

深入地下工程: 含钒高强钢中的氮如何影响材料稳定性

Going Deep Underground: How Nitrogen Affects the Stability of Vanadium-containing High-strength Steel

供稿|李振 / LI Zhen

内
容
导
读

深部矿山开采逐渐向千米级地下延伸, 支护用高强钢需要长期承受高地应力、冲击载荷和潮湿腐蚀环境, 对材料的强度、韧性和稳定性提出了更高要求, 材料强韧性匹配和质量稳定性对氮含量波动较为敏感。本文基于某长流程钢厂全炉次成分及力学性能数据, 分析了 MG500、Q420 和 HRB500E 等含钒高强钢在转炉-LF 精炼-连铸过程中的增氮规律, 并比较了不同氮含量下钢材力学性能变化。结果表明, 含钒高强钢在 LF 精炼和连铸阶段明显增氮。随着氮含量升高, 钢材屈服强度由 512 MPa 提高至 582 MPa, 表明适量氮有利于提高钒的析出强化效果; 但当氮质量分数超过 80×10^{-6} 后, 塑性和抗冲击韧性明显劣化。当氮质量分数为 $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 时, 钢材屈服强度为 558 MPa、断后伸长率为 20.5%、常温冲击功为 64 J, 该区间可作为当前生产条件下较优的氮含量控制窗口。针对全流程吸氮特征, 提出优化钒氮合金加入时机、LF 精炼埋弧控制、软吹减少钢液裸露、连铸密封保护浇注及分钢种氮阈值管控等措施, 为深地支护用含钒高强钢稳定生产提供了依据。

我国煤炭和金属矿山开采深度持续增加, 深部巷道普遍处于高地应力、强采动扰动、围岩冲击和井下潮湿腐蚀等复杂工况。与浅部巷道相比, 深部巷道围岩变形强烈、支护结构受载更加复杂, 传统普通强度支护钢材更易出现变形失稳和断裂失效。因此, 锚杆、锚索、矿用型钢以及高强抗震支护钢筋等材料逐步向高强度、高韧性和高组织均匀性方向发展^[1]。

钒微合金化是低成本制备高强钢的重要技术路径。钢中 V、C、N 可形成弥散分布的 V(C, N) 析出相, 通过细晶强化和析出强化提高屈服强度, 并在合理成分窗口内保持较好的强韧性匹配^[2-5]。其中, 氮元素既可以提高钒的析出效率, 也可能在含量过高或波动过大时导致 V/N 配比失衡、析出相粗化、游离氮含量增加及应变时效敏感性上升。因此, 深地工程用含钒高强钢的氮含量控制并非单纯降低氮

作者单位: 山东省石横特钢集团有限公司, 山东 泰安 271600

氧含量，而是要实现合金氮、过程增氮和成品性能之间的稳定匹配。

当前部分特钢企业对氮含量的管理仍以月度统计和异常炉次追溯为主，缺少分钢种、分工序的增氮定量分析。已有研究更多关注实验室条件下钒氮析出机理和热处理响应，而工业长流程中转炉、LF精炼和连铸各环节对氮含量波动的贡献尚需进一步量化。

本文以某长流程钢厂 2026 年 4 月全炉次化学成分台账为基础，围绕转炉、LF 精炼和连铸 3 大核心环节，分析不同钢种的增氮特征，并以 MG500、Q420 和 HRB500E 等深地工程支护用含钒高强钢为代表钢种，识别了氮含量波动的主要工序来源，提出可指导现场稳定生产的全流程控氮策略。

生产流程、分析对象与数据来源

生产流程与统计范围

本文数据来源于某长流程钢厂炼钢车间 2026 年 4 月全炉次化学成分台账，覆盖转炉终点、出钢、吹氩、LF 精炼、连铸坯样和成品检验等主要节点。统计钢种包括 HRB400E、HRB500E、MG335/MG400、MG500、Q355 和 Q420 系列。以相邻取样节点氮含量差值为基础，计算不同工序增氮量，并按钢种、工序和增氮区间进行分组评价。

