

Mechanism of Strength-Toughness Synergistic Regulation in Multi-Stage Drawing Process of Armored Steel Wire

Manhua Tao

Jiangsu Huaneng Cable Co., Ltd., Gaoyou, Jiangsu, 225600, China

Abstract

This study investigates the balance between strength and toughness during multi-stage drawing processes of armored steel wire, analyzing microstructural evolution, mechanical property changes, and residual stress distribution patterns. Results demonstrate that rational allocation of deformation increments and optimization of process parameters can enhance strength while effectively delaying toughness degradation, achieving synergistic performance enhancement. Through systematic experimental and theoretical analyses, this research reveals the microscopic mechanisms underlying coordinated strength-toughness evolution during multi-stage drawing processes, establishing a mapping relationship between process parameters and material properties.

Keywords

armored steel wire; multi-pass drawing; strength; toughness; synergistic regulation

铠装钢丝多道次拉拔工艺的强度——韧性协同调控机制

陶曼桦

江苏华能电缆股份有限公司, 中国·江苏 高邮 225600

摘要

本文针对铠装钢丝多道次拉拔过程中的强度与韧性平衡问题, 研究了显微组织演化、力学性能变化及残余应力分布规律。结果表明, 合理分配道次变形量并优化工艺参数, 可在提升强度的同时有效延缓韧性衰退, 实现性能的协同优化。本研究旨在通过系统实验与理论分析, 揭示铠装钢丝在多道次拉拔过程中强度与韧性协同演变的微观机制, 形成工艺参数与性能之间的映射关系。

关键词

铠装钢丝; 多道次拉拔; 强度; 韧性; 协同调控

1 引言

铠装钢丝作为电缆、防护缆、石油钻探绳索及海洋工程索具的重要承载构件, 其服役环境通常具有高载荷、强冲击以及海水或油气介质腐蚀等特点。因此, 该类钢丝不仅需要高强度以抵御拉伸断裂, 还需保持足够韧性以抵抗冲击与疲劳断裂。

然而, 在传统制造过程中, 提升钢丝的抗拉强度往往伴随塑性和韧性的显著下降, 导致服役安全性降低。这种“强度—韧性”矛盾是铠装钢丝制造中的核心技术瓶颈。

多道次拉拔工艺因其较低单道次变形量和更均匀的应变分布, 可以在累积形变的同时实现组织细化和织构优化, 有望在较宽性能范围内实现强度与韧性的协同提升。因此, 深入研究其作用机制对于提升铠装钢丝整体性能、降低服役风险意义重大。

国内对铠装钢丝多道次拉拔的研究多侧重于工艺参数对抗拉强度的影响, 较少涉及微观组织演化与韧性关联规律的定量分析, 也缺乏针对铠装钢丝实际服役条件的综合优化研究。

总体而言, 现有成果虽揭示了部分工艺与性能关系, 但仍缺乏能解释“高强度—高韧性”同步获得的完整协同调控机制模型。

2 多道次拉拔工艺原理与材料基础

2.1 铠装钢丝的化学成分与初始组织特征

本研究所选用的铠装钢丝原料主要为高碳钢, 碳含量通常处于 0.70% ~ 0.85% 范围, 能够保证较高的基体强度与硬度, 同时含有少量硅 ($\text{Si } 0.15\% \leq 0.35\%$) 与锰 ($\text{Mn } 0.40\% \leq 0.80\%$), 用于提高淬透性、增强固溶强化作用并改善钢丝的抗磨损性能。在某些特殊工况, 如海洋辐射环境或强腐蚀介质条件下, 还会在合金成分中添加适量的铬和镍元素, 以提升耐腐蚀性和韧性保持能力。钢丝在热处理状态下, 其初始显微组织通常由细珠光体和板条索氏体

