

高柔性电缆材料与结构一体化设计研究

杨冬冬

江苏华光电缆电器有限公司 江苏常州 213000

摘要：本文针对高柔性电缆材料与结构一体化设计进行展开，着重剖析了诸如导体排布优化、高韧性材料挑选、多层结构规划以及绝缘和护套性能增强等关键技术，凭借对材料与结构协同作用的恰当设计，增强了电缆的柔韧度、抗疲劳能力与电气特性，实现复杂工况下可靠传输的需求。文章也探究了导体材料改良、绝缘层完善以及多层结构整合的具体举措，采用先进制造工艺进行结合，实现电缆性能和制造效率的对等平衡，一体化设计理念为高柔性电缆在智能制造、高端装备领域的应用给予了坚实技术支持，推动电缆技术达成创新与拓展。

关键词：高柔性电缆材料；导体排布；高韧性材料

引言

高柔性电缆在诸如机器人、自动化设备等领域普遍应用，应具备超凡的柔韧性与耐久性。一体化的材料与结构设计借助优化导体、绝缘、护套材料及其内部结构，提升电缆机械性能及电气性能水平，提高使用寿命，适应复杂工况里可靠传输的要求，推动智能制造及高端装备技术跃进。

一、高柔性电缆的性能需求分析

实际应用要求高柔性电缆具备优良的柔韧性、耐疲劳性和抗拉伸性能，以适应频繁弯折以及复杂的运动情形，实现长期的稳定运转，其导体材料需拥有良好的导电及耐腐蚀性能，还应具备较高机械强度，以杜绝出现断裂现象，绝缘材料首先要求其电气绝缘性能十分优良，也须拥有耐高温、油脂及磨损等方面的特性，为保障使用安全及延长寿命。护套材料要既柔软又耐磨，能切实对抗外界机械冲击与环境的破坏，高柔性电缆还应具有优秀的耐弯曲疲劳本领，杜绝在多次重复弯曲期间发生内部结构破坏或性能减退现象，维持信号传输的稳定效果，高柔性电缆性能需求包含机械性能、电气性能以及环境适应表现，适应复杂工业自动化及智能装备对高效、可靠传输的严格规范^[1]。

二、高柔性电缆材料与结构一体化设计原理与方法

(一) 优化导体排布

优化导体排布作为高柔性电缆材料与结构一体化设计的关键环节，直接关乎电缆的机械性能及电气性能，科学的导体布局可显著降低电缆弯曲与拉伸时的应力集

中现象，减小导体彼此的摩擦及磨损，进而增强电缆的抗疲劳能力，传统电缆里导体大多呈紧密束状排列，即便在电气性能上表现颇为出色，然而在高柔性应用场景下，内部应力易出现集中现象，引发导体断裂及绝缘层损伤^[2]。采用优化导体排列方式的手段，如选用分层缠绕、绞合的构造或交叉式排布，可以让导体在弯曲状态下更均匀地分散应力，减小局部存在的变形，强化整体的柔韧水平，应结合排布方式调整导体截面形状和尺寸的设计，为保证导体间的间隙合理无误，杜绝因互相挤压引起性能下滑。导体排布优化还需同时兼顾电气性能的稳定状态以及制造工艺的可行性，当保证电阻与电感特性契合设计规格的时候，采用仿真分析及实验核实，反复调整导体排列的密度与层数，达到机械性能与电气性能的最优平衡水平，现代设计方法往往借助计算机辅助设计（CAD）以及有限元分析（FEA）技术，对导体在实际运行工况下的受力与变形状况展开模拟，为排布方案的优化提供指引，对导体排布予以优化，可减少导体材料用量，促进生产效率增长。

(二) 选择高韧性材料

作为高柔性电缆材料与结构一体化设计的重要原则，选择高韧性材料不可或缺，高韧性材料展现出出色的抗拉伸、抗疲劳及抗断裂性能，可于频繁弯折与扭转的复杂工作状况中维持出色的机械性能，有力延长电缆的服役寿命，诸如导体、绝缘层和护套等各个组成部分，均要采用高韧性材料，从而保障整体结构具备柔韧性与耐久性^[3]。导体材料除良好导电性能这一要求外，还得具备充分的延展性及强度，常借助多股细丝绞合技术，强

化导体的抗疲劳水平，绝缘材料需选用兼具弹性及耐磨性的高分子材料，诸如交联聚乙烯（XLPE）、热塑性聚氨酯（TPU）这般的，这些材料可有效抵御反复弯曲所引发的微裂纹与破损。护套材料多数采用具备出色弹性与耐磨损表现的热塑性弹性体，使电缆外层在机械摩擦以及环境侵蚀作用下依旧完整无损，选择高韧性材料，材料的环境适应性以及加工性能也需纳入考虑，高柔性电缆经常在工业机器人、自动化设备等多变的使用环境里出现，材料需具备诸如耐高温、耐油污、抗紫外线之类的特性，以符合复杂工况下稳定运行的诉求。电缆的制造工艺及成本直接受材料加工性能的影响，优质的材料需有良好的成型及兼容能力，便于落实多层复合结构的一体化设计安排，伴随纳米材料及复合材料技术发展，纳米填料掺杂的高分子材料，在提升韧性及耐疲劳性能方面极具潜力，为高柔性电缆材料创新开辟了崭新途径。