本文将 Q355、MG335/MG400 和 HRB400E 作为对比钢种，将 MG500、Q420 和 HRB500E 作为含钒高强钢重点分析对象。该分类（见表 1）主要基于钢种强度级别、微合金化特征及其与支护材料的应用关联，并非对上述钢种工程用途的绝对限定。

表 1 试验钢种、工程应用场景及研究定位

钢种系列	分析定位	执行标准或依据	典型规格	工程应用场景	研究用途
Q420系列	重点对象	GB/T 1591—2018 ^[6]	12~40 mm 板材、型材	深部巷道支架、液压支架及支护结构件	含钒高强支护结构钢
MG500系列	重点对象	企业矿用锚杆专用标准	φ16~25 mm 棒材	千米深井高强锚杆、锚索杆体	深部冲击地压锚杆钢
HRB500E系列	重点对象	GB/T 1499.2—2024 ^[7]	φ12~32 mm 螺纹钢	井下硐室及支护结构配筋	含钒高强抗震支护钢筋
Q355系列	对比对象	GB/T 1591—2018 ^[6]	板材、型材	井下辅助支撑、通风管道等构件	普通低合金结构钢
MG335/MG400系列	对比对象	企业矿用型钢标准	φ14~22 mm 棒材	浅部巷道锚杆及辅助支护件	矿用中强度对比钢种
HRB400E系列	对比对象	GB/T 1499.2—2024 ^[7]	φ12~32 mm 螺纹钢	浅部巷道常规支护钢筋	普通抗震钢筋对比钢种

增氮量与氮收得率计算方法

不同工序增氮量按相邻取样节点氮含量差值计算。LF 精炼阶段增氮量定义为精炼终样氮含量与出钢样氮含量之差；连铸阶段增氮量定义为坯样氮含量与精炼终样或对应成品节点氮含量之差。对于加入钒氮合金的含钒钢种，应扣除未加钒氮合金同类钢种的系统增氮贡献，以区分合金带入氮和过程吸氮。

钒氮合金氮收得率按式（1）估算：

$$\eta_N = \Delta N_{\text{all}} / [m(V, N) \cdot w(N)] \times 100\% \quad (1)$$

式中， η_N 为钒氮合金氮收得率； ΔN_{all} 为扣除系统增氮后的合金贡献氮质量分数增量； $m(V, N)$ 为吨钢钒氮合金加入量，t； $w(N)$ 为钒氮合金中氮的质量分数。以 Q420 系列为例，吨钢钒氮合金平均加入量约为 740 g，合金氮质量分数按 15.59% 计，理论带入

氮质量分数约为 115.4×10^{-6} ；扣除系统增氮后的合金贡献氮质量分数增量约为 49.0×10^{-6} ，对应氮收得率约为 42.46%。

结果与讨论

转炉工序增氮影响因素分析

4 月份统计覆盖氩气和氮气两类转炉底吹气体。氩气底吹炉数为 776 炉，转炉终点氮质量分数平均值为 21.26×10^{-6} ；氮气底吹炉数为 558 炉，转炉终点氮质量分数平均值为 20.76×10^{-6} 。如表 2 所示，2 类底吹条件下终点氮含量均值接近，独立样本检验显著性概率（ p ）值为 0.263，说明在统计范围和现有操作条件下，底吹气体种类对转炉终点氮含量未表现出显著影响。

非增氮钢种出钢口寿命统计结果见表 3。不同寿

命区间内精炼-出钢增氮总体平均为 6.20×10^{-6} 。除 101~150 炉次区间出钢氮含量和精炼氮含量基础值偏高外，其余区间增氮水平整体较低。该结果表明，

在本月统计范围内，出钢口寿命未表现为持续性主控因素；101~150 炉次区间的高基础氮含量可能与钢种结构、前期高氮钢水残留或局部异常操作有关。

表 2 转炉底吹气体种类对终点氮含量的影响

底吹气体	统计炉数/炉	转炉终点氮质量分数平均值/ 10^{-6}	标准差/ 10^{-6}	独立样本t检验p值
氩气	776	21.26	1.87	0.263
氮气	558	20.76	1.79	0.263

