第 27卷 第 1期
2006年 1月
焊 接 学 报
TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION
Vol. 27 No. 1
January 2006

高速机车构架侧梁的焊接顺序

崔晓芳[1,2]， 岳红杰[1]， 兆文忠[2]， 马 君[3]，
（1. 清华大学 机械工程系，北京 100084；2. 大连交通大学 机械工程学院，辽宁 大连 116028；
3. 大同电力机车有限责任公司，山西 大同 037038）

崔晓芳

摘 要：控制高速机车转向架构架侧梁的焊接变形是控制构架生产质量的关键。以热弹塑性理论为基础，基于热－机耦合算法创建了侧梁热弹塑性仿真模型，采用 Marc软件，分别研究了内部焊缝和外部主焊缝焊接顺序对侧梁焊接变形量的影响，得到了焊接顺序影响变形的规律，为实际生产过程中控制高速机车转向架构架的焊接质量提供了可靠的依据。为了避免计算仿真模型过于庞大，计算效率低下等问题，在创建该数值仿真模型中，采用了分段移动的串热源模型和并行计算技术等，从而使数值仿真领域中最复杂的焊接过程仿真得以直接应用工程中。

关键词：高速动力车；转向架构架；焊接变形；焊接顺序；数值仿真
中图分类号：U292.91+4 文献标识码：A 文章编号：0253－360X(2006)01－101－05

0 序 言

机车动力转向架的设计生产直接决定着列车的最高时速以及能否正常运营，因此在生产过程中确保转向架的质量具有十分重要的意义[1]。构架是转向架的重要承载部件，在构架生产过程中面临的主要问题是如何控制焊接变形。而作者所研究的构架侧梁又是构架焊接生产过程中控制焊接变形的关键问题。

目前，对于焊接变形的控制主要靠多年积累的经验和多次的试验。在新产品试制或制造中，有时会出现焊接变形超出设计尺寸要求而不得不采用火焰或机械等方法矫正变形，这样做不仅增加成本，而且会改变残余应力的分布状态[2]。残余应力的存在对高速机车构架的疲劳强度和疲劳寿命均有很大的影响[3]。因此研究侧梁的焊接过程，找到可以减小侧梁焊接残余变形量的生产方法，对于实际的生产具有十分重要的意义。

构架侧梁为一箱形结构梁，通常减少箱形梁结构焊接残余变形量的方法有优化结构，调整焊接顺序，改变热输入或者是加强焊件约束等[4]。相对于其它可以减少焊接变形量的方法，调整焊接顺序在实际生产中具有简单易行，成本低等优点，因此作者以热弹塑性理论为基础，基于热－机耦合算法创建侧梁热弹塑性仿真模型，采用大型非线性有限元 Marc软件，分别研究了内部焊缝和外部主焊缝焊接顺序对侧梁焊接变形量的影响，得到了焊接顺序影响变形的规律，为实际生产过程中控制高速机车转向架构架的焊接质量提供了可靠的依据。

1 有限元模型

该转向架构架侧梁是由上、下盖板、前、后立板以及内部纵、横隔板及加强筋板组焊而成的箱形结构梁，其结构及焊缝位置如图 1、2所示。由于侧梁的结构尺寸大（x方向纵向尺寸为 4.5 m，y方向横向尺寸为 0.25 m，z方向高度尺寸为 0.31 m），焊缝多（内部纵、横隔板 15个，纵筋板 5个；外部主焊缝 4条），按照常规焊接过程数值模拟建立的有限元模型会因为自由度庞大而使计算难以进行，尤其是采用全耦合的三维热弹塑性有限元进行数值模拟时，庞大的计算量很容易导致计算不能进行，为了解决计算量大这一困难，在建立有限元模型时采用了以下三种技术进行模型简化，以减小数值模拟计算量，使数值模拟能够顺利进行

（1）采用较粗大的单元进行较均匀的网格划分。由于焊接残余变形是一个宏观量，根据文献[5]可知，采用较粗大的网格划分进行残余变形量的模拟计算，经过实践证明能够满足精度要求，因此采用了粗大的单元尺寸进行网格划分，单元尺寸约为 25 mm×25 mm。

