

# Study on the Welding Residual Stress of the Side Beam of the Subway Bogie

Di Zhang, Tao Xu, Hongda Dong

CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd, Nanjing Jiangsu  
Email: zhangdi135790@163.com

Received: Mar. 19<sup>th</sup>, 2018; accepted: Apr. 5<sup>th</sup>, 2018; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The welding residual stress is tested in the same test position of the side frame of the bogie frame in different states during the manufacturing process, the distribution and regularities of residual stress of side beam after different steps and different treatment processes are obtained, and the influence of heat treatment and sandblasting process on the residual stress distribution of welded joints is studied. The results show that, most of the surface of the side beam material base is compressive stress; after welding and thermal regulation, the overall stress distribution is uneven, and the overall stress value is large. There are high value residual tensile stresses at individual test points; sand blasting technology can make plastic deformation on the shallow surface of the frame and form favorable compressive stress; the heat treatment process can reduce the residual stress peak of the frame, and the distribution of stress is homogenized.

## Keywords

The Side Beam of the Bogie, Welding Residual Stress, Thermal Repair, Heat Treatment, Sand Blasting Treatment

---

# 地铁转向架侧梁焊接残余应力的研究

张迪, 徐涛, 董洪达

中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京  
Email: zhangdi135790@163.com

收稿日期: 2018年3月19日; 录用日期: 2018年4月5日; 发布日期: 2018年4月16日

---

## 摘要

通过对制造过程中不同状态下转向架构架侧梁的同一测试位置进行焊接残余应力的测试, 获得侧梁在不

同步骤、不同处理工艺后残余应力的分布及化规律, 研究热处理及喷砂工艺对焊接接头残余应力分布的影响。结果表明, 侧梁来料基础件表面大部分为压应力; 侧梁焊后及热调修后残余应力区间范围较宽, 应力整体分布不均匀, 整体应力值较大, 个别测试点存在高值残余拉伸应力; 喷砂工艺可以使构架浅表面产生塑性变形, 形成有利的压应力; 热处理工艺可使构架的残余应力峰值得到削减, 应力的分布得到均化。

## 关键词

转向架侧梁, 焊接残余应力, 热调修, 热处理, 喷砂处理

Copyright © 2018 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

## 1. 引言

转向架作为轨道车辆的主要部件之一, 对行车安全起着至关重要的作用, 而构架又是转向架的重要承载和传力构件。目前, 大部分转向架构架均采用焊接形式, 焊接是转向架的基本连接形式[1]。焊接残余应力的存在对转向架构架的疲劳强度和疲劳寿命均有很大的影响, 特别是应力集中和高残余应力叠加的焊接接头, 往往因此产生相当高的应变循环, 若材料的韧性储备不足, 就有可能开裂[2] [3]。同时, 由于组织性能的变化, 高的残余应力可以提高裂纹的扩展速率, 从而影响轨道列车安全运行的可靠性。因此对构架重要部位焊接残余应力的研究, 并通过合理的方法降低和消除这些部位的焊接残余应力, 对预防裂纹的生长和构架的失效以及提高构架疲劳寿命具有重要工程应用价值。

## 2. 试验材料及方法

### 2.1. 试验材料

试验试验所用材料为 EN10028-3: P355NL1 正火可焊接细晶粒钢[4] [5], 其化学成分、力学性能见表 1、表 2。

### 2.2. 试验方法

侧梁的焊接采用熔化极活性气体保护焊(MAG/t135), 保护气体选择富氩混合保护气体(80% Ar+ 20% CO<sub>2</sub>)。

**Table 1.** Chemical composition of P355NL1 (wt%)

**表 1.** P355NL1 主要化学成分(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cu	Cr	Mo	Ni	Ti	Nb	V
≤0.18	≤0.50	1.10~1.70	≤0.025	≤0.015	≥0.020	≤0.012	≤0.30	≤0.30	≤0.08	≤0.50	≤0.03	≤0.05	≤0.10

**Table 2.** Basic mechanical properties of P355NL1

**表 2.** P355NL1 基本力学性能

板厚 t (mm)	屈服强度 ReH (Mpa)	抗拉强度 Rm (Mpa)	延伸率 A (%)
t ≤ 16	≥355	490~630	≥22
16 < t ≤ 40	≥345	490~630	≥22

残余应力测试采用 i-XRD 便携式残余应力测量仪, 电解抛光设备采用 DJP-II 型和 8818-V2 型电解抛光机。

本文残余应力测试参照的标准为:

1) 欧盟残余应力测试标准 EN 15305-2008: Non-destructive Testing: Test Method for Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction;

2) GB 7704-2008 无损检测: X 射线应力测定方法;

3) ASTM E 915-2010 Standard test method for verifying the alignment of X-ray diffraction instrumentation for residual stress measurement.

