

75 kg/m 钢轨接头预留轨缝与接头热应力场分析

尹成斐

(朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁 062350)

摘要:近期某干线铁路区间钢轨接头联结零件出现大量损坏的情况,为进一步探究故障原因,以线路普通接头为研究对象,以十余年轨温数据为基础,计算铺轨作业时预留轨缝、钢轨伸缩量,并且分析其在日常环境下的温度场分布及温度效应。依据轨道真实结构建立 75 kg/m 钢轨接头联结零件有限元温度场模型,分析不同工况下温度云图,并总结其分布规律。研究发现:该地区 15 a 内,各月预留轨缝平均值相差不大;对于普通钢轨接头,在螺栓中部、钢轨扣压部分、鱼尾板螺栓孔位置产生应力集中;受螺栓预紧力影响,钢轨接头应力集中点最大点在螺栓中部,且受预紧力影响较大;接头联结螺栓预紧力对钢轨温度应力影响比扣件更为明显;这些研究成果为今后养护维修工作提供理论支持。

关键词:铁路;钢轨接头;热应力;有限元

中图分类号:U213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)02-0089-07

0 引言

目前,我国新建以及改建的铁路正线均采用 60 kg/m 钢轨,重载运煤专线采用 75 kg/m 钢轨^[1],如大秦铁路、朔黄铁路等。2007 年底,为提高煤炭运输能力,朔黄铁路正线上行线全部换铺为 75 kg/m 钢轨。但随着铁路运输能力大幅提高,钢轨接头联结零件等零部件逐渐出现不同程度损坏。如果天气温度过高,钢轨内部会产生比较大的压应力,温度过低,钢轨内部会产生比较大的拉应力,当轨温产生剧烈变化时,巨大的温度力会引起钢轨变形、断裂和扭曲,对安全运输产生威胁。故而,掌握钢轨温度力分布和变化对工务维护具有重要意义。文献[2]中,利用有限元软件 ABAQUS 和实验分析无缝线路钢轨温度力与断裂程度的关系,研究钢轨温度应力分布特点;文献[3]采用 ANSYS 软件,对中低速磁悬浮轨排温度效应及其动力响应特征进行分析,并讨论行车速度与轨下胶垫的变化规律;文献[4]使用有限元分析方法对 18 号和 38 号无缝道岔温度力、变形进行分析计算;文献[5]则采用施加横向集中力法对钢轨温度力的测量进行研究;文献[6]计算温度场、机械应力应变场共同作用下的轮轨接触应力变化;文献[7]基于弹性点支撑梁模型,采用三维非线性动力学分析有限元程序建立了轮轨轨缝处接触-冲击有限元模型,通过模拟车轮经过轨缝时冲击钢轨接头的过程,研究了冲击过程中轨头应力分布情况;文献[8]采用计算模型将钢轨接头看作半无限长连续弹性点支承梁用弹性铰接连接的结构,给出钢轨接头强度计算的方法和算例。

根据文献[9],其考虑温度应力与变形对钢轨铺设过程影响,针对钢轨预留轨缝进行分析计算。然而,国内外研究资料中缺乏对轨缝进行统筹和数据分析,针对这一特点,利用 2000—2014 年每个月轨温数据,对钢轨预留轨缝、钢轨伸缩量进行逐一计算分析,并且对 75 kg/m 线路接头联结零件进行温度应力分析,为分析接头联结零件损伤提供理论及数据基础。

1 模型建立

1.1 三维模型建立

收稿日期:2016-11-24 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2017.02.16

基金项目:铁道部科技研究开发计划(2012G011)

作者简介:尹成斐(1974-),男,博士,高级工程师,主要从事铁道运输管理的研究。E-mail:shuohuangycf@163.com

尹成斐. 75 kg/m 钢轨接头预留轨缝与接头热应力场分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2017, 30(2): 89-95.