收稿日期：2004－10－08

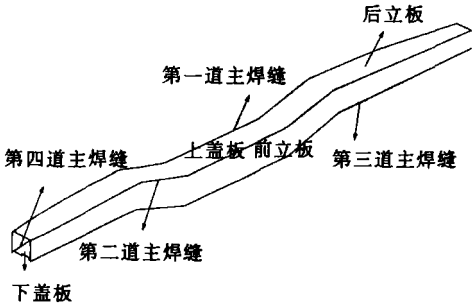

图 1 构架侧梁外部结构及主焊缝位置

Fig. 1 Outer structure of frame beam and main welds

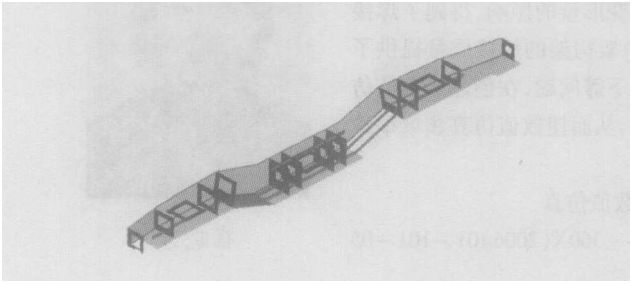

图 2 构架侧梁内部结构

Fig. 2 Inner structure of frame beam

(2) 单元类型选用四边形壳单元。壳单元的节点数目明显少于实体单元,自由度数目也有所减少,同时考虑到四边形单元较之三角形单元的计算精度有所提高,因此采用四边形的壳单元进行建模,从而使三维热弹塑性分析的计算效率大幅度提高。

(3) 应用分段串热源对焊接热源进行模拟。焊接过程数值模拟计算量庞大的重要原因就是因为焊接移动热源的存在,而采用不同的焊接热源进行数值模拟计算量差别很大,此处采用了一种分段移动串热源模型[6]进行模拟计算。这种热源模型的一个最大特点就是计算效率极高,并且应用这种热源计算大型结构的变形场也是经过检验的[7]。

在计算过程中考虑了材料性质的非线性,输入的力学性能参数和热物理性能参数(弹性模量、屈服强度、比热、热导率、线膨胀系数、强化曲线等)均与温度相关,对于材料接近熔化和熔化以后的高温性能则采用线性外推法获得[8~11]。

采用以上简化技术进行侧梁的有限元建模。单元总数为 9 387,节点总数为 9 457,采用有限元分析软件 Marc,并采用了并行计算方法,在 CPU 为 1.8 G 的双 CPU 微机上进行,每种模型所需计算时间约为 7 h。可以发现对于侧梁这样的大型结构,采用上述简化技术之后,单元和节点数目大大减少,计算时间也能够接受。

2 焊接顺序对焊接变形的影响

由于焊缝数目较多,而可采取的焊接顺序方案也较多,根据生产的实际经验,将内部焊缝与外部主焊缝对焊接残余变形的影响分开来研究。

2.1 内部焊缝焊接顺序对焊接变形的影响

为了研究内部焊缝的焊接对残余变形的影响,建立了只焊接内部焊缝(即只焊接下盖板对接焊缝及内部焊缝)的有限元模型并进行了计算。由于在工厂的实际生产中,内部焊缝是人工焊接的,因此焊缝焊接顺序的变动可以比较灵活,建立的三种不同内部焊缝焊接顺序是 1号模型为两个工人同时从中间到两边焊接;2号模型的基本顺序与 1号相同,只是在局部范围内有部分顺序变化;3号模型的焊接顺序则为 1个工人从左到右顺序焊接。1号、3号模型具体焊接顺序如图 3、4所示,各模型计算所得各个方向的最大变形量如表 1所示。

表 1 内部焊缝不同焊接顺序下的残余变形计算结果

Table 1 Calculated deformation results of inner welds under different welding sequence

模型编号	内部焊缝焊接顺序	最大 x向收缩量 ΔL /mm	最大 y向收缩量 ΔB /mm	最大 z向挠度 f/mm	变形情况对比
1	从中间到两边,如图 3所示	-1.84	-1.45	7.53	z向挠曲变形对比见图 5
2	从中间到两边,与 1号模型相比只有部分顺序变化	-1.89	-1.40	7.45	
3	从左到右,如图 4所示	-1.89	-1.48	6.75	

