

神华号（HXD1）电力机车牵引电机软风道优化设计与分析

郭京华

国能朔黄铁路发展有限责任公司车辆分公司 062350

【摘要】关于神华号（HXD1）电力机车牵引电机软风道设计在结构、材料、工艺等方面存在的问题开展优化设计方面的探讨，在简述了软风道优化设计的重要意义的同时，针对目前软风道在结构设计布局、材料工艺选择等方面存在的一些不足，提出了一些有效的优化设计手段，包括结构布局优化、高性能材料选择、先进成型工艺应用、匹配各种运行工况下的优化设计等，并以此为基础对软风道系统进行了优化设计，使得牵引电机的散热效果得到了极大的加强，提升了电机工作的可靠性，也进一步保障了神华号电力机车安全高效地运行。

【关键词】HXD1电力机车；牵引电机；软风道；优化设计

Optimized design and analysis of soft air duct for traction motor of Shenhua （HXD1）electric locomotive

Guo Jinghua

China National Development Co., LTD.locomotive branch 062350

【Abstract】This study investigates structural, material, and process challenges in the soft air duct design of Shenhua HXD1 electric locomotive's traction motors. While highlighting the critical importance of such optimization, it proposes practical solutions addressing current limitations in structural layout and material selection. The proposed improvements encompass optimized structural configurations, high-performance material selection, advanced forming processes, and operational condition-specific optimization. Through these enhancements, the soft air duct system achieves significantly improved heat dissipation efficiency, enhanced operational reliability, and ultimately ensures safe, efficient performance of Shenhua HXD1 electric locomotives.

【Key words】Shenhua HXD1 electric locomotive; traction motor; soft air duct; optimization design

引言：

软风道是电力机车牵引电机通风散热系统的关键部件，其设计质量直接影响电机散热效果及运行安全，神华号（HXD1）电力机车作为我国大功率交流传动货运电力机车的主力车型，装备了前沿高功率牵引电机组。随着牵引重量等级不断提升，电机损耗导致的热量逐步增大，对软风道散热性能提出了更高要求，当前该型号电力机车软风道在结构布置、材料制作工艺等方面仍存在短板，迫切地开展相关优化设计，以实现软风道散热效能的充分释放，保障电机安全平稳运行。

一、HXD1 电力机车牵引电机软风道优化设计的意义

（一）提高电机散热效率，保障电机安全运行

软风道是牵引电机散热系统的重要组成部分之一，软风道设计合理与否直接影响到电机散热的效果；合理的软风道设计可以很好的引导冷却风通过电机内部走向，加快电机内部分散热量，避免由于局部温度过高造成的绝缘老化等问题。随着牵引功率的增大，电机的发热损失也不断增加，因

此对软风道进行设计优化、最大程度的提高散热性能，保证牵引电机的正常安全稳定的运行，在设计优化后的软风道能使牵引电机拥有更好的散热条件，从而彻底解决牵引电机局部过热的问题，显著提高牵引电机的运行安全系数^[1]。

（二）降低电机噪音，改善司机驾驶环境

软风道气动性能直接影响到电机噪声水平，若软风道设计不合理会使气流产生紊乱的情况发生，电机便会因共振而引起振动加大，造成司机驾驶感受较差的情况出现；但是通过对软风道结构布局进行优化、减弱气流的阻力，有利于大幅降低软风道气动噪声，提高车厢内的驾乘体验。噪声控制是软风道设计需要完成的一个重要目标，合理的软风道形态能够有效的抑制气流紊动，减小流体动力噪声，进而为乘员创造一个更加舒适的车内环境^[2]。

（三）延长电机使用寿命，降低运营维护成本

牵引电机是电力机车的重要部分，牵引电机的可靠性和耐久性决定了机车的使用成本，温度影响着电机绝缘的寿命，实施软风道设计改进、加强散热，可以使电机温降效果显著，进而降低电机温度，提高绝缘的老化速度，可以减少电机检修更换次数，降低机车的使用和维修成本；另外，软风道散热效能的增强有利于防止因局部过热而导致绝缘的