文献[10]中钢轨接头按性能分类可分为普通接头及特种接头,特种接头由异型接头、绝缘接头、导电接头、斜接头和冻结接头等组成。根据参考文献[11-13],建立 75 kg/m 钢轨普通接头三维实体模型,普通接头由 75 kg/m 钢轨、75 kg/m 钢轨接头夹板、螺栓、螺母和弹簧垫圈组成,由于弹簧垫圈^[14]主要目的是螺栓防松,在分析时忽略该结构。图 1 为普通接头三维模型,图 2 为普通接头有限元模型。

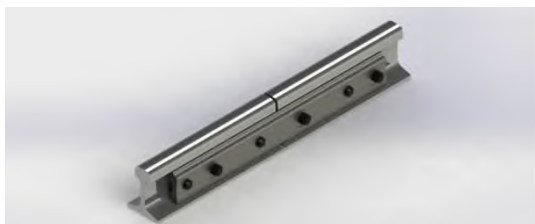


图 1 75 kg/m 钢轨普通接头三维实体模型



图 2 75 kg/m 钢轨普通接头有限元模型

1.2 有限元模型建立

根据 75 kg/m 钢轨普通接头真实结构,钢轨材质为 U75V、接头夹板为 55 钢、螺栓为 20MnSi、螺母为 Q275,模型材质力学性能表如表 1 所示。为减少运算量,使积分更易收敛,螺栓删去螺纹而采用 Bolt load 加载预紧力,为保证模型计算结果精确,所有网格采用六面体单元,由于螺栓、螺母与接头夹板有接触分析,故采用 C3D8R 单元计算,共划分 94 439 个网格。钢轨接头处轨枕间距为 540 mm,单个 II 型弹条扣压力约为 10 kN;设置轨底斜坡部分位置为面载荷,模拟弹条压力;由于本次模型并非轮轨间作用力,故忽略钢轨底面弹性约束,在轨枕作用位置设置全约束。最高最低轨温差 $< 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,螺栓紧固力矩为 $500\text{ N}\cdot\text{m}$,螺栓预紧力为 104.17 kN ;最高最低轨温差 $\geq 85\text{ }^{\circ}\text{C}$,当螺栓紧固力矩为 $700\text{ N}\cdot\text{m}$,螺栓预紧力为 145.83 kN ^[9]。

表 1 模型材质力学性能

参数	弹性模量/GPa	泊松比	线膨胀系数/ $(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
U75V	220	0.3	$1.18\text{e}-5$
55 钢	217	0.27	$9.9\text{e}-6$
20MnSi	200	0.29	$1.5\text{e}-5$
Q275	210	0.274	$8\text{e}-6$

1.3 某地区轨温数据

钢轨铺轨作业的预留轨缝与钢轨温度关系密切。利用某机构提供数据,将某地区 2000—2014 年极端最低轨温、极端最高轨温、平均轨温等数据和参考文献[9]相结合。通过大量计算与分析,实现对钢轨预留轨缝逐年逐月计算,分析钢轨变温时普通接头温度场变化。收集 15 a 轨温数据,为使表述清晰,仅绘制 2000、2007、2014 年份温度变化曲线,如图 3 所示。