由表 1的变形计算结果可以发现,内部焊缝的焊接不会产生很大的 x方向的纵向收缩和 y方向的横向收缩,但会产生较大的 z向挠曲变形,改变内部焊缝的焊接顺序对 x向和 y向的收缩量影响都很小;内部焊缝焊接顺序的改变只对 z向的挠曲变形影响较大,图 5的结果显示内部焊缝采取从左到右的焊接顺序所得的挠曲变形量较小,而表 1的结果表明采取这种焊接顺序所得最大挠度(6.75 mm)可以比采用从中间到两边的焊接顺序最大 z向挠度(7.53 mm)减少 0.78 mm;由 1号模型和 2号模型

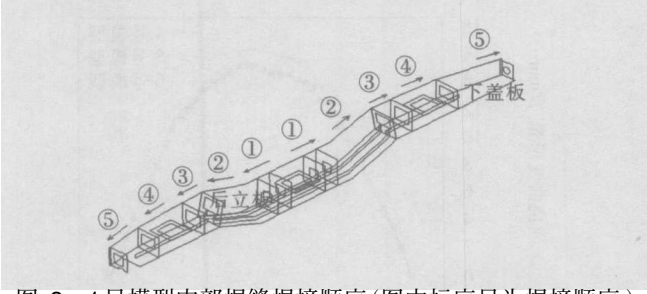

图 3　1号模型内部焊缝焊接顺序(图中标序号为焊接顺序)

Fig. 3　Welding sequence of first model (number denotes welding sequence)

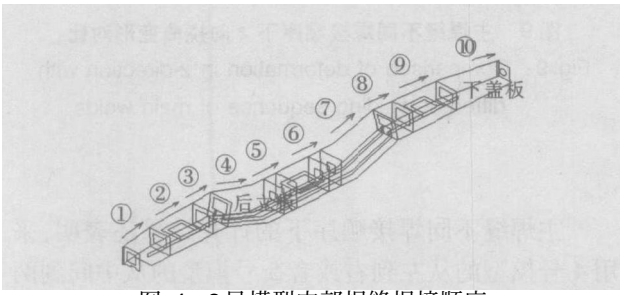

图 4　3号模型内部焊缝焊接顺序

Fig. 4　Welding sequence of third model

的计算结果还可以发现, 内部焊缝焊接顺序较小的变化并不会影响最终的残余变形结果。因此对于内部焊缝, 采取从左到右的焊接顺序更为合理。

2.2　主焊缝焊接顺序对焊接变形的影响

鉴于内部焊缝采取从左到右的焊接顺序可以减少残余变形量, 在研究主焊缝焊接顺序对焊接残余变形的影响时, 内部焊缝采取了从左到右的相同焊接顺序进行分析计算。所建立的三种不同主焊缝焊接顺序的计算模型为 4号模型采取从左到右的焊接顺序焊接, 如图 6所示; 5号模型采取从中间到两边的焊接顺序焊接, 如图 7所示; 6号模型采取从右到左的焊接顺序焊接, 与 4号模型焊接顺序相反, 如图 6所示; 各模型计算所得各个方向的最大变形量如表 2所示。

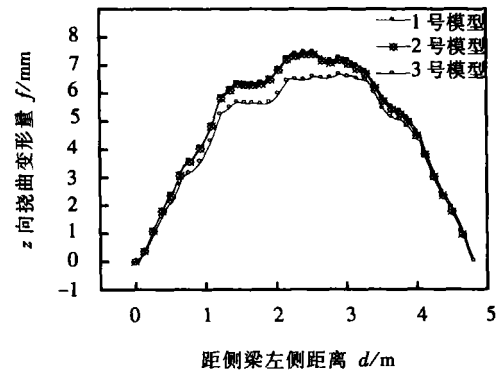

图 5　内部焊缝不同焊接顺序下 z向挠曲变形对比

Fig. 5　Comparison of deformation in z-direction with different welding sequence

表 2　主焊缝不同焊接顺序下的残余变形计算结果

Table 2　Calculated deformation results of main welds with different welding sequence