4) 应力标样校正。测试前对 SFE052109-19 Stress Standard  $-500 \pm 20$  MPa Fe 应力标样进行了 3 次随机选点测量, 测量结果分别为  $-501.28 \pm 13.55$  MPa、 $-505.19 \pm 18.10$  MPa、 $489.54 \pm 11.52$  MPa, 说明所选测试参数符合测试要求, 能够保证所测数据的准确性。

### 3. 实验结果及分析

#### 3.1. 侧梁基础件残余应力测试

对侧梁来料基础件, 在组装成侧梁之前进行残余应力测试, 测试位置为侧梁外腹板, 测试点分布见图 1, 测试结果见表 3。

侧梁外腹板来料基础件所有测试点纵向残余应力均为压应力, 大部分在  $-100$  MPa 至  $-200$  MPa 之间, 残余应力分布较均匀, 且左右两边对称性较好。这主要因为侧梁来料基础件考虑到防腐及后续的焊接, 表面为喷砂状态, 喷砂能在钢材表面形成一层压应力层。侧梁腹板在喷砂过程中是一个平面板, 基本没有曲面, 各个部位喷砂相对来说较为均匀, 所以喷砂所形成的表面残余压应力也比较均匀。

#### 3.2. 侧梁组焊后残余应力测试

侧梁组焊后, 对侧梁外腹板处进行焊接残余应力的测试。测试点分布见图 2, 测试结果见表 3。

结果显示, 侧梁组焊后, 焊接残余应力分布极不均匀, 既有拉应力也有压应力, 个别位置拉应力峰值较大, 如点 2、11、13、16、27, 已经超过材料的名义屈服极限。高值残余拉伸应力主要集中在侧梁上、下盖板与腹板连接的长焊缝上, 这是因为侧梁上、下盖板与腹板焊接时相互约束, 在焊接热输入一定的情况下, 焊接变形与焊接残余应力成反比关系, 即焊接变形越小, 焊接残余应力越大[6]。

#### 3.3. 侧梁热调修后残余应力测试

侧梁调修后, 仍在侧梁外腹板处进行焊接残余应力的测试。测试点分布见图 2, 测试结果见表 3。

调修后的残余应力分布仍然很不均匀, 且纵向残余拉应力峰值仍然很大, 最大值超过  $500$  MPa, 超出材料的屈服极限。

#### 3.4. 构架喷砂后残余应力测试

侧梁组焊调修后, 进行构架的组装及焊接。构架组焊后为了对构架的全部焊缝进行探伤, 构架需整体进行一次喷砂处理。喷砂后对侧梁外腹板相同部位进行残余应力的测试。测试点分布见图 2, 测试结果见表 3。

构架整体喷砂后, 除了个别点外, 焊接残余应力基本上都为压应力, 但压应力整体分布不均匀, 主要分布在  $-100$  MPa 至  $-300$  MPa 之间。压应力有利于裂纹闭合, 对提高构架的抗疲劳性能有利。构架的疲劳裂纹多数源于构架表面, 疲劳失效大都是由于拉伸应力造成, 构架通过焊后的喷砂处理, 使构架表层产生的压应力可以比内层拉应力大数倍, 当转向架在不同工况载荷受力下, 表面承担的拉应力会恰好