注： $p=0.263>0.05$ ，表明两类底吹条件下终点氮含量差异无统计学显著性。

表 3 出钢口寿命与非增氮钢种增氮统计

出钢口寿命/炉	统计量/炉	出钢N质量分数/ 10^{-6}	精炼后N质量分数/ 10^{-6}	精炼增氮质量分数/ 10^{-6}	工况说明
1~50	132	27.08	37.93	10.85	新出钢口阶段，钢流稳定性仍需关注
51~100	77	27.11	34.14	7.03	服役中期，钢流和挡渣状态较稳定
101~150	53	54.36	60.62	6.26	基础氮偏高，可能受钢种结构或残留钢水影响
151~200	12	19.50	24.75	5.25	样本量较少，仅作参考
301~350	8	18.75	20.38	1.63	临近报废阶段，定期维护修补
合计/平均	282	29.36	35.56	6.20	—

从生产控制角度看，出钢口服役中后期仍需加强钢流形态、挡渣状态和出钢口修补记录管理，以降低局部卷气和异常增氮风险。

钒氮合金对含钒高强钢氮含量的影响

含钒高强钢的氮含量同时受到钒氮合金加入量、加入时机、合金收得率以及精炼和连铸过程吸氮的影响。由表 4 可知，以 Q420 系列为例，未加入钒氮合金的 Q420B5 和 Q420B6 炉后氮质量分数平均为 24.85×10^{-6} ，成品氮质量分数平均为 35.48×10^{-6} ，

连铸坯样氮质量分数平均为 46.31×10^{-6} ；加入钒氮合金的 Q420C6 和 Q420B73 炉后氮质量分数平均为 77.49×10^{-6} ，成品氮质量分数平均为 91.22×10^{-6} ，坯样连铸氮质量分数平均为 103.86×10^{-6} 。

由表 4 可见，加入钒氮合金后，Q420 系列连铸坯样氮质量分数平均提高约 57.55×10^{-6} 。扣除未加钒氮合金钢种对应的系统增氮后，钒氮合金对含钒高强钢氮含量提升具有显著贡献，但实际收得率仍受加入时机、钢液搅拌、渣层覆盖和连铸保护状态影响。

表 4 Q420 系列钒氮合金加入前后氮含量对比

类别	代表钢种	终点氮质量分数/ 10^{-6}	炉后氮质量分数/ 10^{-6}	成品氮质量分数/ 10^{-6}	连铸坯样氮质量分数/ 10^{-6}	吨钢钒氮合金加入量/kg
未加钒氮合金	Q420B5	22.75	26.68	40.18	51.00	0
未加钒氮合金	Q420B6	20.68	23.01	30.78	41.61	0
未加钒氮合金平均值	—	21.72	24.85	35.48	46.31	0
加钒氮合金	Q420C6	26.67	80.15	97.53	107.20	0.78
加钒氮合金	Q420B73	24.33	74.82	84.91	100.51	0.70
加钒氮合金平均值	—	25.50	77.49	91.22	103.86	0.74

合金成分检测结果表明（表 5），4 月份进厂钒氮合金 V、N 含量波动较小，成品氮含量离散更可能来自合金加入时机、补加次数、钢水裸露、LF 精

炼和连铸保护状态等过程因素。

现场钒氮合金添加方式主要包括转炉出钢随钢流加入、吹氩站集中添加和 LF 精炼后期分批补加。

表 5 4 月份进厂钒氮合金成分检测结果（质量分数） %

检测结果及评价	V	N
范围	77.02~77.40	15.50~17.10
平均值	77.21	16.23
评价	波动较小	满足合金质量要求

与出钢过程加入相比，LF 后期补加存在 2 个不利影响：一是钢水搅拌强度相对较弱，合金熔化和扩散均匀性不足，导致氮收得率波动；二是补加过程易造成炉门开启和渣层破坏，使钢液裸露并增加吸氮风险。因此，对 MG500、Q420 和 HRB500E 等含钒高强钢，宜优先采用出钢过程加入并减少 LF 后期补

