

力学性能不均匀焊接接头的强度预测

朱 亮, 陈剑虹

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 提出一种评价力学性能不均匀焊接接头强度的方法。从管线钢的低匹配焊接接头截取试样, 进行硬度测量和拉伸试验。根据已有的材料硬度值和强度的关系, 确定其屈服应力、最大载荷处的真应力和加工硬化指数。从而利用焊接接头的硬度分布, 得到其对应各区域的局部材料性能。建立焊接接头的有限元模型, 将焊缝和热影响区分割成小区, 输入对应的材料性能参数, 这样使有限元模型中能较准确反映焊接接头的力学不均匀性; 进行有限元计算, 得到相应焊接接头的试样的屈服强度和抗拉强度。与对应拉伸试验结果比较表明, 这种预测焊接接头强度方法的精确度为 $\pm 40\text{MPa}$

关键词: 焊接接头强度; 力学性能不均匀; 有限元; 硬度

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)05-13-05



朱 亮

0 序 言

在焊接接头中, 焊缝、热影响区的化学成分和组织与母材有一定的差异, 不同程度地存在力学性能不均匀的现象。如 TMCP 钢的焊接接头, 由于焊接热循环的作用发生热影响区晶粒粗化, 从而引起热影响区的局部软化; 对于有些高强钢的焊接接头, 其焊缝及热影响区的强度随热输入的不同产生较大的变化^[1]。另外, 工程上为了某些需要, 有意识地采取非等强匹配的焊接接头。如在承受拉伸载荷结构中, 为了保证结构发生塑性变形时, 不让屈服优先发生在容易产生缺陷的焊缝上, 常采用高匹配焊接接头; 对于热影响区软化的细晶粒钢焊接接头, 为了不损失整个接头的承载能力, 在设计上采用高匹配的焊接接头。低匹配焊接接头常用于高强钢的焊接结构, 目的是为了减小冷裂纹倾向, 降低预热温度进而降低焊接成本^[2]。

焊接接头的强度试验, 通常从焊接试件上横向切取含有焊接接头的拉伸试样来进行。但试验发现, 对力学性能不均匀的焊接接头, 试样的取样位置和尺寸对强度测量值有一定的影响, 且这种影响随接头力学性能不均匀程度的增加而加强。要客观评价力学性能不均匀的焊接接头的强度, 应该采用宽板试样。通常认为试样的宽度是板厚的 10 倍以上才能看作为无限大板, 因此这种大宽板试验在实际中难度较大。对性能不均匀结构的力学分析,

有限元分析得到了成功的应用, 在评价力学性能不均匀的焊接接头的强度方面, 已取得了初步的结果^[3,4], 有望成为一种实际有效的方法。作者通过硬度试验, 结合硬度值与材料强度的关系, 确定焊接接头各区域的局部力学性能。然后利用有限元分析模型, 计算相应焊接接头的屈服强度和抗拉强度。并与拉伸试验的结果进行对比, 从而对有限元分析确定力学性能不均匀的焊接接头的强度的准确性进行评价。

1 试 验

1.1 试验方法

试验材料取自国内新开发的管线钢轧制板, 室温下其屈服强度为 606MPa, 抗拉强度为 756MPa, 试板板厚是 14mm, 坡口形式为 V 形, 用埋弧焊进行焊接, 焊丝为 H08Mn, 焊剂为 HJ431。采用 5 种不同的焊接规范施焊, 其焊接工艺参数见表 1。母材和焊缝的化学成分见表 2。

表 1 焊接工艺参数
Tab 1 Welding parameter

试板	电流 I/A	电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	热输入 $E/(kJ \cdot mm^{-1})$
1	450	26.5	9.3	1.3
2	458	30.5	8.8	1.6
3	495	30.5	7.8	1.9
4	456	37.5	7.6	2.3
5	600	34.0	7.3	2.8

收稿日期: 2004-06-09

基金项目: 甘肃省科技攻关项目(GS002-A25-021)

