

胶接、胶焊与点焊接头剪切拉伸疲劳行为

王华锋, 王宏雁, 陈君毅

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 通过剪切拉伸疲劳试验测定车用结构胶接接头、胶焊接头和点焊接头在不同应力水平下的疲劳寿命. 基于载荷-寿命曲线在单对数坐标下为指数曲线段这一假设, 利用疲劳试验数据拟合出载荷-寿命曲线, 以此表征三种接头的疲劳性能. 同时, 对胶接接头、胶焊接头和点焊接头的疲劳行为进行对比分析. 研究表明: 三种连接方式的疲劳试验数据具有较好的规律性; 拟合结果证实了三种接头载荷-寿命曲线在单对数坐标下为指数曲线段这一假设的正确性; 胶接接头的疲劳强度最高, 而点焊接头最低; 胶焊接头的疲劳断裂行为比胶接接头更为安全; 通过胶焊工艺可以有效提高车身接头的疲劳寿命等. 研究结论为车用结构胶接技术的应用提供了参考依据.

关键词: 胶焊接头; 胶接接头; 载荷-寿命曲线; 疲劳行为
中图分类号: TG 495, TG 498, TG 405 **文献标识码:** A

Shear Tension Fatigue Behavior of Bonded Joint, Weldbonded Joint and Spot-welded Joint

WANG Huafeng, WANG Hongyan, CHEN Junyi

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A test was made on the fatigue life of structural bonded joints, weldbonded joints and spot-welded joints under different levels of stresses. Based on the hypothesis that load-life curve in single logarithm coordinate should be exponential curve, load-life curves of three kinds of joints were fitted by using of fatigue test data. Thus, fatigue performance of three kinds of joints was able to be described by these curves. And, a comparative analysis was made of the fatigue behavior of bonded joints, weldbonded joints. The study show that distribution of these fatigue test data follows a certain law. The fitted result proves that the hypothesis that load-life curve in single logarithm should be exponential curve is right. Fatigue strength of bonded joints is the highest of the three

kinds of joints. On the contrary, fatigue strength of spot-welded is the lowest. Fatigue rupture behavior of weldbonded joint is more dangerous than that of bonded joint. Fatigue life of body joints can be improved by bonded process. These conclusions provide references for application of structural adhesive to vehicles.

Key words: weldbonded joint; bonded joint; load-life curve; fatigue behavior

目前, 轿车车身承载结构的连接工艺仍以点焊为主. 但随着新型车用结构胶的研发及胶接性能的大大提升, 胶接工艺已倍受众多轿车厂家的重视. 同时, 车身轻量化材料的应用也促进了胶接工艺的普及. 应用上的需要促进了关于胶接和胶焊接头力学性能研究, 疲劳行为研究也是其中之一, 国内外目前已经取得一些研究成果. 常保华等^[1-3]对胶接接头、点焊接头(单焊点)和胶焊接头(单焊点)进行了高频疲劳试验(90~110 Hz), 对接头的疲劳强度进行对比分析, 并研究了点焊接头的疲劳行为. 尹为恺^[4]通过高频拉压疲劳试验对铝合金胶焊接头、铆接和点焊接头的疲劳性能进行测试与对比, 验证这种拉压疲劳性能测定方法的有效性. Wang P C^[5]等比较了铝合金拉剪接头在胶焊、点焊和胶接三种不同连接方式下的疲劳强度, 发现在不同厚度下, 胶焊接头疲劳寿命均大于点焊接头, 最大可达到10倍于点焊接头的疲劳强度. 在试验中还观察到两种不同的失效形式: 焊点的断裂和胶的撕裂. Arne Melander^[6]等做了高强度胶焊接头疲劳寿命试验方面的研究. 到目前为止, 关于车用镀锌钢板胶接接头和胶焊接头疲劳行为的试验研究仍非常罕见. 考虑到镀锌钢板在轿车车身结构中的广泛应用, 本文选用车用镀锌钢

收稿日期: 2010-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50975208)

第一作者: 王华锋(1975—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽车车身结构安全性. E-mail: whf228@sohu.com

通讯作者: 王宏雁(1962—), 女, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为汽车车身结构安全性. E-mail: why-sos@vip.sina.com

板和结构胶来制作胶接、胶焊接头,通过低频疲劳试验测试胶接、胶焊接头的疲劳寿命,并拟合接头的载荷-寿命曲线,同时对胶接和胶焊接头的疲劳行为进行研究.所得结论可为车用结构胶胶接接头和胶焊接头的抗疲劳设计提供相关参考依据.

