

Methods of Improving the Performance of the End of Metal Bolt

Chengwen Zhang, Meng Cai, Fei Li, Weining Zhang

School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, Beijing
Email: lijj19890522@126.com

Received: Apr. 8th, 2015; accepted: Apr. 22nd, 2015; published: Apr. 28th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In the past few years, the problems of the metal bolt are very serious, which terribly influence the service life and the supporting effect. Base on the manufacturing technique of the common metal bolt applied to the underground projects, the paper had a investigation and a analysis at the existed problems of the common metal bolt and had a study on how to improve the integrated performances of the present metal bolt. Research results show that after the special processing technique of the bolt, with the help of advanced processing technology to improve the accuracy of thread processing and by improving bolt elongation, the integrated strength and the plasticity of the bolt will be highly improved.

Keywords

Thread Rolling Accuracy, Rock Bolts, Bolts Tail, Metal Bolt, Processing Technology

金属锚杆尾部若干改进方法

张成文, 蔡 猛, 李 飞, 张魏宁

中国矿业大学(北京), 资源与安全工程学院, 北京
Email: lijj19890522@126.com

收稿日期: 2015年4月8日; 录用日期: 2015年4月22日; 发布日期: 2015年4月28日

摘要

在过去的一段时间内，金属锚杆尾部的问题较为突出，影响到了锚杆的使用寿命和支护效果。本文基于地下工程中采用的普通金属锚杆制作工艺，对普通金属锚杆存在的问题进行了调查和分析，研究了如何提高现用金属锚杆的整体性能。研究表明，金属高强度粗尾锚杆经过特殊加工工艺，借助先进的加工工艺提高螺纹加工精度，提高锚杆尾部的延伸率是提高锚杆整体性能的几种重要方法，大大提高了锚尾的塑性和锚杆整体强度。

关键词

螺纹加工精度，锚杆支护，锚杆尾部，金属锚杆，加工工艺

1. 引言

我国煤矿开采方式主要为井工开采，需要在井下开挖大量巷道。据不完全统计，国企大中型煤矿每年新开挖的巷道总长度高达八千公里左右[1]，80%以上是在煤层中的巷道，保持巷道畅通与围岩稳定对煤矿建设与安全生产具有重要意义。煤矿巷道支护技术经历了从木支护、砌碛支护、型钢支护发展到锚杆支护的漫长过程。锚杆支护是一种主动支护形式，其具有支护效果好，支护成本低等诸多优点，代表了巷道支护技术的发展方向，锚杆支护大大简化了采煤工作面端头支护和超前支护工序，保证了煤矿安全生产，为采煤工作面的快速推进和煤炭产量的大幅度提高创造了良好条件。但是，随着采煤深度不断加深，矿井采掘进度不断加快，地质条件日渐复杂化，采掘影响不断变大，高强度金属锚杆暴露出许多问题，导致井下支护效果变差，影响了高产高效矿井的采掘进度。

2. 我国锚杆支护技术的发展

我国煤矿于 1956 年开始在岩巷中使用锚杆支护，至今已有将近 60 年的历史。早期的锚杆主要是机械锚固锚杆、钢丝绳砂浆锚杆、端部锚固树脂锚杆、快硬水泥锚杆及管缝式锚杆等。这些锚杆支护强度、刚度低，支护原理上仍属于被动支护，只适应于简单地质条件，支护效果差，支护阻力小，20 世纪末我国从澳大利亚引进高强度锚杆支护技术[2]，改变了早期锚杆的许多问题。高强度锚杆支护是一种主动支护形式，支护效果好，支护成本低，重要的是锚杆支护大大简化了采煤工作面端头支护和超前支护工艺，保证了煤矿安全生产，为采煤工作面的快速推进和煤炭产量的大幅度提高创造了良好条件。是近些年煤矿发展的一项重要支护技术。图 1 为端头锚固式锚杆受力原理示意图。

3. 锚杆尾部存在的问题

在锚杆应用过程中，随着巷道埋深增加，地质条件的复杂化以及受到强烈的采动影响，高强度锚杆支护逐渐暴露出很多问题。在深部及复杂困难巷道中，金属锚杆支护巷道围岩变形大，支护构件破坏严重，支护效果差，不能满足安全生产要求。通过研究总结可将高强度金属锚杆支护存在的问题分为以下几类：

