重载电气化铁路轨道烧蚀解决方案

通过对某重载电气化铁路轨道烧蚀现场的调研，结合该重载铁路牵引负荷的分布、牵引供电回流系统设置情况，分析并得出了钢轨电位是引起电气化铁路轨道烧蚀的重要原因。同时对钢轨电位进行了理论分析和计算推导，并研究提出了降低钢轨电位的技术思路和工程措施，解决了现场钢轨电位过高引起轨道烧蚀的问题。研究结果表明电气化铁道尤其是重载铁路，可采取增加接触网与钢轨间互阻抗、降低钢轨泄漏电阻等工程措施改善牵引回流分布、降低钢轨电位，以避免轨道烧蚀等设备损害及对人体安全的威胁。

彭　伟/中铁第一勘察设计院集团有限公司

彭　伟/工程师

关键词/Keywords
电气化铁路·
轨道烧蚀·
钢轨电位·
解决方案·

随着电气化铁路的运营速度、线路坡度和电力机车牵引定数的不断提高，相应大功率机车、动车组也陆续投入运行，列车牵引负荷逐渐增大，牵引回流也不断增加，从而引起较高的钢轨电位，当钢轨电位达到一定数值时，可能会烧蚀铁路设施设备，甚至威胁工作人员的人身安全。

目前，国内对电气化铁路尤其是高速铁路牵引回流及钢轨电位特性等问题研究较多，研究侧重于理论分析、仿真计算和模拟测试，相关文献中，关于钢轨电位对设备的损害研究较少，工程实践甚少，鲜有解决现场实际问题的案例。

作者通过对某煤运重载铁路轨道烧蚀现场的调查，研究了引起轨道电弧烧蚀的重要因素——钢轨电位，结合电气化铁路钢轨电位的理论分析及计算推导，提出通过增加接触网与钢轨间互阻抗、降低钢轨的泄漏电阻等降低钢轨电位的解决方案，采取增设横向电联接、增设吸上线等工程措施，优化牵引回流、降低钢轨电位，解决了现场轨道烧蚀的问题。研究结果及解决方案，可供电气化铁路设计、施工、运营和维护参考应用。

轨道烧蚀

1. 轨道烧蚀的现象

某煤运重载铁路主要技术标准为：复线半自闭、双机SS4机车牵引10 000 t和重车上坡，铁路运营现场车站信号闭塞区段轨道以及道岔扣板烧蚀，具体烧蚀现场情况如下。

（1）轨道的烧蚀

如图1和图2所示，现场拍照比对正常的轨道与烧蚀后的轨道，图2中，轨道烧蚀发生在车站的进站端上下行岔道间，运营部门反映轨道绝缘处夜间经常出现弧光，近距离查看为钢轨电弧烧蚀，更换轨道绝缘片后未能解决烧蚀问题，信号设备频繁异常工作，严重影响列车运输的安全。

图1　正常的轨道绝缘　　图2　烧蚀的轨道绝缘

（2）道岔扣板的烧蚀

如图3和图4所示，现场拍照比对正常的道岔扣板与烧蚀后的道岔扣板，图4中，扣板烧蚀发生在上、下行渡线间，

图3　正常的道岔扣板　　图4　烧蚀的道岔扣板

中国知网　https://www.cnki.net

维护部门多次打磨，加大扣板间距离，同样仍无法解决电弧烧蚀的发生。

2. 轨道烧蚀原因分析

对煤运重载铁路轨道绝缘烧蚀现场的调查及研究表明，与高速铁路动车通过并烧蚀轨道绝缘不同，本铁路不仅仅有轨道绝缘烧蚀，还有道岔扣板烧蚀，可以肯定轨道烧蚀的主要原因是钢轨电位电压过高引起。由于现场列车牵引定数增大、运力加强后，钢轨电流及钢轨入地电流增大，钢轨间钢轨电位升高，较大的电流、电压作用导致轨道烧蚀。

