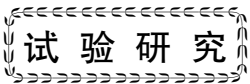


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2021.06.002



钨极氩弧焊热输入与面积稀释率关系的探讨

郭 泉¹, 徐 锴¹, 吕晓春¹, 陈佩寅², 陈 波², 霍树斌²

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028; 2. 哈尔滨威尔焊接有限责任公司, 哈尔滨 150028)

摘 要:针对传统热输入、功率比公式存在不够细化等不足,采用公式推导、材料热物理性能计算等手段,对钨极氩弧焊(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)焊接热输入与面积稀释率的关系进行了研究,初步建立了基于焊接热输入预测镍基合金焊缝稀释率的公式,并进行了试验验证。利用公式推导,得到利用有效热输入 Q_{eff} 预测稀释率的公式 $\delta_{area-pre} = \left[\frac{\mu_m(Q_{eff} - Q_{fm})}{\mu_m(Q_{eff} - Q_{fm}) + Q_{fm}} \right] \times 100\%$ 。计算等效面积 $A_{fm-calc}$ 与实际测量结果 $A_{fm-test}$ 基本一致,利用不同焊接速度下试验结果反推计算出熔化系数 $\mu_m = 0.12 \pm 0.03$,试验验证结果表明,预测的稀释率与测量结果误差在 $\pm 5\%$ 以内,吻合度较好。

关键词:钨极氩弧焊;焊接热输入;稀释率;熔化系数;镍基合金焊丝

中图分类号:TH123;TG434;TG40

文献标志码:A

Investigation on relations between heat input and dilution ratio for GTAW

GUO Xiao¹, XU Kai¹, LYU Xiaochun¹, CHEN Peiyin², CHEN Bo², HUO Shubin²

(1. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China;

2. Harbin Well Welding Co., Ltd., Harbin 150028, China)

Abstract: There are shortcomings in traditional formulas for heat input and power ratio, such as insufficient refinement. The relation between welding heat input and area dilution ratio for Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) was studied by the methods of formula derivation, thermophysical properties calculation and experiment validation, etc., the formula for dilution ratio of nickel base alloy welds predicted based on welding heat input was established preliminarily and was verified by tests. The dilution prediction

formula $\delta_{area-pre} = \left[\frac{\mu_m(Q_{eff} - Q_{fm})}{\mu_m(Q_{eff} - Q_{fm}) + Q_{fm}} \right] \times 100\%$ based on effective heat input Q_{eff} was obtained through formula derivation.

The calculation results of equivalent area $A_{fm-calc}$ were basically in agreement with the results of actual measurement $A_{fm-test}$. The melting coefficient $\mu_m = 0.12 \pm 0.03$ was obtained through reverse deduction using experimental results at different welding speeds. Results show that there is a good coincidence with $\pm 5\%$ error between predicted results and experimental values.

Key words: GTAW; heat input; dilution; melting coefficient; nickel base alloy wires

0 引言

焊缝稀释率对焊接接头的质量与服役性能有非常重要的影响^[1]。不同的场合对于稀释率的控制要求不尽相同,如厚件焊接时,期望热输入一定时稀释率较大;而异种钢焊接时,较小的稀释率

为宜^[2]。

目前,针对稀释率的影响与预测研究主要以工艺参数、热输入与稀释率之间关系的算法优化为主,已有学者^[3-7]分别采用遗传神经网络、Elman 网络算法、响应曲面法、统计分析等不同算法,建立了通过焊接电流、焊接速度等工艺参

收稿日期:2021-01-09 修稿日期:2021-03-06

基金项目:国家科技重大专项资金项目(2018ZX06004001)