模型编号	主焊缝焊接顺序	最大 x向收缩量 ΔL /mm	最大 y向收缩量 ΔB /mm	最大 z向挠度 f/mm	变形情况对比
4	从左到右, 如图 6所示	-4.42	-6.17	15.46	y, z向变形对比见图 8, 9
5	从中间到两边, 如图 7所示	-4.38	-6.17	15.47	
6	从右到左, 与 4号模型相反	-4.41	-5.58	16.59	

注: 内部焊缝焊接顺序固定为从左到右。

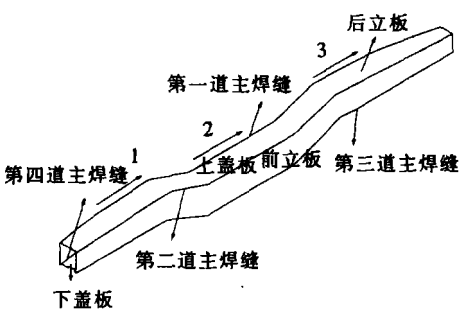

图 6　4号模型主焊缝焊接顺序(图中所标序号为焊接顺序, 6号模型方向相反)

Fig. 6　Welding sequence of fourth model

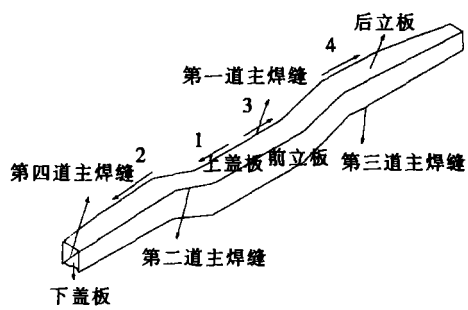

图 7　5号模型主焊缝焊接顺序

Fig. 7　Welding sequence of fifth model

由表 2的结果可以看出,主焊缝不同的焊接顺序对于 x方向的纵向收缩变形影响较小。而表 2和图 8的 y方向横向收缩结果则表明,主焊缝不同的焊接顺序对于 y方向的收缩变形影响较大,主焊缝采用从右到左的顺序得到的横向收缩量可以比采用另外两种焊接顺序减少近 0.6mm;而且主焊缝的焊接会产生较大的横向收缩量,这一收缩量由只焊接内部焊缝的 1.40 ~1.48 mm 增大到 5.58 ~6.17mm;另外, y向收缩变形量的大小与隔板的位置密切相关,隔板所在位置,收缩量相对较小,而不存在隔板的位置, y向收缩量显著增大,图 8中峰值均出现在隔板加强最薄弱的地方。主焊缝不同的焊接顺序也会对 z方向的挠曲变形产生一定影响,由表 2和图 9的结果可知,主焊缝采用从左到右和从中间到两边的焊接顺序所得 z向变形几乎完全一样,而当主焊缝采用从右到左的焊接顺序时,上挠变形有一定幅度的增加,这一增加量为 1.13mm;另外,主焊缝的焊接同样会产生较大的 z向挠曲变形,在焊接全部完成之后(即主焊缝焊接完成), z向的上挠变形量达到了 15.46 ~16.59 mm,可见对于转向架侧梁的焊接,控制 z向挠曲变形对于实际生产具有十分重要的意义。但是计算结果表明,采取不同的内部焊缝焊接顺序只能减少 0.78mm的挠曲变形,而采取主焊缝不同的焊接顺序则最多能减少 1.13mm的 z向挠曲变形。因此只依靠简单地改变焊缝焊接顺序来减小 z方向的上挠变形量效果并不十分显著,要控制这一变形还需配合采用其它能够减少焊接变形量的手段共同作用。例如根据焊接残余变形预测数据,采用反变形装配工艺,以达到减少 z向挠曲变形的目的。