1 接头结构尺寸、材料与工艺

1.1 结构尺寸

试验中设计的三种接头均由两块钢板搭接而成.胶焊接头的具体形状与尺寸如图 1 所示.与胶焊接头相比,胶接接头仅缺少两个焊点,点焊接头仅缺少胶层,其余均完全相同.

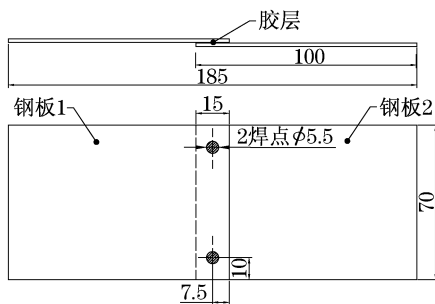


图 1 胶焊接头形状与尺寸(单位:mm)

Fig.1 Form and dimension of weldbonded joint (unit:mm)

1.2 材料与制作工艺

接头所用材料为车用镀锌钢板与车用结构胶.其中,钢板为车用镀锌钢板,厚度为 1.6 mm.其化学和机械性能分别见表 1 和表 2.车用结构胶采用某型号车用环氧树脂结构胶.

表 1 钢板化学成分

Tab.1 Chemical composition of steel plate

元素	C	Mn	P	S	Al	Si	Fe
含量/%	0.120	1.500	0.030	0.030	0.015	0.500	余量

表 2 钢板机械性能

Tab.2 Mechanical performance of steel plate

屈服强度/MPa		抗拉强度/ MPa	伸长率/%		应变硬化系数 Min
Min	Max		50 mm	80 mm	
340	420	410	22	20	0.13

制作三种连接方式接头,分别采用胶接、点焊和胶焊工艺.在制作胶接接头时,直接用刮胶刀涂胶,两块钢板粘接好以后,用夹子夹紧固定,然后放入烤箱中加热固化,胶层厚度一般在 0.2~0.5 mm 之间.制作点焊接头时,焊点直径控制在 5~6 mm 之

间,焊透值为 40%~50%,压坑深度为 15%.制作胶焊接头采用先涂胶、后点焊的工序.

2 试验条件、方法与步骤

2.1 试验条件

为模拟车身结构接头在实际工况中响应频率,疲劳载荷振动频率 20~30 Hz;应力循环特征 $R = 0.1$;胶接、胶焊接头在试验过程中的温度不得高于 30℃.

2.2 方法与步骤

首先测定胶接、胶焊和点焊接头的静态剪切拉伸破坏载荷;其次确定疲劳试验的加载应力水平;最后进行疲劳试验并记录结果.通过静态剪切拉伸试验测试,胶接接头、胶焊接头和点焊接头的静态剪切拉伸破坏载荷分别为 30.41, 24.60 和 16.53 kN.在疲劳试验中,胶接接头的应力水平共分为六级,疲劳循环载荷的峰值分别为其静态剪切拉伸破坏载荷的 0.6 倍、0.5 倍、0.4 倍、0.35 倍、0.3 倍和 0.25 倍;胶焊接头的应力水平共分为六级,疲劳循环载荷的峰值分别为其静态剪切拉伸破坏载荷的 0.5 倍、0.4 倍、0.35 倍、0.3 倍、0.25 倍和 0.2 倍;点焊接头应力水平共分为五级,疲劳循环载荷的峰值分别为其静态拉伸破坏载荷的 0.5 倍、0.4 倍、0.3 倍、0.25 倍和 0.2 倍.