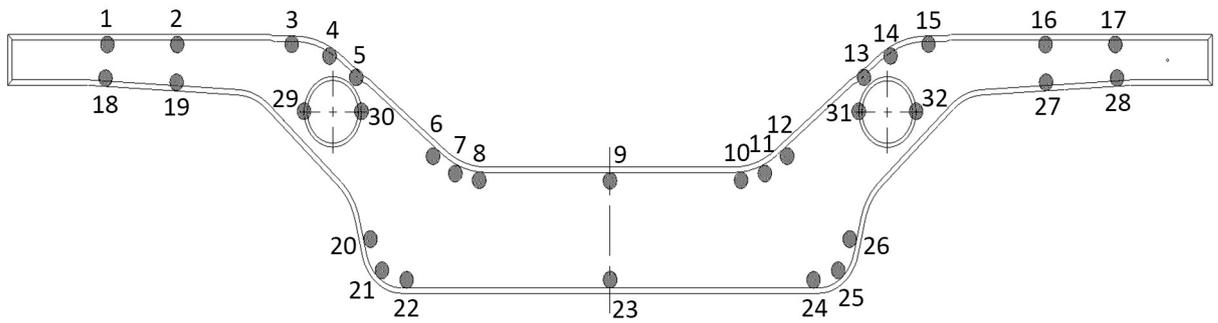


Figure 1. Test point distribution of residual stress in the side beam foundation

图 1. 侧梁基础件残余应力测试点分布

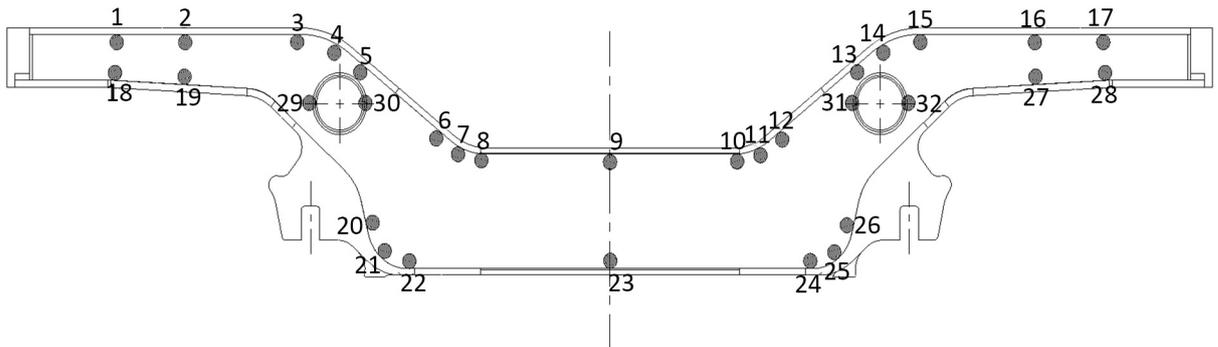


Figure 2. Test point distribution of residual stress in the manufacturing process of side beam

图 2. 侧梁制造过程中残余应力测试点分布

Table 3. Test value of longitudinal residual stress in the manufacturing process of side beam

表 3. 侧梁制造过程中纵向残余应力测试值

测试位置	侧梁基础件 6x	组焊后 6x	调修后 6x	喷砂后 6x	热处理后 6x
1, 2	-187, -198	57, 495	419, 547	-172, -185	102, 3
3, 4, 5	-199, -218, -190	265, -185, 388	436, 103, 46	-150, -320, -256	66, 85, 91
6, 7, 8	-156, -133, -212	143, 237, 19	95, 209, 467	23, 51, 81	98, 27, 121
9	-210	234	317	-11	139
10, 11, 12	-186, -199, -199	96, 432, 346	344, 361, 93	104, 11, 7	97, 142, 143
13, 14, 15	-274, -202, -184	448, -169, 29	17, 33, 501	-362, -305, -315	78, 85, 115
16, 17	-173, -194	493, 19	393, 74	-192, -167	27, 105
18, 19	-177, -175	137, 161	538, 563	-146, -150	52, 66
20, 21, 22	-152, -172, -157	278, 227, 181	172, -133, 3	-180, -127, 116	112, 133, 113
23	-156	417	103	-137	88
24, 25, 26	-169, -166, -148	298, 328, 228	-62, 458, 250	-174, -134, -136	99, 99, 21
27, 28	-169, -192	375, 266	542, 306	-167, -125	51, 46
29, 30	-231, -179	62, -185	-146, -95	-133, -163	102, 27
31, 32	-201, -236	181, 44	105, -65	-92, -201	68, 49

被喷砂层的残余压应力所抵消。此外，喷砂产生的塑性变形会导致晶体滑移，晶格变形，并使位错密度增加，因而改善了构架的疲劳性能，并提高了材料的抗应力腐蚀性能。

### 3.5. 构架热处理后残余应力测试

因为焊接工艺的特点决定了构架焊接后必定存在残余内应力。为了消除焊接残余内应力或使内应力均匀化，目前最为普遍的做法是进行焊后热处理即去应力退火处理。焊后热处理工艺是将构架整体装入热处理炉内，缓慢升温至指定温度并保温一段时间，再缓慢冷却至一定温度后结束。热处理后依然对侧梁外腹板相同部位进行残余应力的测试。测试点分布见图2，测试结果见表3。

构架整体热处理后，所有测试点的残余应力均为拉应力，基本都在100 MPa以下。相对于侧梁组焊后、调修后，构架喷砂后，热处理状态下的整体残余应力分布最为均匀，同时残余应力的绝对值有了较大幅度的下降，说明热处理具有削峰、均匀化整体应力、使应力重新分布的作用。

热处理消除构架焊接残余应力的原理是把构架整体均匀加热至材料相变点以下的温度范围，即550℃~650℃，经过一定时间保温，此时金属未发生相变，但在此温度上，其屈服极限降低，其材料的弹性模量也会下降，使内部由于残余应力的作用而产生一定的塑性变形，然后利用高温时材料蠕变速度加快，蠕变引起应力松弛，给予充分时间(保温1~3 h)，使试件均匀缓慢地冷却，最终使应力大幅度降低得以消除。