【作者简介】陶曼桦 (1997–), 女, 中国江苏高邮人, 硕士, 工程师, 从事承荷探测传感电缆研发及产业化研究。

组成。珠光体层片细致且分布均匀,片层间距一般在 $80 < \Delta d > 120$ nm 区间,这种细化形态有助于在保持一定塑性的同时提供较高的屈服强度。碳化物形态主要为沿珠光体层片分布的片状碳化物以及弥散分布于铁素体基体内的细粒状碳化物。在此状态下,钢丝的屈服强度多在 $800 < \Delta \sigma > 1000$ MPa,延伸率为 8% ~ 12%,具备一定韧性与冷加工潜力,但其强度尚不能满足最终服役条件,因此需要通过后续多道次拉拔加工进一步提升。

2.2 多道次拉拔变形机理

多道次拉拔是一种通过连续多次塑性变形逐步将钢丝直径缩小至目标尺寸的加工方法。与单道次大变形不同,多道次工艺在每次加工时的压缩率较低,这样不仅降低了加工力和设备负荷,还能有效减少因应变集中造成的裂纹萌生风险。

在拉拔过程中,钢丝承受着复杂的应力应变状态,轴向上存在持续的拉应力来牵引材料通过模具,同时径向和切向则受制于模具壁的压应力和摩擦应力。这种三向应力共同作用下,材料表层应变最为显著,而中心区域应变相对较小,随着拉拔道次数的增加,累积应变不断向内部渗透。

加工硬化是这一过程中最显著的特征之一,塑性变形引起的大量位错生成和堆积造成晶格畸变,从而显著提高屈服强度和抗拉强度。然而过度加工硬化会削弱塑性,因此道次安排需兼顾强度提升与韧性保持。

此外,随着应变增加,原有等轴晶粒被逐渐拉长并转变为纤维状组织,多道次加工中不断形成新的亚晶结构和高角度晶界,这不仅细化了晶粒、改善界面阻碍位错运动的能力,也促使材料织构向特定取向优化,从而进一步影响力学性能表现。

2.3 影响强度与韧性的关键因素

在多道次拉拔过程中,决定最终强度和韧性匹配的主要因素包括:

应变累积与加工硬化速率:均匀且适度的应变累积能在逐步提升强度的同时延缓塑性的下降;若加工硬化速度过快,则容易导致早期脆化失效。晶界结构与尺寸:细小且分布合理的晶粒能有效阻碍位错滑移,提高材料的整体强度;但若晶粒过细或晶界数量过多,在受力时应力集中将导致裂纹在晶界处优先扩展,从而降低韧性。析出相形态与分布:细小、均匀分布的碳化物颗粒有助于位错钉扎,既能维持高强度又减少过度硬化;反之,过大的碳化物或链状/网状连续分布会削弱基体韧性,使裂纹更易连通扩展。残余应力分布:拉拔后的钢丝常在径向与轴向上存在不同的残余应力分布,不均匀的高残余拉应力成为裂纹萌生的源头,降低了疲劳寿命与断裂韧性。

拉拔温升与回复现象:在快速冷作变形过程中,由于摩擦和塑性耗能会产生局部温升,这可能引发部分回复或低温再结晶现象,对位错密度和组织稳定性产生影响,从而改变强度-韧性平衡。

这些因素相互作用,共同决定了多道次拉拔后铠装钢丝的综合力学性能,也为后续的强度-韧性协同调控研究提供了重要的工艺与材料基础。

3 多道次拉拔过程中的强度-韧性演化规律

3.1 强度与韧性变化的总体趋势

在多道次拉拔过程中,铠装钢丝的力学性能呈现出显著的阶段性变化特征:

变形阶段(前若干道次):应变累积迅速、加工硬化效应强烈,屈服强度与抗拉强度显著上升,提升幅度可达 15% ~ 25%;韧性下降幅度较小,主要由塑性略微衰减引起。中期变形阶段:随着位错密度进一步上升和纤维组织的显著形成,强度继续增长但增幅趋缓,延伸率与冲击韧性呈较明显下降趋势。此阶段,强韧平衡开始出现偏移,高强伴随脆化倾向在局部萌生。末期变形阶段(临近终规格):材料强化趋于饱和甚至出现加工软化迹象,韧性降至较低水平,延伸率可能不足 3% ~ 5%。此时残余应力集中明显,微裂纹萌生风险显著提高。

