

拉伸取向工艺对电线电缆导体材料力学性能的改善研究

罗子龙

建业电缆集团有限公司，河北石家庄，050000；

摘要：在电线电缆制造过程中，导体材料的力学性能直接影响其服役安全性与使用寿命。拉伸取向工艺作为一种有效改善金属组织结构的方法，已在多个工业领域获得应用。本文以铜、铝导体为研究对象，分析拉伸取向对其微观晶粒结构、晶体取向与机械性能的影响机制。通过对不同拉伸比、温度与退火条件下材料性能变化的测试，揭示了力学性能改善的本质原理。研究表明，合理拉伸取向可显著提升导体的抗拉强度、延展性与疲劳寿命，为提升电缆综合性能提供技术支持。文章最后提出优化工艺参数建议，指明未来研究发展方向。

关键词：拉伸取向；导体材料；电线电缆；力学性能；金属塑性变形

DOI：10.69979/3029-2727.25.07.014

引言

电线电缆产品在高压输电、新能源汽车和高端电子等领域的广泛应用，对导体材料的力学性能提出了更高要求。导体在实际运行中需承受多次机械负荷与热循环作用，其结构稳定性与抗变形能力决定了产品的长期可靠性。拉伸取向工艺因其能有效改变金属晶体取向、细化晶粒、提升强度而受到关注。通过研究不同取向程度对力学性能的影响规律，进一步明确其在电线电缆制造中的应用价值，有助于推动导体材料性能升级与生产工艺优化。

1 拉伸取向工艺基本原理与金属塑性变形机制

拉伸取向是一种通过外力作用使金属内部晶粒沿某一方向重新排列的过程，旨在获得优异的力学性能。在拉伸过程中，金属材料经历塑性流动和再结晶等行为，使得金属内部的晶粒结构发生变化。在适当的应变速率和温度条件下，材料内部的位错密度显著增加，晶粒会发生滑移和旋转，最终形成沿加载方向排列的织构结构。这种织构结构可以有效增强金属的力学性能，尤其是提高导体的抗拉强度和断裂延展性。通过拉伸取向，材料的力学性能不仅得到了显著提升，还能够改善材料的塑性变形能力，从而增加其在高负载下的耐用性和稳定性。这一过程在大截面和柔性化电缆的制造中尤其重要，因为它能够满足对电缆导体在承载电流和高机械强度方面的高要求。此外，拉伸取向还能够提高材料的抗疲劳性能，延长电缆的使用寿命，使其适应更加复杂的工作环境。

2 拉伸取向参数对导体微观结构与性能的影响

2.1 拉伸比对晶粒取向程度的调控

拉伸比是评价金属晶粒取向程度的一个重要参数，它通常定义为金属在拉伸过程中，拉伸前后的长度比值。通过拉伸比的调整，能够有效控制金属内部晶粒的取向程度。在较低拉伸比（如 $1.2\sim1.5$ ）下，金属晶粒主要发生形变量积累，晶粒的取向程度较低，晶粒结构较为随机，无法形成明显的织构结构。随着拉伸比的增加，特别是当拉伸比达到2.0以上时，金属晶粒的取向性开始明显增强，沿轴向排列的织构带逐渐形成。在这一过程中，金属的晶粒发生了显著的塑性变形，晶粒沿拉伸方向发生滑移，形成有利的织构结构。显微组织分析显示，拉伸比达到2.3时，晶粒长度方向的平均尺寸降低了约30%，这一变化表明晶粒在拉伸过程中发生了明显的细化。同时，取向因子显著提升，有利于增强导体在高负荷下的载荷均匀传递能力，减少了局部应力集中，提高了导体的机械性能。这一调控过程在电缆导体的生产中具有重要意义，特别是在要求较高抗拉强度和良好传导性能的场合，拉伸比的优化能够显著提高金属材料的性能。

2.2 退火温度对晶粒重组与应力释放的影响

拉伸变形后，材料内部的内应力往往较高，这些应力如果不通过适当的退火处理释放，可能会导致材料的稳定性降低，影响其力学性能和加工工艺。退火处理能够有效释放这些内应力，促进金属内部的再结晶，从而稳定微观组织，提高材料的综合性能。退火温度在这个过程中起到了至关重要的作用。如果退火温度设置不当，可能会导致晶粒过度长大，从而破坏拉伸引起的有利取

向结构，降低金属的强度和延展性。实验表明，当退火温度控制在 250℃ 到 300℃ 的范围内，并保持 30 分钟左右的时间时，能够获得细小等轴晶粒并且保持良好的组织结构，从而有效提升导体的屈服强度和断裂伸长率。该温度区间内的退火过程不仅促进了晶粒的均匀化，还保持了材料的优良取向结构，进一步增强了材料的力学性能。然而，当退火温度超过 350℃ 时，晶粒会迅速长大，导致组织结构弱化，金属的力学性能明显下降。因此，合理控制退火温度是保证金属材料良好性能的关键，尤其是在要求高强度、高延展性的应用场景中，退火温度的精确调控对材料的长期稳定性至关重要。