数预测稀释率的模型。文献[2]采用统计分析方法,研究了极性、送丝速度、焊接速度、电压四因素耦合对埋弧焊热输入、稀释率、热影响区宽度的影响规律,结果表明焊接热输入对稀释率的影响不明显。焊接工艺参数对稀释率影响具有双重作用^[3],以焊接速度为例,增大焊接速度,一方面会降低母材、焊丝总热输入,从而使稀释率降低;另一方面又会减小单位长度焊缝上焊丝的熔敷量,使稀释率增大,两方面综合作用使焊接速度对稀释率的影响作用难以预测。文献[4]采用 Elman 网络算法预测稀释率,结果表明,随着堆焊速度的增加,稀释率变化不大。同样,热输入对稀释率的影响也是双重的,热输入增大时,作用于母材、填充金属的热输入均增加,热输入对稀释率的影响难以预测。目前对稀释率的本质缺乏全面研究,焊接热输入作用于母材熔化、填充金属熔化、热影响区的比例尚无相关报道,同时,传统的热输入公式存在诸多不足,如未考虑填充金属作用、难以直接与稀释率建立关系

等。采用传统公式研究热输入与稀释率的关系容易得出相反的结论^[8-9]。

文中对稀释率本质、传统热输入的不足进行分析,对传统热输入公式进行分解细化,采用 JMatPro 计算密度、比热等热物理性能,并计算单位体积填充金属需要的热量 q_{fm} ,对热输入与稀释率的关系进行推导,建立由热输入预测稀释率的公式,并通过试验对预测公式进行验证。

1 试验方法

验证试验用焊接材料采用实验室试制 $\varnothing 1.2\text{ mm}$ 的 ERNiCrFe-13 型镍基合金焊丝,其化学成分具体见表 1。采用钨极氩弧焊 (GTAW) 工艺在规格为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的 Q235 钢板上进行堆焊,堆焊尺寸约为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的块状金属。对表面进行磨削加工后,在表面进行单道焊验证试验(见图 1),具体工艺参数见表 2。对焊道 5 个横截面面积进行测量,求取面积算术平均值。

表 1 试验用焊丝化学成分

Tab. 1 Chemical composition of experimental wire

元素	C	Si	Mn	S	P	Nb	Fe	Mo	Al	Ti	Ni	Cr
数值	0.02	0.07	0.96	0.001	0.002	3.01	9.44	4.06	0.28	0.20	余量	29.02

表 2 验证试验焊接工艺参数

Tab. 2 Welding process parameters for verifying test

焊道编号	电流 I / A	电压 U / V	焊接速度 v_{ws} / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	送丝速度 v_f / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	热输入 Q / ($\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$)	功率比 P_R / ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
WS1	220	14	0.20	2	15.40	272.6
WS2	220	14	0.27	2	11.55	363.4
WS3	220	14	0.33	2	9.24	454.3
WS4	220	14	0.40	2	7.70	545.1
WS5	220	14	0.47	2	6.60	636.0

ASME 第 XI 卷 QW-409.29 节给出了 GTAW 的传统的热输入 Q 计算公式:

$$Q = \frac{IU}{v_{ws}} \quad (1)$$

传统的热输入 Q 主要考虑焊接电源的输出功率和焊接速度。实际过程中,基于热效率考虑,提出 Q_{eff} 公式如下:

$$Q_{eff} = \frac{\mu_{eff} IU}{v_{ws}} \quad (2)$$

式中, μ_{eff} 为热效率系数,对于 GTAW 工艺, μ_{eff} 一般为 $0.7 \sim 0.9$ ^[10]。

TATMAN^[9] 采用自主研发的自动液氮量热系统精确测定了 TIG 焊的热效率 μ_{eff} , 本文选取测定

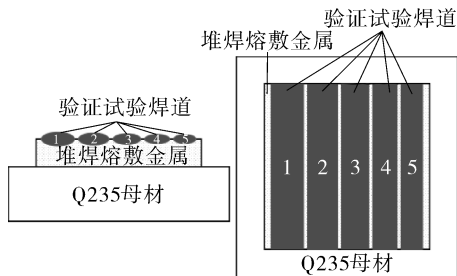


图 1 验证焊接试验示意

Fig. 1 Schematic diagram of verifying welding test

2 分析与推导

2.1 传统热输入、功率比公式的不足

值的平均值 $\mu_{eff} = 0.85$ 。对于 GTAW 工艺, 焊接电弧不仅作用于母材, 还用于熔化填充金属, 式(2)实际为焊接电源的有效热输入, 并未区分 Q_{eff} 分别作用于母材、填充金属的大小, 在研究热输入对稀释率、组织、性能的影响时, 送丝量的影响被忽略, 利用 Q_{eff} 研究热输入对组织、性能的影响时, 可能会得出相反的结论。