老化加速,同时也有利于牵引电机的使用寿命得到延长,减少牵引电机出现故障的次数,并且还可以节省牵引电机大修、备品费等大量支出,可以有效降低电力机车全寿命周期成本^[3]。

二、HXD1 电力机车牵引电机软风道现状分析

(一) 软风道结构设计现状与不足

HXD1 电力机车牵引电机一般采用传统软风道结构设计,虽在一定时期内满足了电机散热的基本标准,但仍有诸多环节需进一步改进优化,部分软风道各段位横截面积分布均匀性不足,特定地段甚至存在明显堵塞,极大阻碍了冷却风流的顺畅流动。显著降低了风道通风散热的综合效率,软风道内部布局在合理性与科学性方面存在欠缺,未能最大程度引导冷却气流均匀扫过绕组表面各区域,进而造成局部出现显著的散热空白区与死域,散热实际效果难以保证,软风道内壁表面粗糙度偏大,导致气流流动时承受更大黏性阻力,既额外消耗风机功率,又削弱了流体与壁面间的对流换热效能,上述结构性缺陷严重束缚了软风道散热性能的充分发挥,尤其随着牵引电机单机功率持续升高,既有软风道设计已难以契合日益苛刻的散热需求^[4]。

(二) 软风道材料选择与工艺现状分析

由于牵引电机软风道实际应用环境恶劣,对材料的力学性能、绝缘性能及耐环境性能要求极高,但目前软风道在材料选取与成型工艺层面仍存在诸多不足,需进一步改进提高,从材料选用角度看,目前制作软风道主要采用玻璃钢等传统复合材料,此类材料的力学强度与绝缘性能均较为有限,尤其在高温环境中极易出现明显蠕变,长期使用后易发生开裂、破损,给散热通道的结构稳定性及安全可靠性埋下隐患,在软风道生产制造过程中。目前普遍采用手工糊制的传统工艺路线,总体工艺水平较为粗陋,质量管控手段存在不足,最终产品常出现壁厚不均、表面粗糙及内部存在缺陷等问题,导致软风道使用性能大幅衰减,先进材料工程化应用与精密成型工艺开发仍有极大改进提升空间^[5]。

(三) 软风道在不同运行工况下的性能表现

在电力机车实际运行过程中,常频繁出现牵引、制动和速度改变等不同工况的交替,进而导致牵引电机温升幅度、散热需求等呈现动态波动,对软风道散热性能的要求进一步提高,大部分软风道设计未针对典型运行工况进行针对性考量,使其在面对复杂多变的实际应用环境时难以适应,在持续大牵引力工况下,牵引电机发热量急剧飙升,若软风道散热能力无法匹配,易造成局部位置温度急剧升高,进而加速绝缘材料老化;环境温度降低时,软风道材料热变形恢复能力较弱,散热通道易出现形变,阻碍冷却气流顺畅流动,影响散热效果;随机车运行时长与里程不断增加,受长期振动、