加，以提升 V-N 匹配稳定性。

LF 精炼阶段增氮行为及钢种差异

LF 精炼阶段是含钒高强钢氮含量波动的重要环节。如表 6 所示，对比钢种 Q355、MG335/MG400 和 HRB400E 的精炼平均增氮质量分数分别为 6×10^{-6} 、 6×10^{-6} 和 7×10^{-6} ，氮质量分数增加量超过 20×10^{-6} 炉次占比仅为 1%~2%，整体控制水平较好。相比之下，MG500、HRB500E 和 Q420 系列精炼平均增氮量分别为 11×10^{-6} 、 15×10^{-6} 和 15×10^{-6} ，增氮超过 20×10^{-6} 炉次占比分别为 12%、21% 和 19%，明显高于普通钢种。

表 6 不同钢种 LF 精炼阶段增氮统计

钢种系列	生产数量/炉	平均增氮/ 10^{-6}	氮质量分数增加量 $>20 \times 10^{-6}$ 占比/%	控制水平	深地用钢关联
Q355 系列	418	6	1	较好	普通/对比钢种
MG335/MG400 系列	177	6	1	较好	矿用钢对比钢种
HRB400E 系列	101	7	2	良好	对比钢种
MG500 系列	147	11	12	需重点关注	深地/矿用高强钢重点对象
HRB500E 系列	29	15	21	需重点关注	含钒高强钢对比对象
Q420 系列	372	15	19	需重点关注	深地支护结构用钢重点对象

上述差异说明，含钒高强钢因钒氮合金补加、渣层控制和炉门开启等因素叠加，LF 阶段增氮风险明显高于普通低合金钢。LF 控氮的关键在于快速形成流动性良好的白渣，保持全程埋弧操作，限制炉门开启时间，并在软吹阶段以渣面微翻为准，避免强搅拌造成渣层破裂和钢液裸露。

连铸阶段增氮行为及保护浇注控制

连铸阶段氮含量控制的核心是减少钢液与空气接触，稳定长水口、浸入式水口和中间包覆盖保护状态^[8-9]。4 月份统计结果显示（表 7），HRB500E

和 MG500 系列连铸平均增氮量分别达到 26×10^{-6} 和 21×10^{-6} ，明显高于 Q355、MG335/MG400 和 Q420 系列。HRB500E 系列高增氮炉次占比比较高，说明该钢种在连铸过程仍存在空气卷入或保护浇注波动风险。

从工艺逻辑看，连铸增氮异常通常与长水口安装不及时、长水口与滑动水口密封不严、裸浇时间过长、中间包覆盖剂不足、降液面时钢液裸露以及浇注液面波动有关。仅统计成品或坯样 N 含量不足以准确定位连铸吸氮来源，应将裸浇时长、长水口密封状态、氩封压力、中间包覆盖厚度和液面波动情况

表 7 不同钢种连铸阶段增氮统计

钢种系列	数量/炉	平均增氮质量分数/ 10^{-6}	最大增氮质量分数/ 10^{-6}	低增氮区间占比	中增氮区间占比	高增氮区间占比	说明
HRB400E 系列	101	17.6	41	62.38%	28.71%	8.91%	对比钢种
HRB500E 系列	29	26	50	24.14%	37.93%	37.93%	含钒高强钢
MG335/MG400 系列	177	12	49	81.36%	14.69%	3.95%	矿用钢对比钢种
MG500 系列	147	21	55	47.62%	34.69%	17.69%	深地/矿用高强钢重点对象
Q355 系列	418	10	45	41.56%	40.67%	17.77%	普通低合金结构钢
Q420 系列	372	12	58	70.43%	17.20%	12.37%	含钒深地支护结构用钢