ASME 第 XI 卷 QW-409.29 节给出了 GTAW 的另一种热输入估算公式, 即功率比 P_R (Power Ratio), 具体公式如下:

$$P_R = \frac{IUv_{ws}}{v_{fs}A_{wire}} \quad (3)$$

式中, P_R 为功率比, W/cm^2 ; v_{fs} 为送丝速度, cm/s ; A_{wire} 为焊丝的横截面积, cm^2 。

功率比 P_R 综合考虑了焊接热源、焊接速度、填充金属送丝速度, 假设焊缝全部由填充金属形成, 物理意义为单位面积焊缝横截面的功率。显然这与实际情况存在差异, 由于忽略了熔化母材的影响, 难以建立 P_R 与稀释率的关系。

2.2 热输入与面积稀释率关系公式推导

稀释率指焊接过程中, 由于母材熔化混入熔池而引起焊缝金属成分的变化程度, 用母材在焊缝中所占的百分比表示。目前计算稀释率的方法主要包括面积稀释率、化学成分稀释率、厚度稀释率 3 种^[11-13]。

本文稀释率采用面积百分比 δ_{area} 表示, 即熔化母材的横截面面积在整个焊缝横截面面积所占的百分比, 具体示意图见图 2。稀释率 δ_{area} 计算公式^[14]如下:

$$\delta_{area} = \frac{A_{bm}}{A_{bm} + A_{fm}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, A_{bm} 为焊缝中熔化的母材部分横截面面积, mm^2 ; A_{fm} 为焊缝余高部分横截面面积, mm^2 。

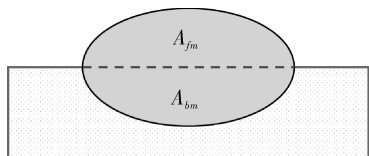


图 2 稀释 δ_{area} 定义

Fig. 2 Definition of dilution δ_{area}

有效焊接热输入 Q_{eff} 主要作用于母材与填充金属, 其公式如下:

$$Q_{eff} = Q_{fm} + Q_{bm} \quad (5)$$

式中, Q_{fm} 为熔化填充金属需要的热输入, kJ/cm ; Q_{bm} 为作用于母材的热输入, kJ/cm 。

(1) 余高部分 A_{fm} 与 Q_{fm} 。

A_{fm} 为填充金属熔化后形成焊缝部分面积, 其可由下式求出:

$$A_{fm} = \frac{v_{fs}A_{wire}}{v_{ws}} \quad (6)$$

按照表 2 中参数对不同焊接速度的下 A_{fm} 进行计算, 计算值 $A_{fm-calc}$ 与测量值 $A_{fm-test}$ 结果如图 3 所示, 可以看出, 预测值与实测值基本一致。

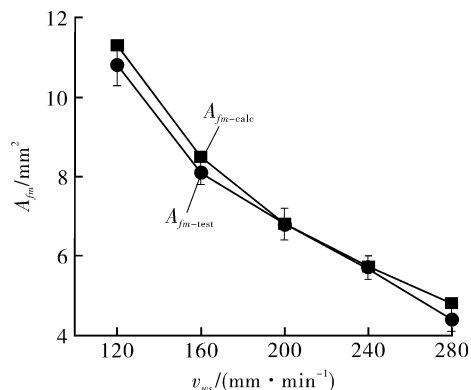


图 3 A_{fm} 预测验证结果

Fig. 3 Verification results for A_{fm} prediction

Q_{fm} 为作用于填充金属的热输入, 主要用于熔化填充金属, 为简化计算, 忽略电阻热、对流散热等其他影响, 即全部用于熔化填充金属, 因此 Q_{fm} 等效为熔化填充金属需要的热输入。为实现 Q_{fm} 计算, 需要将常用的质量比热容 c_{fm} 转变为体积比热容 s_{fm} , 即:

$$s_{fm} = c_{fm}\rho_{fm} \quad (7)$$

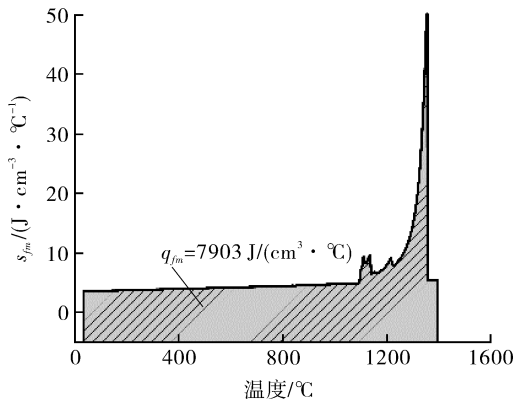
式中, s_{fm} 为体积比热容, $J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$; c_{fm} 为质量比热容, $J/(g \cdot ^\circ C)$; ρ_{fm} 为密度, g/cm^3 。

则熔化单位体积填充金属需要的热量 q_{fm} 为:

$$q_{fm} = \int_{T_0}^{T_m} c_{fm}\rho_{fm} dT \quad (8)$$

式中, T_m 为熔点, $^\circ C$; T_0 为室温, $^\circ C$ 。

基于表 1 中化学成分, 采用 JMatPro 进行材料 $c_{fm}\rho_{fm}$ 热物理性能计算, 然后利用 Origin 软件, 按照公式(8)求取 q_{fm} , 其值大小对应图 4 中阴影部分的面积值, 求取阴影部分面积, 可知 $q_{fm} = 7903 J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$ 。

图4 体积比热容 s_{fm} 随温度变化趋势Fig. 4 Variation trend of temperature with volumetric specific heat capacity s_{fm}

则焊接过程中用于熔化填充金属的热输入 Q_{fm} 公式如下:

$$Q_{fm} = q_{fm} A_{fm} \quad (9)$$

(2) 母材 A_{bm} 与 Q_{bm} 。

对于母材的熔化面积 A_{bm} , 无法通过类似式(6)的方法求出, 需要在对 Q_{bm} 分析的基础上, 结合式(5)反推求出。作用于母材的 Q_{bm} 中用于熔化母材的部分为 Q_{mbm} , 假设熔化系数 μ_m 为固定值, μ_m 物理意义为 Q_{bm} 在 Q_{mbm} 中的占比, 则有以下式:

$$Q_{mbm} = \mu_m Q_{bm} \quad (10)$$

作用于母材的热输入 Q_{bm} 可由式(5)求出。同时 Q_{mbm} 还满足式(11), 母材为熔敷金属, 所以 $q_{bm} = q_{fm}$ 。对于 μ_m , 则由式(12)求出。

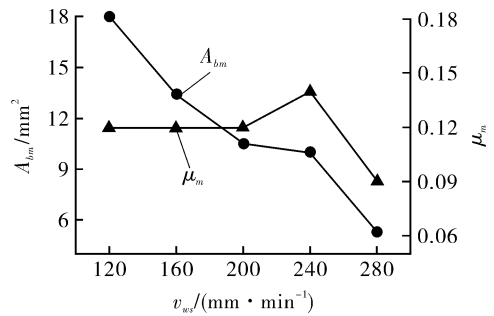
$$Q_{mbm} = q_{bm} A_{bm} \quad (11)$$

$$\mu_m = \frac{Q_{mbm}}{Q_{bm}} = \frac{q_{fm} A_{bm}}{\frac{\mu_{eff} IU}{v_{ws}} - \frac{q_{fm} v_{fs} A_{wire}}{v_{ws}}} \quad (12)$$