（三）多层结构设计

高柔性电缆材料与结构一体化设计里，多层结构设计是核心方法之一，借助恰当的分层安排，实现各层材料功能相互补充与协同，借此提升电缆的整体性能水平，高柔性电缆一般是由导体层、绝缘层、屏蔽层以及护套层等多层结构所构成，各层所承担的功能皆不相同^[4]。导体层担当起电流传输的职能，需有良好的导电及柔韧的属性；绝缘层保障电气绝缘的性能，杜绝短路及漏电现象出现；屏蔽层以抗电磁干扰为用途，实现信号的平稳传输；护套层起到保护相关作用，应对机械磨损及环境侵蚀，采用多层结构的设计方式，可有效实现机械应力分散，弱化内部的摩擦效应，降低疲劳损伤形成的风险，极大改善电缆耐弯折的能力和耐用度。处于具体设计的阶段，需依据应用需求对多层结构的厚度、所选材料及排列次序加以优化，导体层与绝缘层之间选取柔性填充材料，缓和弯曲状态下的应力传导；把屏蔽层设计成螺旋缠绕与编织结构，于保有柔性之时增进抗电磁干扰的能力；选用高韧性且耐磨损的材料作为护套层，提高整体耐用的水平。多层结构设计还需顾及制造工艺的可行性，保证各层之间紧密均匀地彼此结合，规避层间出现剥离及局部损伤的现象，现代设计手段一般将有限元分析与实验验证相结合，进行多层结构在动态弯曲、拉伸等工况下力学行为的模拟与优化，由此达成材料与结构的高效组合，多层结构设计既提升了高柔性电缆性能，又延长了其使用寿命，还为复杂工况里的可靠操作给予了坚实保障。

三、高柔性电缆材料与结构一体化设计的关键技术

（一）导体材料改进

作为高柔性电缆材料与结构一体化设计的关键技术之一是导体材料改进，直接关乎电缆的导电表现、机械灵活性与耐疲劳特性，传统导体多数采用铜及铜合金，即便其导电性能相当不错，然而在高柔性的应用环境里，单一粗股导体易因疲劳出现断裂，致使电缆寿命受到影响。为处理这一困境，主要以两方面体现导体材料的改进：首先要做的是优化导体结构，借助多股细丝缠绕绞合技术，把导体拆碎成大量细柔的铜丝，让导体整体变得更柔韧，且抗疲劳能力较高；其二为改进导体材料这一主体，就如应用高纯度无氧铜与铜合金材料，加大导体机械强度与延展的水平，进而提升导体的抗疲劳能力。还能采用表面处理方式，诸如开展镀锡、镀银作业，提高导体的抗腐蚀特性及导电稳定性，提高电缆的使用寿命，伴随新材料技术的进步，导体材料的改进中也逐步引入了纳米材料与复合材料，借助向铜丝里掺杂纳米颗粒，可增强导体机械强度和热稳定性，增进其耐疲劳及耐高温的本事。采用柔性金属制成的复合材料，诸如铜包铝导体之类，既降低了材料的相关成本，还明显降低了电缆整体重量，提高了电缆的柔韧度，导体材料的改进需搭配精密制造工艺，保障细丝绞合达到均匀状态且结构稳定，杜绝因制造缺陷而引发的性能下滑，将材料创新与结构优化技术加以综合运用，能显著增进高柔性电缆导体的综合性能，实现复杂工况下高性能传输的要求。

（二）绝缘层优化

高柔性电缆材料与结构一体化设计里，关键技术之一便是绝缘层优化，直接牵涉到电缆的电气安全性和机械耐久特性，在高柔性电缆的使用阶段，绝缘层不仅要拥有卓越的电气绝缘性能，杜绝漏电及短路现象，还必须可承受频繁弯曲及拉伸引发的机械应力。优化聚焦于绝缘层材料的选择及结构设计，诸如交联聚乙烯（XLPE）、热塑性聚氨酯（TPU）和硅橡胶等属于常用绝缘材料，这些材料既具备良好的介电强度，又有柔韧性，可有效减轻机械疲劳，经由合理调控绝缘层厚度，维持电气绝缘合理的安全裕度，也防止因厚度过大引起柔性的降低，实现电气性能跟机械性能的协调。绝缘层的优化还需借助材料改性与多层复合技术的运用，投入二氧化硅、纳米粘土等纳米填充物质，可明显提升绝缘材料的介电强度及耐热程度，与此同时增强它的机械强度与

