全熔透与部分熔透十字接头疲劳性能对比分析

张仁航，李帅贞，汪认，何建英，许骏，孙晓红，冷康龙
中车青岛四方机车车辆股份有限公司　山东青岛　266111

摘要：通过对比7B05-T4铝合金全熔透与部分熔透十字接头疲劳力学性能，分析了焊接缺陷对其力学性能的影响，有限元分析发现部分熔透十字接头会导致其焊脚处应力集中加剧。试验表明：两种十字接头抗拉强度分别为374MPa、356MPa，全熔透和部分熔透十字接头疲劳极限分别为60.0MPa、46.0MPa。

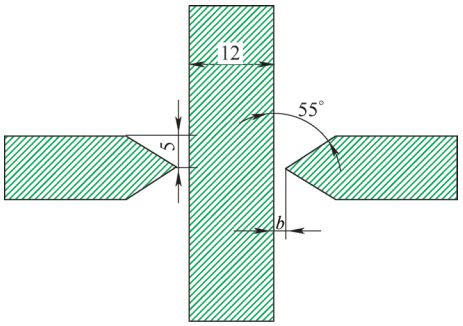
关键字：全熔透；部分熔透；疲劳性能；应力集中

1　序言

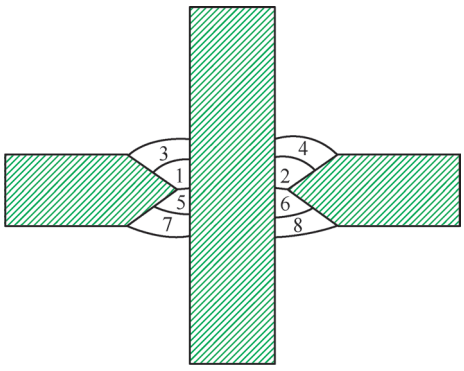
高速列车已日益成为国家交通主动脉，随着高速列车生产技术要求日益提高，焊接生产受到越来越多的关注。铝合金中厚板焊接易出现未焊透现象，十字接头未焊透现象采用常规的无损检测方法难以检出其内部缺陷，因此十字接头类焊缝未焊透情况下的力学性能研究对于焊接生产具有重要的指导作用。哈尔滨工业大学刘永等[1]建立了疲劳失效的主*S*—*N*曲线以研究不同板厚参数对于疲劳性能的影响；RAVINDRA等[2]研究了十字接头角度对于疲劳性能的影响；山东大学吴俊亮等[3]提出了较厚板部分熔透可以部分取代全熔透十字接头的理念；马思群等[4]给出了不同焊接缺陷试件疲劳寿命的“等效初始裂纹”。本文研究了7B05铝合金全熔透和部分熔透十字接头性能，借助有限元分析方法对疲劳性能进行了验证性分析。

2　试验方法

十字接头焊接试验采用国产7B05铝合金，合金状态为T4，焊接方式为人工MIG焊，采用ϕ1.2mm的ER5356焊丝。焊接坡口形式如图1所示，坡口间隙为2.5mm。等效未熔透缺陷[4]总尺寸不高于焊缝厚度2mm。焊接参数见表1。拉伸试验设备采用岛津IG-250KN万能试验机，疲劳试验采用高频疲劳试验机PLG进行常规试验，应力比采用*R*=0.1，试验分为8个应力等级。拉伸、疲劳试样由相同焊接参数批量焊接后统一取样，根据焊接熔合状况分别编号J8、J9。



a）接头形式



b）焊缝布局

图1　十字接头焊接坡口形式

注：1~8代表焊接顺序。

十字接头疲劳试件尺寸及应力加载方向如图2所示。试件加工去除起弧点及收弧点25mm范围内焊缝，在十字接头界面处抛光、倒圆角，以避免疲劳裂纹产生于界面位置。全熔透焊接接头如图3a所示，部分熔透焊接接头如图3b所示，图中未熔透总尺寸为1.8mm。