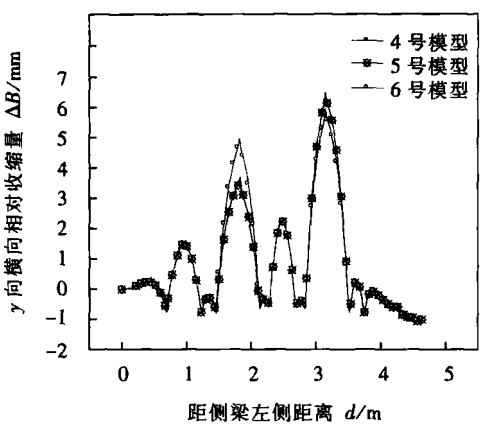

图 8 主焊缝不同焊接顺序下 y向变形量对比

Fig. 8 Comparison of deformation in y direction with different welding sequence of main welds

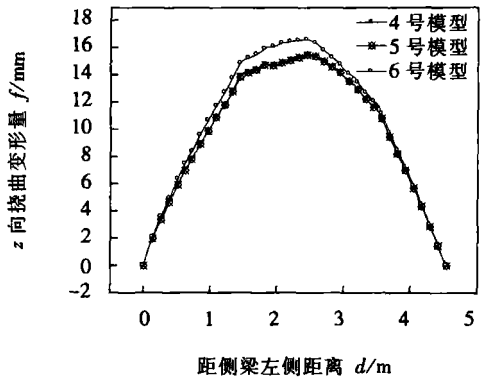

图 9 主焊缝不同焊接顺序下 z向挠曲变形对比

Fig. 9 Comparison of deformation in z direction with different welding sequence of main welds

主焊缝不同焊接顺序下的计算结果还表明,采用 4号模型的从左到右或者 5号模型的从中间到两边的焊接顺序所得变形结果非常接近,但是由于实际生产过程中采用焊接机械手焊接,对于从左到右的焊接顺序,主焊缝能够从左到右一次焊接完成,即焊接一条主焊缝只需起弧一次,而当主焊缝的焊接顺序为从中间到两边时,一条焊缝的焊接则需要起弧两次,因此在生产中主焊缝采取从左到右的焊接顺序更加合理。

3 结 论

(1) 不同的焊接顺序对于侧梁的纵向收缩量几乎没有影响。

(2) 内部焊缝不同的焊接顺序对于侧梁的横向收缩影响很小,主焊缝不同的焊接顺序对横向收缩影响较大,采用从右到左的主焊缝焊接顺序能够将横向收缩量减少 8%(由 6.17 mm 减小到 5.58 mm)。

(3) 内部焊缝和主焊缝不同的焊接顺序对侧梁在焊接过程中产生的挠曲变形都有一定的影响,内部焊缝采取从左到右的焊接顺序可以在一定程度上减少上挠变形,这一减少量为 10%(由 7.53 mm 减少到 6.75 mm),主焊缝采取从左到右或者从中间到两边的焊接顺序相对于从右到左的顺序可以减少挠曲变形量约 7%(由 16.59 mm 减少到 15.46mm)。

(4) 单纯依赖改变焊接顺序进行焊接变形量的控制,尤其是挠曲变形的控制很难达到生产要求。

(5) 计算所得焊接顺序影响变形的规律,可以为实际生产过程中控制高速动力车转向架构架的焊接质量提供了可靠的数值依据。 [下转第 108页]