抗撕裂的能力，多层绝缘结构设计经由组合不同性能的各材料层，造就互补长处，增进整体的耐用性与柔性。采用高介电强度材料做内层，保证绝缘效果显现，采用耐磨耐油弹性体作外层，提升机械防护能力，诸如共挤出和层压技术的先进加工工艺，使多层结构紧密结合起来，防止层间出现剥离或产生缺陷，采用以上做法，电气性能上，绝缘层获得了提升，而且大幅增强了耐疲劳与应对环境侵蚀的能力，符合高柔性电缆于复杂工况下稳定运行的要求。

（三）护套材料创新

护套材料创新是高柔性电缆材料与结构一体化设计中不可忽视的关键技术，直接与电缆的机械保护性能及使用年限相关联，在诸如工业自动化、机器人等领域的高柔性电缆，屡屡碰到频繁弯折、拉伸以及各种机械摩擦和环境侵害的困境，传统护套材料在同时满足高柔性、高耐磨性需求方面较难。实现电缆综合性能提升，护套材料创新是关键，目前大量应用的护套材料，主要有热塑性聚氨酯（TPU）、氯丁橡胶（CR）、乙烯基共聚物（EVA）之类，这些材料展现出出色的弹性、耐磨性能与耐油特性，经由改进材料配方，添加耐磨助剂、纳米填料或增塑剂，可进一步提升材料机械强度、耐磨耗的能力及抗老化的性能，使护套在复杂工况里始终保持完整又柔韧。伴随新型高分子材料与复合材料技术的进步，护套材料创新显现出多样化的态势，纳米复合材料护套借助引入纳米颗粒来强化材料的结构强度与耐热性能，有效增进护套抵御撕裂与耐磨的能力，柔性共混材料是把不同性能的高分子材料融合在一起，兼顾机械强度与柔韧性，实现对护套材料性能的优化。对生物基环保材料应用的关注渐起，既降低了环境方面的污染，进而提升了材料可持续水平，制造工艺达成的进展，诸如共挤出技术以及表面改性手段，也助力护套材料同内部结构紧密结合在一起，增进整体电缆的耐用性及可靠性，护套材料创新依托材料性能提升与工艺优化相融合，有效保障高柔性电缆在多样严苛环境里长期稳定工作。

（四）多层结构集成

多层结构集成是高柔性电缆材料及结构一体化设计中的关键技术，目的是把不同功能层合理组合，实现材料性能互补及协同状态，增强电缆整体的机械强度与电气性能，高柔性电缆一般包含导体层、绝缘层、屏蔽层、护套层等多个功能层面，每层材料性能和结构的设计，

直接关乎电缆柔韧性、耐磨性及电气稳定性。多层结构集成采用科学手段安排各层的厚度、材料类型和排列形式，充分分散机械应力，减少弯曲动作下的局部变形，防止层间出现剥离以及损坏，极大提高电缆的抗疲劳能力，延长其寿命，多层结构集成的达成还仰仗先进制造工艺，就如共挤出、层压还有缠绕技术，让各层材料紧密结合在一起，结构坚实又齐整。这些工艺在提升电缆整体性能上成效显著，也实现了结构设计复杂程度限制制造效率的平衡，借助有限元分析这类现代设计手段，可以对不同层间应力分布以及变形行为加以模拟，督导结构实施优化，促成机械性能跟电气性能的最优配合，多层结构集成技术为高柔性电缆在工业自动化、机器人等高标准领域给予了可靠的技术支撑，是实现材料与结构一体化设计的关键路径。

结语

高柔性电缆材料与结构一体化设计依靠优化导体排布情况、选择高韧性材料、采取多层结构设计以及提升绝缘和护套的综合性能，实现了机械性能跟电气性能的紧密融合，切实提高了电缆的柔韧性、耐疲劳特性及使用寿命，诸如导体材料改善、绝缘层升级和多层结构融合等关键技术，不仅带动了材料性能的上扬，也推动制造工艺实现创新，契合了智能制造与高端装备对高性能柔性电缆的要求，伴随新材料、新工艺以及数字化设计手段持续进步，高柔性电缆设计会实现更科学精准，应用的范围将进一步拓展，为现代工业自动化及智能装备可靠运作予以支持。

参考文献

- [1] 屠粹芳, 王坤. 异型结构特种圆-扁电缆的研制[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2010, 000(004): 18-20.
- [2] 孙磊. 新型柔性储能器件: 柔性锂离子电池[J]. 化学教育(中英文), 2019, 40(4): 8.
- [3] 刘媛, 段绍辉, 张金广, 等. 电缆中间接头用石墨基柔性材料防火防爆性能研究[J]. 材料开发与应用, 2022(001): 037.
- [4] 夏兴治. 高柔性拖链电缆设计与测试[J]. 中国科技博览, 2015, 000(040): P.28-28.
- [5] 朱智恩, 陈龙啸, 杨黎明, 等. 柔性直流电缆附件应力锥设计研究[J]. 绝缘材料, 2019.