

铝合金车体焊接残余应力模拟计算方法介绍

梅 阳, 王 川, 赵 轩, 邢志梅

(四川省特种设备检验研究院, 四川 成都 610061)

摘 要: 焊接残余应力与变形是高速列车铝合金焊接所面临的一个突出问题, 也是一个突出难题。残余应力与变形不但要影响外观尺寸精度和尺寸稳定性, 还会降低焊接构件的疲劳强度和安全可靠性。研究铝合金车体的焊接变形和应力产生机理及变形规律不但可以指导焊接生产过程的焊接变形和应力控制措施, 更可以通过对焊接变形与应力的定量研究, 分析其对疲劳强度的影响, 预测焊接接头的疲劳寿命, 保证安全可靠。

关键词: 残余应力; 有限元计算; 材料计算软件; 材料数据库; 残余应力模拟

1 概述

300km/h 动车组头车车体(二阶段)采用车体全长的大型中空铝合金挤压型材组焊成筒型整体承载结构。头车车体由底架、侧墙、车顶、端墙、车体附件及司机室头部结构组成。车体中, 司机室头部、端墙使用铝合金 A5083P-0 (JIS H4000), 侧墙和车顶采用铝合金 A6N01S-T5 (JIS H4100), 底架补强板为铝合金 A7N01P-T4 (JIS H4000), 底架采用铝合金 A7N01S-T5 (JIS H4100)。

在对焊接接头进行计算的过程中, 主要分两阶段进行实施: 一是建立计算所需的材料数据库; 二是根据图纸建立相应的有限元模型进行计算分析, 并和前期的 X 射线测试结果相结合, 得出典型接头的残余应力分布规律, 同时对焊接顺序进行模拟, 获得不同焊接顺序对残余应力大小、分布的影响规律, 为生产过程中控制焊接残余应力提供依据和帮助, 并通过对不同约束载荷下, 分析焊接应力场的变化。

2 计算软件介绍

2.1 有限元计算软件 SYSWELD

SYSWELD 软件是由法国的 ESI 公司开发, 最早主要用于核工业焊接的计算模拟, 后来由于热处理模拟过程中存在的多种物理现象和焊接过程很相识, 因此 SYSWELD 很快被用于热处理工艺的模拟。经过多年的开发, SYSWELD 软件功能得到不断的完善, 从而满足现代工业制造的需要。

SYSWELD 完全实现了机械、热传导和金属冶金的耦合计算, 允许考虑晶相转变及同一时间晶相转变潜热和晶相组织对温度的影响, 在具体计算中分两步进行, 首先实现温度和晶相组织的计算, 然后进行机械力的计算。在机械力的计算中, 已经充分考虑了第一步计算的结果, 如残余应力和应变

的影响。

SYSWELD 只要有三大模块: 一是焊接模拟模块, 可以进行制造业中常用的焊接方法的模拟, 如点焊、激光焊、MIG 焊、TIG 焊等, 同时可以对工件表面进行处理强化。二是热处理模拟模块。该模块可以模拟不同热处理工艺对构件的影响, 从而指导热处理工艺的制定。三是结构装配模块。在该模块可以对大型结构的焊接装配进行模拟, 获得结构在组装完毕的焊接变形规律, 为设计阶段的焊接变形控制提供参考, 特别是对那些焊接变形需要严格控制的结构来说这是很重要的。

2.2 材料计算软件 JMatPro4.1

JMatPro4.1 是一款由英国的 Thermotech 公司开发的功能强大的金属材料相图计算和材料性能模拟软件, 可以用来计算金属材料的多相平衡和多种性能, 被广泛的运用到航空航天、机械制造、合金开发等领域。它是一个基于材料类型的软件, 不同的材料类型有不同的模块。现在提供的材料模块有铝合金、镁合金、铸铁、通用钢、不锈钢、镍基合金、钛合金、锆合金等。JMatPro4.1 可以对某一特定材料进行稳态与亚稳态的相平衡计算、热物理及物理性能计算、机械性能计算、凝固性能计算、相转变计算。在相平衡计算中可以分析单个或多个成分对相平衡的影响, 可以计算按照温度变化或者按照成分变化的相平衡。在热物理及物理性能计算中可以得到不同温度下的热物理及物理性能参数, 如杨氏模量、剪切模量、体积模量、泊松比、导热系数、热膨胀系数、密度、比热容、线性膨胀、焓等。在机械性能计算中可以得到材料的硬度、屈服强度、抗拉强度随晶粒尺寸变化曲线, 高温强度随温度变化曲线、蠕变曲线、断裂寿命曲线、应力

