

应用技术

超高强钢的摩擦焊工艺研究

钱晓亮, 姜华, 王波, 姜春茂, 刘有江, 柳燕, 方晓玲

(北方华安工业集团有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161046)

摘要: **目的** 研究某产品摩擦焊的工艺性能。**方法** 研究了超高强钢 45CrNiMo1VA 钢在不同摩擦焊接工艺参数下的接头组织与性能, 以及在不同热处理回火温度下对焊接接头强度的影响。**结果** 在合适的工艺参数下, 45CrNiMo1VA 钢的高韧性可以有效保证焊接接头韧性, 满足产品高指标的要求, 使焊接接头组织具有良好的组织性能, 焊后热处理工艺的正确确定是保证焊缝组织性能与母材组织性能的重要保证。**结论** 试验证明超高强钢(45CrNiMo1VA)完全可以应用于摩擦焊生产中, 并能获得理想的性能指标。

关键词: 45CrNiMo1VA 钢; 摩擦焊; 回火温度; 组织性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.014

中图分类号: TG457.11

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)04-0074-05

Friction Welding Technology of Ultra-high-strength Steel

QIAN Xiao-liang, JIANG Hua, WANG Bo, JIANG Chun-mao, LIU You-jiang, LIU Yan, FANG Xiao-ling
(North Hua'an Industrial Group Co., Ltd., Qiqihar 161046, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the friction welding process of a product. **Methods** The joint structure and properties of ultra-high-strength steel 45CrNiMo1VA under different technological parameters of friction welding, as well as the effects of different tempering temperatures in heat treatment on the strength of welded joint were studied. **Results** The results showed that the high toughness of 45CrNiMo1VA steel could effectively guarantee the toughness of welded joint, which met the high performance requirements of products, and improved the performance of the welded joint. The correct determination of heat treatment after welding was the important guarantee for the performance of weld and parent metal structure. **Conclusion** Trials showed that ultra-high-strength steel (45CrNiMo1VA) could be used in the friction welding production with ideal performance.

KEY WORDS: 45CrNiMo1VA steel; friction welding; tempering temperature; structure performance

超高强度结构钢有硬度高、淬透性强、比强度高、韧性高等特点, 具有良好的综合力学性能, 常用于火箭、导弹部件, 重型装备等重要零部件^[1]。自 20 世纪 50 年代初, 我国就开始研制适用于航空工

业需要的超高强度结构钢的材料。经过几十年的科研与发展, 目前我国军工产品中特别是航天航空工业中的歼击机、运输机的起落架, 战略导弹壳体等, 均采用此类钢材。然而, 超高强度结构钢因其熔炼、

收稿日期: 2014-03-26

作者简介: 钱晓亮(1983—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 工程师, 主要研究方向为金属材料工程。

合金元素组成等特点,在产品焊接加工过程中,易出现裂纹、气孔、未熔合等焊接缺陷,所以很少采用焊接方式进行加工,因此此类钢的焊接加工是一项关键技术难题^[2]。

摩擦焊技术经过 100 多年的研究与发展,已成为一种成熟、先进的焊接技术方法。因具有高效、环保、节能、低耗、焊接质量高、成本低等优点,被广泛应用于各种领域^[3]。国内对 45CrNiMo1VA 钢摩擦焊及焊后的热处理工艺研究较少。文中采用摩擦焊接技术对 45CrNiMo1VA 超高强度结构钢焊接进行研究。

某公司最近新研制的产品以 45CrNiMo1VA 钢为原材料,因设计要求产品的加工尺寸无论是长度还是直径,均需多次冲拔加工才能完成此产品的毛坯加工,其材料利用率较低,后续机加加工余量较大,增加了加工成本,降低了生产效率。而采用分段冲拔、机加后,利用摩擦焊的特点将两段毛坯摩擦结合,就可以解决冲拔加工带来的不足,同时为深入研究超高强度结构钢摩擦焊提供依据,而且热处理回火工艺的研究也是保证工件摩擦焊后各项性能指标的保障。