试验采用 Instron1343 电液伺服疲劳试验机.每种接头在同一应力水平下做 3~5 次疲劳试验,试验中严格控制载荷大小.接头疲劳失效时停止试验.若循环次数超过 500 万次而接头仍不失效,也停止试验.接头疲劳失效定义如下:点焊接头疲劳失效是指在焊点或其边缘周围处产生肉眼可见裂纹;胶接接头疲劳失效是指在胶接处彻底断裂;胶焊接头疲劳失效是指在焊点或其边缘周围处产生明显裂纹,且胶接处彻底断裂.

3 试验结果处理

3.1 处理方法

疲劳试验的目的是研究三种连接方式对接头疲劳强度的影响.为此,首先对试验结果进行处理,即利用散点图剔除掉偏差很大的数据,然后利用剩余有效试验数据来拟合接头载荷-寿命曲线,以表征三种接头的疲劳性能.处理方法与步骤如下:①绘制散点图,即把每种接头的所有疲劳试验数据都绘制

在散点图中(见图2).②基于载荷-寿命曲线在单对数坐标上为指数函数曲线段的假设,利用每种接头的全部疲劳试验数据拟合最佳指数曲线,如图2中曲线所示.③考虑到疲劳试验数据往往具有较大的发散性,应剔除掉偏差很大的试验数据.剔除的数学依据是:如果疲劳试验所测得的某一应力水平下的疲劳寿命与拟合曲线上的相应疲劳寿命相差在10倍左右或以上,则认为该试验数据偏差很大,如图2中“×”所表示的数据.④利用剩余的有效试验数据(如图2中“+”所表示的数据),计算每一应力水平下的平均疲劳寿命,以此作为其疲劳寿命 N ,并将全部有效试验数据(N, F_{\max})换算成($\text{Lg}N, F_{\max}$).

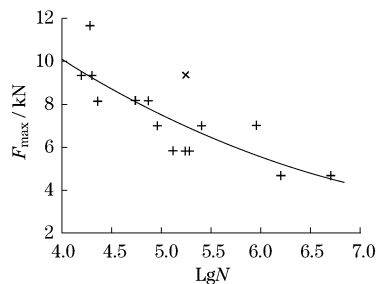


图2 胶焊接头试验数据散点图

Fig.2 Test data points of welded joints

3.2 三种接头的疲劳 S-N 曲线

一般地,根据材料疲劳 S-N 曲线在双对数坐标上为直线段的假设,采用最小二乘法可以确定出最佳的拟合直线.相类似,基于载荷-寿命曲线在单对数坐标上为指数曲线段的假设,以拟合最佳指数曲线,具体实现通过软件 SPSS 的指数拟合功能.考虑到低周疲劳($N < 10^4$)应该用应变-寿命曲线表征,这里所拟合的疲劳曲线均为 $N > 10^4$ 范围内的疲劳载荷-寿命曲线(见图3和图4).结果表明:疲劳试验数据有较好规律性;所拟合的胶焊接头、胶接接头和点焊接头载荷-寿命曲线相关系数分别为0.926,0.991和0.999,从而证实了疲劳载荷-寿命曲线在单对

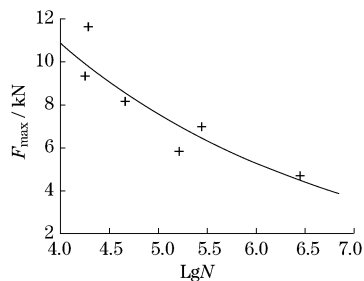


图3 胶焊接头载荷-寿命曲线

Fig.3 Load-life curve of welded joint

数坐标上为指数曲线段这一假设的正确性;胶接接头的疲劳强度最高,而点焊接头最低.