-应变曲线（真应力、工程应力）等。凝固性能计算用来模拟铸造，相转变获得 CCT 或 TTT 曲线，进行金属热处理计算。在 JMatPro4.1 版本中不同的材料模块的计算功能有所区别，

JMatPro4.1 在软件开发过程和实际运用过程中做过大量的实验，验证计算结果和实际材料性能参数的吻合性，确保软件计算的材料性能数据的准确性。软件的界面简洁使用者容易操作。计算速度快，在现在的计算机上计算一种材料的性能只需几分钟。每个软件版本中都提供演示版和正式版，演示版具有正版软件除计算功能外的所有功能，它可以帮助初学者了解、学习软件，并且可以处理正版软件上的计算结果。因此，JMatPro4.1 软件被广泛运用于辅助合金材料的开发；预测材料的各种性能数据，特别是高温下的材料参数，从而节省大量的实验费用；为材料成型 CAE 软件提过材料数据。

3 材料数据库的建立

3.1 材料性能参数获取

焊接过程是一个把材料加热到熔化甚至是汽化，然后再冷却凝固的过程。为了能准确模拟焊接过程和焊接结束后的焊缝甚至整个结构的变形和应力状况，就需要材料在各个温度下的性能参数。本文的方法是建立材料数据库过程中所需的参数，常温下的参数用实验测得，而高温的材料通过 JMatPro4.1 软件计算和查询材料手册获得。

3.2 材料计算方法验证

对于软件计算出来的材料性能参数的准确与否，这个问题是大量使用者的疑虑。JMatPro4.1 软件使用的计算理论是已经非常成熟并被大量试验证明是准确的。JMatPro4.1 在软件开发过程和实际运用过程中都做过大量的实验，验证计算结果和实际材料性能参数的吻合性，从而确保软件计算的材料性能数据的准确性。下面两个表格是用软件计算的结果和实际材料的参数比较：

A5083 相当于我国原 LF4 铝合金，通过手册查询获得的常温数据如下表 3-1：

表 3-1 常温下实验值和计算值的比较

合金牌号	密度 g/cm³	固相线温度℃	液相线温度℃	比热 J/(kg*K)
LF4	2.66	574	638	900
计算值	2.65	576.14	640	900

为说明计算结果的可靠性，在计算所需铝合金材料之前，将 SYSWELD 软件中的铝合金进行计算验证。SYSWELD 软

件中的材料数据是多年发展创建的，在使用过程中得到验证的。计算的铝合金为 AlMgSi 其化学成分如下表所示：

表 3-2 AlMgSi 的化学成分

Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	V	Mg
1.3	0.5	0.1	0.5	0.25	0.2	0.1	0.10	0.8

部分计算参数和现有参数的比较如下表：

表 3-3 固相线温度、液相线温度比较

参数类型	固相线温度（℃）	液相线温度（℃）
现有参数	580	650
计算参数	571.99	650.33

从上面的数据的比较可以看出使用 JMatPr4.1 软件计算的材料性能数据和实际数据虽然在大小上有所区别，但是数值的偏差在一定允许的范围内，同时在随温度变化的趋势上两者是相似的，因此，使用 JMatPro4.1 软件计算的材料性能参数是可靠的，是可以使用到后面的计算中。

4 铝合金焊接构件残余应力模拟

4.1 热源调整

焊接模拟分析结果是否能准确反映实际焊接情况很大一部分取决于在进行焊接模拟过程中的热源模型的选择是否合适。焊接热源模型决定着热量输入和分布情况。不同的焊接方法在实际施焊过程中热输入效率和分布情况是有所差别的，热源模型能否准确反映实际情况，影响着最后计算出的结果可靠性。本文在进行焊接接头计算采用的热源为双椭圆热源模型。双椭圆热源模型适合于模拟 MIG、TIG 等焊接。热源模型的数学表达式如下：

$$Q(x,y,z)=Q_f\exp\left(-\left(\frac{x^2}{a_f^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}\right)\right)$$

