

ARO 型四臂锚杆钻车用新型干式吸尘钻杆的研发

张国樑¹, 张汉斌¹, 张良刚¹, 郭蔓丽¹
余德芳², 李治平², 贾礼², 刘芳²

(1. 中国地质大学 掘进工程研究所, 湖北 武汉 430074; 2. 神东天隆机械维修加工中心, 内蒙古 伊旗 017200)

摘要:针对 ARO 型四臂锚杆钻车所需的国产 $\Phi 22 \times 5 - 2200, 2500$ mm 干式吸尘回转钻杆的弹性不足、质量波动大、出现早期断裂和弯曲的问题, 经多次现场试钻调查和残体分析, 并结合所积累的信息和经验, 从 $\Phi 22 \times 5$ mm 管坯以及钻杆的几何结构参数、钢种、钢质标准、钢管冶轧工艺、钻杆制造工艺(含机加工、热处理、表面强化)和使用技术等 6 个方面, 进行了系统地创新和改进, 机械性能与质量稳定性全面提升。

关键词:干式吸尘钻杆; 几何结构参数; 钢种; 钢质标准; 钻杆制造工艺; 性价比
中图分类号:TD421.2*5 **文献标识码:**B

The Research of New Type of Dry Cleaning Drilling Rod Used by ARO Four - arm Bolt Drilling Jumbos

ZHANG Guo-ju¹, ZHANG Han-bin¹, ZHANG Liang-gang¹, GUO Man-li¹
YU De-fang², LI Zhi-ping², JIA Li², LIU Fang²

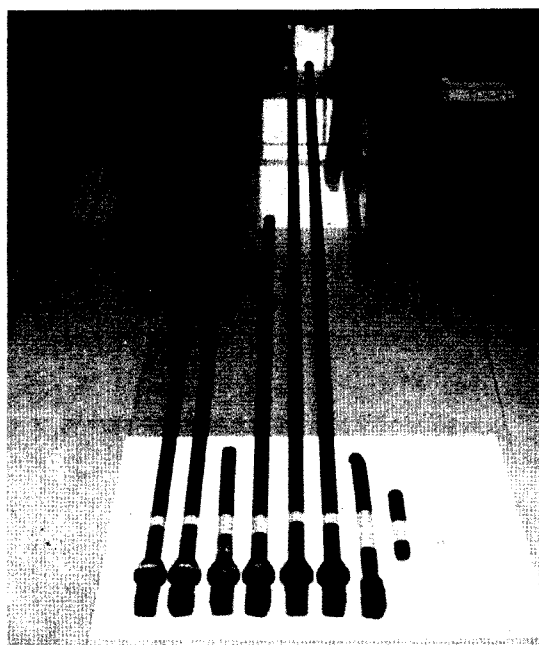
(1. Institute of Extavating Engineering, China University of Geosciences Research, Wuhan, Hubei 430074, China;
2. TianLong Machine Maintains to Process the Center ShenDong, Yiqi, Nei Monggol 017200, China)

Abstract: The four - arm bolt drilling jumbos need dry, dust absorption, rotary drilling rods with the size of $\Phi 22 \times 5 - 2200, 2500$ mm. The domestic drilling rods are of inadequate flexibility, great quality fluctuations and early fracture and bending occur in the using process, so that they can not meet the production requirements. Systematic innovations and improvements have been made on the following six aspects: geometry parameters of drilling rods, steel composition, steel quality standard, the metallurgical and rolling technique of the steel tube, the process of drilling rod manufacturing (including machining, heat treatment, and surface hardening), and the technique of application. The four series of drilling rods developed, are of better mechanical properties and higher quality stability.