反复热循环等因素影响,软风道结构逐渐显现疲劳失效迹象,散热效果显著变差,受设计与材料条件限制,软风道全面适应实际运行工况仍面临诸多困难。

三、HXD1 电力机车牵引电机软风道优化设计与分析

(一) 针对结构设计不足的优化方案与分析

依据软风道结构的缺点进行如下优化设计:重新确定软风道的截面尺寸,运用流体力学模拟调试手段,使软风道截面积沿路径均匀过渡,避免局部过细现象,降低空气流通的阻滞。建立软风道三维模型,运用 CFD (计算流体动力学) 软件对不同截面设置方式下的内部流场分布情况进行分析,选取流速均匀、阻力最小的断面设计。优化软风道三维布置,靠近电机定子绕组敷设;提高绕组表面风道覆盖面积占比,缩小散热死角面积;增强绕组热点区域气流冲刷效果,提升冷却风散热的均匀性。结合电机定子绕组的三维扫描数据,利用 CAD 软件完成与绕组的零间隙贴合,使冷却风完全扫过绕组表面带走热量。在绕组端部等易发热部位增加风道引流模组,引导气流进入绕组缝隙内;利用表面纹理排布法,在软风道壁面加工规则的微凹槽阵列,以消除气流边界层并促进紊流间的热量交换。在软风道内壁加工高度 10~100 μm 、周期 0.5~2mm 的织构化微凹槽,大幅增加壁面与气流的接触面积,促进气流产生小规模乱流,增强近壁面范围的流动传热效果,使散热效率提高 10~30 个百分点。通过改变风道结构,利于提升软风道气流组织性能,实现电机各处散热均衡化,降低流动损失,增强散热效果。针对朔黄线超重载牵引作业工况,在软风道截面尺寸优化过程中,重点强化大功率部位的设计;使用气动仿真手段确定大截面风道走向,降低局部气流速度,减少流动分离造成的影响及散热无效区域,兼顾流动阻力与散热效率的平衡。针对电机高温发热量较大的部位,采用二次引风方式,依托主风道设置局部高速风道,通过“主-从”两级风道结合,增加气流驱动力,使热点区域气流能够迅速掠过该部分,实现靶向热量散发。

(二) 针对材料选择与工艺问题的改进措施

为提高软风道的力学性能、绝缘性能及耐环境性能,在材料选择与成型工艺上应采取以下方法:其一选择以高性能树脂为主体的复合材料体系,选用高强度、高劲度模量的碳纤维增强材料,以增强软风道的机械强度与刚度,降低其在高温下的蠕变形变并提高抗冲击能力。通过合理的碳纤维铺层方式与编织结构,使软风道满足受力特性要求;根据软风道轴向与径向受力大小,分别布置单向碳纤维布与碳纤维环向缠绕,形成具有各向异性力学性能的复合材料体,使软风道的轴向抗拉强度较初始强度提高 50% 以上,径向抗压强度较初始强度提高 30% 以上。向树脂基体内加入环氧硅氧烷

等耐高温改性剂,利用化学键合与物理隔离作用增强材料的抗热解能力,改善其耐热解温度与长期工作可靠性,将玻璃化转变温度提升至 180℃以上、热变形温度提高到 260℃以上,以满足电机运行时的恶劣工况需求。其二采用新型模压成型工序替代传统手糊成型工艺,将复合材料软风道放入金属模具后经热压罐固化成型,以改善成型精度与表面质量,避免因气体阻滞造成的风道堵塞问题,增强散热效果。利用数值模拟优化模具型腔结构,控制型腔压力梯度分布,使纤维预制体受力均衡,避免局部纤维发生偏移、褶皱等缺陷;在金属模具内部设置冷却水道,通过调控水温与水速控制固化温度场,保证树脂基体整体固化,防止因局部过热导致性能不良。采用模压成型方法,可使软风道的尺寸公差小于 $\pm 0.2\text{mm}$,表面粗糙度小于 $Ra0.8\mu\text{m}$,相较于传统手糊工艺,散热效果提升 5% 以上。借助模压成型,软风道的力学性能、表面质量得以显著提高,综合性能与可靠性增强。考虑到朔黄线机车超长的运行里程及恶劣的工作环境,选择具备优良耐候性与高疲劳寿命的热塑性树脂基复合材料;通过界面改性提高树脂基体与碳纤维之间的结合能力,改善复合材料的抗疲劳强度,延长其使用寿命;在树脂体系内加入抗紫外线助剂,提升材料的抗老化性;在软风道外表面喷涂纳米陶瓷涂层,有效降低风沙磨蚀与材料老化速率,使其在强紫外线与风沙环境下的使用寿命延长 30% 以上。

