

上海轨道交通服役到期列车延寿改造策略

吴正晨

(上海地铁维护保障有限公司车辆分公司,200237,上海//工程师)

摘 要 上海轨道交通部分列车即将服役到期,针对该问题,研究技术经济性良好的退行更新处置方案,保证有足够数量的功能完好、结构安全的列车替代这批列车,保证正线正常运营,已迫在眉睫。从车体寿命评估、列车退行更新策略、退运列车处置策略等方面进行了探索,对比分析了不同延寿改造方案的安全性和经济性。通过车体补强将列车使用寿命延至 44 年的方案与将退行列车改造成综合巡检车的方案最佳。

关键词 上海轨道交通; 车辆; 服役期限; 延寿改造; 车体补强; 综合巡检车

中图分类号 U279.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.S1.008

Shanghai Rail Transit Train Service Life Extension and Retrofitting Plan

WU Zhengchen

Abstract Some trains of Shanghai Rail Transit are reaching their service life, and it is urgent to study the disposal plan of technically and economically viable retrograde updates to ensure that a sufficient number of functional and structurally safe trains replace this batch of trains and ensure normal operation on main line. Aspects such as carbody lifespan assessment, train retrograde update strategy, and retired train disposal strategy are explored. The safety and economy of different service life extension and retrofitting plans are compared and analyzed. The plan to extend the service life of the trains to 44 years through carbody reinforcement and the plan to transform the retrograde trains into comprehensive inspection vehicles are found to be the best options.

Key words Shanghai rail transit; vehicle; service life; service life extension and retrofitting; carbody reinforcement; comprehensive inspection vehicle

Author's address Vehicle Branch of Shanghai Rail Transit Maintenance Support Co., Ltd., 200237, Shanghai, China

上海轨道交通的 01A02 型列车共有 5 列 40 辆,其中 10 辆 Tc(带有司机室的拖车)车由德国德沪地铁集团设计制造,并自 1994 年投运,使用期已

接近其 30 年的设计寿命;其他 30 辆动车为 2009 年到 2010 年间从中车株洲电力机车有限公司新购并投运。实际使用中,该批列车车体日趋老化,结构裂纹严重,安全性得不到保障,而列车主体结构的寿命决定了整车的寿命。此外,根据交运规[2019]8 号《城市轨道交通设施设备运行维护管理办法 第四章 更新改造管理》中的相关要求:“对于车辆、供电、信号等涉及行车安全的关键设备,到达使用年限的应及时更新。”因此,研究并制定退行更新处置方案已迫在眉睫。必须采用技术经济性良好的方案,以保证有足够数量的功能完好、结构安全的列车替代这批列车,保证正线正常运营。该项工作必要而迫切。本文从车体寿命评估、列车退行更新策略、退运列车处置策略等方面研究服役到期列车的延寿改造策略。

1 车体寿命评估

车体是车辆的不可更换部件,更换车体的成本接近于采购新车,因此需对车体的残余寿命进行研究。在车辆退运及延寿使用的决策中,主体结构车体的寿命决定了整车的寿命,因此,在修复裂纹以解决车辆短期故障问题的同时,为了给后续车辆长期使用方案提供决策依据,上海轨道交通内部成立了课题组开展专题研究。车体评估对象为发生裂纹的原第一批车辆,即 01A02 型列车的 Tc 车。通过对车体有限元强度评估、裂纹原因分析、车体关键焊接结构疲劳强度计算等技术手段对该批次车辆车体的状态和剩余使用寿命进行预测,并提出裂纹补强建议方案及补强后车体寿命的评估,如表 1 所示。

由表 1 可看见,01A02 型列车 Tc 车的使用寿命受限于牵引梁寿命(只有 26 年),而车体的寿命决定整车的寿命,故 Tc 车的预期使用寿命为 26 年。采用补强方案一,Tc 车的使用寿命可达 34 年,其中,车钩座、牵引梁采用结构性改变的补强方式,抗

侧滚扭杆座、空簧座采用临时性补焊的修补方式,且为寿命限制区域;采用补强方案二,Tc 车的使用寿命可达 44 年,相比补强方案一,抗侧滚扭杆座、空簧座优化为结构性改变的补强方式,因此寿命得以延长。