Key words: dry cleaning drilling rod; geometry parameters; steel composition; steel quality standards; the drill rods manufacturing technique; cost - effective

1 问题的提出

中国神华集团神府—东胜煤田,是我国目前最大的现代化煤炭生产基地.该矿区采掘工程引进的澳大利亚 ARO 型四臂锚杆钻车,各臂配用的回转式干式吸尘钻机:单机功率 20 kW;转速 600 r/min;推力 28 kN;推进速度 0~20 m/min;扭矩 350 N·m.该矿区煤层顶板为钙质细砂岩或细砂岩,平均单轴抗压强度 $\sigma_D = 40 \sim 90$ MPa(有时也会遇到少量 σ_D 值达到 170 MPa 的坚硬细砂岩夹层).所用的两种国产 $\Phi 22 \times 5 - 2200, 2500$ mm 干式吸尘钻杆,矿山反映弹性不足,容易弯曲,或质量不稳定,常发生早期断裂(见图 1),急待改进.为查明原因,找出解决办法,双方决定合作研发新一代具有高效低耗特点的《天隆》系列 $\Phi 22 \times 5 - 2200, 2500$ mm 锚杆钻机用干式吸尘钻杆.



1. 早期折断;2. 中期折断;3. 使用不当引起的异常早期断裂

图1 矿山提供的两种钻杆破坏形式

Fig.1 Two broken patterns of dry cleaning drilling rods

2 断裂原因

经过现场工业考核和 1、2、3 号残体的断口分析,以及化学成份与高低倍组织金相检测,同时对不同热处理工艺的成品样管横断面几何参数与抗拉强度 σ_b 值,进行了精确测定,其结果如下.

1) 1、2 号残体化学成份(%)为 40Cr(C - 0.34, Cr - 1.00, Si - 0.28, Mn - 0.61, S - 0.010, P - 0.017); 3 号残体化学成份(%)为 30CrMnSi(C

- 0.34, Cr - 0.85, Mn - 0.88, Si - 0.91, S - 0.009, P - 0.015).

2) 1、2 号残体管壁平均厚度 $t = 5.2$ mm,横截面平均面积为 $S = 272$ mm²; 3 号残体管壁厚度 $t = 4.8$ mm,横截面积 $S = 260$ mm².

3) 同一牌号的 1 号残体为早期外源折断,断口粗糙,晶粒粗大,表面硬度为 HRC33.3,金相组织为铁素体 + 珠光体,抗拉强度 $\sigma_b = 493$ MPa,无缩颈发生;但 2 号残体为中期折断,断口晶粒较细,硬度为 HRC42,抗拉强度为 $\sigma_b = 1487$ MPa,延伸率 $\delta = 9.5\%$,钢管内壁表层有轻微脱碳,这表明该产品总体水平不高,质量稳定性较差,热处理工艺要求严格,较难控制.另一牌号的 3 号残体,杆体很新,断口处弯曲并伴有塑性变形,断口参差不齐,且钻尾孔口有被横向挤压崩裂的碎块,可以认定该残体属人为操作不当发生的异常断裂.经调质处理的 3 号残体:杆体表面平均硬度为 HRC38,且同批样管硬度值集中,分布均匀;抗拉强度 $\sigma_b = 1531$ MPa;高倍检测发现,金相组织为屈氏体 + 上贝氏体,但内孔壁表层有轻微脱碳,出现有网状铁素体,晶粒较粗,这显示该牌号残体即使在热处理硬度偏低的条件下,仍比 1、2 号残体有更好的强韧性.这也显示 30CrMnSi 钢的综合机械性能明显优于 40Cr 钢,只是就该批产品而言,其潜力尚未充分发挥,需要在其断面几何结构参数、化学成份、钢质标准、钢管冶轧和热处理工艺方面作进一步改进.

4) 调查发现,我国目前用于回转钻杆的无缝钢管,只有地质、石油部门使用的粗径厚壁钢管,因为服役条件相对较好,对钢种的要求相对较低,这种钢管一般用“热穿—热轧法”生产.锚杆钻杆用 $\Phi 22 \times 5$ mm 小直径细长薄壁钢管,要求在高转速、高轴推力、高钻速的动载条件下使用,现在国内尚无生产这种新产品的专业轧钢厂,只有少数几家生产高压锅炉用类似规格的代用钢管.但经初步的室内和工业试验检测证明,其性能不能满足锚杆钻杆的工况要求.因此,只能选择有条件的炼钢厂和专业无缝钢管厂,按照本所和本中心针对这种特殊需要的设计,共同研发新一代锚杆钻杆专用的细长薄壁冷拔无缝钢管.

