表明,40Cr中碳调制钢最佳焊接参数为焊接初始转速1 800 r/min,焊接压力75 MPa。在此条件下,焊接接头达到与母材锻轧钢棒同级别的无损检测合格A等级,抗拉强度最高达710 MPa,塑性无明显下降,各项力学性能都接近母材随炉试样。惯性摩擦焊较适用于40Cr等焊接性较差的材料,但需要对工艺参数进行进一步的调整和研究。

参考文献:

- [1] 文恒玉,李佩琪,丁煜瀚,等. 惯性摩擦焊研究现状[J]. 热加工工艺,2019,48(19):6-11.
WEN H Y, LI P Q, DING Y H, et al. Current status of inertia friction welding research[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(19): 6-11.
- [2] Dahlan H, Nasution A K, Rusli M. Preliminary study on effect of inertia and continuous friction welding on mechanical properties of SS 316-Zn alloys friction

- welded joint [J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2024, 9: 100187.
- [3] 何胜春, 张田仓. TC17 钛合金惯性摩擦焊接头组织特征分析[J]. 焊接, 2008(4): 61–63.
HE S C, ZHANG T C. Organisational characterisation of inertia friction weld head of TC17 titanium alloy[J]. Welding & Joining, 2008(4): 61–63
- [4] 许鸿吉, 尹丽香, 魏志宇, 等. Ti17 合金惯性摩擦焊接头力学性能与组织分析[J]. 焊接学报, 2009(12): 89–92.
XU H J, YIN L X, WEI Z Y, et al. Mechanical properties and organisational analysis of Ti17 alloy inertia friction welded joints[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2009(12): 89–92.
- [5] 廖云建, 何胜春, 于广娜, 等. TC17 钛合金惯性摩擦焊接头室温断裂韧性测试与分析[J]. 航空制造技术, 2014, 57(16): 55–56.
LIAO Y J, HE S C, YU G N, et al. Room temperature fracture toughness testing and analysis of TC17 titanium alloy inertia friction welded head[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(16): 55–56.
- [6] Kimura M, Ishii H, Kusaka M, et al. Joining phenomena and joint strength of friction welded joint between aluminium–magnesium alloy (AA5052) and low carbon steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(7): 655–661.
- [7] Bennett C. Finite element modelling of the inertia friction welding of a CrMoV alloy steel including the effects of solid–state phase transformations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 18: 84–91.
- [8] 张露, 张春波, 廖仲祥, 等. IN718/FGH96 惯性摩擦焊接头焊缝区微观组织状态与织构分布特征[J]. 电焊机, 2022, 52(4): 8–13.
ZHANG L, ZHANG C B, LIAO Z X, et al. Characteristics of microstructure state and weave distribution in the weld zone of IN718/FGH96 inertia friction welding head[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(4): 8–13.
- [9] Wang F, Li W, Dai Y, et al. Finite element simulation of inertia friction welding of superalloy bars[J]. China Welding, 2012, 21(1): 13–17.
- [10] 乌彦全, 周军, 张春波, 等. $\alpha+\beta$ 型钛合金惯性摩擦焊接头焊态/热处理态组织特征及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(6): 2144–2150.
WU Y Q, ZHOU J, ZHANG C B, et al. Organisational characteristics and properties of inertial friction weld heads of $\alpha+\beta$ type titanium alloys in welded/heat-treated state[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(6): 2144–2150.
- [11] 李睿, 张春波, 周军. Ti52 钛合金/304 不锈钢异种材料惯性摩擦焊接技术研究[J]. 电焊机, 2022, 52(6): 70–77.
LI R, ZHANG C B, ZHOU J. Research on inertia friction welding technology of Ti52 titanium alloy/304 stainless steel dissimilar materials[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(6): 70–77.
- [12] Qin F, Zhang C, Zhou J, et al. Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy/stainless steel dissimilar ring joint welded by inertia friction welding[J]. Frontiers in Materials, 2022, 8: 813118.
- [13] 林杨, 张震, 宋汝晖, 等. 20 mm 厚 42CrMo 钢光纤激光焊接工艺及接头组织性能[J]. 应用激光, 2024, 44(10): 111–119.
LIN Y, ZHANG Z, SONG R H, et al. 20 mm thick 42CrMo steel fibre laser welding process and joint tissue properties[J]. Applied Laser, 2024, 44(10): 111–119.
- [14] 陈大军, 徐晓菱, 徐元泽, 等. K418 涡轮盘与 42CrMo 轴异种材料惯性摩擦焊研究[J]. 焊接, 2008(6): 58–60.
CHEN D J, XU X L, XU Y Z, et al. Study on inertia friction welding of dissimilar materials between K418 turbine disc and 42CrMo shaft[J]. Welding & Joining, 2008(6): 58–60.
- [15] Ding Y, You G, Wen H, et al. Microstructure and mechanical properties of inertia friction welded joints between alloy steel 42CrMo and cast Ni–based superalloy K418 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 176–184.
- [16] 吴玮, 邓发. 304 不锈钢与 42CrMo 钢惯性摩擦焊工艺[J]. 重庆理工大学学报, 2017, 31(12): 72–77.
WU W, DENG F. Inertia friction welding process of 304 stainless steel and 42CrMo steel [J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2017, 31(12): 72–77.
- [17] Zimmerman J, Wlosinski W, Lindemann Z R. Thermo–mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic–metal friction welding [J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(4): 1644–1653.
- [18] Dong H, Yu L, Gao H, et al. Microstructure and mechanical properties of friction welds between TiAl alloy and 40Cr steel rods [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3126–3133.
- [19] Lee W B, Kim M G, Koo J M, et al. Friction welding of TiAl and AISI4140 [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(3): 1125–1128.