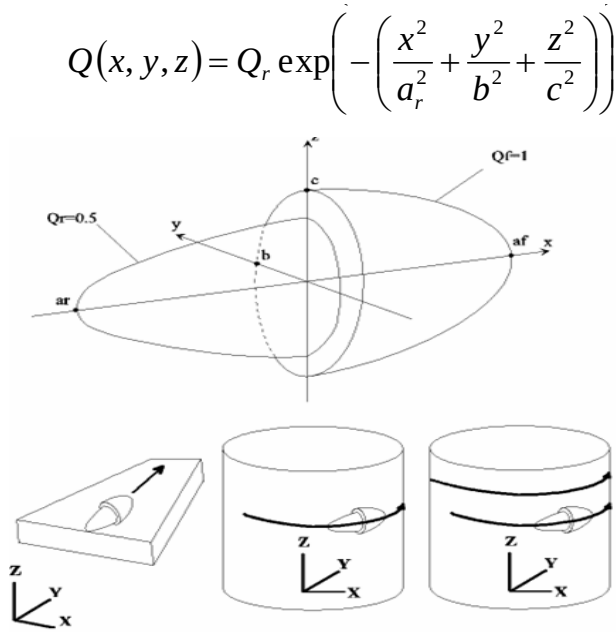


图 4-1 双椭球热源模型

在计算模拟的过程如果仅仅按照线能量大小来进行计算的话, 结果和实际情况可能出现较大的偏差, 因为同样的线能量, 电流电压可以不一样, 最后导致焊接完成焊缝形状不一样如下图:

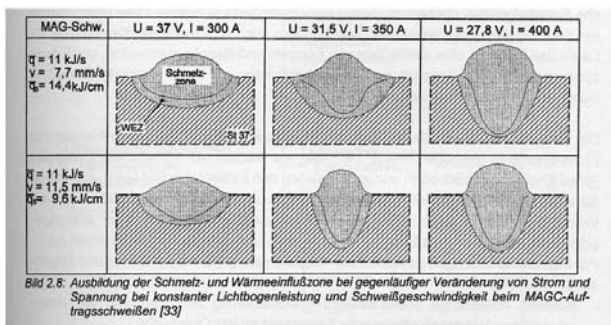


图 4-2 相同线能量不同焊缝形状

相同的线能量, 不同的熔深和熔宽计算出来的温度场和残余应力分布是不一样的。为了保证计算的结果更接近实际情况, 在进行计算的时候, 要对焊接热源进行调整, 使得模拟出来的焊缝形状更接近于实际焊缝。

为了保证计算结果, 不同厚度、不同材料、不同接头形式、不同线能量都要进行热源调整。调整完得热源形状如下图所示:

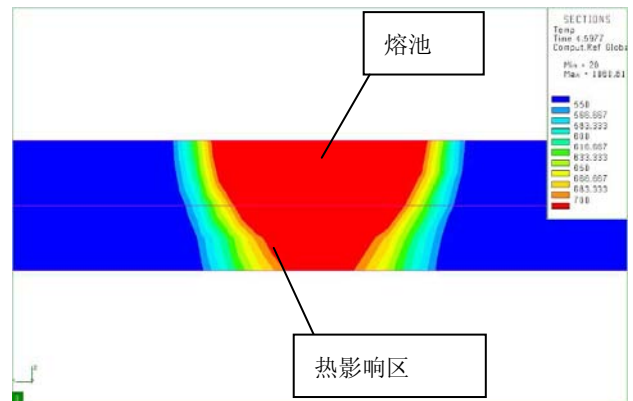


图 4-3 调整完的热源形状

4.2 标准接头应力计算

对接接头和对接接头两种标准接头进行残余应力模拟, 并对实验中的两种接头分别用 X 射线衍射法和小孔法进行测试, 计算的模型如下:

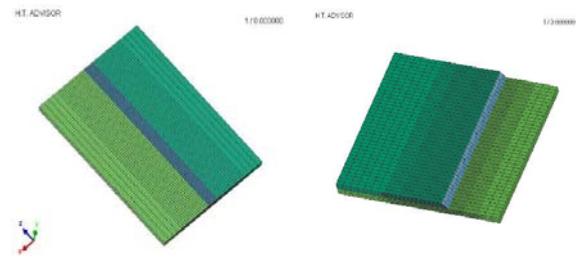


图 4-4 对接、搭接计算模型

对接接头是由两块 $300 \times 110 \times 8$ 构成, 搭接接头是由 $230 \times 200 \times 8$ 和 $200 \times 150 \times 8$ 组成, 材料均为 A6N01S-T5, 采用的焊接工艺相同, 即焊接电流为 270A, 焊接电压为 27V, 焊接速度为 520mm/min。对接接头是开有 V 型坡口, 两层焊满, 在模拟过程中施加两次热源来模拟两层焊。计算过程采用双椭球热源对模型加热, 在施加热源之前对热源的高斯参数进行调整。计算出来的纵向应力分布云图如下图:

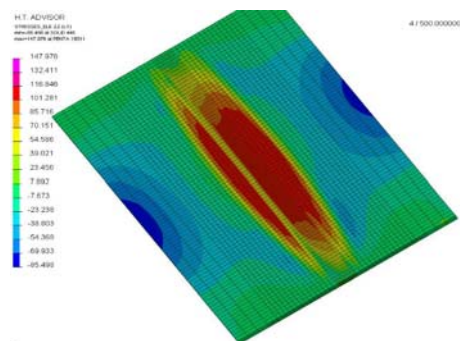


图 4-5 对接接头纵向应力分布图

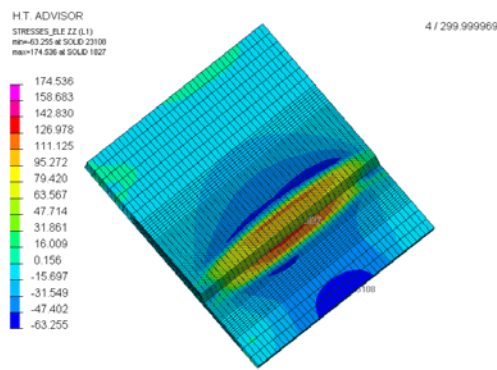


图 4-6 搭接接头纵向应力分布图

计算结果和实测结果如下图、表：

表 4-1 对接接头残余应力测试和计算结果

距离 (mm)	0	2	4	6	8	12	15	28	36
小孔法 (MPa)	118	158	123	81	—	—	71	25	—
X 射线 (MPa)	88.26	83.13	97.03	83.05	-55	—	—	—	—
计算 (MPa)	111.99	102.3	112.97	—	110.84	117.87	96.45	-4.13	-25.90

表 4-2 搭接接头残余应力测试和计算结果

距离 (mm)	0	3	5	8	10	13	15	20	23
小孔法 (MPa)	80	62	56	50	—	45	—	—	-71
计算 (MPa)	110.60	105.84	93.04	75.29	67.71	34.68	-15.22	-44.51	—

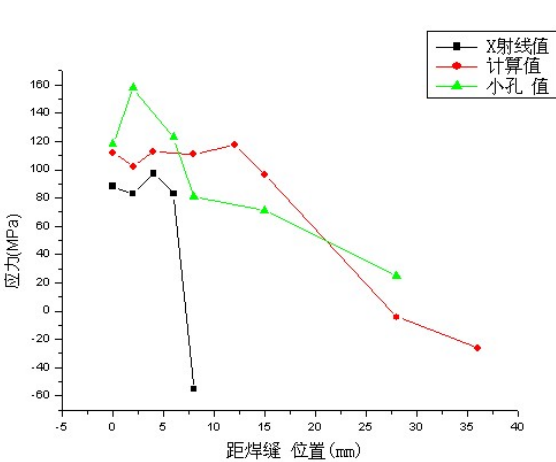


图 4-7 对接接头计算结果和实验比较

在图 4-7 中 X 射线衍射法测得的残余应力值比小孔法测得的数值小，这是由于 X 射线衍射法只能测试构件近表面的应力值，其测试的深度一般在几个微米到几十个微米，为防止表面附加应力的影响，在测试之前要对表面进行电解抛光