3 技术创新

1) 几何结构参数调整^[1]

我国现有冷拔无缝钢管,是针对高压锅炉管等静载服役条件,按照 GB/T8162 - 1999《结构用

无缝钢管》^[2]组织生产的,其几何结构参数要求不严,造成各批产品管壁厚薄不均,导致锚杆钻杆质量波动很大,有的甚至成为废品.为了确保干式吸尘钻杆排粉通道畅通,并保证其与钻头连接部的六方钻梢具有足够的强度,特定新的 $\Phi 22 \times 5$ mm 冷拔钢管的供货标准为:孔径 $d = \Phi 12.1 \pm 0.10$ mm;壁厚 $t = 5.2 \pm 0.20$ mm;相应的外径则为 $\Phi 22.5 \pm 0.50$ mm.订货目标尺寸则定为:孔径 $\Phi 12.1$ mm,壁厚 5.2 mm,相应的外径 $D = \Phi 22.5$ mm.这可确保钻杆与钻头连接的六方钻梢最低薄壁点的壁厚 ≥ 2 mm,在保证强力排粉的条件下,可防止钻头丢失,并提高钻杆的抗拉压弯扭能力,从而提高钻杆的使用寿命.与此同时,确定钢管供货状态的直线度 ≤ 1.3 mm/m.

为解决钻头脱落与钻杆修复问题,提高钻孔效率和延长钻具使用寿命,利用摩擦焊接技术,研发成功了整体干式吸尘钻具,如图 2 所示.

2) 钢种

我国现有合金无缝钢管的钢种,一般按 GB/T3077-1999《合金结构钢》^[3]的相关规定供货,技术要求规定较宽.针对锚杆钻杆的服役条件,按照 $\Phi 22 \times 5$ mm 成品钻杆抗拉强度 $\sigma_b \geq 1500$ MPa,延伸率 $\geq 10\%$,表面硬度 HRC = 40 ~ 45,平均晶粒度 ≥ 7 级的目标,选择和调整了钢种的化学成份.经过多次筛选后,确定了 4 种性价比指标优良的新钢种,即 TLM1#、TLM2#、TLM3#、TLM4#.其目标化学成份(%)为:TLM1#—C—0.30 ~ 0.35, Cr—1.10, Mn—1.10, Si—1.20, S、P ≤ 0.008 ; TLM2#—C—0.42, Si—0.50, Mn—0.70, Cr—1.10, Mo—0.25 ~ 0.30, P、S ≤ 0.008 ; TLM3#—C—0.42, Si—0.35, Cr—1.10, Mn—1.10, Mo—0.25 ~ 0.30, P、S ≤ 0.008 ; TLM4#—C—0.40, Si—0.35, Mn—0.70, Cr—0.80, Ni—1.50, Mo—0.25, P、S ≤ 0.008 .



图 2 $\Phi 22 \times 5 - \Phi 27$ mm 新型整体干式吸尘钻具外貌

Fig. 2 The appearance of new-type integral dry cleaning drilling tools

3) 钢质^[4]

所用 $\Phi 55$ 、 $\Phi 63$ 、 $\Phi 75$ mm 坯料,要求选择由

50 吨以上电弧炉熔炼(EBT),经过炉外精炼(LF)和真空脱气(VD)处理,并具有高压缩比的连铸连轧棒坯.每炉产品各钢号化学元素目标成份(%)含量波动范围(已注明者除外) $\leq 0.05\%$;氧含量 $\leq 0.0012\%$;非金属夹杂物尺寸 ≤ 8 μm ;平均晶粒度细至 7 级以上,Cu 含量 $\leq 0.05\%$;低倍组织不得有缩孔、气泡、裂纹、夹杂、翻皮、白点、晶间裂纹和点状偏析、锭型偏析 ≤ 1 级,中心和一般疏松 ≤ 1 级,棒坯不允许有明显脱碳层(总脱碳层深度(铁素体+过渡区)应小于棒坯直径的 0.1%)——从而保证管坯具有高洁净度、高均匀度、超细晶粒的超级钢内在特征,并使成品钢管经过相应热处理工艺后,其机械性能实现窄带供货(同炉号、同批次钻杆成品表面硬度变化范围 $\leq 3\text{HRC}$),压缩比(连铸钢坯与钢管横断面比值)大于 300,抗拉强度 σ_b 值达到 1500 MPa 级以上.