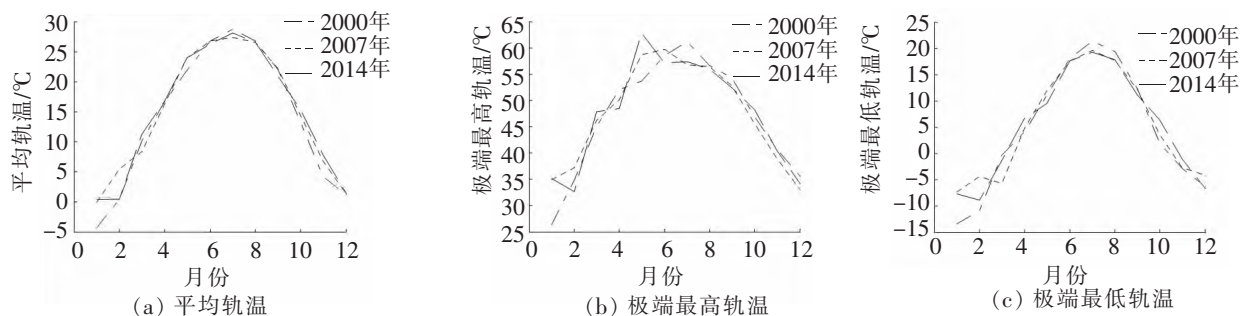


图 3 某地区 2000、2007、2014 年份轨温变化曲线

2 计算及结果分析

2.1 预留轨缝计算

根据文献[9]计算预留轨缝

$$a_0 = \alpha L(t_z - t_0) + \frac{1}{2}a_g \quad (1)$$

$$t_z = \frac{1}{2}(T_{\max} + T_{\min}) \quad (2)$$

式中, a_0 为更换钢轨或调整轨缝时预留轨缝; α 为钢轨线膨胀系数; L 为钢轨长度; T_z 为更换钢轨或调整轨缝地区中间轨温; $T_{\max}$, $T_{\min}$ 为当地历史最高、最低轨温; t_0 为更换钢轨或调整轨缝时轨温; t_g 为构造轨缝, 38, 43, 50, 60, 75 kg/m 钢轨均采用 18 mm。

最高、最低轨温差不大于 85 °C 地区, 在按式(1)、式(2)计算以后, 可根据具体情况将轨缝值缩小 1~2 mm。

通过分析 2000—2014 年逐月轨温数据, 预设各月换轨温度见表 2。通过统计分析, 近 15 a 中有近一半月份最高最低轨温差 ≥ 85 °C, 其中 2002、2005、2006、2008 年的 4~9 月出现温差 ≥ 85 °C, 其余年份每年为 5~9 月。经计算, 该地区近 15 a 内预留轨缝平均值为 12.4 mm, 最大值为 14.3 mm, 最小值为 10.9 mm。表 3 为 2000—2014 年某地区各月预留轨缝计算结果, 预留轨缝计算结构暂未考虑缩小轨缝温差 ≥ 85 °C 需缩小轨缝值的因素。

表 2 某地区各月预设换轨温度

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
换轨温度/°C	-2	2	9	16	22	26	28	26	21	15	7	0

表 3 2000—2014 年某地区各月预留轨缝计算

2000—2014 年	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	方差/mm ²	标准差/mm
1 月	13.648	10.669	12.158	0.703	0.838
2 月	13.281	10.951	12.116	0.616	0.785
3 月	12.686	10.665	11.675	0.295	0.543
4 月	12.575	10.525	11.550	0.277	0.527
5 月	12.695	11.324	12.009	0.191	0.436
6 月	12.629	11.331	11.980	0.202	0.450
7 月	12.615	11.346	11.980	0.186	0.431
8 月	12.554	11.374	11.964	0.106	0.326
9 月	12.622	11.147	11.884	0.156	0.395
10 月	12.967	11.433	12.200	0.211	0.459
11 月	12.852	10.949	11.900	0.222	0.471
12 月	12.650	10.629	11.640	0.341	0.584

2.2 热应力分析

当有限元模型温度场产生变化时, 模型会产生变形, 其应力应变场也会发生相应改变^[15]。为探究钢轨在变温环境中螺栓与扣件对钢轨温度应力的影响大小, 为减少接头损坏提供理论依据, 故对 75 kg/m 钢轨普通接头真实结构进行热应力分析。分析 2000—2014 年极端高低温轨温数据, 其温度最低为 -13.9 °C, 最高为 62.9 °C, 根据文献[16]内容, 设置有限元温度变化为 -15 °C、65 °C、10 °C。在线路上, 钢轨接头处车轮产生较大冲击动载荷, 因此接头处钢轨轨枕间距会比普通线路小一些。根据文献[16],