为此，需对引起轨道烧蚀的主要因素钢轨电位进行研究，并根据研究结果，结合现场牵引负荷的分布、牵引供电回流系统设置情况，提出降低钢轨电位的解决方案及工程措施，避免轨道烧蚀等危害的发生。

钢轨电位分析研究

交流电气化铁路钢轨电位的危害中，电流烧蚀现象最为明显、直观，本文将通过对引起轨道电弧烧蚀主要因素钢轨电位进行研究，提出降低钢轨电位的工程措施，以避免轨道烧蚀现象的产生，减小对铁路运输安全的影响。

1. 牵引回流数学模型

通过建立电气化铁路牵引回流数学模型，对钢轨电位进行理论研究。

牵引回流模型如图5所示，分布参数电路简化数学模型为

$$-\frac{\mathrm{d}V(x)}{\mathrm{d}x}=Z_{\mathrm{R}}I(x)+E \qquad (1)$$

$$-\frac{\mathrm{d}I(x)}{\mathrm{d}x}=YV(x) \qquad (2)$$

式中，$V(x)$为x处钢轨电位；$I(x)$为x处钢轨电流；Z_{R}为钢轨自阻抗；E为牵引网电流在钢轨上引起的感应电压；Y为钢轨地泄漏导纳。

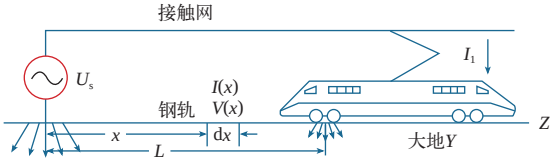

图5　牵引回流模型

2. 钢轨电位的分布

对于目前应用广泛的带回流线的直接供电方式，结合接触网电流回路确定边界条件，求出A、B和E的值，可得钢轨电压电流分布为

$$I(x)=-\frac{1-n}{2}I_1(\mathrm{e}^{rx}+\mathrm{e}^{-r(L-x)})-nI_1 \qquad (3)$$

$$V(x)=-\frac{1-n}{2}Z_0I_1(\mathrm{e}^{-rx}+\mathrm{e}^{-r(L-x)}) \qquad (4)$$

式中，n为耦合因数，$n=Z_{\mathrm{TR}}/Z_{\mathrm{R}}$；$I_1$为列车电流；$Z_{\mathrm{TR}}$为接触网与钢轨间互阻抗；$L$为列车与牵引变电所距离。

3. 降低钢轨电位的分析

通过上述对钢轨电位进行的理论研究和计算推导可知，钢轨电位$V(x)$的大小主要由机车负荷电流I_1、列车与变电所距离L、接触网钢轨间互阻抗Z_{TR}、钢轨自阻抗Z_{R}以及钢轨－地泄漏导纳Y等因素决定，为此可以通过改变上述参数，降低钢轨电位的影响。

实际在铁路设计、运营及维护过程中，列车牵引负荷、接触网系统和钢轨是由铁路运输要求的实际情况决定，调整的可行性较小，而通过改变接触网与钢轨间互阻抗Z_{TR}及钢轨－地泄漏导纳Y降低钢轨电位比较可行。

