

The Study of the Relation of 316L Stainless Steel Diffusion Welding Process Parameters Based on the Weibull Distribution and the Reliability

Ziliang An¹, Li Zhang², Yinjun Li², Meifang Hou¹

¹School of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, Shanghai

²Shanghai No. 3 Metro Operation Cooperation, Shanghai

Email: anziliang123@163.com, 13162562998@163.com, mfhhou@sit.edu.cn

Received: Nov. 12th, 2016; accepted: Dec. 9th, 2016; published: Dec. 12th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on an orthogonal experimental design method, optimal welding process parameters are studied on 316L stainless steel diffusion welding joint. Three factors, *i.e.* welding temperature, pressure and holding time, are distinguished. The optimal parameter set is obtained to have welding temperature of 1100°C, welding pressure of 10 MPa and holding time of 3 hrs. At the same time, a statistical estimation is performed for the tensile strength data of the welding joint round bar samples following three-parameter Weibull distribution. Estimated statistical parameters of the distribution are with a position parameter of 147.42, scale parameter of 148.9139 and shape parameter of 1.6336, respectively. Average value of the strength data is 281 MPa.

Keywords

Diffusion Bonding, 316L Stainless Steel, Orthogonal Experimental, Weibull Distribution

基于威布尔分布316L不锈钢扩散焊接工艺参数与可靠性关系研究

安子良¹, 张利², 李音君², 侯梅芳¹

文章引用: 安子良, 张利, 李音君, 侯梅芳. 基于威布尔分布 316L 不锈钢扩散焊接工艺参数与可靠性关系研究[J]. 机械工程与技术, 2016, 5(4): 315-321. <http://dx.doi.org/10.12677/met.2016.54038>

¹上海应用技术学院轨道交通学院, 上海

²上海地铁第三运营有限公司, 上海

Email: anziliang123@163.com, 13162562998@163.com, mfhou@sit.edu.cn

收稿日期: 2016年11月12日; 录用日期: 2016年12月9日; 发布日期: 2016年12月12日

摘要

基于正交试验设计方法, 本文优化了焊接工艺参数对316L不锈钢扩散焊接头的研究, 并对焊接温度、焊接压力和保温时间三个因素进行了试验验证, 得到常温下最佳参数设置为1100℃焊接温度, 10 MPa焊接压力, 3小时保温时间。同时对焊接头的圆棒试样的抗拉强度数据进行三参数威布尔分布。分布的位置参数为147.42, 尺度参数为148.9139, 形状参数为1.6336, 强度数据的平均值为281 MPa。

关键词

扩散焊, 316L不锈钢, 正交实验, 威布尔分布

1. 引言

微型机械存在系统构建内部结构复杂且需严格控制构件加工精度等特点, 熔焊、高能粒子束焊、点焊等方法都不能满足其形状和尺寸加工精度要求, 随着微机电系统与微小型化学机械系统研究的深入, 扩散焊技术因其加工精度高、便于制造复杂构件优势逐渐成为微型化学化工机械系统的首选加工方法[1][2]。

国内外对316L不锈钢与异种材料扩散接头常温性能的研究比较完善[3][4][5], 但很少有关于316L不锈钢同种材料的扩散焊连接的报道, 尤其是关于接头的高温性能和接头高温强度设计准则。正交试验设计是研究多因素多水平的一种非常重要的设计方法, 它是根据因子设计的分式原理从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验, 并对结果进行统计分析的多因子试验方法[6]。采用正交实验设计安排316L不锈钢扩散焊可靠性试验可以减少试验次数和成本, 只需要在所有可能的316L不锈钢扩散焊工艺参数中挑选小部分因子组合进行试验既可确保以最少数的试验获得全部试验中影响性能参数的全部信息[7][8]。因此, 本文采用正交实验设计方法来研究316L不锈钢同种材料的扩散焊连接工艺, 探讨焊接温度、焊接压力和保温时间对316L不锈钢接头的常温短时拉伸性能的影响, 获得最佳的焊接工艺参数, 并对常温下的测试件用威布尔分布预测其抗拉强度。