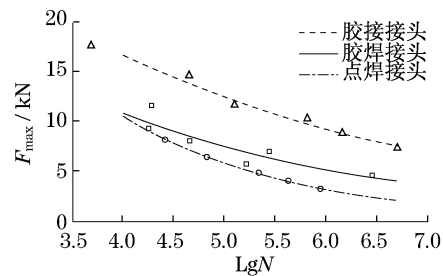


图4 胶接、点焊和胶焊接头的载荷-寿命曲线

Fig.4 Load-life curves of bonded joint, spot-weld joint and welded joint

4 三种接头疲劳行为研究与对比分析

4.1 三种接头疲劳破坏形式与对比分析

疲劳试验观察发现:全部接头的疲劳破坏都发生在连接处.其中,胶接接头的疲劳破坏大多表现为胶层断裂和镀锌层撕裂(见图5),少数表现为胶层断裂(见图6).点焊接头的疲劳破坏大多表现为焊点热影响区边缘开裂并向接头两侧扩展(见图7),少数表现为焊点断裂(见图8).胶焊接头的疲劳破坏表现为胶层断裂和焊点失效.其中,大多数胶焊接头在焊点热影响区边缘产生裂纹并扩展(见图9),少数在焊点处发生断裂或撕裂(见图10)由此可知:胶接接头疲劳强度主要取决于胶层的粘结强度和镀锌层的粘

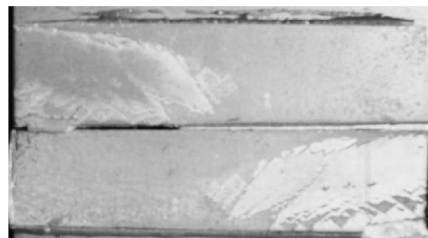


图5 胶接接头疲劳破坏形式 I

Fig.5 Fatigue failure type I of bonded joint

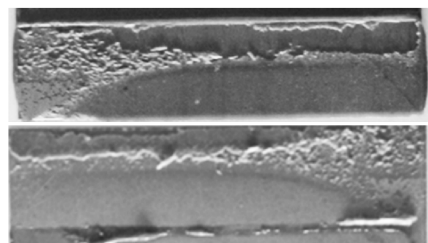


图6 胶接接头疲劳破坏形式 II

Fig.6 Fatigue failure type II of bonded joint

附强度;点焊接头疲劳强度主要取决于焊点质量;而胶焊接头的疲劳强度则与胶层、镀锌层和焊点等密切相关.



图 7 点焊接头疲劳破坏形式 I

Fig.7 Fatigue failure type I of spot-welded joint

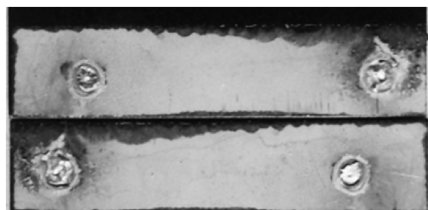


图 8 点焊接头疲劳破坏形式 II

Fig.8 Fatigue failure type II of spot-welded joint



图 9 胶焊接头疲劳破坏形式 I

Fig.9 Fatigue failure type I of weldbonded joint

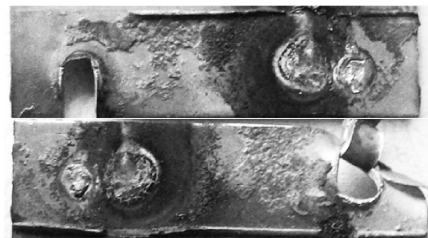


图 10 胶焊接头疲劳破坏形式 II

Fig.10 Fatigue failure type II of weldbonded joint

疲劳试验结果表明:所有接头在发生疲劳破坏以后,其连接处都产生不同程度的塑性变形.胶接接头塑性变形较小(见图 11),而点焊接头和胶焊接头的塑性变形较大(见图 12 和图 13).其原因是:胶接接头承载面积大,应力集中要小得多;而点焊接头的承载面积小,且在焊点热影响区边缘的应力集中系

数很大.胶焊接头胶层破坏之后,其疲劳破坏与点焊接头基本一致.