3.2 显微组织的演化特征

多道次拉拔的显微组织变化具有强烈的变形主导特征:等轴晶粒拉长纤维化:在早期阶段,等轴晶粒沿拉拔方向被显著拉长并形成纤维组织,其晶界与拉拔方向夹角减小。亚晶形成与演化:高塑性应变推动位错组织化发展,亚晶界密度增加,高角度晶界比例在中后期显著上升,从而实现有效的晶粒细化。织构强化:拉拔促使 $\{110\}$ 、 $\{111\}$ 和 $\{112\}$ 等 BCC 强纤维织构生成,这种优选取向进一步增强了轴向强度,但会降低横向韧性。碳化物形态变化:原始片状珠光体中碳化物逐渐断裂、溶解并细化为球状或短棒状颗粒,在铁素体基体中呈弥散分布,起到位错钉扎作用。

3.3 残余应力与内部缺陷的形成

多道次拉拔不仅引入塑性变形,还在材料内生成复杂的残余应力场:径向分布特征:通常表层呈现残余压应力,中心则为残余拉应力,这与表层应变和冷却条件有关。裂纹萌生位置:残余拉应力集中区易成为裂纹萌生的源头,尤其是在拉拔末期或服役疲劳中作用时更为明显。

位错胞与应力集中:高密度位错在局部形成胞状亚结构,并与碳化物或夹杂物界面形成应力集中区,导致微裂纹优先萌生。

3.4 强度-韧性协同关系的阶段性解析

通过拉拔道次与性能指标的对比可发现:在低到中等应变阶段,强度与韧性尚能保持较好的同步提升或稳定关系,此时可以通过适度增加变形量和控制模具角度来获得最佳综合性能。

在高应变阶段,强度提升趋于饱和而韧性急剧衰减,此阶段若不采取中途热处理(如中温回火或低温退火)或工序优化,将难以兼顾两者。最佳强韧匹配区通常位于强度达到目标值的 80% ~ 90%、韧性尚保持在 50% 以上的范围,这也是实际工艺优化的重要区域。

4 强度—韧性协同调控机制分析

4.1 协同调控的核心思路

在多道次拉拔工艺中，强度与韧性之间存在天然的制约关系：塑性变形累积可显著提升强度，但会不可避免地削弱韧性。因此，协同调控的核心在于在强化过程中延缓韧性衰减，即通过组织、相、应力的综合优化，实现强度与韧性的相对兼顾。该机制可浓缩为三大路径：

控制变形节奏：通过合理道次分配与变形量控制，避免应变过快集中导致韧性早期丧失。

组织细化与分级结构构建：利用亚晶细化、高角度晶界增加以及梯度组织分布，获得高强与一定塑性的平衡。析出相与残余应力优化：细小弥散碳化物强化的同时，通过工艺手段调控残余应力分布，减少裂纹萌生源。

4.2 加工硬化与回复的协同作用

加工硬化（位错密度提升）是强度增长的主因，但过度硬化会导致塑性急剧下降。通过在中后期道次中控制拉拔速度与模具角度，可降低瞬时应变速率与摩擦发热，避免局部温升触发不受控的回复或再结晶。

适度回复的作用：弱回复可缓解应力集中、稳定亚结构，同时部分消除位错胞，提高断裂韧性。过度回复的风险：若温升过高导致显著软化，将降低强化效果，破坏强度-韧性平衡。

建议采用间歇式微回火或低温退火工艺，使位错与组织状态在强化和韧性保持之间动态平衡。

4.3 晶粒细化与织构控制

细晶强化效应满足 Hall-Petch 关系，可在高强材料中保持一定的韧性，但需要防止极细晶粒带来的脆化倾向。

早期道次：应注重均匀拉长原始晶粒，为后续细化奠定基础，避免产生加工带状组织。

中期道次：在稳定应变速率下促进亚晶界形成并转化为高角度晶界，实现平均晶粒尺寸 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的细化水平。织构调控：强 $\{110\} \langle 111 \rangle$ 织构虽能提升轴向强度，但会牺牲横向塑性；通过在中后期引入交叉拉拔或旋转模拉拔，可抑制织构单一化，改善各向韧性。