### 3.6. 制造过程中不同阶段残余应力的对比

相同测试点在制造过程中不同阶段的纵向残余应力对比曲线如图3所示。从图中可见，侧梁组焊后、调修后以及构架喷砂处理后，这三个阶段残余应力的变化趋势基本相同，由于测试点所处的位置不同，焊接过程中受到约束、温度场以及由构架结构所致喷砂效果的不同，这三个阶段的纵向焊接残余应力既有拉应力也有压应力。侧梁来料基础件和构架热处理后这两个阶段的残余应力分布最为均匀，与文中前面所述一致。

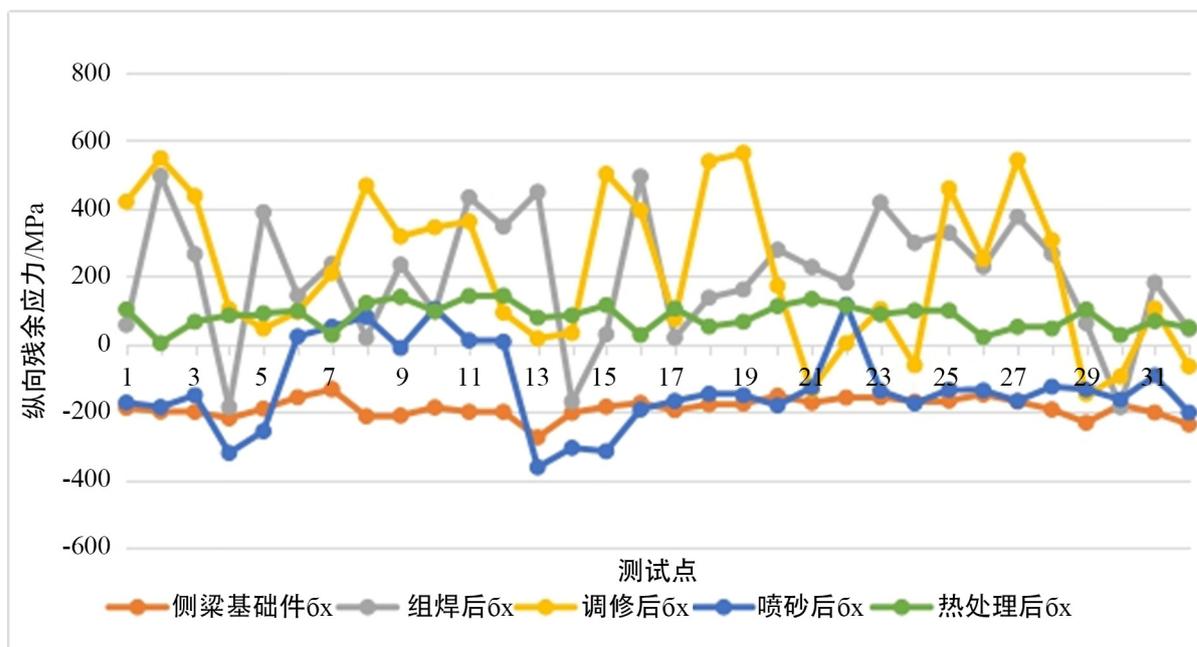


Figure 3. Longitudinal residual stress contrast curve at different stages  $\sigma_x$

图3. 不同阶段的纵向残余应力对比曲线

## 4. 结论

侧梁经过来料基础件、组焊、调修、喷砂、热处理后五种状态下残余应力的分布呈现较为规律性的分布:

1) 经过喷砂处理后的侧梁来料基础件表面均为压应力, 残余应力分布比较均匀, 且对称性良好。

2) 侧梁组焊及热调修后残余应力分布极不均匀, 既有拉应力也有压应力, 且个别位置拉应力峰值较大, 超过材料屈服极限。

3) 喷砂在较大程度上改变了侧梁表面残余应力状态, 基本上使表面残余拉应力转变为压应力, 绝大部分应力在 $-200\text{ MPa}$ 左右, 使应力分布趋向均匀, 由于压应力能使裂纹闭合, 这对于提高转向架构架的抗疲劳性能有利。

4) 热处理后, 焊接残余应力的性质发生了根本的改变, 由喷砂厚的残余压应力变为拉应力, 且分布在 $100\text{ MP}$ 以内。热处理后侧梁表面残余应力分布的均匀性要优于前面四种状态。

## 参考文献

- [1] 李强, 刘志明. 高速客车转向架残余应力的试验研究[J]. 试验力学, 1999, 14(2): 260-265.
- [2] 拉达伊. 焊接结构疲劳强度[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [3] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 葛森. 厚板焊接残余应力试验测量与计算[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2002.
- [5] 李义. 钢结构焊接残余应力分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉, 武汉理工大学, 2007.
- [6] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 哈尔滨: 机械工业出版社. 2011.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

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

期刊邮箱: [met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)