表1　十字接头焊接参数

焊道	焊接方法	焊材规格 ϕ/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	电流极性	焊接速度/mm·s^{-1}	热输入/kJ·mm^{-1}
1	131-PM	1.2	224	22.3	DCEP	8.9	0.367
2	131-PM	1.2	224	22.3	DCEP	8.9	0.367
3	131-PM	1.2	239	23.8	DCEP	7.9	0.417
4	131-PM	1.2	239	23.8	DCEP	7.9	0.417
5	131-PM	1.2	235	24.3	DCEP	8.3	0.404
6	131-PM	1.2	235	24.3	DCEP	8.3	0.404
7	131-PM	1.2	235	24.2	DCEP	9.2	0.494
8	131-PM	1.2	235	24.2	DCEP	9.2	0.494

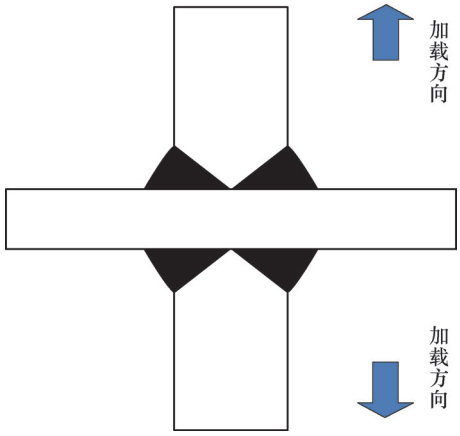
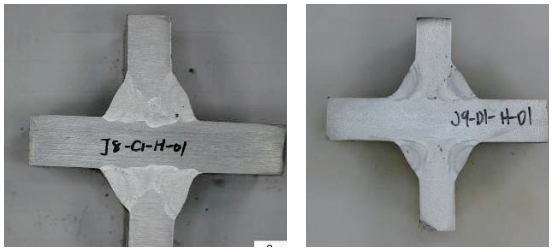


图2　十字接头疲劳试样

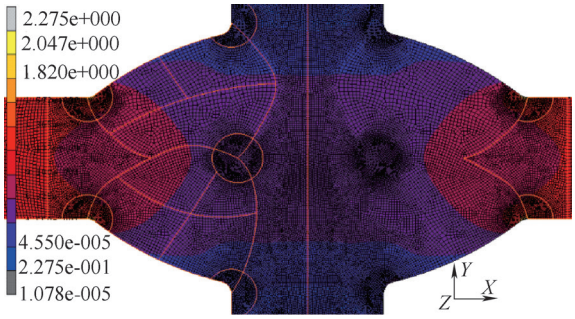


a）全熔透焊缝　　b）部分熔透焊缝

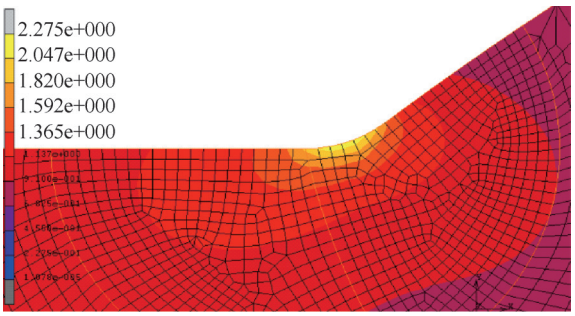
图3　十字接头宏观金相

3　模拟仿真

图4为采用IIW推荐网格划分方式，结合Von Mises应力强度假设[5]条件下十字接头结构网格及应力分布图，可以发现应力均集中于焊脚处，力线传递也从一侧由于截面尺寸突变导致在两焊脚处改变分布流向产生拐点而聚集，后由于截面尺寸的扩大导致力线分布较为稀疏，使内部应力集中较小，应力分布较为平缓，虽没有达到均匀一致，但使得焊跟处应力集中明显优于焊脚。随力线一直沿着同轴

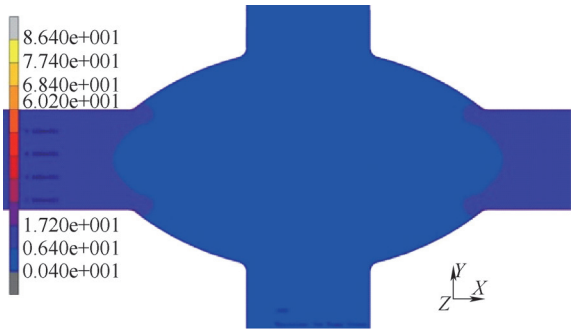


a）网格划分



b）焊脚应力分布

c）部分熔透应力分布



d）全熔透应力分布

图4　同轴受力情况

和对称的方向与路径传递，又在另一侧的两焊脚处再一次遇到截面突然缩小并发生应力集中，两侧应力集中的情况和起因完全对称，程度也保持一致。整体流线走向、变化情况、分布对称统一。试验可以发现，在部分熔透情况下会发生焊脚应力集中程度增加的情况，从而导致焊缝疲劳性能较低。