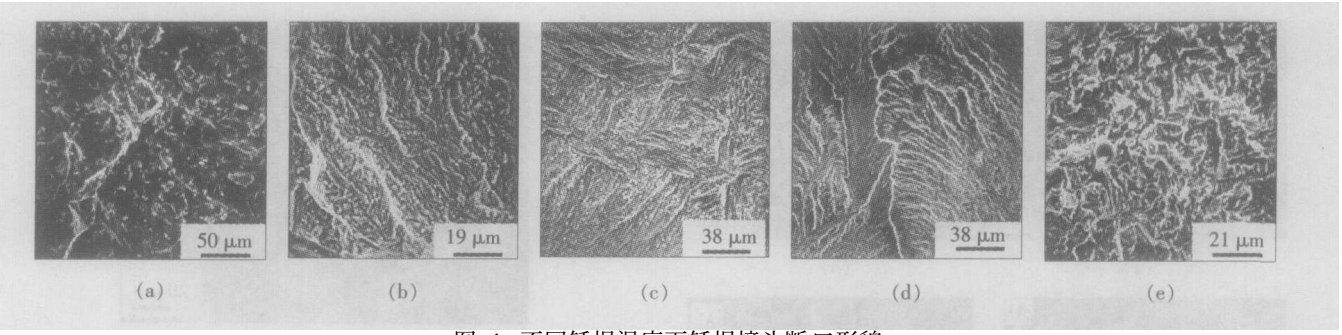

图 4 不同钎焊温度下钎焊接头断口形貌

Fig. 4 Fracture appearances of brazed joint at different brazing temperature

处钎缝和基体的结合有一定的韧性。

5 结 论

(1) 随着钎焊温度升高钎焊接头强度并不升高。

(2) 不同温度下钎焊接头中靠近 TC4合金基体边界处均生成魏氏体组织，随温度升高魏氏体组织粗化程度加剧；当钎焊温度达到 TC4合金的 β相转变温度时，魏氏体组织迅速粗化，魏氏体组织中 α条粗化，呈块状。

(3) 整个钎焊接头中 Ti_3Al-Nb合金基体与钎料的反应程度弱于 TC4合金基体。

参考文献：

[1] Hung C, Loretto M H. Creep behariour of Ti_3Al-based titanium aluminide alloys containing molybdenum [J]. Materials Science and Engineering, 1995, A192/193: 856-861.

[2] Kerry S, Winston M R. Them icrostructure and creep behaiviour of Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo (super α_2) [J]. Materials Science and Engineering, 1995, A192/193: 722-728.

作者简介：杨 丽，女，1973年出生，工学硕士，工程师。主要从事金属材料电子显微分析工作，发表论文 4篇。

Email: hityl@163.com

[上接第 104页]

参考文献：

[1] 林祜亭. 《中华之星》动力组制动系统的技术分析和评估 [J]. 铁道机车车辆, 2003, 23(3): 1-9.

[2] 拉达伊 D. 焊接热效应 [M]. 北京：机械工业出版社, 1997. 189-205.

[3] 李 强, 刘志明, 缪龙秀, 等. 高速客车转向架残余应力的试验研究 [J]. 实验力学, 1999, 14(2): 260-266.

[4] 库兹米诺夫 CA. 船体结构的焊接变形 [M]. 王承权 译. 北京：国防工业出版社, 1978.

[5] 蔡志鹏. 大型结构焊接变形数值模拟的研究与应用 [D]. 北京：清华大学, 2001. 18-27.

[6] Cai Z, Zhao H, Lu A. Efficient finite element approach for modeling of actual welded structures [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(3): 195-204.

[7] 蔡志鹏, 赵海燕, 吴 甦, 等. 串热源模型及其在焊接数值模拟中的应用 [J]. 机械工程学报, 2001, 37(4): 25-28.

[8] Taljat B, Zacharia T, Wang X L, *et al*. Numerical analysis of residual stress distribution in tubes with spiral weld cladding [J]. Welding Journal, 1998, 77(8): 328-335.

[9] 《机械工程材料性能数据手册》编委会. 机械工程材料性能数据手册 [M]. 北京：机械工业出版社, 1994.

[10] Hong J K, Tsai C L, Dong P. Assessment of numerical procedures for residual stress analysis of multipass welds [J]. Welding Journal, 1998, 77(9): 372-381.

[11] Lindgren L E. Finite modeling and simulation of welding, part 2: improved material modeling [J]. Journal of Thermal Stress, 2001, 24(3): 195-231.

作者简介：崔晓芳，女，1964年 1月出生，高级工程师，博士研究生。主要研究方向为大型焊接结构焊接残余应力与变形的预测与控制，发表论文 10余篇。

Email: xf_cui@163.com

Comparison and analysis of the abscissa of the FAD in SINTAP and BS 7910

LIU Jun-yan, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng (School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p97 – 100

Abstract: There are two assessment standards – – SINTAP and BS 7910 to perform a safety assessment. Both the standards have an assessment method which make use of a FAD (failure assessment diagram). The methods which measure the value of the abscissa of the FAD in the two different standards were compared and analyzed. In SINTAP and BS 7910, the abscissas of the FAD indicate the proximity to plastic collapse of the structure. That is to say, the basis of assessment is the same in two standards, but as the detail methods of calculating the values of the abscissas of the FAD are different. Furthermore, in BS 7910, when the levels of the assessment are different, the method of calculating the values of the abscissas of the FAD are different. An example was offered to give a further interpretation. When a same fracture was assessed in a same structure by using the two standard, different results were obtained because the factors which were taken account in the two standards are different. Moreover, the values of the abscissa in different levels of the assessment are different. All these interpret that the conservative degrees of the assessment are different.