4. 降低钢轨电位的主要方法

通过降低钢轨电位的分析可知，具体可采取以下措施降低钢轨电位。

（1）增加接触网与钢轨间互阻抗

1）增加回流线设置，可改造直接供电方式为带回流线的直接供电方式。

2）增加扼流变压器及吸上线数量，加大钢轨与回流线电气连接的密度。

（2）降低泄漏电阻

1）采取降阻措施，降低钢轨泄漏电阻。

2）设置横向电联接，将上下行钢轨充分电气联接。

3）沿线路增设综合地线，与上下行的钢轨、保护线等电气联接。

4）利用线路本身和线路旁边的各种建筑、结

中国知网　https://www.cnki.net

构的基础做自然接地极。

5）设集中接地极，将有关设施设备接地。

轨道烧蚀解决方案

1. 钢轨电位的核算

（1）现场列车负荷情况

现场重载铁路双机牵引单边重载持续上坡，列车牵引电流可达690 A，按照供电臂一趟列车运行，一趟列车车站起动估算，车站附近区段的牵引回流可达1 380 A。

（2）钢轨回流设置情况

现场铁路采用带回流线的直接供电方式，线路区间钢轨经扼流变压器通过吸上线与回流线电气连接，车站信号机扼流变压器未与回流线电气连接，上、下行钢轨间无横向电气连接，车站上、下行渡线处设置轨道绝缘片。

（3）钢轨电位核算

现场烧蚀轨道绝缘及道岔扣板的车站处变电所供电臂末端，通过大地的牵引回流较大、钢轨电位较高。根据钢轨电位的理论推导，推算得到车站附近区段钢轨电位最大值为145.5 V，明显高于标准规定的130 V，数值已经超过标准允许值。需要研究应对解决方案，采取工程措施降低钢轨电位。

2. 降低钢轨电位的方案

通过对钢轨电位的理论分析可知，降低钢轨电位可以通过增加接触网与钢轨间互阻抗、降低钢轨的泄漏阻抗予以实现，针对既有运营铁路，需要尽量采取工程简单、投资较省、降低钢轨电位明显和对运营干扰少的解决方案，可着重从以下两个方面分析研究。

（1）增加接触网与钢轨间互阻抗

煤运重载铁路已采用带回流线的直接供电方式，可将上、下行线路进站信号机扼流变压器中性点与回流线电气连接，进一步增加接触网与钢轨间互阻抗。

（2）降低泄漏电阻

通过降低泄漏电阻来降低钢轨电位，具体可采取的工程措施较多，核心是尽量将钢轨通过扼流变压器中性点与接地体电气相连以达到降低泄漏电阻的目的。

3. 解决轨道烧蚀的工程措施

现场提出以疏代堵的方式，将进站信号机扼流变中性点与回流线电气连接，同时将上、下行线路进站信号机扼流变压器中性点电气连接，使上、下行线路钢轨等电位，同时降低了钢轨的泄漏电阻，解决了钢轨电位过高的问题。

现场采取工程措施为：通过长约15 m、截面积为185 mm^2电缆，将进站端上、下行扼流变压器中性点与回流线分别电气连接，通过长约10 m、截面积为90 mm^2铜缆将上下行线路进站信号机扼流变压器中性点电气连接，工程实施后彻底解决轨道烧蚀问题，现场未再次发生轨道烧蚀。

结束语

本文结合铁路轨道烧蚀工程实例，通过对轨道烧蚀主要因素钢轨电位进行分析，研究了降低钢轨电位的解决方案，提出工程措施解决了轨道烧蚀的问题。

对牵引定数、线路单边坡度和线路通过能力均较大及运营速度较高的电气化铁路，建议在不影响信号设备安全工作的前提下，根据铁路牵引供电负荷实际情况，可增加钢轨与回流线电气连接的吸上线设置密度，将进站端上、下行扼流变压器中性点电气连接，以降低钢轨泄漏电阻，减小轨道和大地的牵引回流引起的钢轨电位，可以避免钢轨电位过高对人体的威胁和对轨道烧蚀等设备的损害。

参考文献

[1] 铁道部工程设计鉴定中心．铁路综合接地和信号设备防雷系统工程设计指南 [S]．北京：中国铁道出版社，2009．

[2] 雷栋．高速铁路牵引回流及钢轨电位特性研究 [D]．成都：西南交通大学，2010．

[3] 刘明光，李娜，屈志坚．钢轨电位分布模型及仿真 [J]．北京交通大学学报，2010，34(2)：137-141．

(下转第127页)

