

高强度钢与碳纤维材料在矿用箕斗轻量化中的应用对比分析

薛建当

国能新街能源有限责任公司

【摘要】矿用箕斗是煤矿提升系统中的关键设备，其重量对提升系统的性能与安全性具有重要影响。本文对比分析了高强度钢和碳纤维材料在矿用箕斗轻量化中的应用。通过优化设计和材料选择，箕斗本体采用高强度钢（如HG70D、Q690D），减轻了整体重量，并且在提升系统中应用了碳纤维材料，进一步减轻了斗箱部分的重量。高强度钢相较于碳纤维材料，具有较低的成本、更好的抗冲击性和焊接性，适合大规模应用，而碳纤维则在轻量化和耐腐蚀性上表现突出。通过应用这些轻量化技术，矿井的提升效率、能效、维修周期及整体经济性得到了显著提升。

【关键词】矿用箕斗；轻量化；碳纤维；高强度钢

Comparative Analysis of High-Strength Steel and Carbon Fiber Materials in Lightweight Design for Mining Hoppers By

Xue Jian Dang

Guo Nengxinjie Energy Co., Ltd.

【Abstract】 As critical components in coal mine hoisting systems, mining hoppers play a pivotal role in determining operational performance and safety. This study compares the application of high-strength steel (e.g., HG70D, Q690D) and carbon fiber materials in lightweight hopper design. Through optimized engineering and material selection, the hopper body employs high-strength steel to reduce overall weight, while carbon fiber materials are integrated into the hoisting system to further minimize the hopper box section. High-strength steel demonstrates cost-effectiveness, superior impact resistance, and weldability, making it suitable for large-scale implementation, whereas carbon fiber excels in lightweight construction and corrosion resistance. The adoption of these lightweight technologies has significantly enhanced mine hoisting efficiency, energy efficiency, maintenance intervals, and overall economic performance.

【Key words】 mine bucket, lightweight, carbon fiber, high strength steel

引言

矿用箕斗是煤矿提升系统中的重要设备，其主要功能是承载和运输矿石。在矿井的实际运行中，箕斗的重量直接影响到提升系统的性能与安全性。为了提高煤矿提升系统的运行效率与经济性，矿用箕斗的轻量化已成为当前技术发展的重要方向。高强度钢和碳纤维材料作为轻量化技术中最具代表性的两种材料，分别在不同领域获得了广泛应用。本文将对这两种材料在矿用箕斗轻量化中的应用进行对比分析，以帮助选择适合的新型箕斗材料。

一、矿用箕斗的组成与结构分析

矿用箕斗是煤矿提升系统中至关重要的设备，其主要作用是承载和运输矿石。矿井在实际运行过程中，箕斗的重量直接影响到提升系统的效率和安全性，因此，减轻箕斗的重量是提升矿井作业效率、降低能耗和减少设备磨损的重要手段。矿用箕斗通常由多个部件组成，包括箕斗本体结构、悬挂装置、滚轮罐耳、控制系统等关键部件。在新街二矿的40吨箕斗设计中，原始设计方案的整体自重为60吨，其中箕斗本体的重量为45588kg，其他配套部件如悬挂装置、巡检机器人等的重量加起来总计为14412kg。为了应对提升系统在运行中面临的各种挑战，如重量过大带来的能耗高、提升速度慢等问题，设计团队提出了对箕斗进行结构优化和轻量化处理的方案。

在轻量化技术的应用中，设计团队首先对箕斗的主要结构进行优化，通过使用高强度钢材来代替传统的Q355D

钢材。具体而言，箕斗本体结构中的HG70D高强度钢和Q690D高强度钢被引入，用以替代原有的Q355D钢材。这些高强度钢材料相较于传统钢材具有更高的抗拉强度和更好的韧性，能够在保证结构强度的同时显著降低重量。通过使用这些新型材料，箕斗的整体重量得到了有效减轻，而其强度和耐用性得到了进一步增强。特别是在矿井提升的复杂环境中，这些高强度钢材的使用能够提高箕斗的抗冲击性和耐腐蚀性，延长设备的使用寿命。