2. 316L 不锈钢扩散焊正交实验设计

由于316L为超低碳奥氏体不锈钢, 同普通的奥氏体不锈钢相比, 其含碳量低并且容易产生加工硬化, 因此将316L不锈钢焊件待焊表面工艺条件确定为粗糙度0.8 μm, 平面度0.02。避免由于机械加工、焊接批次不同带来的误差, 选用2块φ70×φ50 mm的316L不锈钢圆棒制作对接扩散焊头, 并在焊前对圆棒进行酸洗脱脂。采用3因子3水平的正交试验设计方法, 3个因子分别是焊接温度、焊接压力和保温时间。根据本人的前期实验结果和前人的研究成果, 确定每个工艺参数的变化范围: 焊接温度为980℃~1100℃, 焊接压力为4~10 MPa, 保温时间为1~5小时。焊接过程中, 炉腔的真空度保持在 1.33×10^{-3} Pa, 按照表2的参数组合次序在FJK-2型真空扩散焊机上进行焊接试验。

按照国家标准 GB/T 228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》和 GB/T 4338-2002《金属材料高温拉

伸试验方法》在配备了温控高温炉的岛津材料实验机上进行 20℃短时拉伸试验,拉伸试样标距为 $\phi 5 \times \phi 30$ mm,且焊缝位于试样中间位置。试验结果取三次测试的平均值,以保证试验结果的准确性。

3. 实验结果与分析

表 1 为正交实验排列表和拉伸实验结果,并做了极差分析。表 1 中的 I, II, III 分别表示每个因素的水平一、水平二和水平三, j 表示第 j 列; I_j, II_j, III_j 分别表示对应的第 j 列的各指标之和。极差 R_j 表示该因素的指标均值中最大值和最小值之差,通过其大小可以判断各因素对接头性能影响的强弱。判断的原则是:极差越大,其所对应的因子对实验结果影响就越大。由表 1 可知道 $R_2 > R_1 > R_3$,也就是说因子 2 (焊接压力)对接头的常温机械性能影响最大,其次是因子 1 (焊接温度),再次是因子 3 (保温时间)。

4. 实验结果与分析

4.1. 分布类型的判断

根据 316L 不锈钢扩散焊测试样件的抗拉强度数据,运用 K-S 检验方法分别对指数分布、正态分布和威布尔分布进行拟合优度检验[9],其检验结果如表 2 所示。

Table 1. Orthogonal experimental parameters and tensile strength at normal temperature
表 1. 正交实验参数和常温抗拉强度

实验编号	焊接温度 (°C)	焊接压力 (MPa)	保温时间 (H)	Y _i (抗拉强度) MPa	Y _i ²
1	980	4	1	217.5	47,310
2	980	7	3	255.5	65,280
3	980	10	5	300.5	90,300
4	1050	4	3	168.9	28,530
5	1050	7	5	293.7	86,260
6	1050	10	1	280.2	78,510
7	1100	4	5	289.4	83,750
8	1100	7	1	236.3	55,840
9	1100	10	3	484.2	234,450
I _j	773.5	675.8	734		
II _j	742.8	785.5	908.6	$\sum_{i=1}^9 Y_i$	$\sum_{i=1}^9 Y_i^2$
III _j	1009.9	1064.9	883.6	2526.2	770,230
R _j	267.1	389.1	174.6		

Table 2. Fitted results of the distribution of normal temperature tensile strength
表 2. 常温抗拉强度各类型分布的拟合结果

分布类型	测试统计量	假设临界值	结论
指数分布	0.4160	0.4300	服从
正态分布	0.3362	0.4300	服从
威布尔二参数布	0.3005	0.4300	服从
威布尔三参数分布	0.2346	0.4300	服从