4) 钢管轧制工艺

TLM2#— $\Phi 22.5 \times 5.2$ mm 冷拔无缝钢管,采用 $\Phi 55$ 或 $\Phi 63$ mm 棒坯(按 6 m 长度供货,则棒坯尺寸分别为 $\Phi 55 \times 750$ (或 2×750) mm、 $\Phi 63 \times 570$ (或 2×570) mm).以 $\Phi 63$ mm 棒坯为例,其工艺流程为:

$\Phi 63$ 圆钢酸洗检验→修磨→定尺下料→棒坯定心→棒坯加热(1160 ~ 1200°C,煤气炉或中频透热炉)→ $\Phi 50$ 两辊穿孔机穿孔(1110 ~ 1180°C, $\Phi 63 \times 7.5 \sim 8$ mm 毛管)→ $\Phi 50$ 两辊轧管机带芯斜轧减径(1060 ~ 1100°C, $\Phi 56 \times 6.4$ mm 毛管)→酸洗检验 $\Phi 56 \times 6.4$ mm 毛管→毛管退火(850°C 保温炉冷)→酸洗磷化→冷拔(带芯拔制,“退火—酸洗磷化—冷拔”循环进行 7 道次:① $\Phi 56 \times 6.4$ mm→ $\Phi 50 \times 6.2$ mm;② $\Phi 50 \times 6.2$ mm→ $\Phi 45 \times 6$ mm;③ $\Phi 45 \times 6$ mm→ $\Phi 40 \times 5.8$ mm;④ $\Phi 40 \times 5.8$ mm→ $\Phi 35 \times 5.6$ mm;⑤ $\Phi 35 \times 5.6$ mm→ $\Phi 30 \times 5.4$ mm;⑥ $\Phi 30 \times 5.4$ mm→ $\Phi 26 \times 5.3$ mm;⑦ $\Phi 26 \times 5.3$ mm→ $\Phi 22.5 \times 5.2$ mm)→矫直→探伤检验→切管→包装入库.

5) 钻杆制造工艺

以 $\Phi 22 - \text{H}28/16 - 2200, 2500$ mm 四方尾干式吸尘钻杆为例,其外形结构如图 3 所示.杆体和杆尾按企业标准 Q/TLZJ002-2007《锚杆钻机用强力内排粉锚杆钻杆》组织生产.

①长度极限偏差 ± 5 mm;②钻杆六方梢部尺寸和杆尾几何参数按标准规定执行,但杆体横断面尺寸调整为:孔径 $\Phi 12.1 \pm 0.10$ mm,壁厚 5.2 ± 0.20 mm,相应外径 $\Phi 22.5 \pm 0.50$ mm;③热处

理硬度值调整为:杆体 HRC38~45,杆尾 HRC40~48;④抗扭矩调整为 $\geq 200 \text{ N} \cdot \text{m}$;⑤抗推力调整为 $\geq 20 \text{ kN}$;⑥增补杆体抗拉强度 $\sigma_b \geq 1500$