图 11 胶接接头塑性变形

Fig.11 Plastic deformation of bonded joint



图 12 点焊接头塑性变形

Fig.12 Plastic deformation of spot-welded joint



图 13 胶焊接头塑性变形

Fig.13 Plastic deformation of bonded-welded joint

4.2 三种接头疲劳破坏过程分析

疲劳试验观察发现:点焊接头的疲劳裂纹首先产生于焊点热影响区边缘,并向接头两侧扩展,裂纹扩展方向基本垂直于拉伸载荷方向.常保华等已对点焊接头的疲劳失效过程进行了比较深入的研究,这里就不再赘述.本节主要对胶接和胶焊接头的疲劳失效过程进行分析.

4.2.1 胶接接头疲劳破坏过程分析

在不共线的剪切拉伸载荷作用下(见图 14),接头在连接处发生弯曲变形(见图 15).胶层变形表明:胶粘剂层中同时存在剪切应力和剥离应力(垂直于胶界面),这两种应力都在胶层两端达到最大值. Goland 和 Reissner 对应力集中系数进行了定量分析,其中剪切应力集中系数 n_τ 的表达式如

$$n_\tau = \tau_{\max} / \tau_{\text{平均}} = \frac{\beta L(1+3K)(\coth(\beta L/2t))}{8t+3(1-K)/4}$$

式中: t 为钢板厚度; L 为搭接长度; K 和 β 等均由

与材料参数和力矩来确定的系数.由此可计算出剪切应力集中系数.胶接接头在疲劳破坏之后的塑性变形很小,故可认为胶接接头的疲劳破坏主要是由剪切应力引起.所用结构胶为脆性胶,接头胶层两端一旦产生裂纹,就在瞬间发生断裂.显然,胶接接头的疲劳断裂行为异常危险.

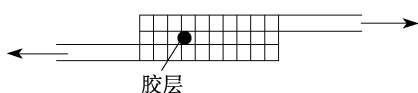


图 14 胶接接头受力图(加载前)

Fig. 14 Force diagram of bonded joint before loading

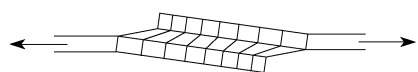


图 15 胶接接头受力图(加载后)

Fig. 15 Force diagram of bonded joint after loading

4.2.2 胶焊接头疲劳破坏过程分析

胶焊接头内部应力集中在焊点热影响区边缘和胶层两端.试验中观察发现:胶焊接头疲劳破坏首先发生在焊点热影响区边缘,其次胶层断裂,最后焊点热影响区边缘裂纹继续扩展.胶焊接头的疲劳破坏包括胶层破坏和焊点破坏两部分.胶层的破坏发生在一瞬间,而焊点的疲劳破坏要经历较长的时间历程,故胶焊接头的疲劳破坏要经历较长的时间历程.胶焊接头疲劳断裂行为显然要比胶接接头安全得多.

4.3 三种接头疲劳强度的对比分析

根据所拟合的载荷-寿命曲线可以计算出接头疲劳寿命在 $N = 2 \times 10^6$ 时的疲劳载荷峰值.计算结果表明:在 $N = 2 \times 10^6$ 时,胶接接头和胶焊接头的疲劳载荷峰值分别是点焊接头的 3.52 倍和 2.01 倍.常保华^[2]等所做高频疲劳拉伸试验也表明:胶接接头疲劳强度最高,而点焊接头疲劳强度最低.在疲劳寿命 $N = 1 \times 10^6$ 时,胶接接头和胶焊接头的疲劳载荷峰值分别约是点焊接头的 2.5 倍和 1.6 倍. Ryazantsev 等^[7]所做的疲劳试验结果表明:在疲劳寿命 $N = 2 \times 10^7$ 时,胶焊接头的疲劳强度比点焊接头高 1.9~3.5 倍.戴瑞玲等^[8]所做的剪切拉伸疲劳试验结果表明:胶焊接头的疲劳寿命高于胶接接头和点焊接头. Arne Melander 等做了高强钢胶焊接头疲劳寿命试验,发现在任何温度和环境湿度下,胶焊接头寿命都比点焊接头高 2~3 倍. Jone^[9]也做了这方面的相关研究.尽管这些疲劳试验的条件不尽相同,但都表明:胶焊接头的疲劳强度(疲劳寿命)比点

焊接头要高.