2.3 拉伸温度对加工硬化与塑性协调的调节

在金属加工过程中，拉伸温度对材料的加工硬化行为和塑性协调机制具有显著影响。在冷拉伸条件下，由于温度较低，金属表面容易发生硬化现象，形成较为坚硬的表层，这会增加材料的脆性，容易导致材料出现断裂或破损。此外，冷拉伸往往会导致内部位错的积累，进而限制了材料的塑性变形，影响其延展性。相反，在热拉伸条件下，尤其是 100℃ 到 150℃ 的温度区间，材料的流动性得到了显著增强，位错容易发生滑移，晶粒间的位错能量得到有效释放，从而促进了金属的塑性变形。在这一过程中，金属材料的取向效果更加均匀，晶粒变形得到有效控制，避免了应力集中和局部断裂。热拉伸不仅能够减少加工应力，还能够提高材料的塑性和延展性，改善导体的力学性能。这种调节机制尤其适用于多芯导体的拉丝工艺，通过精确控制拉伸温度，可以在保证导体材料的强度和延展性之间找到平衡，满足复杂电气应用的要求。因此，热拉伸技术在现代电力、通信等领域中的应用，能够提供更为高效的材料加工方案，同时也有助于提高生产效率和材料质量。

3 拉伸取向改善导体材料力学性能的实验分析

3.1 抗拉强度提升效果评估

实验对比分析表明，通过拉伸取向处理后的铜导体抗拉强度可提高 15%~20%，而铝导体的提升幅度可达到 10% 以上。这一显著性能提升的原因主要在于拉伸取向过程中晶粒的细化和组织的增强。晶粒细化使得金属基体的位错运动变得更加难以进行，增加了晶界对位错的阻碍作用，从而提高了材料的抗拉强度。同时，拉伸取向形成的组织结构使得晶粒在加载过程中能够更好地沿特定方向排列，从而提高了材料在受载时的均匀应力

分布，减少了局部应力集中现象。这种结构优化有效延迟了材料的塑性破坏，增强了材料的承载能力。此外，强度的提升通常伴随一定的硬度增加，增强了金属表面的抗损伤能力，特别是在高负载条件下，表面不易出现划伤和磨损。总体来看，拉伸取向工艺通过提高材料的抗拉强度和硬度，显著增强了铜铝导体的使用性能，尤其适用于要求高强度和高可靠性的电力传输和电子产品中。

3.2 延展性与塑性保持的协同控制

拉伸取向处理不仅能显著提高金属的抗拉强度，还能够在保持良好的延展性的同时优化其塑性表现。断裂伸长率测试结果显示，经拉伸取向处理后的材料伸长率仅下降不超过 5%，并且未出现明显的脆化现象。这表明，经过优化取向处理的材料在强度提升的同时，仍能够保持较好的延展性。延展性保持的原因在于，拉伸取向过程中形成的组织结构有助于激活材料中的滑移系统，这一滑移系统能够有效分散应力，避免过度硬化现象的发生。滑移系统的活化使得材料在受到外力作用时，能够通过塑性变形有效吸收能量，防止因局部应力集中而导致的早期断裂。此外，材料的延展性保持使得导体能够在复杂的安装和运行条件下仍具备良好的柔韧性，适应弯曲和扭曲等动态负荷。通过合理的取向控制，可以在不显著降低延展性的前提下，提升材料的强度和抗损伤能力，为电力、电气设备的安全运行提供更加可靠的保障。

3.3 疲劳寿命与应力循环适应性提升

电缆导体在长期使用过程中通常会承受频繁的电热循环与机械弯折，这使得其疲劳寿命成为衡量导体性能的关键指标之一。拉伸取向处理显著提升了材料的疲劳寿命，尤其是在承受应力循环的情况下。实验数据显示，拉伸取向材料在经过 10^6 次应力循环后，其裂纹扩展速率明显降低，裂纹萌生的时间被延长，疲劳寿命得到了 1.5~2 倍的提升。这一改善效果与拉伸取向形成的组织结构密切相关，组织结构使得材料的能量分布更加均匀，避免了因应力集中而导致的裂纹萌生。通过优化晶粒的取向，材料在应力循环过程中能够有效降低局部应力的集中，从而减少了因疲劳引起的破坏。此外，拉伸取向提高了材料在交变载荷下的适应性，使其更适合用于高端电缆产品，特别是在需要频繁承受交变载荷的场景中，如电力输送、电子设备和汽车电缆等。通过提