根据表 2 的数据可知, 316L 不锈钢扩散焊测试样件的抗拉强度数据在常温时服从指数分布、正态分布、威布尔分布。由于标准的二参数和三参数威布尔分布能够拟合各种类型的寿命数据, 当其形状参数分别取特定的数值时, 它接近于指数分布、正态分布等分布模型, 因此本文针对威布尔分布对其进行研究[10]。

4.2. 威布尔分布函数

威布尔分布的累积失效概率函数和概率密度函数为:

$$F_{(t)} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right], t \geq \gamma > 0 \quad (1)$$

$$f_{(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right], t \geq \gamma > 0 \quad (2)$$

其中: γ 为位置参数, 当 $\gamma = 0$ 时, 威布尔分布为两参数威布尔分布; η 为尺度参数; β 为形状参数。

威布尔分布是根据最薄弱环节模型或串联模型导出的, 充分反映材料缺陷和应力集中源对材料疲劳寿命的影响, 而且具有递增的失效率, 所以因某一局部失效而导致全局停止运行的原件、部件、设备等的寿命都可以看做服从威布尔分布, 机械中的疲劳强度、抗拉强度、磨损寿命、腐蚀寿命大多数服从威布尔分布。

威布尔分布的形状参数 β 决定分布曲线的形状; 威布尔分布的尺度参数 η 起缩小和放大横坐标尺度的作用, 但不影响分布的形状; 威布尔分布的位置参数 γ 也称为最小保证寿命, 产品在 $t = \gamma$ 以前不发生失效, 位置参数 γ 决定了曲线的起始位置。

4.3. 威布尔分布参数的估计方法以及参数值的确定

目前威布尔分布参数的估计方法有很多种, 比如极大似然估计、最小二乘法估计、图解法估计、线性回归估计法等。图解法估计要求样本数量大而且拟合度低; 最小二乘法和极大似然方法适合完全样本、无替换定数截尾样本、无替换定时截尾样本, 通常极大似然方法参数估计要比最小二乘方法估计精度高, 而最小二乘方法比极大似然方法容易计算, 本文所用数据无截尾样本, 因此更适合极大似然方法估计。

设数据列为, 令 Q 为待估的模型参数列, 则对数似然函数为:

$$\ln[L(\theta/t)] = \sum_{i=1}^n \left[\ln(\beta) + (\beta-1)\ln(t_i - \gamma) - \beta \ln(\eta) - \left(\frac{t_i - \gamma}{\eta}\right)^\beta \right]$$

根据两参数、三参数威布尔分布的参数估计方法, 利用 MATLAB 软件解出下面方程组得到各项参数, 所得结果列于表 3 中。

$$\partial \ln[L(\theta/t)] / \partial \beta = 0, \partial \ln[L(\theta/t)] / \partial \eta = 0, \partial \ln[L(\theta/t)] / \partial \gamma = 0,$$

由表 3 可知, 在常温抗拉强度威布尔分布拟合中, 三参数威布尔分布拟合在测试统计量最小的情况下和相关系数最优的情况下都比二参数威布尔分布拟合的效果要好; 根据上面求得的威布尔分布各参数结果, 利用 MATLAB 进行分析并绘制出三参数下的威布尔图形及源数据的分布情况, 如图 1 所示。

在威布尔概率图纸中, 拟合出的曲线越接近于直线, 说明该组数据拟合的效果越好。根据此原则, 由图 1 可知, 所求出的三参数威布尔分布对源数据的拟合程度还是比较好的。如果威布尔分布的参数估计方法不同则所拟合出的曲线结果也会有所偏差, 文献[11]-[16]都是对威布尔分布的参数估计的研究。

Table 3. Weibull distribution fitting of tensile strength at normal temperature
表 3. 常温抗拉强度威布尔分布的拟合结果

威布尔分布	测试统计量	检验统计量	位置参数	尺度参数	形状参数	相关系数
两参数	0.3005	0.4300	0	311.2264	3.3945	0.9307
三参数	0.2402	0.4300	147.4200	148.9139	1.6336	0.9550