试验结果的理论解释:从静态剪切拉伸试验可知:胶接接头的静态拉伸破坏高于点焊接头的静态拉伸破坏载荷.同时胶接接头中承载面积大,应力分布相对比较均匀,而点焊接头在焊点边缘的应力集中系数很大,所以胶接接头的疲劳强度高于点焊接头.胶焊接头在疲劳循环载荷作用下,胶层承担部分载荷,从而降低了胶焊接头中点焊边缘处的应力水平,故胶焊接头的疲劳寿命要比点焊接头高.

与胶接接头相比,胶焊接头在点焊过程中所产生的热量破坏了焊点周边的胶层,从而减少胶层的实际承载面积,最终导致胶焊接头中的胶层所能承受的最大载荷小于胶接接头中的胶层所能承受的最大载荷.但是,胶焊接头中的两个焊点也能够承受一定载荷,故并不能断定胶焊接头的承载能力一定低于胶接接头.静态剪切拉伸试验表明:胶焊接头所能承受的最大静态拉伸破坏载荷低于胶接接头.由此可知:胶焊接头中的两个焊点所能承受的最大载荷要低于点焊时所破坏的胶层所能承受的最大载荷.由于胶接接头的静态剪切拉伸破坏载荷比胶焊接头高,且胶焊接头在局部(焊点边缘)的应力集中系数比较大,故胶焊接头的疲劳强度比胶接接头低.

5 结论

(1) 胶接和胶焊接头的疲劳试验数据具有较好的规律性;拟合结果证实了胶接和胶焊接头的 $F_{\max} - \lg N$ 曲线在单对数坐标上为指数曲线段这一假设的正确性.

(2) 一般地,胶接接头疲劳强度最高,而点焊接头最低.当疲劳寿命 $N = 2 \times 10^6$ 时,胶焊接头的疲劳循环载荷峰值是点焊接头的 2.01 倍.

(3) 大多数胶接接头疲劳破坏表现为胶层断裂和镀锌层撕裂;大多数胶焊接头疲劳破坏表现为点焊热影响区产生裂纹并扩展和胶层断裂;大多数点焊接头的疲劳破坏表现为点焊热影响区产生裂纹并扩展.

(4) 胶接接头的疲劳破坏首先发生在胶层两端,疲劳断裂发生在一瞬间.胶焊接头的疲劳破坏首先发生在焊点热影响区边缘,其次胶层断裂;之后焊点热影响区边缘裂纹将继续扩展.胶焊接头的疲劳断裂要经历较长的时间历程.