表 2 母材和焊缝的化学成分(质量分数, %)
Table 2 Chemical compositions of base metal and welds

	C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Ni	Mo	B	S	P	Fe
母材	0.07	1.52	0.19	0.043	0.04	0.015	0.15	0.18	0.006	0.005	0.019	余量
焊缝	0.1	1.36	0.45	—	0.02	0.008	0.06	0.02	—	0.015	0.019	余量

拉伸试样和硬度试样的取样方式及试样的几何尺寸如图 1 所示。试样横向垂直通过焊缝, 焊缝处于试样的中间。试样在试板中的取样位置有两种, 分别位于焊缝的上部和根部, 上部试样中心线距试板表面的距离 d 为 4 mm, 根部试样 d 为 9 mm。

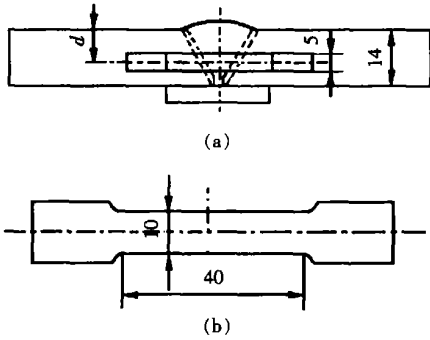


图 1 拉伸试样取样方式及试样尺寸
Fig 1 Specimen extraction and its geometry for tensile testing

维氏硬度试验在试样长度方向中心线上进行, 试验载荷为 294 N。拉伸试验在万能程序试验机上进行, 拉伸速度为 1 mm/min, 试验环境温度为 20 °C, 试样的标距为 25 mm。利用载荷—位移记录曲线, 处理后得到的名义应力—应变的关系曲线, 用引起 0.2% 塑性变形的名义应力来确定屈服强度, 用最大载荷点的名义应力确定抗拉强度。

1.2 试验结果

图 2 给出了 10 种试样的硬度试验结果, 并在图中对应标出显微镜下测量的焊缝及热影响区的宽度, 以及对应试样拉伸试验测量的屈服强度和抗拉强度。可以看出, 在所有试样中, 焊缝的硬度都小于母材的硬度, 接头属于低匹配; 热影响区的硬度呈梯度变化。由于焊接热输入的变化, 以及试样取样位置的差异, 各试样上焊缝和热影响区的宽度都不相同, 硬度分布也有较大的差异。相应的屈服强度和抗拉强度也有较大的变化。