(三) 针对朔黄线超重载及其他典型运行工况的软风道优化设计

基于朔黄线超大规模重载运营工况,需着重应对大功率交流传动电力机车牵引万吨级重载列车时,因牵引重量巨大导致牵引电机散发大量热量的问题。在气动结构优化中,适当加大软风道进风口面积以增加进风量,同时优化出口导流结构,最大限度减小出口处的涡流损失,增强电机散热能力,防止超重载工况下牵引电机过热引发绝缘老化加速。大负载时电机振动加剧,软风道承受的交变应力载荷增大,易导致疲劳失效。除采用高疲劳性能材料体系、设计阻尼缓冲结构及合理布置加强筋外,还可开展软风道疲劳可靠性试验,用随机振动载荷谱表征重载工况下的载荷,进而对筋板进行补强优化设计,确保软风道在超重载、长寿命工况下结构完好。

参考文献

- [1] 株洲创春科技实业有限责任公司. 电力机车牵引电机冷却软风道: CN201824864U[P/OL]. 2011-05-11[2025-07-09].
 - [2] 于海涛, 邓日江, 崔斯柳. 电力机车牵引电机温升偏高的分析与优化[J]. 电机技术, 2021, (03): 27-29.
 - [3] 株洲联诚集团有限责任公司. 一种电力机车牵引电机用高压系数冷却通风机: CN205639013U[P/OL]. 2016-10-12[2025-07-09].
 - [4] 韩东虎. 神华号(HXD1)电力机车牵引电机软风道优化设计与分析[J]. 内蒙古科技与经济, 2021, (10): 107-109+121.
 - [5] 董向斌. 电力机车牵引电机的故障处理与维护保养[J]. 中国战略新兴产业(理论版), 2019, (06): 0266-0266+0265.
- 作者简介: 郭京华(1981.4-)男, 沧州肃宁人, 大学专科, 助理工程师, 研究方向: 铁道机车车辆检修。

对其他典型运行工况的软风道进行工况适配性优化设计: 大牵引力工况: 适当增大软风道进风口面积, 提高冷却风流量以利于电机构造热量排出; 改进出口导流方式, 减小出口处的涡流损失, 强化散热效果。通过对进风口面积和出口导流方式的气动仿真分析, 得出不同参数对软风道内气流分布的影响规律, 选取最优进、出口结构参数, 在保持冷却风量增加 20% 以上的基础上, 使出口总压损失系数下降超过 10%, 有效提高大牵引力工况下的电机散热能力。寒冷环境中, 选用低温韧性与热变形温度较高的材料组合, 以减小软风道的热变形滞后, 保持冷却风道形貌稳定。针对低温环境要求, 采用化学改性方法提高环氧树脂体系的低温抗脆能力, 将断裂韧性提高至 $35\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 以上, 且满足零下 40℃及以下环境的低温冲击强度要求。在软风道初始段增设电加热器, 在进风口处设置一定功率的加热丝环, 将吸入冷风温度提高至零下 10℃以上, 防止因结冰导致风道堵塞。通过上述优化, 确保软风道适用于电力机车重载、低温、长寿命等工况条件, 保障牵引电机散热系统正常工作。

结语

软风道作为神华号电力机车牵引电机散热系统的组要部件, 直接影响到牵引电机散热效果及运行的稳定度, 经过对软风道优化设计的意义、结构布局、材料选择以及工况适应性进行分析研究, 制定了可行性的优化设计途径: 利用流体动力学仿真优化风道结构, 选用高性能复合材料, 采用先进的成型工艺, 并结合具体工况设计风道; 可以提高软风道散热、力学和耐环境性能; 从实际出发, 奠定牵引电机安全平顺行驶的基础。软风道优化设计是一个复杂的系统工程, 需要机车设计、材料、工艺等多个学科协同攻关, 设计人员紧跟电力机车技术发展动态, 学习借鉴国内外先进经验和做法, 不断探索创新, 努力实现软风道设计水平的新跨越, 助推电力机车更加安全高效、经济节能地行驶, 进而加快我国轨道交通装备技术自主创新发展的进程。