MPa;⑦杆体直线度调整为 $\leq 1.3 \text{ mm/m}$;⑧外观:表面不得有裂纹、结疤或其它有害缺陷,杆体应光滑平整。

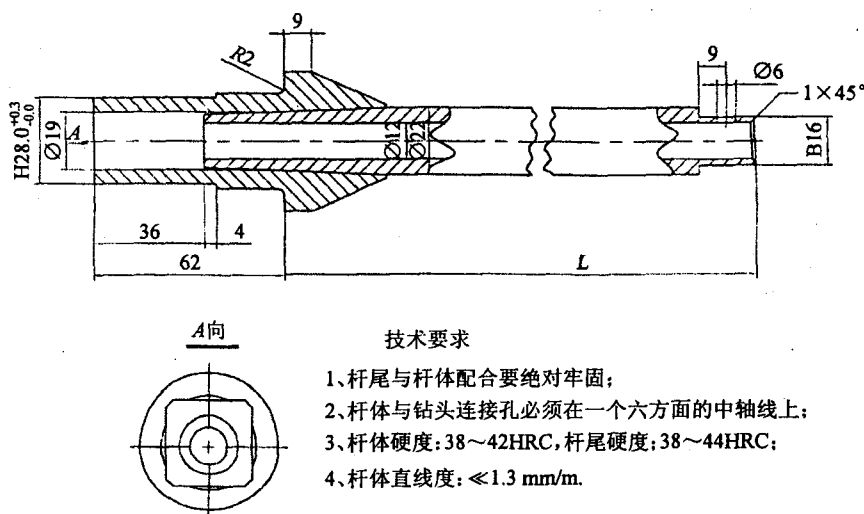


图3 $\phi 22 - \text{H}28/16 - 2200, 2500 \text{ mm}$ 四方尾干式吸尘钻杆几何结构示意图

Fig.3 Structure of square caudal-style dry cleaning drilling rod with $\phi 22 - \text{H}28/16 - 220, 2500 \text{ mm}$

为确保实现上述质量标准,在制造工艺环节采取了以下措施:①杆尾选用高级优质钢 42CrMoA ($A_{C_3} = 795^\circ\text{C}$),严格按图纸加工、打标后,电炉加热 $850^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$ (入炉开始)油或 12%~13% AQ251 水溶液淬火, $380^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$ 空冷回火,目标硬度 HRC42~46,表面进行抛光处理;②杆体采用专门研制的 TLM1# ($A_{C_3} = 845^\circ\text{C}$)、TLM2# ($A_{C_3} = 795^\circ\text{C}$)、TLM3# ($A_{C_3} = 780^\circ\text{C}$)、TLM4# ($A_{C_3} = 790^\circ\text{C}$) 特级优质钢,经过 8 道次带芯轧制而成的高精度冷拔无缝钢管,并根据不同钢号制定了相应的热处理工艺。以 TLM2# 钢钻杆为例,其热处理工艺为:井炉 $850^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$ (入炉开始)透热, 12%~13% AQ251 水溶液淬火,井炉 (或箱炉) $280^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$ 空冷回火。热处理后的钻管进行矫直,并取样作质量检查。经化学分析和高低倍组织与机械性能测定:其化学成份 (%) 为: C - 0.41, Si - 0.25, Mn - 0.76, Cr - 1.02, Ni - 0.02, Cu - 0.02, Mo - 0.18, P - 0.008, S - 0.005; 低倍组织:一般疏松 0 级,中心疏松 1 级,锭型偏析与点状偏析 0 级;高倍组织:无明显脱碳层,平均晶粒度 7~8 级;机械性能:表面平均硬度值 HRC42.5,抗拉强度 $\sigma_b = 1640 \text{ MPa}$,延伸率 $\delta = 12\%$;③钻杆杆体严格按图纸加工,然后通过精密液压校直机精校和抛丸处理,再与杆尾装配成钻

杆。经质量总检后喷漆、包装、入库;④更换钢号、炉号或不同的批次钢管时,所生产的成品钻杆除按企业标准质检外,还必须先作矿井工业试验,合格后方能出厂。

4 使用效果

经过初步改进的 TLM1# 钢 $\phi 22 - \text{H}28/16 - 2200, 2500 \text{ mm}$ 钻杆,经检测,化学成份与低倍组织合格,除高倍组织显示内孔壁有轻微脱碳,晶粒偏粗尚需进一步改进外,抗拉强度 $\sigma_b = 1513 \text{ MPa}$,杆体表面硬度分布在 HRC38~45 之间,比较稳定集中,显示机械性能良好。该批产品随机抽样送检结果,外观、直线度、硬度、抗扭矩、抗推力、基本几何尺寸,全部符合 Q/TLZJ002-2007《锚杆钻机用强力内排粉锚杆钻杆》标准。工业考核表明,该批产品质量稳定,弹性好,正常穿孔速度约 $1.2 \sim 1.6 \text{ m/min}$,工业统计平均寿命约 300 m 左右,已达到迄今最好水平。