注：低、中、高增氮区间采用企业内控分级口径统计，用于比较同一统计周期内不同钢种的连铸保护稳定性。

与增氮量逐炉对应。对 MG500、Q420 和 HRB500E 等重点钢种, 宜将上述工艺参数纳入炉次级追溯项目, 形成连铸保护浇注稳定性评价。

氮含量波动对钢质量稳定性的影响及控制策略

深部矿山巷道长期承受高地应力、采动冲击、交变载荷和井下腐蚀介质耦合作用, 深地支护用钢除需满足标准成分和强度要求外, 批量力学性能均匀性、强韧性匹配和抗冲击时效能力同样重要。对于 MG500、Q420 和 HRB500E 等含钒高强钢, 氮含量通过调控 V(C, N) 析出相数量、尺寸和分布影响细晶强化与析出强化贡献。氮含量过低时, 钒析出强化效率不足; 氮含量过高或波动过大时, 则可能引起粗大氮化物、游离间隙氮增加和塑韧性下降。

根据现有炉次成品性能记录, 本文按钢中总氮含量将样本划分为 4 个区间: $w(\text{N}) < 60 \times 10^{-6}$ 、 $60 \times 10^{-6} \leq w(\text{N}) < 80 \times 10^{-6}$ 、 $80 \times 10^{-6} \leq w(\text{N}) < 100 \times 10^{-6}$ 和 $w(\text{N}) \geq 100 \times 10^{-6}$, 并初步比较不同氮区间的强度、塑性和冲击韧性变化趋势。

表 8 结果初步表明, 随着氮含量升高, 含钒高强钢屈服强度整体上升, 但当氮质量分数进一步提高至 80×10^{-6} 以上后, 断后伸长率和常温冲击功下降趋势明显。综合强度、塑性和韧性匹配, $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 可作为当前生产条件下的优选氮含量控制区间。需要指出的是, 该区间应与具体钢种的 V 含量、轧制工艺和用户性能要求联动确定, 不能简单将高氮作为提高强度的唯一手段。

表 8 深地工程用钢不同氮含量与力学性能关系

质量分数/ 10^{-6}	统计数 量/炉	平均钒质 量分数/%	屈服强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	断后伸 长率/%	强屈比	常温冲 击功/J	综合性能评价
$w(\text{N}) < 60$	62	0.121	512	645	21.8	1.26	68	氮元素不足, V(C, N) 析出量少, 强化效果偏弱, 屈服强度偏低, 满足常规浅部支护, 不适用于千米冲击地压巷道
$60 \leq w(\text{N}) < 80$	156	0.123	558	662	20.5	1.19	64	V-N 配比均衡, 析出细小弥散, 强度、塑性、冲击韧性匹配最优, 适配深部高地应力巷道, 为最优控制窗口
$80 \leq w(\text{N}) < 100$	97	0.122	576	668	17.3	1.16	51	屈服强度小幅上升, 但塑性、冲击韧性呈明显下降趋势, 冲击载荷下存在脆断风险
$w(\text{N}) \geq 100$	43	0.124	582	671	14.1	1.15	36	游离氮与粗大 V(C, N) 析出, 塑性、低温冲击韧性显著劣化, 冲击地压工况极易发生脆性断裂, 严格限制该区间出炉

根据转炉、LF 精炼和连铸统计结果, 面向深地工程用含钒高强钢的氮含量控制应遵循“合金带氮可设计、过程吸氮可抑制、成分性能可追溯”的原则。具体控制策略如下。

(1) 钒氮合金加入前移。优先在转炉出钢过程中随钢流加入钒氮合金, 利用出钢过程钢流搅拌提高合金熔化和收得率稳定性; 对 MG500、Q420 和 HRB500E 等重点钢种, 减少 LF 精炼后期补加, 并记录钒氮合金批号、加入量、加入时刻及加入后 N、V 响应。

(2) LF 精炼减少空气接触。快速形成流动性良好的白渣并保持渣层覆盖, 执行全程埋弧操作, 控制炉盖密封、炉门开启时间和观察孔状态。软吹阶段以渣面微翻为宜, 避免强吹导致渣层破裂和钢液裸露。

(3) 连铸实施保护浇注。大包长水口和浸入式水口应及时安装、稳定对中并保持密封; 中间包覆盖剂应保持足够厚度, 换包、降液面和异常处理过程中应缩短裸露时间。裸浇时长、长水口安装时间、密封垫状态、氩封压力和覆盖剂厚度宜纳入重点钢种质量追溯。