1 试验材料及方法

1.1 45CrNiMo1VA 超高强钢的焊接性分析

45CrNiMo1VA 钢是我国为提高钢的纯度,采用真空感应炉+真空自耗炉两次真空冶炼工艺研制出的超高强度结构钢,依据焊接、钢种的特点,确保产品的质量,该类钢种一般采用先退火再焊接后调质处理工艺完成产品的焊接、热处理的加工。表 1 列出了母材的化学成分,通过表 1 的化学成分可以看出,在各种化学元素中,碳的影响最明显,因此可用碳当量来估算该材料的焊接性。根据碳当量经验公式($C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/15 + Cr/5 + Mo/4 + Cu/13 + P/2$),计算出该合金钢的碳当量为 0.99% ~ 1.23%。根据经验,当碳当量>0.60%时,钢材塑性较低,淬硬倾向很大,焊接性较差,特别是高强度钢难度更大^[4],因此,该钢种具有相当大的冷热裂纹倾向。

表 1 45CrNiMo1VA 钢的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of 45CrNiMo1VA steel

C	Mn	Si	Cr	V	Mo	Ni	P	S
0.44 ~ 0.49	0.60 ~ 0.9	0.15 ~ 0.35	0.90 ~ 1.20	0.05 ~ 0.15	0.9 ~ 1.10	0.40 ~ 0.70	≤0.015	≤0.015

试验在配有计算机闭环控制与数据采集系统的 C25 型连续驱动摩擦焊机上进行,试验用料尺寸见图 1 和 2。

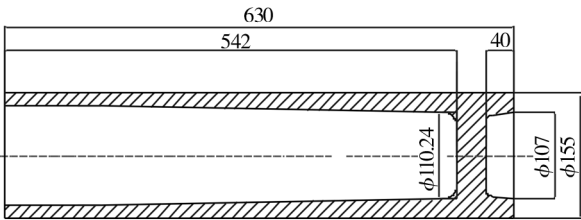


图 1 前段工件
Fig. 1 Front Workpiece

在确定摩擦焊焊接工艺参数时,考虑到焊接用料是大截面的工件,其工艺参数控制应是不同阶段采用不同的控制方案:即在一级摩擦阶段,可以进行时间控制和压力控制;在二级摩擦阶段进行变形量

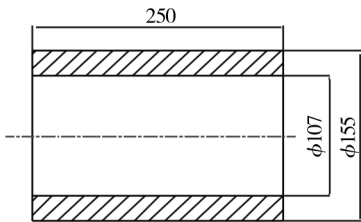


图 2 后段工件
Fig. 2 Rear Workpiece

的控制;在顶锻阶段进行压力和时间控制^[5]。

1.2 焊接试验过程及结果分析

焊接过程中,对摩擦变形量的控制可以采用计算机的控制系统进行。为确定最佳工艺参数,试验采用正交试验方法对试验件进行优化,主要因素有:一级时间、一级压力、摩擦变形量、顶锻压力、顶锻时

间。正交试验采用 L_93^5 , 三水平五因素。其正交试验表见表 2, 焊接工艺参数正交试验排列表见表 3^[6]。

表 2 焊接工艺参数正交试验表

Table 2 Orthogonal test table of parameters for the welding process

试验因素及水平	A 一级 时间	B 一级 压力	C 摩擦 变形量	D 顶锻 压力	E 顶锻 时间
1	10	2	0.6	10	30
2	15	2.5	1	15	40
3	20	3	2	20	50

表 3 焊接工艺参数正交试验排列表

Table 3 Orthogonal test arrangement table of parameters for welding process

序号	A	B	C	D	E
1	10	2	0.6	10	30
2	10	2.5	1	15	40
3	10	3	2.5	20	50
4	15	2	0.6	10	30
5	15	2.5	1	15	40
6	15	3	2.5	20	50
7	20	2	0.6	10	30
8	20	2.5	1	15	40
9	20	3	2.5	20	50