图5示出根据不同焊道测量出的母材熔化面积 A_{bm} 以及根据公式(12)估算出的 μ_m 。可以看出, 随着焊接速度 v_{ws} 的增加, 母材熔化面积 A_{bm} 显著减小, 估算的 μ_m 变化不大, 取均值 $\mu_m = 0.12$ 。

结合公式(4)(9)(10)可推导出公式(13), 利用式(13), 便可以用热输入 Q_{eff} 和 Q_{fm} 预测稀释率。

$$\begin{aligned} \delta_{area-pre} &= \left[\frac{\mu_m (Q_{eff} - Q_{fm})}{\mu_m (Q_{eff} - Q_{fm}) + Q_{fm}} \right] \times 100\% \\ &= \left[\frac{0.12 (Q_{eff} - Q_{fm})}{0.12 (Q_{eff} - Q_{fm}) + Q_{fm}} \right] \times 100\% \quad (13) \end{aligned}$$

图5 不同焊接速度 v_{ws} 下的 A_{bm} 、 μ_m Fig. 5 A_{bm} and μ_m at different welding speed v_{ws}

3 试验验证

设计了不同焊接速度下的试验对上述推导公式(13)进行验证, 图6示出不同焊接速度下的焊道截面。各焊道统计5组焊道截面的数据, 统计结果见表3。

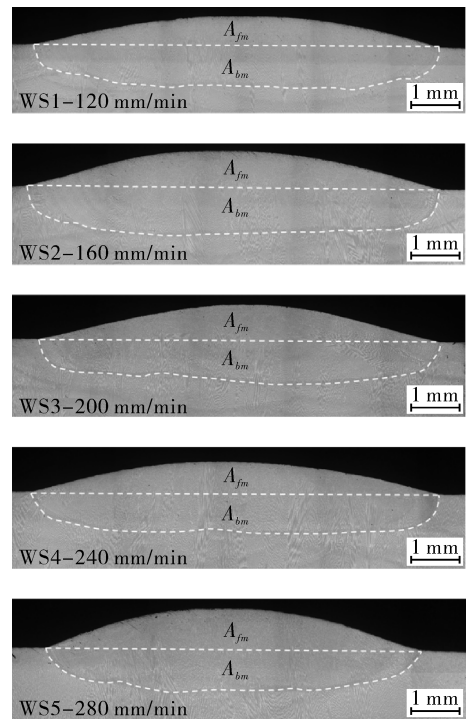


图6 不同焊接速度下的焊道横截面

Fig. 6 Weld bead cross section at different welding speed

由表3可以看出, 稀释率预测值与测量值的误差在 $\pm 5\%$ 内, 吻合度较好, 且随着有效热输入的减小, 稀释率逐渐减小。

表 3 稀释率验证试验结果

Tab.3 Test results of dilution verification

焊道 编号	有效热输入 $Q_{eff}/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	熔化填充金属热输入 $Q_{fm}/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	余高部分横截面 A_{fm}/mm^2	熔化母材部分 横截面 A_{bm}/mm^2	稀释率测量值 $\delta_{area}(\%)$	稀释率预测值 $\delta_{area-pre}(\%)$	预测偏差 (%)
WS1	12.32	0.89	10.74 ± 0.40	18.10 ± 0.23	62.6 ± 0.3	61	-3
WS2	9.24	0.67	8.17 ± 0.09	13.27 ± 0.11	62.4 ± 0.2	61	-2
WS3	7.39	0.54	6.74 ± 0.20	10.40 ± 0.27	60.6 ± 0.5	61	1
WS4	6.16	0.45	5.78 ± 0.10	10.00 ± 0.11	63.5 ± 0.3	64	1
WS5	5.28	0.38	4.20 ± 0.20	5.21 ± 0.07	54.6 ± 0.8	52	-5