Keywords: SINTAP; British standard; safety assessment; plastic collapse

Study of different welding sequences in the bogie frame of the high speed locomotive

CUI Xiao-fang[1,2], YUE Hong-jie[1], ZHAO Wen-zhong[2], MA Jun[3] (1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Mechanical Engineering, Liaoning Dalian Jiaotong University, Liaoning Dalian 116028, China; 3. Datong Electric Locomotive CO. LTD., Shanxi Datong 037038, China). p101 – 104, 108

Abstract: It is a major issue to reduce and control the welding deformation in the process of manufacturing the bogie frame of the high-speed locomotive. In this paper, heat-elastic-plastic mechanics was proposed to establish heating-elastic-plastic simulation model of the weld beam based on heating-mechanical coupling algorithm. The welding deformation with different welding sequences for inner welds and main welds were investigated with Marc. The results of finite element computation was applied to reduce welding deformation and quality control in manufacturing the bogie frame of the high-speed locomotive. To avoid the problem of low efficiency in such large complicated simulation model, the following strategies were taken in establishing the simulation model, such as the subsection moving string heat source model, parallel-treatment calculation technique and so on, which could catch the main relationship in the most complicated welding process simulation so that the conclusions were able to be applicable in the real engineering problems.

Keywords: high-speed locomotive; bogie frame; welding deformation; welding sequence; numerical simulation

Influnce of brazing temperature on microstructure of TC4 and Ti_3Al-Nb alloy brazed joint

YANG Li[1], HUO Shu-bin[2], WANG Hui-ting[3], CUI Yue-xian[1], ZHANG Hong-zhi[1] (1. School of Material Sience and Engintering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Harbin Welding Institute, Harbin 150080, China; 3. Harbin Institute of large Electric Machinery, Harbin 150046, China). p105 – 108

Abstract: TC4 and Ti_3Al-Nb alloys were brazed in vacuum by using powered filler metal of 50Ti-20Zr-20Ni-10Cu. Microstructure and property of the joint with different brazing temperature were investigated by scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, electron probe and tensile test. The results showed that the tensile strength of the joint do not raise with the brazing temperature. With different brazing temperature, the widmanstatten structure appears near TC4 alloy boundary in the brazed joint, and when the temperature raises, widmanstatten structure coarse degree will increase. In the brazed joint, the interaction degree between base metal of Ti_3Al-Nb alloy and filler metal was less than that of TC4 alloy and filler metal.

Key words: Brazing; TC4 alloy; Ti_3Al-Nb alloy; 50Ti-20Zr-20Ni-10Cu filler metals

Nickel-based high temperature wear-resistant non-slag hardfacing electrode and its heat treatment process

WANG Zhong-wei[1,2], ZHANG Qing-hua[2], XIAO Yi-feng[2,3] (1. Zhuzhou Cemented Carbide Group Corp. Ltd. R&D Center, Hunan Zhuzhou 412000, China; 2. College of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Hunan Xiangtan 411105, China; 3. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China). p109 – 112

Abstract: A kind of nickel-base non-slag hardfacing electrode with thermal wear resistance was investigated. The electrode has little weld fume during welding, and the weld fume does little harm to workers' health. Since there is no slag on the bead after welding, it can weld successively with multi-pass and needn't remove slag. In addition, its price is much cheaper than that of the cobalt-base hardfacing electrode, and the properties at high temperature (at 650 ℃) are excellent. Due to the electrode has more elements than those in other normal hardfacing electrode, the weld metal components are more complicated, the residual stress after welding is higher, and the weld metal structure is not stable with the high speed cooling after welding, which affect general properties of the weld metal. In order to use the electrode more suitably and widely, the heat-treat process of weld metal was also discussed.

Keywords: nickel-bases alloys; wear resistance; non-slag electrode; heat-treatment