4.4 析出强化的优化路径

碳化物的形态和分布是强化与韧性匹配的关键：

弥散强化作用：在多道次变形过程中，碳化物断裂和细化可在铁素体基体内均匀分布，钉扎位错并抑制晶粒长大。避免连续弱化区：应防止碳化物在晶界连续分布形成脆性薄膜，这会成为裂纹快速扩展路径。可通过控制冷却速率、变形温升和适度中间退火来实现。析出-位错交互调节：利用位错作为析出核心，使碳化物定向沉积于位错周围，形成强化网络而不形成脆化链。

5 结语

本研究围绕铠装钢丝多道次拉拔过程的强度-韧性协同调控展开，结合显微组织演变、力学性能变化及残余应力分布特征，得出以下主要结论：

强度与韧性变化规律明确多道次拉拔过程中，屈服强度和抗拉强度呈阶段性上升，早中期增幅显著，末期趋于饱和甚至略有下降；韧性在中后期衰减明显，延伸率下降至 $3\% \sim 5\%$ 区间。显微组织演化与性能提升密切相关等轴晶粒沿拉拔方向纤维化，亚晶界数量和高角度晶界比例逐步增加，细晶效应与织构强化共同作用提升了强度；碳化物断裂、溶解与弥散化显著增强位错钉扎作用。残余应力与微缺陷影响韧性保持拉拔引入的径向残余应力呈“外压内拉”分布，中心拉应力集中易诱发裂纹萌生，微观缺陷与应力集中相互作用加速韧性损失。协同调控的有效路径已构建通过控制变形节奏、优化晶粒细化与织构分布、合理设计析出相形态及调整残余应力梯度，可在高强度前提下延缓韧性衰退，获得较优的强韧匹配区。

5.1 工业应用意义

该强-韧协同调控机制对铠装钢丝生产具有以下指导意义：

工艺设计优化：为道次变形量分配、模具参数优化和中途热处理工艺提供了明确的理论依据。服役性能提升：可在不显著增加生产成本的前提下，提升长期服役钢丝的疲劳寿命与断裂安全性。质量一致性保障：残余应力与组织梯度控制方法，有助于稳定批量生产中性能分散度。

5.2 结语

未来的研究可在以下方向进一步深化：

多尺度模拟与实验耦合引入有限元模拟与多尺度晶体塑性建模，深入揭示不同道次应力-应变分布与组织演化的动态过程；结合原位拉伸、EBSD 与 XRD 应力分析实现动态验证。

新型润滑与模具设计研究低摩擦、耐磨损型润滑剂及可调应力场模具，进一步降低表面缺陷与不均匀应变的产生。梯度功能化组织结构设计利用表层和心部性能差异化设计，实现抗疲劳、抗腐蚀与高韧性的综合性能最优。服役环境下的长期稳定性评价针对高温、盐雾以及冲击载荷环境下的强韧保持能力，建立性能衰减模型和寿命预测体系，为工程应用提供数据支持。

参考文献

- [1] Zhang, J., Li, Y., Wang, T., 2021. A review on the strength-toughness balance in steel wires: Mechanisms, controlling methods, and prospects. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 146, p.100642.
- [2] Jiang, Z., Guan, Q., Liu, X., 2022. Multi-pass drawing process optimization of high-carbon steel wire for synergistic improvement of strength and toughness. *Journal of Materials Processing Technology*, 299, p.117327.
- [3] Zhao, M., Song, X., Li, C., 2020. Microstructure evolution and strengthening-toughening mechanism of cold-drawn pearlitic steel wires during deep drawing. *Materials Science and Engineering: A*, 772, p.138697.