表 1 01A02 型列车 Tc 车补强方案及车体寿命评估
Tab. 1 Reinforcement plan and carbody lifespan assessment for Tc vehicle of 01A02 train

项目	原始车体寿命/年	补强方案一		补强方案二	
		方案	使用寿命/年	方案	使用寿命/年
车钩座	40.2	结构性补强	>55	结构性补强	>55
牵引梁	26.0	结构性补强	44	结构性补强	44
抗侧滚扭杆座	26.7	修补	34	结构性补强	>50
空簧座	27.5	修补	34	结构性补强	>50
其他区域 (包括门角区域)	>26.0		>34		>44
车体预期使用寿命	26.0		34		44

注:阴影处为寿命限制的部件区域,即为车体寿命。

鉴于表 1 的寿命评估,需采用技术、经济良好的补强方案来开展 01A02 型列车的退运更新工作。

2 列车退运更新策略评估

列车退运更新策略的制定依据主要是车体状况,因此,以车体为对象,01A02 型列车有 4 种退运更新策略。

2.1 整车退运

车体及其他子系统直接使用至设计寿命 30 年后退出运营,采购新的车辆投入运营。退运后的车辆可用作培训或拍卖回收,尽可能利用其剩余价值。

2.2 车体补强延寿,其余升级改造

若使用至 30 年时不退运,首先需确定列车延寿目标寿命,然后对车辆所有系统进行评估并进行相应的升级改造。通过验证,确定车体延寿目标定为 44 年。由于车体是承载车辆所有设备的基本结构,因此车体寿命即作为整车延寿的目标寿命。车体补强延寿后,车辆其余子系统将根据此目标寿命,再结合各系统设计寿命、当前状态进行匹配性的升级改造,最终实现整车延寿。

Tc 车车体根据表 1 补强方案二延寿至 44 年,其余各子系统根据技术性能、设计寿命、更新改造情况(“直改交”)和设备当前状态,若需要在车辆 30 年使用寿命后继续使用,其涉及的升级改造或更换范围如表 2 所示。

表 2 01A02 型列车不同车辆补强延寿和升级改造方案
Tab. 2 Different vehicle reinforcement life extension and retrofitting plans for 01A02 train

序号	项目	不同车辆升级改造项目	
		10 辆 Tc 车(老车)	30 辆动车(增购车)
1	车体	新购/补强	
2	内装	全部更换	
3	车门		
4	车钩和缓冲器		
5	贯通道		
6	转向架构架	拖车更换	
7	齿轮箱		
8	轮对	全部更换	
9	乘客信息系统		
10	照明系统		
11	空气制动系统		
12	受电弓		
13	空调	全部更换	
14	牵引、辅助供电、控制系统		
15	电缆	部分更换	
16	小型电器	部分更换	
17	其他	拆装运输	

注:01A02 型列车目标寿命是使用到 2037 年,因此,10 辆 Tc 车(老车)使用期限是 1993—2037 年,需补强延寿和升级改造;30 辆动车(增购车)使用期限是 2008—2037 年,处于寿命期内,无需补强延寿和升级改造。

2.3 车体更新延寿,其余升级改造

基于该批车辆车体出现裂纹的情况较为严重,对于延寿方案提出第二种方式,即:将车体更新为新的车体,新购车体可按 30 年寿命进行设计,具体目标寿命根据列车整体寿命统一考虑。其余子系统逐项根据目标寿命、系统设计寿命、实际状态进行升级改造,充分利用设备的剩余价值。最终将升级改造的子系统安装在新购车体上投入运营。

采购新车体,替换 5 列车中 10 辆 Tc 车(老车)的车体,将 Tc 车可利用的子系统安装在新车体上。若新购车体 Tc 车与 30 辆动车(增购车)继续使用至增购车整车退运的 2038 年,新购车体仅使用了 15 年。由于 01A02 型列车中间车(30 辆动车)车体情况比拖车(10 辆 Tc 车)较优,因此建议将 30 辆动车延寿 10 年,则头车(Tc 车)新购车体可以使用 25 年。01A02 型列车 Tc 车车体补强方案和车体更新方案时间轴示意图如图 1 所示。