5 结论

1) 根据工业考核和矿方反映,由于新型干式吸尘钻杆的使用,钻杆弯曲和早期断裂现象已经基本消除,可以较好地满足生产需要,表明其具有优良的综合机械性能和性价比指标。

(下转第 65 页)

4 结束语

本文在经典的计算力矩法基础上,针对存在模型误差和外部扰动情况下的机器人系统提出了一种自学习模糊全局滑模控制方法,并将其成功应用于2关节机器人轨迹跟踪控制中,仿真结果验证了所提出方法的有效性和可行性。但该方法要求控制器硬件具有更大的输出范围,增加了硬件的开销。如何在不增加硬件要求的前提下实现自学习模糊全局滑模控制方法需要今后继续研究。

参考文献:

- [1] 林 雷. 基于模糊变结构的机械臂控制[J]. 控制理论于应用, 2007, 24(4): 643 - 645.
- [2] 孙炜伟, 武玉强. 机器人操作器的自适应模糊滑模控制器设计[J]. 控制理论于应用, 2007, 23(3): 397 - 402.
- [3] Chih - Lyang Hwang, Hung - Yueh Lin. A Fuzzy Decentralized Variable Structure Tracking Control with Optimal and Improved Robustness Designs Theory and Applications[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2005, 12(5): 615 - 630.
- [4] Gou Y Z, Woo P Y. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Robotic Manipulators[C]//Proc of the 42rd IEEE Int Conf on Decision and Control. Maui, Hawaii, 2003: 2174 - 2179.
- [5] 陈 丽, 陈卫东, 王洪瑞. 改进的机器人神经网络变结构混合控制[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3): 429 - 430.
- [6] 邹小兵, 蔡自兴, 孙国荣. 基于变结构的移动机器人侧向控制器的设计[J]. 中南大学学报, 2004, 35(2): 262 - 267.
- [7] Feng Yong, Yu Xinghuo, Man Zhihong. Non - singular Terminal Sliding Mode Control of Rigid Manipulators[J]. Automatica(S0005 - 1098), 2002, 38(12): 2159 - 2167.
- [8] Man Z H, Papl Inski A P, Wu H R. A Robust MIMO Terminal Sliding Mode Control Scheme for Rigid Robotic Manipulators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(12): 2464 - 2469.

(上接第51页)

2) 最新冶轧的 TLM1#、TLM2#、TLM3#、TLM4# - $\Phi 22 \times 5$ mm 新型冷拔无缝钢管, 是国内首创的锚杆钻杆专用无缝钢管, 其性价比指标居国内领先水平。

3) 锚杆钻车施工发现, 钻杆与钻头的连接方式, 与澳大利亚原装产品相比, 装卸钻头更方便, 但连接部分仍然是该钻具系统的一个薄弱环节。生产中仍然有钻头脱落, 或钻头穿过坚硬夹层发热损坏导致钻杆六方梢损坏等现象发生, 且钻头裤腿较长, 粗径部分增加了回转阻力, 对钻速与钻头寿命有不利影响, 应可改用方牙螺纹连接, 或更进一步在不断提高钻杆、钻头寿命的基础上, 按照

平均寿命超过 500 m 的目标, 利用磨擦焊接技术研发新一代整体锚杆钻具。

参考文献:

- [1] 张国樑. 凿岩钎具的设计、制造和选用[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1986.
- [2] GB/T8162—1999 中华人民共和国国家标准: 结构用无缝钢管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [3] GB/T3077—1999 中华人民共和国国家标准: 合金结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [4] 张国樑. 超纯、超细、窄带 Cr - Ni - W - Mo - V 系列“穿孔 - 全程带芯纵轧法”中空钎钢[J]. 矿山机械, 2004, 31(6): 8 - 11.