(5) 尽管胶接接头的疲劳强度高于胶焊接头,但是胶接接头的疲劳断裂行为异常危险(发生在瞬

间). 当胶焊接头中的胶层发生疲劳破坏之后, 其疲劳断裂行为与点焊接头基本一致. 在低寿命区, 胶焊接头疲劳强度略高于点焊接头. 而在高寿命区, 胶焊接头疲劳强度则比点焊接头高出很多. 可见, 车用结构胶的应用, 可有效提高点焊接头的抗疲劳性能. 胶焊工艺将在车身制造中有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] 常保华, 史耀武, 董仕节. 胶焊接头的三维弹塑性应力分析[J]. 中国机械工程, 1998, 9(7): 73.
CHANG Baohua, SHI Yaowu, DONG Shijie. Three-dimensional elastoplastic stress analysis of weld-bonded joints [J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(7): 73.
- [2] 常保华, 史耀武, 卢良清. 胶焊接接头的应力分布和疲劳行为研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(2): 106.
CHANG Baohua, SHI Yaowu, LU Liangqing. Studies on stress distribution and fatigue behavior of weldbonded lap shear joints [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(2): 106.
- [3] 常保华, 史耀武, 董仕节. 点焊接接接头中的应力分布及接头疲劳行为[J]. 机械强度, 1998, 20(4): 271.
CHANG Baohua, SHI Yaowu, DONG Shijie. Studies on stress distribution in spot welded lap joints and the fatigue behavior of the joints[J]. Journal of Mechanical Strength, 1998, 20(4): 271.
- [4] 尹为恺. 胶焊、铆接结构件高频拉压疲劳性能测定方法的试验[J]. 洪都科技, 1986(4): 8.
YIN Weikai. Determination method's experiment about fatigue performance of weldbonded joint and riveted joint under high frequency tension compression loading[J]. Hongdu Science and Technology, 1986(4): 8.
- [5] Wang P C, Chisholm S K. The role of failure mode, resistance spot weld and adhesive on the fatigue behavior of weld-bonded aluminum[J]. Welding Journal, 1995(2): 41.
- [6] Arne Melander, Mats Larsson. Fatigue performance of weldbonded high strength sheet steels tested in Arctic, room temperature and tropical environments[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2000(20): 415.
- [7] Ryazantsev V I, Shavyrin V N. Strength characteristics of welded and bonded-welded joints[J]. Welding Production, 1979, 26(9): 19.
- [8] 戴瑞玲, 王玮, 李春植. 粘接点焊技术及最佳工艺参数的研究[J]. 机械强度, 1996, 18(3): 64.
DAI Ruiling, WANG Wei, LI Chunzhi. Research on weldbonding technique and its best technology [J]. Journal of Mechanical Strength, 1996, 18(3): 64.
- [9] Jone T B, Williams N T. Fatigue in adhesive and weldbonded steel joints[J]. SAE, 1986, 97(7): 48.
-
- (上接第 404 页)
- HANG Yuxian, CHEN Xin, ZHANG Shuo, et al. Reasons and countermeasures for break accident of wide - diameter steel water transmission pipe in Changshu City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(7): 89.
- [3] 张铁刚, 黄廷林, 何文杰. 城市供水管网爆管折管分析及防漏对策[J]. 供水技术, 2007, 1(2): 56.
ZHANG Tiegang, HUANG Tinglin, HE Wenjie. Leakage reduction and analysis of pipe bursts and pipe breaks of municipal water supply network [J]. Water Technology, 2007, 1(2): 56.
- [4] 杨玉思, 辛亚娟. 管网爆管的水力因素分析及防爆技术探讨[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21): 61.
YANG Yusi, XIN Yajuan. Analysis of hydraulic factors of pipe bursting and discussion on prevention technology [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(21): 61.
- [5] 李震, 裴亮, 田一梅. 基于 FAHP 的供水管道爆管因素权重的确定[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 75.
LI Zhen, PEI Liang, TIAN Yimei. Determining weights of influence factors of water pipe breaks based on FAHP [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(9): 75.
- [6] Cooper N R, Blakey G, Sherwin C. The use of GIS to develop a probability-based trunk mains burst risk model [J]. Urban Water, 2000, 2(2): 97.
- [7] 胡新玲, 张宏飞. 基于 GIS 的供水管网爆管分析的算法[J]. 给水排水, 2007, 33(11): 109.
HU Xinling, ZHANG Hongfei. Design of GIS-based pipe burst analysis for water supplying network[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(11): 109.
- [8] Rajani B, Kleiner Y. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models [J]. Urban Water, 2001(3): 177.
- [9] 沈之基. 给水管线的应力分析、爆管原因及对策[J]. 给水排水, 1996, 22(4): 40.
SHEN Zhiji. Stress analysis of water pipeline [J]. Water & Wastewater Engineering, 1996, 22(4): 40.
- [10] Kleiner Y, Rajani B. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models [J]. Urban Water, 2001(3): 151.
- [11] Tabesh M, Soltani J, Farmani R, et al. Assessing pipe failure rate and mechanical reliability of water distribution networks using data driven modelling [J]. J of Hydroinformatics, 2009, 11(1): 1.
- [12] Koza John R. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection [M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [13] 赵洪宾. 供水管网系统理论与分析 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
ZHAO Hongbin. Water network system theories and analysis [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [14] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
WANG Xiaoping, CAO Liming. Theory, application and programme of genetic algorithm [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000.