4 结论

(1)通过公式推导,建立了利用热输入 Q_{eff} 预测稀释率 $\delta_{area-pre}$ 的公式(见式(13))。

(2)结合 JMatPro 热物理性能计算结果、试验测量,计算出熔化单位体积填充金属需要的热量 q_{fm} 与熔化系数 μ_m ,分别为 $q_{fm}=7\ 903\ \text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, $\mu_m=0.12$ 。

(3)通过试验对公式(13)进行了验证,结果显示计算的稀释率与试验实测值误差在 $\pm 5\%$ 以内,吻合度较好。

参考文献:

[1] 张庆茂,刘文今,杨森,等. 送粉式激光熔覆稀释率的分析模型及其影响因素[J]. 钢铁研究学报, 2002,14(1):11-15.
ZHANG Qingmao, LIU Wenjin, YANG Sen, et al. Analysis model of dilution and related factor in process of powder feeding laser cladding[J]. Journal of Iron and Steel Research,2002,14(1):11-15.

[2] HARI O M, PANDEY S. Effect of heat input on dilution and heat affected zone in submerged arc welding process[J]. Sadhana,2013,38(6):1369-1391.

[3] 梁恩宝,胡绳荪,王志江. 基于响应面法的 Inconel 625 镍基合金 GTAW 堆焊工艺优化[J]. 焊接学报, 2016,37(6):85-88.
LIANG E B, HU S S, WANG Z J. Optimization of GTAW cladding process of Inconel 625 on carbon steel using response surface methodology[J]. Transactions of the China Welding Institution,2016,37(6):85-88.

[4] 何帅,王立君,葛可可. 基于 Elman 网络算法的 Inconel 625 合金堆焊稀释率的控制[J]. 焊接学报,2016,37(11):124-128.
HE S, WANG L J, GE K K. Control of dilution rate of Inconel 625 alloy surfacing based on Elman network algorithm[J]. Transactions of the China Welding Institution,2016,37(11):124-128.

[5] MADADI F, ASHRAFIZADEH F, SHAMANIAN M. Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM[J]. Journal of Alloys and Compounds,2012,510(1):71-77.

[6] YOUSEFIEH M, SHAMANIAN M, SAATCHI A. Influence of heat input in pulsed current GTAW process on microstructure and corrosion resistance of duplex stainless steel welds[J]. Journal of Iron and Steel Research(International),2011,18(9):65-69.

[7] REDDY G M, MOHANDAS T, RAO A S, et al. Influence of welding processes on microstructure and mechanical properties of dissimilar austenitic-ferritic stainless steel welds[J]. Materials and Manufacturing Processes,2005,20(2):147-173.

[8] TATMAN J K, MCCracken S L, HICKS T G. Development of new weld heat input and dilution equations for gas tungsten arc welding: Part 1[C]//Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference: PVP2013-97358. Paris, France, ASME, 2013:1-11.

[9] TATMAN J K. Development of improved equations for weld heat input and dilution control - Part 2[C]// Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference: PVP2018-85154. Prague, Czech Republic, ASME, 2018: V01BT01A065-1~V01BT01A065-16.

[10] ESSAM A, RAMY A, EI-NIKHAILY A, et al. Effect of heat input and filler metals on weld strength of gas tungsten arc welding of AISI 316 weldments[J]. China Welding,2020,29(1):8-16.

[11] 张庆茂,钟敏霖,杨森,等. 送粉式激光熔覆层质量与工艺参数之间的关系[J]. 焊接学报,2001,22(4):51-54.
ZHANG Q M, ZHONG M L, YANG S, et al. The relationship between the processing parameters and the qualities of the coatings formed by powder feeding laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution,2001,22(4):51-54.