(4) 建立分钢种氮含量阈值。非含钒钢种以降低过程吸氮为主; 含钒高强钢则应在满足 V-N 匹配和性能稳定的前提下, 结合钢种强度级别、V 含量和成品性能确定目标 N 窗口。对高氮异常炉次, 应同步追溯 LF 补加、渣层破坏、长水口密封和裸浇时间等关键过程信息。

结束语

(1) 基于 2026 年 4 月份全炉次统计数据, 转

炉底吹气体种类对终点氮含量未表现出显著影响。氩气与氮气底吹条件下转炉终点 N 平均值分别为 21.26×10^{-6} 和 20.76×10^{-6} ；非增氮钢种精炼—出钢增氮平均为 6.20×10^{-6} ，说明本月增氮波动不宜简单归因于转炉基础工艺参数。

(2) Q420 系列统计表明，钒氮合金对含钒高强钢氮含量提升具有显著贡献。4 月份钒氮合金 V、N 含量波动较小，成品氮含量离散更应重点关注合金加入时机、补加次数和精炼/连铸保护状态。

(3) Q355、MG335/MG400 和 HRB400E 等普通或对比钢种 LF 精炼增氮控制较好，平均增氮量不超过 7×10^{-6} ；MG500、HRB500E 和 Q420 等含钒高强钢精炼平均增氮为 $11 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ ，增氮超过 20×10^{-6} 炉次占比为 12%~21%，表明 LF 阶段是含钒高强钢氮含量波动的重要管控节点。

(4) 连铸阶段 HRB500E 和 MG500 系列平均增氮分别为 26×10^{-6} 和 21×10^{-6} ，HRB500E 高增氮炉次占比较高，说明保护浇注稳定性仍是深地工程用含钒高强钢控氮的关键短板。长水口安装时间、裸浇时间、中间包覆盖厚度、密封垫状态和氩封压力应纳入炉次级追溯。

(5) 氮含量分组结果初步显示， $60 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 区间具有较好的强度、塑性和冲击韧性匹配。面向深地工程用含钒高强钢，应由单纯控制氮含量转向 V-N 匹配、工序增氮抑制和成品性能追溯相结合的

窄窗口稳定控制。

参考文献

- [1] Kang H P. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review. *Int J Coal Sci Technol*, 2014, 1(3): 261
- [2] Fang F, Yong Q L, Yang C F, et al. A model for precipitation kinetics in vanadium microalloyed steel. *J IronSteel Res Int*, 2010, 17(2): 36
- [3] Karmakar A, Mukherjee S, Kundu S, et al. Effect of composition and isothermal holding temperature on the precipitation hardening in vanadium-microalloyed steels. *Mater Charact*, 2017, 132: 31
- [4] Zhan D P, Wang J X, Huang L Y, et al. Effect of slag compositions on change behavior of nitrogen in molten steel. *Metals*, 2022, 12(5): Art No. 846
- [5] Misra S, Fruehan R J. Hydrogen and nitrogen control in ladle and casting operations. *Iron Steel Technol*, 2004, 1(4): 34
- [6] 中国钢铁工业协会. GB/T 1591—2018 低合金高强度结构钢. 北京：中国标准出版社，2018
- [7] 工业和信息化部. GB/T 1499.2—2024 钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋. 北京：中国标准出版社，2024
- [8] Poirier J. A review: influence of refractories on steel quality. *Metall Res Technol*, 2015, 112(4): Art No. 410.
- [9] Chatterjee S, Rout B K. A comprehensive review of nitrogen control in the current and future green steelmaking operations. *Metall Mater Trans B*, 2025, 56(6): 6093

作者简介：李振（1987—），男，山东省泰安人，工程师。2007 年毕业于山西工程职业学院钢铁冶金专业，主要研究方向：转炉炼钢技术。通信地址：山东省肥城市石横镇石横特钢集团有限公司；E-mail: 306192561@qq.com。