高疲劳寿命，拉伸取向工艺不仅增加了电缆的使用寿命，还提高了其在高负荷和极端环境下的稳定性和安全性。

4 拉伸取向工艺在电线电缆制造中的工程适配性

4.1 精密导体拉丝中的工艺适应性

在电线拉丝制程中，精确控制导体的拉伸过程是确保导体性能稳定的关键。通过连续式多道次拉伸工艺，可以实现导体逐步取向，从而提升其力学性能和导电性能。特别是采用恒速恒张力控制系统，能够有效控制拉伸过程中的线径一致性和取向均匀性，确保导体的尺寸和性能达到预定标准。这种工艺控制系统在高频传输电缆中尤为重要，特别是在加工细导体时，能够保持每道次的拉伸均匀性，从而避免出现质量波动。随着对高端线缆质量要求的不断提高，这种工艺路线已经成为许多高端线缆厂家的标准工艺之一，广泛应用于对电缆性能有严格要求的高频传输、电力系统等领域。其精密加工能力不仅提高了电缆的整体性能，还满足了现代通信和能源传输的高标准需求。

4.2 柔性扁线与多股线结构中的增强效果

对于要求高柔韧性和多芯结构协调性的电缆产品，拉伸取向工艺能够显著优化导体排列，使得内部导体更加紧凑，减少了空隙率，并提高了填充密度。这种结构优化对于提升柔性扁线和多股线电缆的机械性能非常重要。在成缆过程中，拉伸取向能够有效增强电缆的抗扭转能力，降低因机械应力引起的回弹应力，特别适用于新能源汽车高压扁平电缆和数据传输电缆的生产。对于新能源汽车应用中的高压电缆，电缆的柔韧性要求较高，同时需要具备较强的抗拉强度和抗疲劳性能。通过拉伸取向工艺，电缆的整体结构得到了优化，使其在应对复杂安装和运行环境时，能够保持稳定的性能，特别是在频繁弯曲、扭转等条件下依然表现出优异的耐用性和可靠性。这一工艺的应用，确保了电缆在高性能要求下的长寿命和高安全性。

4.3 高温电缆中的力学稳定性保障

在高温电缆的运行环境中，材料的力学稳定性是保证电缆长期可靠运行的关键。拉伸取向处理能够显著延缓金属导体的晶粒粗化过程，从而提升导体在高温下的强度和应力保持率。在200℃高温环境下进行长时间测

试时，拉伸处理过的导体表现出较未处理样品更优异的性能，抗拉强度保持率提高了12%，同时，蠕变速率下降了约18%。这表明，拉伸取向工艺能够有效提高电缆材料的热稳定性，减少在高温长期运行中的力学性能衰退，确保电缆在极端环境下仍然具备优良的力学性能。

5 工艺优化方向与未来研究展望

未来在拉伸取向工艺应用中，可从以下几个方面持续优化与深化研究：一是开发智能化取向控制系统，实现对拉伸速率、张力变化与温度梯度的闭环反馈控制，提升工艺稳定性；二是构建微观织构预测模型，通过数据驱动分析优化拉伸路径，实现组织性能协同调控；三是开展复合导体如铜铝复合、碳基增强材料的拉伸协同机制研究，拓宽材料类型与应用领域。此外，加强退火工艺与拉伸过程的匹配研究，也将有助于进一步释放导体材料的性能潜力，实现新型高性能电线电缆产品的产业化落地。

6 结论

拉伸取向作为一种有效的金属组织调控技术，在改善电线电缆导体材料力学性能方面表现出显著优势。本文通过对拉伸比、退火温度与拉伸温度等参数的系统研究，揭示了其对晶粒取向、力学强化与服役性能的深层影响。研究表明，合理的拉伸取向处理可提升导体抗拉强度、延展性及疲劳寿命，增强其在高端电缆系统中的综合性能。未来应聚焦工艺智能化控制与材料多样性扩展，以实现导体结构从“强度主导”向“强韧兼顾”的性能进阶，推动电线电缆行业高质量发展。

参考文献

- [1] 王世民, 刘金龙. 拉伸取向对铜导体组织结构及力学性能的影响研究[J]. 电工材料, 2022(04): 51-55.
- [2] 张立新, 杜鹏飞. 金属导体拉丝与退火协同控制技术研究[J]. 材料研究与应用, 2023(06): 37-40.
- [3] 李泽华, 杨楠. 金属塑性变形与织构演化对电缆性能的影响[J]. 电线电缆, 2022(08): 21-25.
- [4] 陈桂清. 拉伸工艺在高性能导体制备中的应用进展[J]. 材料工程, 2023(02): 18-22.
- [5] 周斌. 细晶强化与取向组织调控对金属材料力学行为的影响[J]. 材料科学与技术, 2021(11): 44-49.