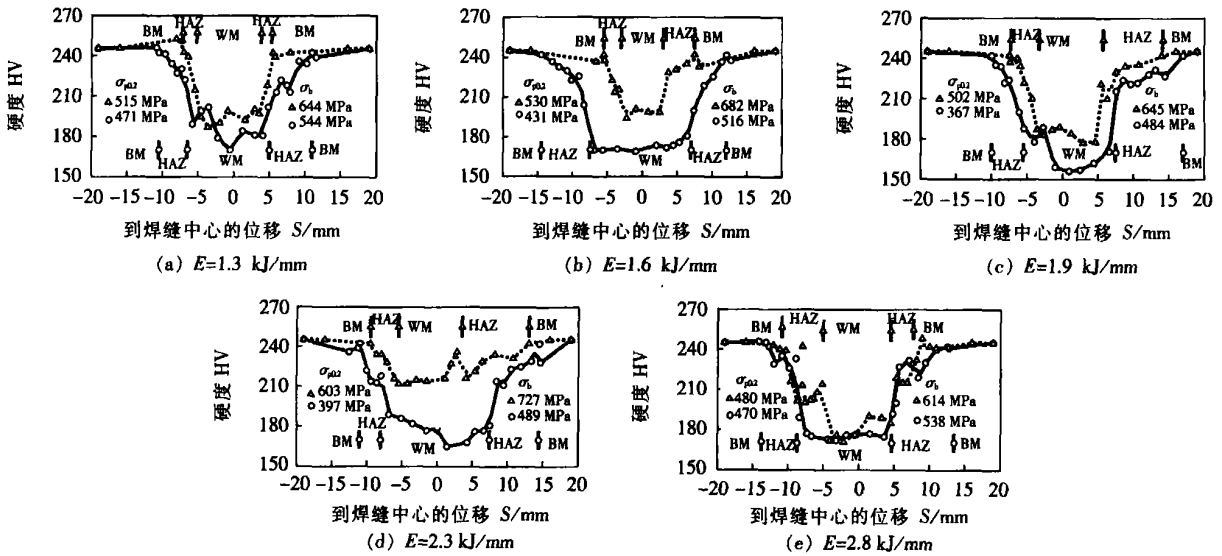


图 2 硬度分布

Fig 2 Hardness distribution

○—上部试样 $d=4\text{mm}$; △—根部试样 $d=9\text{mm}$; BM—母材; WM—焊缝; HAZ—热影响区; $\sigma_{p0.2}$ —屈服强度; σ_b —抗拉强度; E —热输入

2 接头强度的分析模型

2.1 有限元模型

有限元分析的试样的几何尺寸, 与用于试验用试样完全相同, 考虑到试样的对称性, 取试样的 1/4

作为计算对象, 分析试样的网格如图 3 所示。用 ABAQUS 有限元分析软件进行分析, 模拟载荷以均匀分布载荷的形式施加在端面上, 以施加载荷增量来模拟整个加载过程, 在增加载荷的每一步, 记录加载面的载荷与试样标距上的位移, 处理后可得到加

载过程中的名义应力和名义应变的关系曲线。采用与拉伸试验相同的方法确定屈服强度和抗拉强度,屈服强度用引起 0.2% 塑性变形的名义应力来确定,抗拉强度为最大载荷点的名义应力。

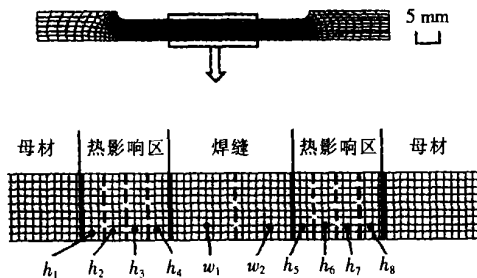


图 3 有限元分析试样网格

Fig 3 Finite element mesh for tensile specimen

用有限元分析力学性能不均匀的焊接接头的强度时,不仅需要接头各部分材料的屈服应力,而且需要提供材料屈服后的流变性能及抗拉强度。用描述试样各部分的弹塑性变形行为的真应力应变曲线,作为有限元计算的材料性能。在给有限元计算输入材料的性能时,只将真应力应变曲线上真应力小于等于材料抗拉强度这部分数据输入;ABAQUS在计算时,当应力超出输入的材料性能数据中的真应力范围时,材料性能的应力响应视为常数,其值等于所输入的应力应变曲线上的最后一个真应力值^[3],也就是说,如果材料的应力达到该值时,材料将持续变形直至应力降至该值以下。

由图 2 所示的接头硬度分布可以看出,接头具有非常复杂的力学性能不均匀性,如热影响区的性能呈梯度变化,即使在焊缝区,上部与根部的性能也存在较大的差异。用有限元方法分析这样的焊接接头时,要获得一定的精确度,必须在有限元模型中对局部的力学性能不均匀性进行细致的描述。为此,根据接头力学性能不均匀的程度,将焊缝和热影响区分区,如图 3 中的 $w_1, w_2, h_1 \sim h_8$ 输入对应的材料模型参数,这样使有限元模型中能较准确反映焊接接头的力学性能不均匀性。所分区数量的多少可根据各区域内硬度值变化的程度来确定。

精确测定焊接接头的局部力学性能,至今仍然没有一个很好的方法。尽管热模拟方法可以研究热影响区的组织与性能,但是,实际焊接条件下的整个热影响区梯度变化的性能,仍无法完全描述。有学者从接头中取出微小试样,借助袖珍拉伸试验和袖珍剪切试验,确定接头局部力学性能,但费时、成本高。硬度试验方便快捷,在工程中应用广泛,硬度与

强度的关系已有相对可信的研究结果,利用这些结果,根据以上所测定的硬度值,可以确定每个试样中接头各部分的真应力应变曲线。

2.2 硬度与真应力应变曲线

Cohoon^[5]研究了钢的屈服强度和硬度之间的关系,发现

$$\sigma_{p0.2} = \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_Y}{0.08} \right)^n HV \quad (1)$$