4 疲劳性能

疲劳试验前对十字接头拉伸试验测试见表2，两种形式十字接头拉伸断裂位置均位于母材，接头处抗拉强度高于母材，断裂方式属于韧性断裂。针对十字接头疲劳试验，应力比选用R=0.1，分别进行了8组应力等级试验，试验数据见表3、表4。疲劳性能拟合曲线如图5、图6所示。

表2 十字接头拉伸性能

试样编号	屈服强度/MPa	平均屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	平均抗拉强度/MPa	断裂位置
J8-C1-LS-01	268.613	264	374.505	374	母材
J8-C1-LS-02	273.381		382.115		母材
J8-C1-LS-03	251.565		364.564		母材
J9-D1-LS-03	261.391	263	355.874	356	母材
J9-D1-LS-04	265.011		355.992		母材
J9-D1-LS-05	264.089		357.886		母材

针对接头J9-D1的典型疲劳断口分析，其宏观断口形貌如图7所示，从中可以看出，断口存在明显的疲劳辉纹和瞬断区剪切唇结构。焊接裂纹起始于焊缝焊脚缺陷处，由焊缝表面向焊缝内部发展。图8为其疲劳断口的典型区域SEM图片，图8a为疲劳裂纹萌生区域局部，裂纹起始于近焊脚表面焊接缺陷处；图8b为疲劳裂纹扩展区，可以观察到互相平行且细密的疲劳辉纹，裂纹扩展路径中没有遇到大颗粒杂质和第二相颗粒，无明显的二次裂纹出现，同时未发现明显的分层台阶；图8c为疲劳裂纹瞬断区，由大小不一的等轴韧窝组成，呈典型的韧性断裂，韧窝深度较深，说明材料塑形储备良好，部分韧窝中可观察到棒状的第二相粒子。

表3 全熔透试样疲劳试验数据

应力状态		破坏循环次数/次	断裂位置
σ_{max}/MPa	频率/Hz		
145	148~160	146243 348157 206416	焊脚
135	148~160	565145 418437 496464	焊脚
125	148~160	703225 352284 648413	焊脚
110	148~160	1.41857E6 1.16447E6 1.36545E6	焊脚
95	148~160	1.75494E6 1.52173E6 1.81655E6	焊脚
80	148~160	1.87811E6 2.43611E6 2.05465E6	焊脚
75	148~160	2.29291E6 2.09021E6 2.81087E6	焊脚
65	148~160	10^7	焊脚

注：破坏循环10^7次对应疲劳极限为60.0MPa。

表4 部分熔透试样疲劳数据

应力状态		破坏循环次数/次	断裂位置
σ_{max}/MPa	频率/HZ		
125	148~160	157432 209820 223546	焊脚
110	148~160	635513 538150 567987	焊脚
95	148~160	519358 640757 618973	焊脚
80	148~160	856674 742145 816746	焊脚
65	148~160	1224001 1080430 1154670	焊脚
60	148~160	1441536 1019045 1567696	焊脚
55	148~160	2950293 10^7 10^7	焊脚 焊脚 未断
50	148~160	10^7	未断