(下转第 41 页)

- YANG Haibo, YANG Cheng, FAN Bailin. Analysis of key process parameters in liquid bulge forming of fourarm tube and computer simulation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(1):72-75.
- [9] 张良文. 三四通管件制造新工艺研究[J]. 科技信息(科学·教研), 2007(1):61.
- ZHANG Liangwen. Research on new manufacturing process of tee and cross pipe fittings[J]. Scientific Information, 2007(1):61.
- [10] 刘彩霞. 焊制三通管件塑性极限载荷的有限元分析[D]. 北京:北京化工大学, 2003.
- LIU Caixia. A finite element analysis for plastic limit load of welded piping branch junctions[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2003.
- [11] 万书亭, 韩庆瑶, 赵建涛. 确定极限载荷时增量法中载荷增量步长的选取[J]. 华北电力大学学报, 1997, 24(4):71-76.
- WAN Shuting, HAN Qingyao, ZHAO Jiantao. Analysis of the load incremental factor on limited load by incremental elasto-plastic fem[J]. Journal of North China Electric Power University, 1997, 24(4):71-76.
- [12] 陈天敏, 张强升, 贺振宇, 等. 管线阀门的抗外载荷试验模拟及其安全评估[J]. 流体机械, 2018, 46(8):13-16.
- CHEN Tianmin, ZHANG Qiangsheng, HE Zhenyu, et al. External load resistance test simulation and safety evaluation of pipeline valve[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(8):13-16.
- [13] 王志文, 蔡仁良. 化工容器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- WANG Zhiwen, CAI Renliang. Chemical vessel design[M]. Beijing:China Machine Press, 2005.

作者简介:张鹏(1993), 男, 主要从事压力容器及管道可靠性分析工作, 通信地址:200237 上海市梅陇路 130 号华东理工大学, E-mail: zhangpeng0910@foxmail.com。

通讯作者:惠虎(1974), 男, 教授, 主要从事压力容器及管道结构完整性研究工作, 通信地址:200237 上海市梅陇路 130 号华东理工大学, E-mail: huihu@ecust.edu.cn。

本文引用格式:

张鹏, 惠虎, 黄淞. 异径四通的塑性极限分析[J]. 压力容器, 2021, 38(6):34-41.

ZHANG Peng, HUI Hu, HUANG Song. Plastic limit analysis of reducing cross[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(6):34-41.

(上接第 14 页)

- [12] 徐锴, 冯伟, 邹力维, 等. 工艺参数对带极单层电渣堆焊层成分、成形及性能的影响[J]. 焊接, 2019(12):32-36.

XU Kai, FENG Wei, ZOU Liwei, et al. Effect of process parameters on composition, forming and properties of single-layer electro-slag strip cladding[J]. Welding & Joining, 2019(12):32-36.

- [13] 胡方勤, 王郑, 张青科, 等. 粉末粒度对镍合金熔覆薄层组织及成分的影响[J]. 焊接, 2019(8):17-20.

HU Fangqin, WANG Zheng, ZHANG Qingke, et al. Effects of particle size on microstructure and composition of thin Ni alloy cladding layers[J]. Welding & Joining, 2019(8):17-20.

- [14] 潘浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温

合金稀释率的可控性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4):109-115.

PAN X, ZHAO J F, LIU Y L, et al. Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding repairment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4):109-115.

作者简介:郭泉(1988), 男, 高级工程师, 主要从事核级焊接材料与技术研究工作, 通信地址:150028 黑龙江省哈尔滨市松北区创新路 2077 号哈尔滨焊接研究院有限公司, E-mail: guoxiaogarden@163.com。

通讯作者:徐锴(1973), 男, 研究员, 主要从事核级焊接材料与技术研究工作, 通信地址:150028 黑龙江省哈尔滨市松北区创新路 2077 号哈尔滨焊接研究院有限公司, E-mail: wellxk@sina.com。

本文引用格式:

郭泉, 徐锴, 吕晓春, 等. 钨极氩弧焊热输入与面积稀释率关系的探讨[J]. 压力容器, 2021, 38(6):10-14.

GUO Xiao, XU Kai, LYU Xiaochun, et al. Investigation on relations between heat input and dilution ratio for GTAW[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(6):10-14.