式中: $\sigma_{p0.2}$ 是钢的条件屈服强度,根据在名义应力应变曲线上,对应 0.2% 的塑性应变的应力所确定; ϵ_Y 是对应 $\sigma_{p0.2}$ 的应变; HV 是维氏硬度值。Yurioka^[6]研究了焊缝金属的抗拉强度和硬度的关系,发现

$$\sigma_b = 3.0 HV + 22.3 \quad (2)$$

式中: σ_b 是钢的抗拉强度,根据在名义应力应变曲线上,对应最大载荷处的应力所确定。

设屈服后塑性变形的加工硬化过程符合幂函数规律,则

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^n \quad (3)$$

式中: σ, ϵ 分别为真应力及真应变; σ_0, ϵ_0 分别为在真应力应变曲线上确定的屈服应力和应变。真应力应变和名义应力应变有如下关系,即

$$\epsilon_{nom} = e^\epsilon - 1 \quad (4)$$

$$\sigma_{nom} = \sigma e^{-\epsilon} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{nom}, \epsilon_{nom}$ 分别为名义应力和名义应变。根据式 (4),可得到

$$\epsilon_{nom}^0 = e^{\epsilon_0} - 1 \quad (6)$$

式中: ϵ_{nom}^0 是对应屈服真应变的名义应变,根据式 (6),可得到

$$\epsilon_Y = \epsilon_{nom}^0 + 0.2\% = e^{\epsilon_0} - 1 + 0.2\% \quad (7)$$

根据式 (4)和式 (7),可得到

$$\epsilon_{0.2} = \ln(1 + \epsilon_Y) = \ln(e^{\epsilon_0} + 0.2\%) \quad (8)$$

式中: $\epsilon_{0.2}$ 是对应 ϵ_Y 的真应变,由式 (3),可得到

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 \left(\frac{\epsilon_{0.2}}{\epsilon_0} \right)^n \quad (9)$$

式中: $\sigma_{0.2}$ 是对应 ϵ_Y 的真应力,根据式 (5),可得

$$\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2} e^{-\epsilon_{0.2}} \quad (10)$$

将式 (8)、(9)代入式 (10),再将式 (7)和式 (10)代入式 (1),可得

$$\left[\frac{0.08 \ln(e^{\epsilon_0} + 0.2\%)}{\epsilon_0 (e^{\epsilon_0} - 1 + 0.2\%)} \right]^n = \frac{HV(e^{\epsilon_0} + 0.2\%)}{3\sigma_0} \quad (11)$$

根据文献 [7] 的研究结果,对于加工硬化过程符合幂函数规律的材料的拉伸试样,最大载荷处的真应变等于材料的加工硬化指数 n 。由式 (3)可得

$$\sigma_u = \sigma_o \left(\frac{n}{\epsilon_o}\right)^n, \quad (12)$$

式中: σ_u 是对应最大载荷处的真应力, 由式 (12) 和式 (5) 可得

$$\sigma_b = \sigma_o \left(\frac{n}{\epsilon_o}\right)^n e^{-n}. \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (2), 可得

$$\sigma_o \left(\frac{n}{\epsilon_o}\right)^n e^{-n} = 3 \text{ OHV} + 22.3 \quad (14)$$

如果硬度值 HV 已知, 同时考虑到 $\sigma_o = E\epsilon_o$ 的关系, 其中 E 是弹性模量, 求解式 (11) 和式 (14), 可得到 σ_o 和 n , 再根据式 (12), 即可求得 σ_u 。图 4 是其计算结果。

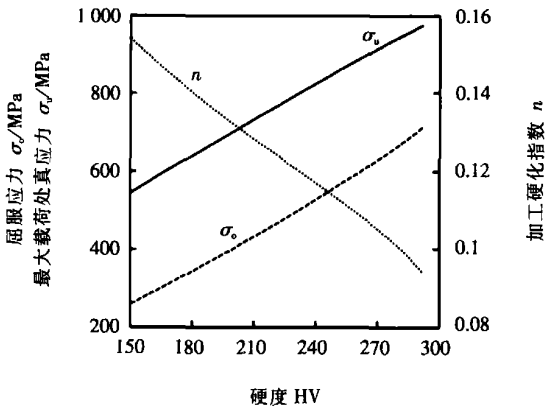


图 4 应力及加工硬化指数与硬度之间的关系

Fig 4 Yield true stress, true stress at maximum load and work hardening exponent vs hardness