设置 Load 及 BC。计算结果见表 4。

表 4 钢轨最大温度应力变化

温度/℃	螺栓紧固力矩 500 N·m 时钢轨应力/MPa	螺栓紧固力矩 700 N·m 时钢轨应力/MPa
-15	354.9	512.8
-5	359.3	515.8
5	362.9	518.2
15	365.9	520.1
25	368.5	521.8
35	370.4	523.1
45	372.5	524.2
55	375	525.5
65	378	527



图 4 螺栓紧固力矩 500 N·m 时,65 °C 钢轨接头应力云图(单位:MPa)

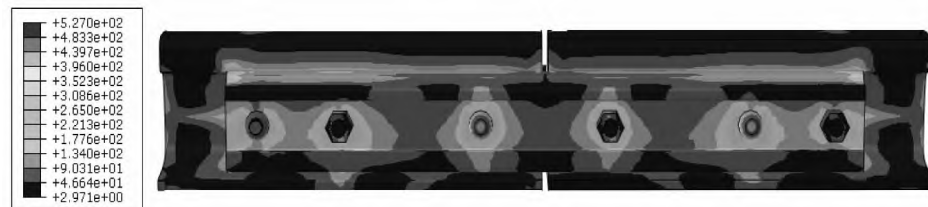


图 5 螺栓紧固力矩 700 N·m 时,65 °C 钢轨接头应力云图(单位:MPa)

经分析,当钢轨温度升高时,钢轨受热发生膨胀,但是由于钢轨两端受到扣件和鱼尾板约束,其纵向不能自由伸缩,而且鱼尾板承受螺栓较大预紧力,因此在螺栓中部、钢轨扣压部分、鱼尾板螺栓孔位置产生应力集中,受预紧力影响,钢轨最大应力集中处为螺栓中部位置。如只查看钢轨应力,以某一单元为例:查看轨腰中性轴处 2 760 单元应力值,螺栓紧固力矩为 500 N·m 时,Mises 应力为 149.396 MPa(-15 °C)、190.511 MPa(65 °C);螺栓紧固力矩为 700 N·m 时,Mises 应力为 214.806 MPa(-15 °C)、257.623 MPa(65 °C);查看扣件紧固位置处 4 246 单元应力值,螺栓紧固力矩为 500 N·m 时,Mises 应力为 46.968 8(-15 °C)、87.548 3(65 °C);螺栓紧固力矩为 700 N·m 时,Mises 应力为 67.799 8(-15 °C)、111.411(65 °C)。



图 6 螺栓紧固力矩 500 N·m 时,65 °C 钢轨应力云图(单位:MPa)

与文献[2]作对比,由于该文献中对无缝钢轨进行分析,并未考虑钢轨接头螺栓预紧力对应力影响,故而其结论为:扣件施加钢轨垂向作用力对纵向温度力具有较大影响,需要对此部位重点监测。因无缝线路一般为 1 000~2 000 m,因此在其研究背景下其结论有效,但工程实际中,钢轨鱼尾板接头螺栓预紧

力对钢轨温度应力影响比扣件更为明显。

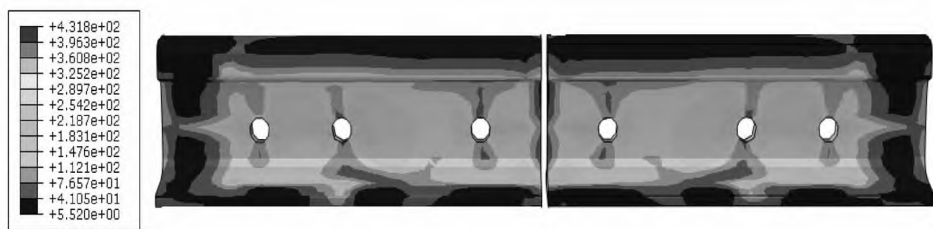


图 7 螺栓紧固力矩 700 N·m 时,65 °C 钢轨应力云图(单位:MPa)