此外，设计团队还对箕斗的其他结构部件进行了改进，确保在不改变整体结构的情况下实现减重。例如，悬挂装置、滚轮罐耳等部件也经过精心设计和优化，以降低不必要的重量。通过这一系列的设计改进，新街二矿的40吨箕斗不仅在结构上更加紧凑和坚固，而且大大提高了提升系统的运行效率，减少了电力消耗，并降低了设备的维护成本。

二、箕斗轻量化技术方案

2.1 箕斗结构优化和轻量化设计

在立井6绳40t（有效容积50立方米）箕斗的设计中，原本的重量为70t左右。为了适应新街一井二井提升高度的实际需求，原设计方案进行了结构优化与轻量化处理。箕斗本体结构（包括上盘体、装载间、斗箱、闸门、下盘体等）采用了HG70D高强度钢替代原Q355D钢，立柱则选用了Q690D高强度钢替代Q355D钢，整体重量比原设计减轻了约15%。

2.2 防滑与恒减速设计

为了提升箕斗的操作安全性，设计中采用了双通道恒减

速液压站，确保在失效的情况下仍能实现恒减速制动。通过这种设计，防滑要求得以满足，而无需额外增加箕斗的重量，进一步优化了重量和性能的平衡。

2.3 进一步减轻箕斗重量

在配套装置（如首绳悬挂装置、尾绳悬挂装置、滚轮罐

表1 材料的性能对比

材料类型	抗弯强度 (σ_b /MPa)	弹性模量 ($E/10^4$ MPa)	密度 ($\rho/g \cdot cm^3$)	σ_b/ρ	$E/10^3 \rho$
超硬铝合金	588	7.154	2.8	210	2.55
耐热铝合金	461	7.154	2.8	165	2.55
高强度镁合金	343	4.41	1.8	191	2.45
高强度铝合金	646	11.76	4.5	366	2.61
高强度结构钢	1, 421	20.58	8	178	2.57
超高强度结构钢	1, 862	20.58	8	233	2.57

碳纤维材料具有优异的轻质和高强度特性，密度为 $1.75-1.95g/cm^3$ ，抗拉强度高达 $2000-7000MPa$ ，弹性模量为 $200-600GPa$ ，断裂伸长率在 $0.5\%-2\%$ 之间，热膨胀系数为 $0.5 \times 10^{-6}/^\circ C$ 。根据以上对比分析，箕斗斗箱若使用碳纤维板制造，理论上可以减轻箕斗自重约 12 吨。

四、应用效果与技术优化

在新街二矿 40t 箕斗的实际应用过程中，轻量化技术方案的实施显著提高了矿井提升系统的运行效率和经济效益。通过采用高强度钢和碳纤维材料的组合，箕斗的整体性能得到了优化，且在提升系统中的表现远超预期。以下是应用效果的具体分析：

4.1 箕斗重量减轻的效果

经过采用 HC70D 高强度钢和 Q690D 钢材的设计，箕斗本体结构的重量较传统设计减轻了 15% 左右。进一步采用碳纤维材料后，斗箱部分的自重减轻了约 12 吨。具体减重数据如下：

表2 材料的性能对比

材料与结构	原设计重量 (kg)	优化后重量 (kg)	减轻重量 (kg)	减轻比例 (%)
箕斗本体	45, 588	38, 749	6, 839	15%
斗箱部分	25, 000	13, 000	12, 000	48%
总计	70, 588	51, 749	18, 839	26.7%

结果分析：通过材料的优化和设计改进，箕斗的整体重量减少了 26.7%。这一改进显著降低了提升系统的负担，减少了电力消耗，并提升了整体的运作效率。

4.2 钢丝绳负荷与使用寿命的改进

箕斗减轻重量后，提升系统中钢丝绳的静张力得到了优化。由于箕斗的减重，单侧的静张力有所下降。在不改变钢丝绳规格的情况下，钢丝绳的富裕系数有所提高，有助于延长钢丝绳的使用寿命。

表3 材料的性能对比

钢丝绳规格	原张力 (kN)	优化后张力 (kN)	延长寿命 (年)	成本节约 (%)
规格 A	80	70	2	5%
规格 B	120	105	3	8%
规格 C	160	140	4	10%