2.4 整车退运,将未达到使用寿命车体改造成综合巡检车

针对拖车(Tc 车)与动车(增购车)使用年限存在较大差异,结合上海轨道交通数字化检测需求,

可采取整车退运的更新策略。未达到使用寿命的车体改造成综合巡检车使用:5 列 40 辆车使用至拖车使用寿命 30 年时退运,然后采购 40 辆新车;将 30 辆动车改造成 5 列 6 节编组的综合巡检车。

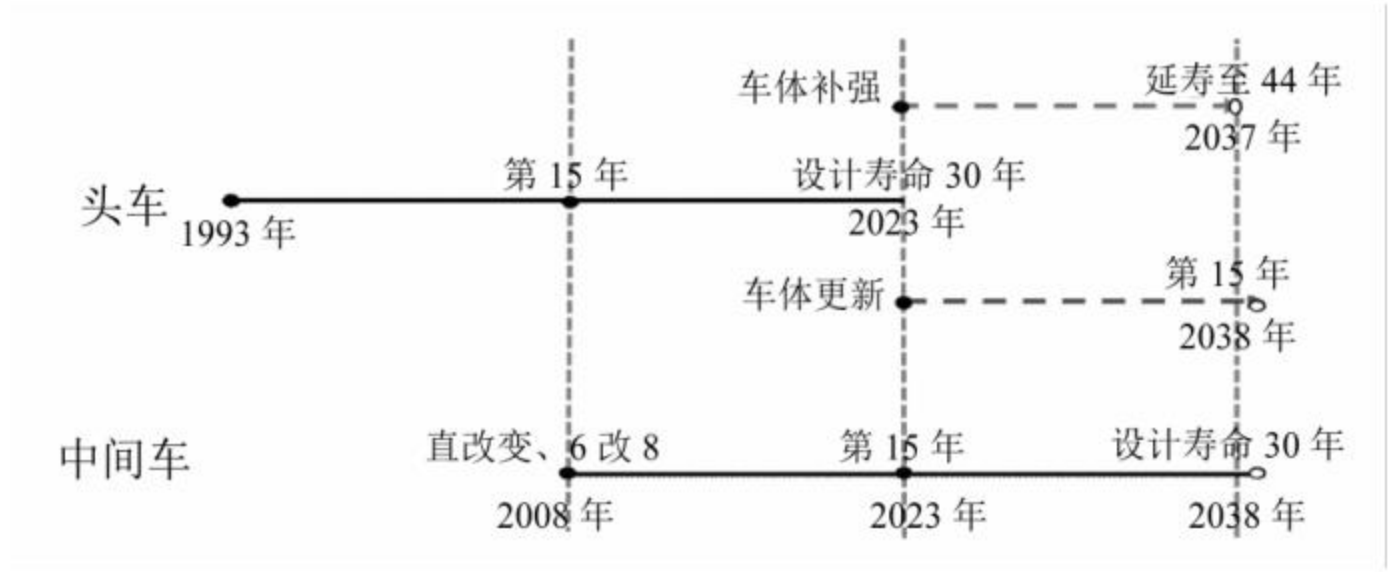


图 1 01A02 型列车 Tc 车车体补强方案和车体更新方案时间轴示意图

Fig. 1 Timeline diagram of 01A02 train Tc carbody reinforcement plan and carbody upgrade plan

在城市轨道交通正常运营过程中,接触网、钢轨、隧道、轨道等设施设备工作状态是否良好,直接影响到能否正常运营。而此类设施设备属于城市轨道交通基础设施设备,其规模和覆盖范围随着网络规模的扩大而拓展,维护工作量和范围日益加大。同时,此类设施设备的检测及维护大多依靠人工判断和作业,存在效率低下、隐患较多、质量难以控制等弊端,难以满足维护需求。由于此类设施设备直接关系到运营安全,为确保维护质量,不宜采用委外维护的模式。因此,有必要在网络化建设与运营阶段,加强综合巡检车(见图 2)的配置。