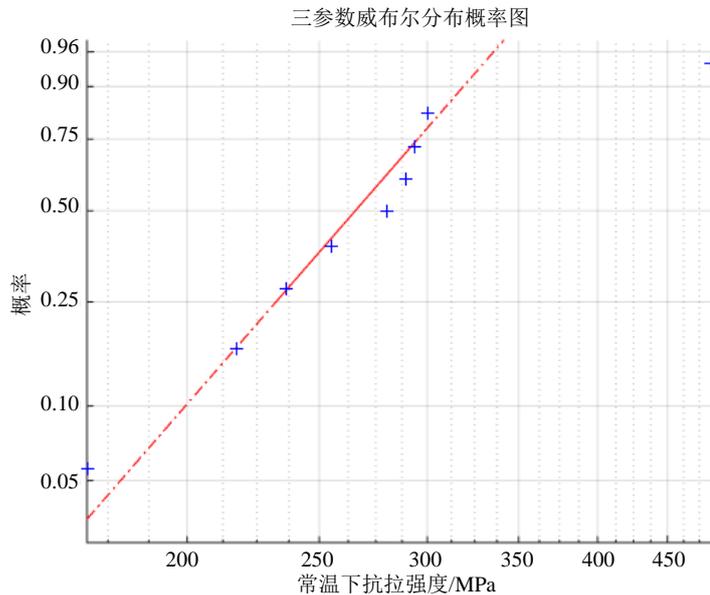


Figure 1. The probability of three parameter Weibull distribution under normal temperature

图 1. 常温下三参数威布尔分布概率图

4.4. 可靠性分析

由以上分析可知, 316L 不锈钢扩散焊的抗拉强度在常温下服从三参数威布尔分布, 其累计失效分布函数为:

$$F_{(t)} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - 147.42}{148.9139} \right)^{1.6336} \right] \quad (3)$$

316L 不锈钢扩散焊抗拉强度的可靠性分布曲线如图 2 所示。

316L 扩散焊的平均抗拉强度为:

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R_{(t)} dt = \gamma + \eta \times \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (4)$$

由此可知, 316L 不锈钢扩散焊在常温下的平均抗拉强度约为 281 MPa。

5. 结论

通过以上分析和研究, 可以得到以下几个基本结论:

1) 正交实验设计方法能成功应用于 316L 不锈钢扩散焊的可靠性工艺参数组合设计中, 并且可以减少试验所需的样件数量, 降低试验成本。

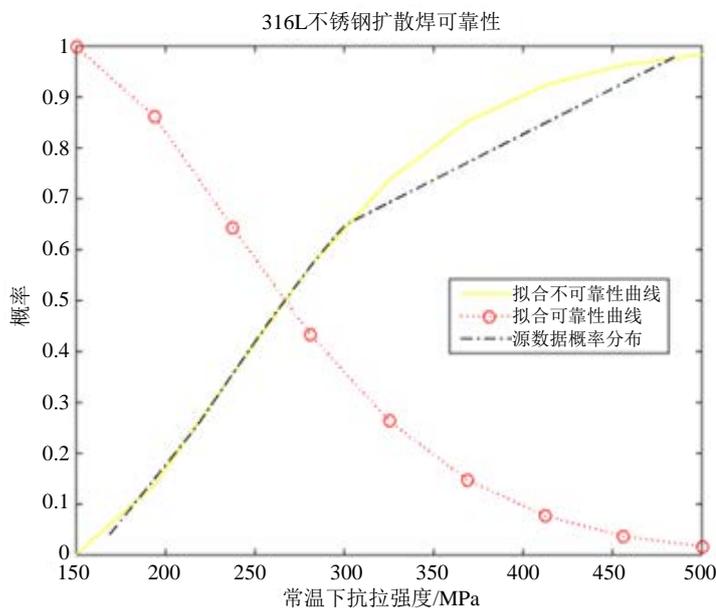


Figure 2. Reliability curve at normal temperature

图 2. 常温下可靠性曲线

2) 基于试验结果的极差分析表明, 在常温下影响 316L 扩散焊焊点可靠性的因素的大小顺序为: 焊接压力对接头的机械性能影响最大, 其次是焊接温度, 再次是保温时间; 本次研究的最优工艺参数为: 焊接温度 1100℃, 焊接压力 10 MPa, 保温时间 3 H。