注：破坏循环10^7次对应疲劳极限为46.0MPa。

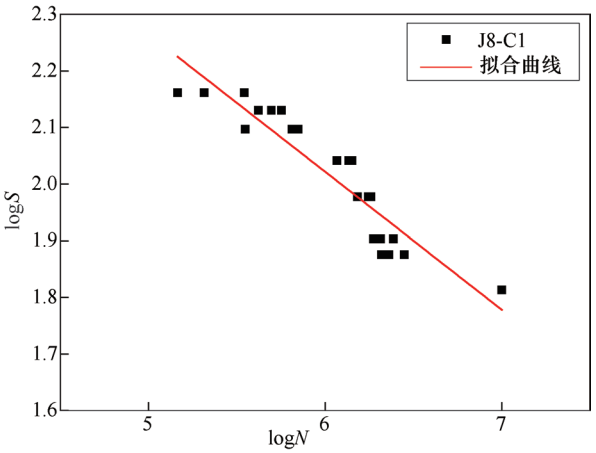


图5　全熔透十字接头疲劳回归线

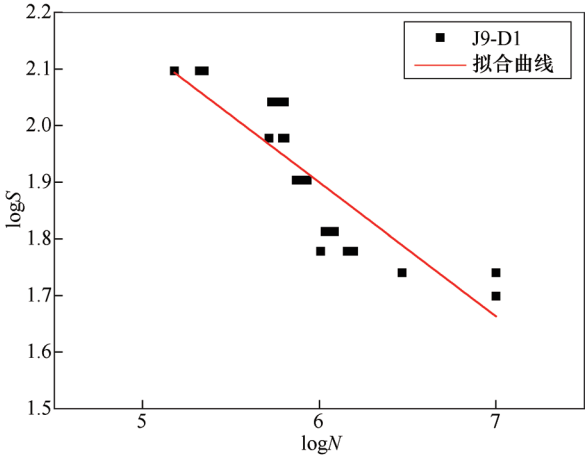


图6　部分熔透十字接头疲劳回归线

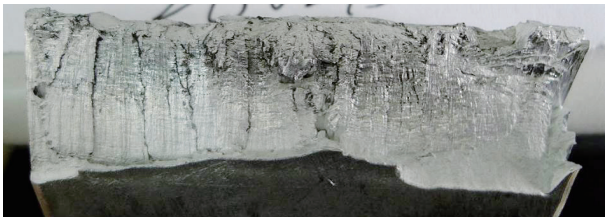
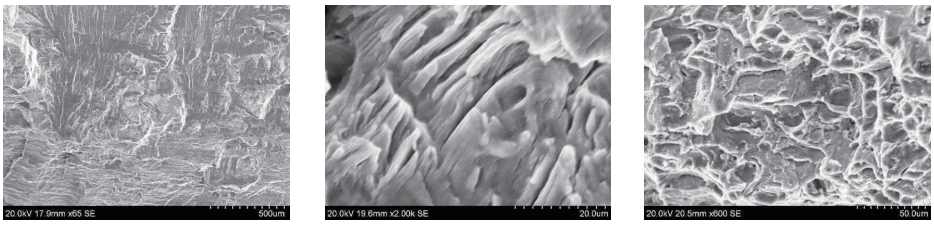


图7　疲劳试件宏观断口形貌



a）疲劳源区　　b）疲劳扩展区　　c）瞬断区

图8　疲劳微观断口形貌

5　结束语

1）十字接头部分熔透接头均具有良好的拉伸载荷承载能力。

2）仿真模拟发现十字接头未熔透部分会导致焊脚应力集中增加，造成接头疲劳承载能力降低。

3）部分熔透较全熔透十字接头疲劳性能降低23%，疲劳断裂主要发生于焊脚应力集中区域，疲劳断裂为韧性断裂。

参考文献：

[1] 刘永，王苹，马然，等.铝合金非承载十字接头疲劳特性[J].焊接学报，2016，37（8）：83-86.

[2] RAVINDRA B，SENTHIL KUMAR T，BALASUBRAMANIAN V. Fatigue life prediction of gas metal arc welded crucifrom joints of AA7075 aluminium alloy failing from root region[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2011（21）：1210-1217.

[3] 吴俊亮，刘敏，侯和涛.部分熔透十字焊接接头疲劳性能试验[J].焊接学报，2003，24（1）：61-63.

[4] 马思群，谷理想，袁永文，等.焊接缺陷对动车组铝合金车体疲劳寿命影响研究[J].铁道学报，2014，36（2）：42-48.

[5] SONSINO C M.A consideration of allowable equivalent stresses for fatigue design of welded joints according to the notch stress concept with the reference radii *r* ref=1.00 and 0.05mm[J].Welding in the World，2013，53（3-4）：64-67.

MW 20201124