2.5 更新退运策略比选

根据经济性比选,01A02 型列车 10 辆拖车(头车)“车体补强延寿”方案相对于“车体更新延寿”方

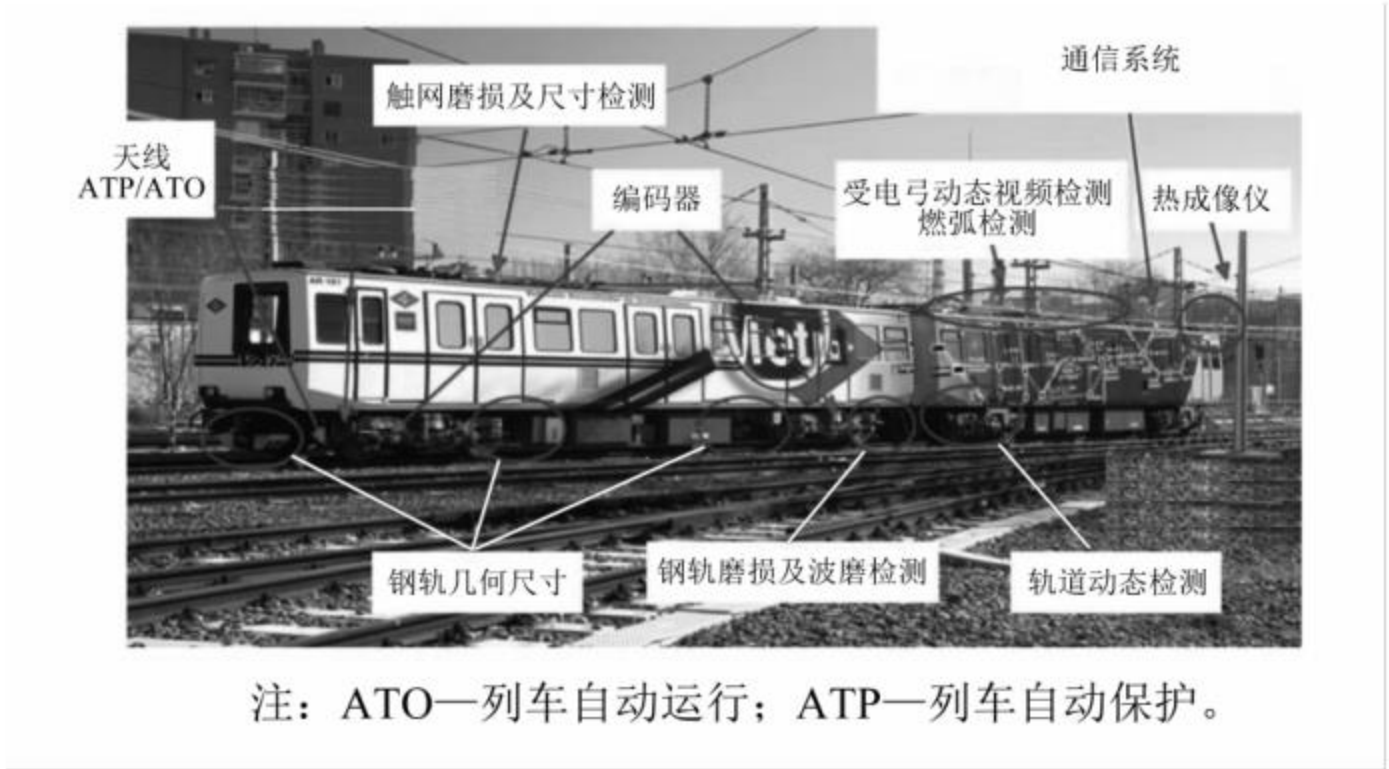


图 2 综合检测车设备配置及功能示意图
Fig. 2 Diagram of comprehensive inspection vehicle equipment configuration and function

案节省约 1 839 万元,“车体更新延寿”方案因为其拆装工程量大,引起的技术服务费较高、电缆更换量较大,所以总费用较高。因此,“车体补强延寿”方案经济性占优。此外,01A02 型列车车体更新后,新购车体与原 01A02 型列车中间车在车龄上相差 15 年,后续中间车报废时,新购车体或将一起报废,造成剩余价值的浪费,因此技术方案角度来看,“车体更新延寿”方案无优势。从安全性角度分析,01A02 型列车只涉及 10 辆拖车(Tc 车),在其采用车体补强方案后,车体若发现再次开裂风险时,扣修车数对全线整个车队的影响面较小。