按照正交试验排列表列出的工艺参数进行摩擦焊试验,共焊接 9 件。试验过程中,将 9 件编号为 1~9,并与正交试验排列表一一对应。观察试样件表面焊接质量、理化分析(试样拉伸性能和延伸率等)、金相分析及超声波探伤等综合结果,得出第 5 号试样件的结果最好(见表 4)。通过数据分析,当摩擦变形量小于 1 mm 或顶锻时间小于 40 s 时,焊件会出现未熔合现象;当摩擦变形量在 1 mm 左右或顶锻时间在 40 s 左右时,焊件接头质量最好,力学拉伸性能、延伸率等指标变动不大,不仅保证了焊接质量,而且其焊接区域的组织较为均匀,便于后续热处理加工(珠光体+铁素体),见图 3;当摩擦变形量大于 2 mm 时,焊件接头良好,但力学拉伸性能和延伸率等指标变动较大,焊接区域的组织不均匀,组织成分较多(珠光体+铁素体+马氏体),不利于后续热处理加工,见图 4^[7]。

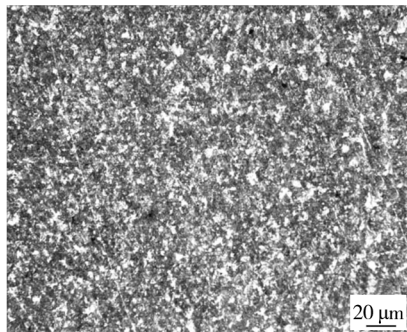


图 3 焊缝组织珠光体+铁素体

Fig. 3 Pearlite + Ferrite in the Weld Structure

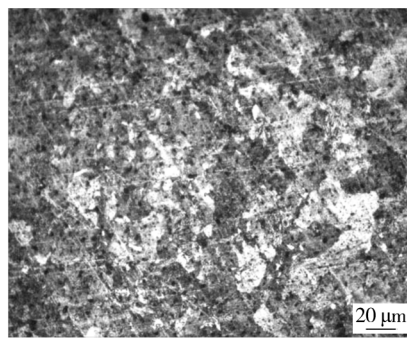


图 4 热影响区组织珠光体+铁素体+马氏体

Fig. 4 Pearlite + Ferrite + Martensite in the Heat Affected Zone

表 4 焊接试样理化分析数据

Table 4 Physical and chemical analysis data of welding samples

序号	焊接效果	理化分析		
		R_{el} /MPa	A /%	a_{ku} /(J·cm ⁻²)
1	焊接接头有未熔合现象	825	10	36, 26
2	飞边不封闭	850	9.5	34, 40
3	焊接接头质量良好	700	13.5	45, 40
4	焊接接头有未熔合现象	850	10	30, 34
5	焊接接头质量良好	850	10.5	31, 33
6	焊接接头质量良好	730	12	40, 40
7	焊接接头质量良好	350	22	24, 27
8	焊接过程中出现焊接接头过热现象	800	10	30, 31
9	焊接接头质量良好	750	12.5	45, 39

在摩擦焊接过程中,摩擦面的温度是一个由低温到高温变化的过程,工件在摩擦的过程中,其塑性、韧性的变化,都随着摩擦温度的升高而呈现出不

同的变化^[8]。材料分子间的流动也是不同的,因此摩擦温度是影响产品焊接质量的最重要的指标。而摩擦时间、变形量大小等参数又是直接影响摩擦温度的因素^[9]。一般情况下,随着轴向力和摩擦扭矩的不断增加,摩擦因数增大,摩擦加热功率提高,其焊接界面温度是不断升高的,塑性随之增高,强度随之降低^[10]。因焊接表面存有不同程度的氧化物、灰尘等影响焊接质量的污物,所以在焊接开始阶段,若摩擦变形量不够或顶锻时间较短,就会使焊接界面的污物一直存在于摩擦界面,使接头质量特别是塑性指标降低,严重时会造成焊接接头的未熔合;若摩擦变形量过大或顶锻时间过长,即顶锻压力增加,加热温度增高,就会使焊接界面温度过高,造成焊接接头过热、过烧,焊缝塑性随之降低、强度随之增高的现象^[11]。