中国知网 https://www.cnki.net

远小于电弧电阻值，这样才能保证弹丸出膛时电流主要走消弧支路；但同时，消弧支路的阻抗应该远大于电枢电阻，保证放电瞬间主电流走电枢支路，而非消弧支路。从实验结果分析，认为消弧支路的阻抗选择不合适影响了实验结果。有关熄弧电容的容量选取，文献[2]中提到：熄弧电容的容量要与主电路的电容量可比拟。目前使用的熄弧电容容量为600 μF，主电路中为两个2 344 μF的电容器，因此可以考虑改变熄弧电容的电容量，从而改变熄弧支路的阻抗，使其在起弧后小于电弧支路的阻抗，这样回路中的剩余电流才能大部分回收到熄弧电容中，进而有利于剩余能量的回收。

结束语

电磁轨道炮的消弧是在其应用中需要解决的问题。目前，国内外对于炮口消弧主要采取的措施有电阻消弧和电容消弧两种。为了研究轨道炮的消弧措施，本文介绍了轨道炮的行为仿真模型，得到了电容消弧与电阻消弧两种方法的仿真结果，并给出了实验中电弧电阻的求解方法，为熄弧电阻的选择提供了依据。

由于电容消弧方式可以回收残存在电磁轨道炮中的剩余磁能，提高电磁发射系统的整体效率，本文采用电容消弧方式进行了实验。实验中采用了两个PFN模块，单个模块电容量为2 344 μF，熄弧电容容量选为600 μF，这样实际熄弧电容上的回收电压为256 V，回收效率较低。在进行消弧实验时应该保证消弧支路的阻抗远小于电弧电阻值，这样才能保证弹丸出膛时电流主要走消弧支路；但同时，消弧支路的阻抗应该远大于电枢电阻，保证放电瞬间主电流走电枢支路，而非消弧支路。因此可以考虑改变熄弧电容的电容量，从而改变熄弧支路的阻抗，使其在起弧后小于电弧支路的阻抗，这样回路中的剩余电流才能大部分回收到熄弧电容中，进而有利于剩余能量的回收。

参考文献

[1] Parker V，evinson S J L．Muzzle arc control using an inductive shunt [J]．IEEE Ransactions on Magnetics，1997 (33)：594-598．

[2] Bernardes J S，Lacava G P．Analysis of a railgun capacitor-muzzle-shunt energy recovery scheme [J]．Power Modulator Symposium，2002，30 (6)：347-350．

[3] 胡玉伟．电磁轨道炮系统的建模与仿真 [D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2007．

[4] 杨玉东，王建新，薛文．轨道炮动态负载特性的分析与仿真 [J]．兵工学报，2010，31 (8)：1026-1031．

（收稿日期：2015－01－20）EA

(上接第112页)

[4] 杨世武，姜锡义，王星晖，等．高速铁路站内绝缘节和钢轨烧损模拟测试及研究 [J]．铁道学报，2013，35 (10)：82-88．

[5] 雷栋，董平安，张雪原，等．重载电气化铁道钢轨电位的测试与分析 [J]．铁道学报，2010，32 (5)．

[6] 缪耀珊．交流电气化铁道的钢轨对地电位问题 [J]．电子电气自动化，2007 (4)．

[7] 张婧晶．高速铁路综合接地系统的研究 [D]．成都：西南交通大学，2008．

[8] 胡京，蓝磊，文习山．工频电流对金属管道烧蚀试验研究 [J]．高压电器，2010，46 (2)：56-57．

[9] KieBling，Puschmann，Schmieder．电气化铁道接触网 [M]．中铁电气化局接团有限公司，译．北京：中国电力出版社，2004．

[10] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院．电气化铁道设计手册 牵引供电系统 [S]．北京：中国铁道出版社，1988．

[11] 谭秀炳，刘向阳．交流电气化铁道牵引供电系统 [M]．成都：西南交通大学出版社，2002．

（收稿日期：2014－07－23）EA

中国知网 https://www.cnki.net