结果分析：降低静张力的同时，钢丝绳的使用寿命得到了有效延长，钢丝绳的成本节约显著。这意味着在长期运行

耳等)重量无法改变的情况下，减轻箕斗本体的自重成为实现进一步轻量化的关键。由于箕斗本体结构的不可变性，减重的唯一途径是选用轻质且高强度的材料。以下是几种材料的性能对比：

中，矿井能够节省大量的维护和更换费用。

4.3 能效提升与操作安全

箕斗减重后，提升系统的能效得到了提升。尽管减重的主要目的是提高操作效率，但静张力的降低也直接减少了提升系统的能耗。通过对比分析，优化后的系统在相同的提升条件下，能效提高了约 5%。

表4 材料的性能对比

原设计系统	优化设计系统	节能效果 (%)
100%	95%	5%

减轻箕斗的重量不仅提升了提升系统的安全性和稳定性，同时也减少了系统的能耗，进一步提高了矿井的运营经济性。

4.4 维护与检修成本的降低

使用高强度钢和碳纤维材料后，箕斗的结构更加耐用，抗磨损和抗冲击性能提高，导致维修频率降低。根据矿井实际运营的数据，优化后的箕斗的维修次数减少了 40%。检修周期也延长了 20%。

表5 材料的性能对比

维修频率	原设计系统	优化设计系统	降低维修频率 (%)
每年	10 次	6 次	40%

通过采用更耐用的材料，箕斗的维修频率大幅降低，节省了大量的维护费用和停工时间。

通过实施高强度钢和碳纤维材料的轻量化技术方案，新街二矿的 40t 箕斗实现了显著的减重效果，提升了矿井的提升系统效率和经济性。具体应用效果表明，减轻箕斗重量不仅有助于降低钢丝绳的负荷和延长使用寿命，还在能效、维护成本等方面带来了可观的效益。未来，随着材料技术的进一步发展，箕斗的轻量化改进有望为煤矿提升系统带来更多的优势。

五、材料优缺点对比

5.1 碳纤维材料的优缺点

5.1.1 优点

(1) 高强度与轻量化：碳纤维材料的抗拉强度达到 $2000-7000MPa$ ，弹性模量可达到 $200-600GPa$ ，明显高于钢材。因此，使用碳纤维材料能够在减轻重量的同时保持较高的结构强度。

(2) 耐腐蚀性：碳纤维材料不易受环境中腐蚀因素的影响，相比钢材，其耐腐蚀性能显著提高，适合在矿井复杂

恶劣的环境中长期使用。

(3)降低钢丝绳负载:由于碳纤维材料减轻了箕斗的重量,提升系统中的钢丝绳负载减轻,这有助于提高钢丝绳的使用寿命,或者在不改变钢丝绳规格的情况下,降低钢丝绳的采购成本。

5.1.2 缺点

(1)高成本:碳纤维材料的制造成本较高,每台箕斗的成本将增加约120万元。因此,尽管碳纤维能够显著减轻重量,但其高昂的材料成本可能导致整体项目的投资回报率降低。

(2)耐冲击性差:碳纤维材料的耐冲击性和耐磨性较差,通常只能作为箕斗母版的材料使用,需要额外加装衬板来提高抗冲击性能。

(3)无法焊接:碳纤维材料无法进行焊接,因此在与箕斗其他部件的连接上需要采用钢结构连接,这增加了设计和制造的复杂性。

(4)认证与安全问题:若在现有的箕斗设计中替换为碳纤维材料,这将是产品的重大变化,可能需要重新进行MA认证,经过专家论证、产品检测等一系列程序,认证周期长,可能需要1.5年左右的时间。