2 热处理规范对焊接接头组织、性能的影响

为确保产品质量满足设计要求,得到理想的性能指标,其热处理工艺参数的确定是非常重要的^[12]。本试验焊件焊后均在 900 ℃ 淬火,其组织主要为回火索氏体。回火温度不同对接头性能的影响是不同的。试验中热处理设备选用可控气氛多用炉进行淬火加回火。按照淬火工艺参数相同,回火温度不同进行研究(回火温度分别为:460, 500, 545 ℃)。热处理工艺见表 5^[13]。

表 5 试验热处理工艺

Table 5 Heat Treatment Technology in the test		
序号	淬火工艺参数	回火工艺参数
1	900 ℃×70 min、油冷	460 ℃×150 min
2	900 ℃×70 min、油冷	500 ℃×150 min
3	900 ℃×70 min、油冷	545 ℃×150 min

热处理前后试样件机加成统一样件,不同热处理工艺参数下获得的室温力学性能结果见表 6。

在表 6 中,第 1 组拉伸试样是热处理前的室温力学性能;第 2—4 组分别为 900 ℃ 淬火+460, 500, 545 ℃ 回火温度下的室温力学性能, R_{eL} 值随回火温度提高而呈下降趋势,数值差有 120 MPa,但 A 值随回火温度升高其数值变化不明显^[14]。460 ℃ 温度回火时,其焊缝区的冲击韧性没有明显变化,到 500 ℃

表 6 试样的理化分析数据

Table 6 Physical and chemical analysis data of samples

序 号	试样 编号	$R_{eL} \geq$ 1500 MPa	$A \geq$ 10%	a_{ku} /(J·cm ⁻²)	工艺参数
1	1-1	850	10.5	31, 33	热处理前
	1-2	830	10.5		
2	2-1	1630	10.0	36, 39	900 ℃ 淬火
	2-2	1650	10.5		460 ℃ 回火
3	3-1	1570	12	47, 46	900 ℃ 淬火
	3-2	1570	14		500 ℃ 回火
4	4-1	1550	11.5	34, 32	900 ℃ 淬火
	4-2	1530	10.5		545 ℃ 回火

时有明显少量屈氏体出现,见图 5。回火温度加热到 545 ℃ 时,可获得较好的强度、韧性,接头组织也为均匀的回火索氏体,见图 6。可见,材料的冲击韧性随着回火温度的升高而升高^[15]。

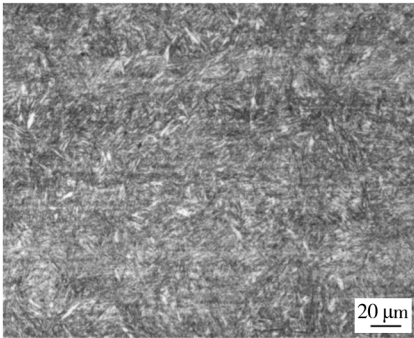


图 5 回火索氏体+少量回火屈氏体

Fig. 5 Tempered martensite + a small amount of tempered troostite

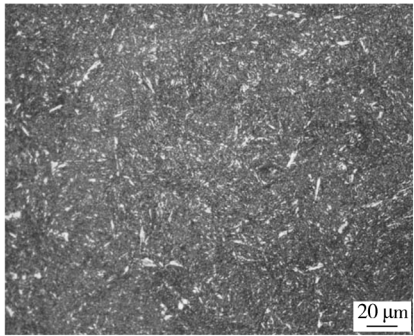


图 6 焊缝组织回火索氏体

Fig. 6 Tempered martensite in the weld structure

3 结论

1) 合理的焊接工艺参数,可以确保超高强钢通过摩擦焊后能够获得满意的焊接接头及接头组织性能。

2) 45CrNiMo1VA 钢的高韧性可以有效地保证焊接接头的塑性、韧性满足产品的要求,使接头组织具有良好的塑性、韧性及强度。

3) 45CrNiMo1VA 钢摩擦焊后的热处理规范的正确确定,是保证焊缝接头具有与母材相当的高强度与高韧性的保证。

参考文献:

- [1] 侯玉华,郝俊明. 超高强度钢的摩擦焊[J]. 航空材料, 1986(4):26—28.
HOU Yu-hua, HAO Jun-ming. Ultra High Strength Steel Friction Welding[J]. Aviation Materials, 1986(4):26—28.
- [2] 柳燕,姜华,钱晓亮,等. D6AC 低合金超高强度钢的 MAG 焊接接头组织与性能分析[J]. 国防制造技术, 2013(3):46—48.
LIU Yan, JIANG Hua, QIAN Xiao-liang, et al. D6AC Low Alloy High Strength Steel of MAG Welding Joint Organization and Performance Analysis[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013(3):46—48.
- [3] 陈杰,张海伟,刘德佳,等. 我国搅拌摩擦焊技术的研究现状与热点分析[J]. 电焊机, 2011, 41(10):92—97.
CHEN Jie, ZHANG Hai-wei, LIU De-jia, et al. The Research Status of Friction Stir Welding Technology in China and Hot Spot Analysis[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(10):92—97.
- [4] 周振丰. 焊接冶金学[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
ZHOU Zhen-feng. Welding Metallurgy[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999.
- [5] 武江,周国萍. 焊接手册. 第2版. [M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
WU Jiang, ZHOU Guo-ping. Manual Welding. 2nd Edition[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.
- [6] TAO Jun, ZHANG Tian-cang, LIU Peng-tao. Numerical Computation of a Linear Friction Welding process[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing, 2007:23—25.
- [7] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
CUI Zhong-qi. The Metallography and Heat Treatment [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.
- [8] 黄凯. 关于摩擦焊接头的机械性能——焊缝物理冶金讨论之一[J]. 钢管技术, 1982(3):36—38.
HUANG Kai. On the Mechanical Properties of the Friction Welding Head: One of Weld Physical Metallurgy of Discussion[J]. Steel Pipe Technology, 1982(3):36—38.
- [9] 雷永平,段立宇. 摩擦焊接头的弱结合界面的断口形貌机理及力学行为的研究[J]. 西北工业大学学报, 1993(增刊):40—42.
LEI Yong-ping, DUAN Li-yu. Friction Welding Head of Weak Combined Mechanism of Interface Fracture Morphology and the Mechanical Behavior of Research[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1993 (Supplement):40—42.
- [10] HASSAN N. Artificial Neural Network Application to the Friction Stir Welding of Al 6061 Alloy to Stainless Steel 304[J]. Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing, 2008:10—13.
- [11] PARK I D, LEE C T, KIM H S, et al. Structural Considerations in Friction Welding of Hybrid Al_2O_3 -reinforced Aluminum Composites [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011:20—22.
- [12] 柳燕,钱晓亮,姜春茂,等. 60Si2Mn 钢摩擦焊后热处理工艺的改进[J]. 精密成形工程, 2011, 3(3):25—28.
LIU Yan, QIAN Xiao-liang, JIANG Chun-mao, et al. 60Si2Mn Steel Friction Heat Treatment after Welding Process Improvements [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(3):25—28.
- [13] 刘雪梅,张彦华,邹增大,等. 先进摩擦焊技术的开发与应用[J]. 热加工工艺, 2006, 35(7):49—53.
LIU Xue-mei, ZHANG Yan-hua, ZOU Zeng-da, et al. The Development and Application of Advanced Friction Welding Technology[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(7):49—53.
- [14] PAVENTHAN R, LAKSHMINARAYANAN P R, BALASUBRAMANIAN V. Optimization of Friction Welding Process Parameters for Joining Carbon Steel and Stainless Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2012, 1:11—13.
- [15] ZHANG L W, PEI J B, ZHANG Q Z, et al. The Coupled Fem Analysis of the Transient Temperature Field During Inertia Friction Welding of GH4169 Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2007, 4:25—27.