基于上述分析,“车体更新延寿”方案被排除。“车体补强延寿至 44 年”方案作为候选方案。

整车退运后将未达到使用寿命车体改造成综合巡检车方案(以下简称“整车退运 & 综合巡检车”方案)优点如表 3 所示。

表 3 “整车退运 & 综合巡检车”方案优点

优点	内容
避免人工或施工点浪费	跨专业多功能检测,一次出车多项检测
节省天窗施工点	部分检查内容可在巡检时直接完成,不需要额外申请天窗施工点
检测精度和效率更高	以设备检测代替以往的人工目测
便于跨专业综合分析	检测设备系统集成,便于各专业分公司的跨专业问题研究(如弓网问题、轮轨问题等)
提高各分公司跨部门合作	借此可成立跨专业综合检测班组,在车上互相协作
便于发现问题后的及时维修	检修工具可随车携带,可及时处理巡检时发现的简单问题
设备安装方便	专用检测车,设备安装和设计时无需考虑乘客因素
行驶时段不受限	设计最高车速为 80 km/h,配备通号相关 ATP 保护设备,可在正线运营时段使用。可包含早上巡道、末班跟跑、正线运营时段、天窗点施工等
可用于各种试验	预留接口,可用于各种设备试验安装
原车报废部件可部分再利用	01A01/01A02 报废列车上的部分部件,可在巡检车上作为备件再利用
功能可扩展	配备车钩,可作为库内调机车、司机救援演练用车使用。同时若在正线发生故障,也方便救援
降低运营车的非运营时段使用	代替原有运营车的每日巡检
多线兼容	3、4 号线为同一信号系统,可共用巡检车;7、9 号线由于既有车型参数相同,可实现简易更换通号、车辆软件后即可换线使用。后续运营线路信号系统完成互联互通改造之后,可考虑对综合巡检车一同实施改造,改造完成后可兼容多条线路运行

根据经济性比选,“整车退运 & 综合巡检车”方案相较于“车体补强延寿至 44 年”方案,采购及改造费用需增加 21 387 万元。但经济性分析上,还需考虑以下几点:

1) 车体补强后的裂纹二次开裂或其它新区域产生裂纹所需大量的维修人工和维修成本的投入。参照之前修补费用,单个裂纹修补费用均价为 20.75 万元。

2) 车体修补裂纹的扣停时间成本。

3) 使用既有列车改造成综合巡检车,节省了采购新列车作为综合检测车载体的费用。按 A 型车 850 万元/辆、20 年折旧来计算(综合巡检车使用寿命为 20 年),本项目可节省 22 666 万元。

4) 综合检测车投入使用之后的人工成本效益:预计综合检测车投入使用之后,工务、通号、供电三个专业年合计可节省 95 568 h 的人工工时。

综上,“整车退运 & 综合巡检车”方案相对于“车体补强延寿至 44 年”方案,虽然采购及改造费用增加了 21 387 万元,但考虑到节省的裂纹修复成本及扣停时间成本、综合巡检车车辆载体的采购成本、人工检测工时的节省,从长远来看两个方案费用的差异性并不大。经济性上,“车体补强延寿至 44 年”方案略占优势。

从技术方案来看,“整车退运 & 综合巡检车”方案,可在不占用天窗点的情况下,有效提高各专业的检测频率;专业检测设备的引入又极大提升了各专业的检测效率及准确性;检测数据的整合化,也可为轨道交通基础设施维护及管理人员提供技术决策支持。“车体补强延寿至 44 年”方案主要是对拖车车体薄弱处(例如车钩座、牵引梁、空簧座)进行结构性补强,补强后仍然有补强裂纹二次开裂或其它新区域产生裂纹等风险。补强裂纹二次开裂之后,将不再具备重新修补的可能性,结构可靠性已无法满足安全运行的便捷条件。从技术方案角度来看,“整车退运 & 综合巡检车”方案更占优势。

从安全性角度来看,采用“车体补强延寿至 44 年”方案,车体补强延寿的寿命只增加 14 年,补强后车体裂纹存在二次开裂或者其他新区域产生裂纹的风险。“整车退运 & 综合巡检车”方案中,存在裂纹隐患风险的车辆(拖车)将到期退运,无安全性风险。从安全角度来看,“整车退运 & 综合巡检车”方案更占优势。