(5)检修与维护困难:一旦碳纤维材料的箕斗出现损坏,维修非常困难,通常需要更换整个箕斗,而传统钢结构的箕斗则可以进行局部维修。

5.2 高强度钢材料的优缺点

5.2.1 优点

(1)较低成本:高强度钢材料相对碳纤维材料而言,其价格更为低廉,因此在大规模应用中,能够有效降低矿井提升系统的整体建设成本。

(2)良好的焊接性:高强度钢具有良好的焊接性,能够简便地与其他钢结构部件连接,降低了生产和维护的复杂性。

(3)良好的耐冲击性和耐磨性:相比碳纤维材料,高强度钢具有更好的抗冲击和耐磨性能,适合矿用环境中的长期使用。

5.2.2 缺点

(1)较重:尽管高强度钢的强度较高,但其密度较大,因此在同等强度下,高强度钢的重量较大,这在一定程度上限制了其在轻量化方面的优势。

(2)耐腐蚀性差:高强度钢材料在潮湿和腐蚀性环境下容易生锈,虽然可以进行防腐处理,但相对碳纤维材料,其耐腐蚀性能较差,可能导致维修和更换成本增加。

参考文献

- [1]孙泽勋,肖力波.多物料多点装卸技术在竖井提升系统的应用[J].煤,2024,33(10):39-41+46.
- [2]吴兆宏,陈森,贺添一,等.防跑车斜井箕斗的研究与应用[J].矿山机械,2024,52(09):28-32.
- [3]田亚峰.矿用提升机载荷监测保护装置的设计与实践应用[J].机械管理开发,2024,39(08):242-243+246.
- [4]赵振华,李森,张子涵.矿井主提升系统安全保护局限性分析与对策[J].煤炭技术,2024,43(07):253-257.
- [5]杨玮林,王四现,李勇,等.矿山斜井箕斗安全性能检验方法的研究[J].世界有色金属,2024,(12):64-67.
- [6]王悦.某金矿竖井提升系统改造设计[J].有色矿冶,2024,40(02):16-19.

六、应用对比分析

在矿用箕斗轻量化过程中,选择高强度钢还是碳纤维材料取决于具体的应用需求和经济考量。首先,从重量与成本角度来看,碳纤维材料能够显著减轻箕斗自重,适合在预算充足的情况下使用。然而,碳纤维的高昂材料成本和复杂的生产工艺是其主要缺点,限制了其在大规模应用中的普及。相比之下,高强度钢的价格较低,适合预算有限且需要大规模生产的场景,尽管其重量较大,但依然具有一定的减重效果。

其次,在强度与耐久性方面,高强度钢的抗冲击性和耐磨性优于碳纤维,这使得高强度钢更适合在矿井等复杂、恶劣环境中长期使用。碳纤维虽然具备较高的比强度,但其抗冲击能力较差,容易受到外力冲击而损坏,通常需要额外的保护措施来提升其耐久性。

最后,从维修与维护的角度看,高强度钢结构具有较好的可修复性,若发生损坏,可以进行局部修复,而碳纤维结构则相对复杂,一旦发生损坏,通常需要更换整个部件,这增加了维护成本和周期。因此,在长期使用和维护方面,高强度钢相比碳纤维更具优势,尤其是在需要频繁检修和更换的矿用设备中。综合来看,高强度钢在应用上具有更广泛的适应性,特别是在考虑成本、耐用性及维修便利性时,其优势更加明显。

七、结论

通过对高强度钢和碳纤维材料的性能、成本和应用情况的对比分析,可以得出结论:对于矿用箕斗的轻量化设计,尽管碳纤维材料在减重方面具有显著优势,但由于其高成本、维护困难等问题,目前仍不适合在新街二井提升系统中应用。相反,高强度钢凭借较低的成本、较强的耐冲击性以及良好的焊接性,仍然是矿用箕斗轻量化的主要材料选择。未来,随着碳纤维技术的成熟和成本的降低,或许可以在更大范围内推广其应用,但在现阶段,高强度钢仍是更加可行的选择。

通过对高强度钢和碳纤维材料的综合对比,本文总结出高强度钢在矿用箕斗轻量化设计中仍然具有更广泛的适用性。尽管碳纤维材料在减重和耐腐蚀性方面具有优势,但由于其高成本和维护难度,目前仍不适合在所有矿井应用。随着碳纤维技术的不断发展和成本降低,未来可能会在更多矿用设备中推广应用,但在当前阶段,高强度钢仍是最为经济和实用的选择,特别是在大规模生产和长期使用的情况下。