为防止该地区线路出现连续瞎缝、轨道方向变形、低头接头或轨缝过大等接头病害,故对钢轨表面施加热流载荷,分析其自由状态下应力、变形、温度等分布情况。根据文献[17]设置钢轨热力学参数,导热系数、密度、比热容等均为非线性,随温度变化而变化,钢轨初始温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。钢轨温度分布云图如图 8,具体数值见表 5。

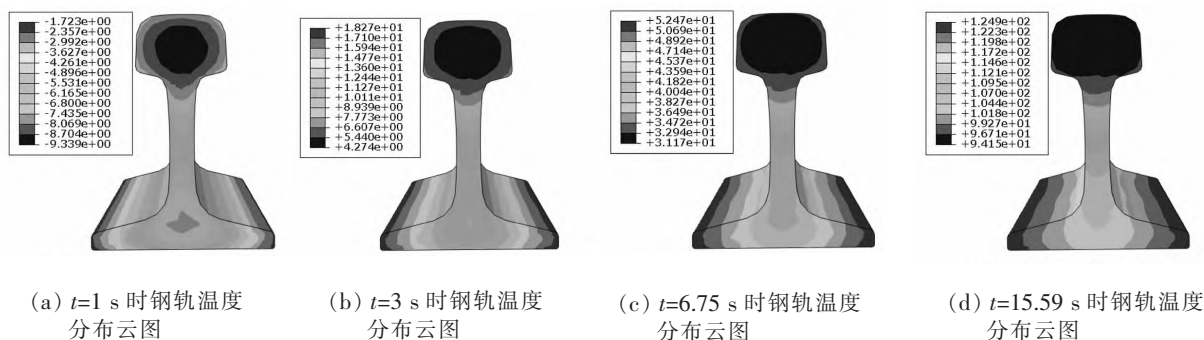


图 8 钢轨温度分布云图(单位:°C)

表 5 钢轨温度分布

时间/s	轨顶温度/°C	轨腰温度/°C	轨底中部温度/°C	轨底边缘温度/°C
0	-15	-15	-15	-15
1	-7.894	-6.075	-6.394	-2.721
2	-1.135	2.509	2.481	7.528
3	5.769	10.927	11.540	17.110
4.5	16.390	23.419	25.073	30.963
6.75	32.688	41.970	44.976	51.157
10.13	57.623	69.480	74.053	80.563
15.19	95.709	110.273	116.472	123.379
22.78	153.327	170.560	178.322	185.725
34.17	239.506	259.427	268.685	276.800
51.26	366.643	389.595	400.358	409.506
76.89	533.574	559.566	571.694	582.115
115.3	796.554	827.760	841.751	854.092

通过分析可知,在采用均匀热流载荷工况下,钢轨轨底边缘位置升温速度最快,轨顶最慢,在加热后,钢轨轨底平均温度最高,轨腰其次,轨顶最低,钢轨温度场分布均匀性较差,轨腰升温速度最快、平均温度最高,钢轨头部升温速度最慢、平均温度最低,可以为今后实际工程应用提供计算参考。

而且在钢轨表面增加热流载荷工况下,理论计算某温差下钢轨变形量为 0.094 mm ,有限元计算结果为 0.0968 mm ,误差为 0.0028 mm ,故认为有限元模型与理论相差不大。根据 3.2 中计算结果,15 a 中,轨温最低为 $-13.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高为 $62.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差为 $76.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据参考文献[9],可计算出长度为 25 m 的 75 kg/m 钢轨在此温差下变化量为 22.7 mm 。

$$\Delta a_0 = \alpha L (T_{\max} - T_{\min}) \quad (3)$$

$$t_z = \frac{1}{2} (T_{\max} + T_{\min}) \quad (4)$$

式中, Δa_0 为钢轨在某该温差下的变化量; α 为钢轨线膨胀系数; L 为钢轨长度; $T_{\max}$, $T_{\min}$ 为当地历史最高、最低轨温。