3) 规格为 $\varphi 70 \times \varphi 50$ mm 的 316L 不锈钢圆棒测试样件的寿命在常温下服从位置参数为 147.42, 尺度参数为 148.9139, 形状参数为 1.6336 的威布尔分布; 316L 不锈钢圆棒测试样件在常温下的平均焊接寿命为抗拉强度 281 MPa。

参考文献 (References)

- [1] 李京龙, 孙福, 熊江涛, 等. 不锈钢分层实体扩散焊制造中的变形控制[J]. 铸造技术, 2006, 27(11): 1235-1237.
- [2] Takeda, T., Kunitomi, K., Horie, T., et al. (1997) Feasibility Study on the Applicability of a Diffusion-Welded Compact Intermediate Heat Exchanger to Next-Generation High Temperature Gas-Cooled Reactor. *Nuclear Engineering and Design*, **168**, 11-21. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(96\)01361-1](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(96)01361-1)
- [3] Nishi, H., Araki, T. and Eto, M. (1998) Diffusion Bonding of Alumina Dispersion-Strengthened Copper to 316L Stainless Steel with Interlayer Metals. *Fusion Engineering and Design*, **39-40**, 505-511. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(98\)00233-6](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(98)00233-6)
- [4] Nishi, H. and Kikuchi, K. (1998) Influence of Brazing Conditions on the Strength of Brazed Joints of Alumina Dispersion-Strengthened Copper to 316 Stainless Steel. *Journal of Nuclear Materials*, **258-263**, 281-288.
- [5] Kliauga, A.M., Travessa, D. and Ferrante, M. (2001) Al₂O₃/Ti Interlayer/AISI304 Diffusion Bonded Joint: Microstructural Characterization of the Two Interfaces. *Materials Characterization*, **46**, 65-74. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(00\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00095-4)
- [6] 杨德. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 171-171.
- [7] 黄春跃, 周德俭, 吴兆华. 基于正交试验设计的塑封球栅阵列器件焊点工艺参数与可靠性关系研究[J]. 电子学报, 2005, 33(5): 788-792.
- [8] 安子良, 轩福贞, 涂善东. 316L 不锈钢扩散焊接工艺与接头性能的研究[J]. 上海应用技术学院学报, 2012, 12(4): 257-260.
- [9] 何正风. MATLAB 概率与数理统计分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [10] 凌丹. 威布尔分布模型及其在机械可靠性中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2010.

- [11] 傅惠民, 高镇同. 确定威布尔分布三参数的相关系数优化法[J]. 航空学报, 1990, 11(7): A322-A327.
- [12] 张秀之. 概率权重矩法及其在 Weibull 分布参数估计中的应用[J]. 海洋预报, 1994, 11(3): 56-61.
- [13] 史景钊, 蒋国良. 用相关系数法估计威布尔分布的位置参数[J]. 河南农业大学学报, 1995, 29(2): 167-171.
- [14] 郭必柱, 邓建. 可靠性分析威布尔三参数估计方法比较分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(25): 6117-6122.
- [15] 赵冰锋, 吴素君. 三参数威布尔分布参数估计方法[J]. 金属热处理, 2007(增刊 1): 443-446.
- [16] Elmahdy, E. and Aboutahoun, A. (2013) A New Approach for Parameter Estimation of Finite Weibull Mixture Distributions for Reliability Modeling. *Applied Mathematical Modelling*, **37**, 1800-1810.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.04.023>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: met@hanspub.org