因此,“车体补强延寿至 44 年”方案和“整车退

运 & 综合巡检车”方案均可选择。

3 退运列车处置策略

3.1 车辆改造后用于培训用车

为加强集团电客车辆培训实景能力建设,改造后的教育培训列车,目标继续使用 14 年,并参照运营列车实施月检和简易架修等维护项点。列车改造内容包括更新列车制动系统、受电弓和轮对。具体实施方案和改造费用需根据培训需求而制定。

3.2 车辆改造后作为地铁博物馆展品

01A02 型列车作为上海轨道交通的第一种型号列车,具有很强的纪念意义。计划将一节拖车改造后,用于地铁博物馆展出,具体改造根据博物馆实际展出需求而定。剩余车体部分拟切割成小块后,当作工艺品出售。

3.3 车辆拍卖或出售

其他剩余车辆拟通过拍卖或出售等方式处置。拍卖包含完整车辆(含各子系统设备)、非完整车辆(已拆除牵引、辅助供电、列车控制、转向架等系统和设备)。

3.4 拆卸部件做为备品备件使用

为确保改造后的综合巡检车及培训用车在今后 10 年的可维修性,计划保留部分列车的牵引、辅助供电、列车控制、转向架等系统和设备,作为未来的维修备件。

4 结语

1) 基于上述分析,01A02 型列车更新处置策略可选择“车体补强延寿至 44 年”方案和“整车退运 & 综合巡检车”方案。

2) 列车退运后可经改造后用于培训用车、作为地铁博物馆展品、拍卖或出售、拆卸部件做为备品备件使用等。

3) 随着时间的推移,未来会有更多的车辆寿命到期,退行更新处置工作将成为一项常态化工作。本次研究工作有助于推动车辆退行更新处置相关工作流程和相关规章制度的研究和确立,为网络化运营和维护的正常运转提供重要的管理手段和技术支撑。

参考文献

- [1] 于映琳. 浅谈地铁列车厂修中的技术改造与探索[J]. 中国设备工程, 2021(14): 58.

(下转第 50 页)

取两者中的最小值,最终确定:原车体的使用寿命为 26 年,补强或补修后车体的剩余寿命为 9 年。

6 结语

针对上海轨道交通 1 号线列车车辆车体裂纹问题,通过改变结构、裂纹补焊对裂纹区域进行补强或补修处理。提出两维度评估方法,即基于 EN 1999-1-3:2011 和 BS 7910:2005 对铝合金车体关键区域进行服役寿命评估,给出原车体的使用寿命及补强或补修后车体的剩余寿命。通过改变结构、裂纹补焊对裂纹区域进行补强或补修处理,能够延长铝合金车体的寿命。通过两维度评估方法最终确定:原车体的使用寿命为 26 年,补强或补修后车体的剩余寿命为 9 年。

参考文献

[1] 李新康,王苏秦,刘潮涛,等. 基于子模型方法的地铁车体疲劳寿命评估[J]. 西南交通大学学报,2022,57(2): 295.
LI Xinkang, WANG Suqin, LIU Chaotao, et al. Fatigue life assessment of subway car body based on sub-model method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(2): 295.

[4] CEN/CENELEC. 欧洲规范 9:铝结构设计 第 1~3 部分:易疲劳结构: EN1999-1-3: 2011 [J]. 布鲁塞尔: CEN/CENELEC, 2011.
CEN/CENELEC. European specification 9: aluminum structure design-part 1 – 3: fatigue prone structure: EN1999-1-3: 2011 [J]. Brussels: CEN/ CENELEC, 2011.

[5] 李磊,臧兰兰,郎艳,等. 基于 BS EN 1993-1-9—2005 的城轨车辆车体结构疲劳寿命分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(2): 67.
LI Lei, ZANG Lanlan, LANG Yan, et al. Fatigue life analysis of mass transit vehicle car body structure based on BS EN 1993-1-9—2005[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2022, 45(2): 67.

[6] 英国标准学会. 金属结构裂纹验收评定方法指南: BS7910: 2005[J]. 伦敦:英国标准学会, 2005.
British Standards Institute (BSI). Guidance for acceptance and evaluation methods of metal structure cracks: BS7910: 2005 [J]. London: BSI, 2005.

[7] 刘俊杰. 焊接缺陷对铝合金车体断裂失效的影响分析[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
LIU Junjie. Influence of welding defects on fracture failure of aluminum alloy car body[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.