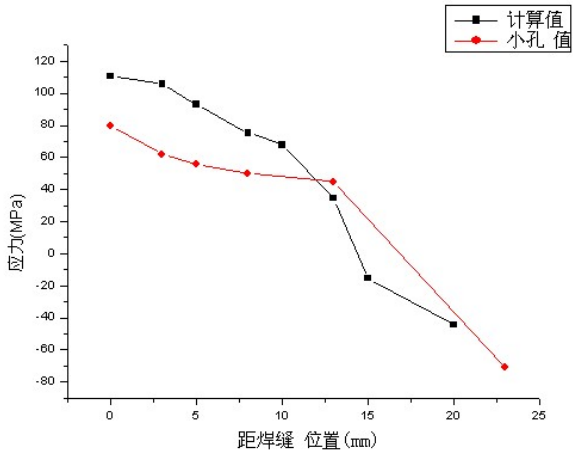


图 4-8 搭接接头计算结果和实验比较

处理，而小孔法可以测试距离构件表面较深的应力，其钻孔深度和钻头的直径有关，在本次实验中钻孔的深度为 2mm 左右。

从图上可以看出计算的结果和实验测试的结果在残余

应力的分布趋势是相似的，即在焊缝上存在残余拉应力，随着离焊缝距离的增加，残余拉应力逐渐减小，最后转变为残余拉应力。从图中可以看出在残余应力大小数值上有所区别，小孔法虽然测试的深度可以达到 2mm，计算的结果取出的数据位置的厚度大于 2mm，因此在数值上有所偏差，但是这种偏差在工程上是允许的，所以采用 SYSWELD 软件计算焊接残余应力分布是可靠的。

5 结论

本报告使用 JMatPro4.1 软件对高速列车上的铝合金材料进行性能参数计算，获得高温下的材料数据，并使用这些

数据对材料数据库进行修正。通过 SYSWELD 软件调用修正后的铝合金数据库对型材焊接接头及构件进行数值模拟，并和实测数据进行比较，得出如下结论：

(1) 在对铝合金型材焊接数值模拟中使用由 JMatPro4.1 软件计算获得的材料性能参数，模拟的结果和实际情况相近，证明利用 JMatPro4.1 软件计算的材料性能参数是可用的。

(2) 通过对标准接头的模拟计算和实验测试结果进行比较，证明使用 SYSWELD 软件对焊接应力场进行计算的方法是可靠的。

(上接第 117 页)

冷态对中曲线的要求对烟气轮机一轴流风机进行二次对中，再次检查动叶叶顶与过渡机壳间隙符合要求后，安装烟气轮机进气机壳。当满足冷态对中的要求值后，将地脚螺栓上、下螺母点焊固定，进行机组底座的二次灌浆。围绕需二次灌浆处做临时模板，将临时模板内灌浆表面进行彻底清理，表面浇水湿润不少于 6 小时。灌浆采用 CH-6 型高强无收缩灌浆料，应从临时模板框的一侧灌入，从另一侧流出，并搅动灌浆料以便于排净底座下的空气，保证充分灌实，二次灌浆必须一次连续完成。

3.6 机组冷态精对中

机组冷态精对对在二次灌浆的高强无收缩灌浆料达到设计强度并且在烟气轮进出口管道回装之前进行，根据对中时的环境温度按冷态对中曲线进行调整对中数值，应符合机组冷态对中的相关要求。

3.7 天圆地方过渡段及机组进出口管道回装

首先回装天圆地方过渡段，恢复烟气轮机出口管道钢结构支撑框架。烟气轮机进出口管道回装回装工序质量非常关键，烟气轮机进出口管道管长，运行时温度高，管道热膨胀量非常大。正常运行时，管道热膨胀后对机壳的推力大，因此在冷态预拉伸安装烟气轮机进出口管道时，要做到无应力安装。在烟气轮机排气机壳 4 个支耳打上百分表，观察排气机壳支耳位移情况，并据此分析管道对烟气轮机的冷态外

力作用情况，避免对机组冷态精对中产生影响。

3.8 再次复核机组冷态精对中

由于机组进出口管道回装采取预拉伸安装工艺，冷态回装结束后进出口管道对烟气轮机本体必然产生拉力作用，有可能造成烟气轮机一轴流风机冷态精对中产生变化，因此必须再次复核机组冷态精对中数据。在机组预热和开机过程中，要用塞尺不时塞测支耳与支座间的缝隙，随时掌握缝隙状况及变化趋势。当缝隙值大于 0.2mm 时要严密监视，变化趋势较快时应立即停机处理。

4 结论

按照上述施工技术及施工工序进行施工后，在规定时间内完成了本次装置停工大修期间烟气轮机的更新安装工作，确保了装置按时开工。烟气轮机机组运行到目前为止已近两年时间，机组各项运行参数正常。

参考文献

- [1] SH/T 3516-2001 催化裂化装置轴流压缩机—烟汽轮机机组施工技术规范[S].
- [2] GB 50231-2009 机械设备安装工程施工及验收通用规范[S].
- [3] GB/T 50448-2008 水泥基灌浆材料应用技术规范[S].