3 结果分析

利用图 4 的结果, 根据材料的硬度值, 即可得到该材料真应力应变曲线的相关参数, 即屈服应力 σ_o 、最大载荷处的流变应力 σ_u 和加工硬化指数 n 。用这种方法, 可将图 2 中每个试样的硬度分布, 转化为有限元计算所用的材料性能。将图 3 所示的有限元计算试样进行分区, 输入相应的材料性能, 使之能准确反映对应拉伸试验用试样的力学性能不均匀特性。然后, 用前面所述的有限元分析模型, 确定每个试样的拉伸强度和屈服强度。图 5 是有限元分析结果和试验结果的比较。可以看出, 除其中一个试样以外, 二者的偏差小于 $\pm 40\text{MPa}$ 。

用这种方法确定力学性能不均匀焊接接头的强度, 利用了硬度与强度的公式, 而它是一种经验关系, 随材料的种类的不同存在一定的差别, 其准确性直接影响着最终的分析精确度。通过分析比较表

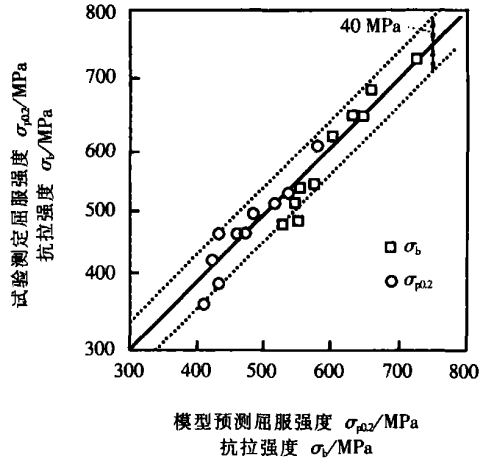


图 5 屈服强度及抗拉强度的模型预测值与试验测定值的比较

Fig 5 Predicted and experimental yield strength and tensile strength

明, 式 (1)、(2) 描述的硬度与强度的关系最适于此试验的母材和焊缝金属。

为了试验方便, 使用尺寸相对小的试样对这种方法的准确性进行了验证, 从有限元分析的过程来看, 这种方法可以用于较大尺寸的试样, 甚至无限大板的强度分析。

4 结 论

(1) 硬度试验和拉伸试验表明, X70 管线钢的低匹配焊接接头, 具有较复杂的力学性能不均匀性。主要表现在焊缝根部的强度明显高于上部, 热影响区的软化呈梯度变化, 且焊接热输入对接头各区的力学性能变化都有影响。

(2) 提出了根据材料硬度值确定其真应力应变曲线的方法, 同时给出了硬度值与屈服应力、最大载荷处的真应力和加工硬化指数之间的关系。

(3) 根据材料硬度值与真应力应变曲线的关系, 将每个试样的硬度分布, 转化为有限元计算所用的材料性能, 使之能准确反映对应试样的力学性能不均匀特性, 通过有限元分析可得到这种接头的强度, 其准确性用拉伸试验得到了验证。

参考文献:

[1] Loureiro A, Itino J R. Effect of heat input on plastic deformation of undematched welds [J]. Journal of Material Processing Technology, 2002, 128: 240-249.

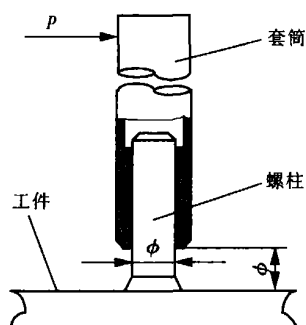


图 3 弯曲试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bend test

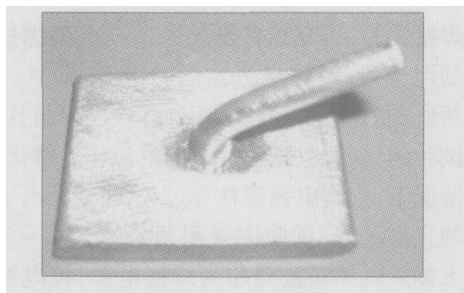


图 4 弯曲接头

Fig. 4 Bend joint

3 结 论

(1) 螺柱送进速度是影响电弧螺柱焊接头质量的一个重要参数。利用电磁式电弧螺柱焊枪进行焊接时,对螺柱送进速度要求的实质是保证螺柱在一定的时间内进入焊接熔池,同时为螺柱提供一个足够大的送进冲力。