故根据 15 a 轨温温差统计结果, 计算钢轨变形量见表 6。

表 6 逐年逐月钢轨温差变形量

mm

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
2000	11.741	13.481 5	13.363 5	14.16	12.596 5	11.947 5
2001	12.832 5	13.629	15.163	13.393	13.747	12.242 5
2002	12.832 5	12.803	14.573	14.337	14.6025	13.334
2003	13.865	12.832 5	14.012 5	12.862	12.567	13.245 5
2004	12.832 5	12.449	13.835 5	14.366 5	13.245 5	12.331
2005	10.443	12.065 5	14.130 5	14.366 5	13.039	13.422 5
2006	10.944 5	13.717 5	14.809	15.133 5	13.186 5	12.154
2007	12.478 5	12.272	15.310 5	13.363 5	13.806	12.419 5
2008	11.387	14.101	12.921	13.57	13.894 5	12.862
2009	13.806	13.776 5	15.605 5	13.57	12.39	13.039
2010	12.98	12.744	13.275	12.626	13.865	12.508
2011	11.741	12.065 5	14.101	14.396	13.068 5	11.475 5
2012	11.121 5	11.711 5	14.632	14.396	12.921	12.478 5
2013	10.885 5	12.065 5	14.779 5	15.871	13.275	11.8
2014	12.655 5	12.242 5	14.514	12.301 5	15.723 5	11.652 5
年份	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2000	11.711 5	10.974	12.360 5	13.275	12.832 5	12.360 5
2001	11.888 5	11.623	12.331	12.685	12.478 5	11.21
2002	12.626	10.885 5	13.393	14.632	12.537 5	11.623
2003	11.623	12.036	12.183 5	12.832 5	12.803	12.744
2004	11.8	11.239 5	11.269	13.275	12.301 5	13.422 5
2005	11.564	11.003 5	11.711 5	12.508	13.245 5	12.508
2006	11.652 5	10.738	11.888 5	13.275	13.983	11.298 5
2007	10.974	11.416 5	11.947 5	12.39	12.301 5	10.944 5
2008	10.944 5	10.649 5	12.065 5	12.950 5	13.776 5	13.776 5
2009	12.006 5	12.685	11.357 5	13.039	13.776 5	12.213
2010	11.918	11.033	11.741	13.894 5	13.216	12.449
2011	11.062 5	11.151	12.419 5	13.127 5	11.623	11.8
2012	11.505	11.564	11.003 5	13.275	12.419 5	11.033
2013	11.859	11.918	11.151	12.596 5	13.127 5	12.685
2014	11.269	11.239 5	12.124 5	12.360 5	12.242 5	12.036

经过与预留轨缝对比分析, 15 a 中共计 180 个月, 其中有 75 个月钢轨长度变化量小于当月预留轨缝长度, 即不会发生钢轨接头病害, 占总数 41.67%。其余月份如在当月未对轨缝进行调整, 则由于温差可能会导致线路轨缝出现严重接头病害, 故应针对当月气候变化及时对轨缝进行巡检。

3 结论

建立普通钢轨接头三维及有限元模型, 以钢轨预留轨缝、应力为主要研究对象, 对某地区 2000—2014 年钢轨预留轨缝进行逐月计算, 并对钢轨温度应力进行仿真分析, 随后利用模型仿真计算不同螺栓预紧力作用下钢轨温度应力状况, 为深入进行这方面研究提供基础数据支持, 并得到结论如下:

(1) 经计算, 2000—2014 年某地区该 15 a 内预留轨缝平均值为 12.4 mm, 最大值为 14.3 mm, 最小值

为 10.9 mm。

(2) 分析普通钢轨接头部分温度应力过程中,应力集中处出现在螺栓中部、钢轨扣压部分和鱼尾板螺栓孔位置;且接头联结螺栓预紧力对钢轨温度应力影响比扣件更为明显。

(3) 钢轨轨底边缘位置升温速度最快,轨顶最慢;在加热后,钢轨轨底平均温度最高,轨腰其次,轨顶最低;钢轨温度场分布均匀性较差,轨腰升温速度最快、平均温度最高,钢轨头部升温速度最慢、平均温度最低。

(4) 通过对比预留轨缝、钢轨变形量,2000—2014 年中,如不调整轨缝,受温度影响但不发生接头病害概率为 41.67%。其余月份应及时对轨缝进行巡检、调整,防止线路出现严重接头病害。

参 考 文 献

- [1] 严隽彗,傅茂海. 车辆工程[M]. 3 版. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [2] 游林涛. 无缝钢轨纵向温度力的仿真分析与实验研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [3] 张凯. 低速磁浮轨道结构温度效应及力学分析[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [4] 王树国,林吉生. 大号码无缝道岔温度力与变形的有限元计算[J]. 中国铁道科学,2005,26(3):68-72.
- [5] 梁素平,李向国. 铁路无缝线路钢轨温度力测定理论分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2011,24(2):42-45.
- [6] Fischer F D, Werner E, Yan W Y. Thermal stresses for frictional contact in wheel rail systems [J]. Wear, 1997, 211(2): 156-163.
- [7] WenZefeng, JinXuesong, ZhangWeihua. Elastic-plastic finite element analysis of three-dimensional contact-impact at rail joint[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(4):411-416.
- [8] 宁明哲,刘长文. 钢轨接头强度的有限元分析[J]. 铁道科学与工程学报,2003,21(2):45-49.
- [9] 中华人民共和国铁道部. 铁路线路修理规则[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.
- [10] 张欢. 30 t 轴重重载铁路钢轨接头合理抗弯刚度取值及动态响应规律的研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2012.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 2585—2007 铁路用热轧钢轨[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [12] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2347—1993 钢轨用高强度接头螺栓和螺母[S]. 北京:中国铁道出版社,1993.
- [13] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2345—2008 43 kg/m~75 kg/m 钢轨接头夹板订货技术条件[S]. 北京:中国铁道出版社,2008.
- [14] 中国机械工业联合会. GB 7244 重型弹簧垫圈[S]. 北京:中国标准出版社,1987.
- [15] 石亦平. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [16] 郝瀛. 铁道工程[M]. 北京:中国铁道出版社,2000.
- [17] 段金良. 钢轨冷却过程中温度场及弯曲变形数值模拟研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2012.

Analysis of Reserved Rail Gap and Thermal Stress Fields of 75 kg/m Rail Joint

Yin Chengfei

(Shuohuang Railway Development Co. Ltd., Suning 062350, China)

Abstract: To explore the causes of the appearance of a large amount of damage in the rail joints of some main trunk railway in recent years, in this paper, the common line connector is taken as the re-search object to calculate the reserved rail gap as well as the the rail expansion, and analyze the temperature distribution and temperature effect in the daily environment based on the temperature data of ten years. The finite element model was established of temperature field of 75 kg/m rail joint connection parts according to the real structure of track to analyze the temperature contour in different conditions, and summarize its regularities of distribution. The study found that: Within 15 years in this region, the average of reserved rail gap was little changed by month; For the common rail joint, the middle bolt, rail buckling part and position of fishbolt hole would create a stress concentration; Because of the bolt pre-tightening force, the maximum point of the rail joint stress concentration was in the middle of the bolt, and was influenced obviously by the bolt pretightening force; The effect of the bolt pretightening force on the temperature stress of the rail was more obvious than that of the fastener. These research results may provide theoretical support for the maintenance and repair work in the future.

Key words: railway; rail joint; thermal stress; finite element