(2) 研制出基于单片机系统控制的步进式电弧

螺柱焊枪。焊枪机械结构部分以步进电机为动力机构,螺旋传动装置为运动机构主体,实现电弧螺柱焊过程所需的螺柱运动过程。步进电机的原动力通过螺旋传动装置转化为螺柱运动方向的力。此焊枪可以实现螺柱低速送进时具有足够的挤压力。

(3) 试验证明步进式电弧螺柱焊枪可以顺利实现螺柱低速送进的焊接过程。对焊接接头进行弯曲试验,结果表明,接头具有较高的强度;同时也证明了螺柱低速送进在电弧螺柱焊中的应用是可行的。

参考文献:

- [1] Singleton R C. The growth of stud welding[J]. Welding Engineering 1963 48(7): 27-31.
- [2] Ramasamy Siva. Drawn arc stud welding crossing over from steel to aluminum[J]. Welding Journal 2000 79(1): 35-39.
- [3] 马福临. 螺柱焊在建筑钢结构中的应用及其新型焊机[J]. 钢结构, 2003 18(5): 64-66 70.
- [4] 池 强, 张建勋, 付继飞. 电弧螺柱焊技术的发展与应用[J]. 焊接技术, 2003 32(6): 18-20.
- [5] Shoup T E. Stud welding[J]. Welding Research Council Bulletin 1976 214: 1-22.
- [6] 齐绍荣, 叶振忠, 王 芸. 影响电弧螺柱焊接质量的几个问题[J]. 焊接技术, 2002 31(4): 27-28.
- [7] Chambers H A. Principles and practices of stud welding[J]. PCI Journal 2001 46(5): 46-58.
- [8] 柳咏枝. 螺柱焊焊接工艺[J]. 焊接技术, 2002 31(4): 20-21.

作者简介: 池 强,男,1973年11月出生,博士研究生。主要从事电弧螺柱焊方法及焊接过程行为方面的研究工作,发表论文4篇。

Email: chiqiang2004@sina.com

[上接第 16 页]

- [2] Umekuni A, Masubuchi K. Usefulness of undematched welds for high strength steels[J]. Welding Journal 1997 76(7): 256s-263s.
- [3] Zhu Liang, Chen Jianhong. Strength and deformation in HAZ softened welding joints[J]. Transactions of the China Welding Institution 2004 25(2): 61-65.
朱 亮, 陈剑虹. 热影响区软化焊接接头的强度及变形[J]. 焊接学报 2004 25(2): 61-65.
- [4] Zhu Liang, Chen Jianhong. Characteristics of stress distribution and prediction of strength in heat affected zone softened welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution 2004 25(3): 48-51.
朱 亮, 陈剑虹. 热影响区软化焊接接头应力分布特征及强

度预测[J]. 焊接学报, 2004 25(3): 48-51.

- [5] Cahoon J R, Broughton W H, Kutzak A R. The determination of yield strength from hardness measurements[J]. Metallurgical Transactions 1971 2(7): 1979-1983.
- [6] Yurioka N. Prediction of strength of weld metal[A]. The 54th annual assembly of the international institute of welding[C]. IIV Doc X-2026-2002.
- [7] 布赖恩 厄克林 F. 钢的组织与性能[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 278-281.

作者简介: 朱 亮,男,1964年12月出生,教授。主要从事焊接工艺及设备、焊接结构强度及断裂的研究,发表论文40余篇。

Email: zhu@hit.cn

MAN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Study on drawing force of flux cored wire

LI Zhi xin JIANG

Jian mia HUANG Fu ping TANG Chun tian(Welding Institute Beijing University of Technology Beijing 100022 China). p1-4

Abstract By analyzing the drawing stress of flux cored wire(FCW), a new model for the calculation of the drawing force for FCW was formed. The factors that influence drawing force were also discussed. Mechanical properties of the steel strip, deformation of flux cored wire, the hole size of dies, drawing speed, friction and lubrication conditions had obvious effects on the drawing stress. The drawing stress increased with the speed rise at low speed. At moderate speed the drawing stress decreased. The drawing stress did not change when the speed increase further.

Keywords flux cored wire drawing force math model

Research on shape from shading in welding pool topside height acquisition

LI Lai ping LN Tao CHEN Shan ben(Welding Engineering Institute Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030 China). p5-8

Abstract The general reflectance map equation proposed by Lee and Kuo was introduced and the resolution method was improved. The surface height was calculated from its synthetic image under real imaging characteristics and compared with Lee Kuo. Based on the imaging characteristics of welding process, reflectance model of welding pool was set up. The surface height of welding pool was calculated from its image.

Keywords shape from shading general reflectance map equation imaging characteristics of welding process reflectance model of welding pool surface height of welding pool

Effect of ball milling condition on formation of Sn-0.7Cu alloy

LU Xie XIA Zhi dong LEI Yong ping SHI Yao wu(The Key Laboratory of Advanced Functional Materials Ministry of Education China Beijing University of Technology Beijing 100022 China). p9-12

Abstract The mixed Sn and Cu powder was milled by mechanical ball milling. The milled powders were analyzed by X-ray diffraction, differential thermal analyzer and scanning electron microscope. The effect of ball milling conditions on the formation of Sn-0.7Cu alloy was investigated. The results showed that voltage ball to powder mass ratio and milling time affect the formation of Sn-0.7Cu alloy significantly. The mechanism of mechanical alloying Sn-Cu was that the mechanically induced atom diffusion drives substitutional solid solution and interface dissolution as a result of which Cu_6Sn_5 was formed.

Keywords mechanical alloying Sn-0.7Cu alloy ball milling condition reactive mechanism

Prediction of tensile properties of welded joint with mechanical heterogeneity

ZHU Liang CHEN Jian hong(State Key Lab of Gansu New Nonferrous Metal Materials Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050 China). p13-16-26

Abstract An approach to evaluate the strength of welded joints with mechanical heterogeneity was proposed. The hardness measurement and tensile testing were performed on the specimens which were cut from the undematching joints of pipeline steel. According to the relation between hardness and strength formulae, methods were developed to determine the yield stress, true stress at maximum load and work hardening component from the hardness measurement. Thereby the local material properties across welded joints could be obtained from the hardness distribution on them. Finite element model of welded joints was constructed to calculate their yield strengths and tensile strengths. In this model weld and heat affected zone were divided into small partitions to be given the special material properties. Comparison between the results from finite element analysis and tensile test showed that with this model the strength of welded joints with mechanical heterogeneity could be predicted with an accuracy of ± 40 MPa.

Keywords strength of welded joint mechanical heterogeneity finite element analysis hardness

Weld width prediction based on artificial neural network

YU Xir ping¹, SUN Hua², ZHAO Xiren¹, Alexandre Gavrilov³ (1. School of Automation Harbin Engineering University Harbin 150001 China; 2. Harbin University of Science and Technology Harbin 150080 China; 3. Bauman Moscow State Technical University Moscow 107005 Russia). p17-19-45

Abstract The method of weld width prediction based on artificial neural network (ANN) was studied and the weld quality could be estimated by it. Problems and questions relating to the welding process monitoring system were considered, such as picking up the characteristics of arc welding, welding quality prediction and the application of ANN. The welding quality monitor system based on ANN was designed and its composing structure was given. The weld quality prediction model based artificial neural network is built up and simulation is given. The results of simulation showed that the ANN model could predict the weld width and the welding quality monitor system based on ANN was efficient.

Keywords artificial neural network weld quality prediction system weld width prediction

Thermodynamic calculation and evaluation for Sn-Ag-Cu-Ce lead-free solder alloy system

XUE Song bai¹, CHEN Yan², LÜ Xiao