3.1. 锚杆尾部强度低

当时我国使用的金属锚杆一般都用螺纹钢钢筋加工而成：首先将符合设计要求的螺纹钢钢筋按锚杆长度需要截割成设计长度，再将钢筋一端(长度 100 mm)切削成圆，最后在切削成圆的锚尾上滚压出螺纹

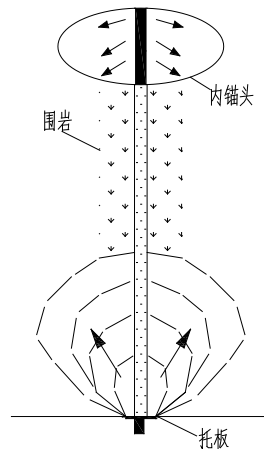


Figure 1. Principal representation of end anchorage bolt
图 1. 端头锚固式锚杆受力原理示意图

制造出锚杆。加工后锚杆尾部部分的螺纹内径是杆体公称直径小 84%~90%，截面面积减小 20%~22% [3]。由于锚杆的极限载荷取决于整根杆体中最薄弱部分的强度，所以这种普通螺纹钢钢筋锚杆的材料和强度浪费超过 20%。各项热处理工艺处理后杆体强度如表 1 所示。

3.2. 螺纹加工精度低

锚杆在使用过程中，尾部由于螺纹加工精度不高常常存在很大的摩擦力，国内锚杆螺纹加工普遍比较粗糙，存在明显的缺陷与损伤。这些缺陷不仅会造成螺旋副摩擦因数的增大，导致对锚杆施加预紧力时扭矩转换率低，而且会在损伤部位造成很大的应力集中而破坏，导致锚杆的支护作用不能充分发挥[4]。加工精度低、缺陷多的螺纹不仅不利于螺母扭矩的转化及锚杆预应力的提高，而且会引起锚杆损伤及达不到拉断强度就发生断裂、失效。

3.3. 锚杆尾部延伸率不够

由于锚杆尾部破断载荷较小，在尾部发生破断时往往达不到螺纹钢钢筋的屈服载荷，锚杆杆体部分不能产生足够的延伸变形，降低了锚杆的整体延伸率，这样不能有效地适应和控制围岩变形，给巷道支护安全带来隐患。锚尾热处理后，延伸率降低，尤其是锚尾段的延伸率仅 10%左右，降低过多，因此，随围岩变形量增加，其由偏心荷载产生的叠加拉应力急剧增加，当 $G_0 > S_s$ 时，极需锚尾段有较大的延伸率来补偿，但热处理后的锚尾难以满足要求，结果可能导致锚尾破断，使破裂区范围达最大[5]。

4. 锚杆尾部改进方法

4.1. 新型金属粗尾锚杆

在一段时间内我国曾采用热处理强化法。所谓热处理强化法即对锚杆尾部螺纹，采用固态淬火亚稳相强化方法，热处理后锚尾的承载力普遍要高于杆体 30%以上，但其延伸率有所降低。由中国矿业大学(北京)马念杰教授研制的新型金属粗尾锚杆是由左旋螺纹钢钢筋经过特殊加工而成的，其结构如图 2 所示。这种锚杆尾部螺纹直径大于锚杆杆体公称直径 3~4 mm [6]，锚尾采用感应加热后在墩粗装置中对尾部进行加粗工艺处理，用锚尾滚丝做配套措施。锚尾热处理采用加热后在空气中冷却，没有淬火的步骤，这样可以保持材料的塑性。

采用拉伸实验对新型金属粗尾锚杆的性能进行测验，原理是：拉伸实验后，杆体经过四个变化阶段：

Table 1. Mechanical property of the bolt after heat treatment

表 1. 热处理工艺处理后杆体力学性能

编号	热处理工艺	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	延伸率%	硬度/HRC
1	860Cx12-14 min 水淬	1130	1690	10	45
4	880Cx12-14 min 水淬	1080	1650	5	46
8	900Cx12-14 min 水淬	1100	1470	4	45
10	热轧供货状态	410	650	26	18



Figure 2. Structural representation of metal bolt with big end

图 2. 金属粗尾锚杆结构示意图

1) 弹性阶段。这个阶段试件表现出弹性变形，如撤去荷载，试件将恢复原状。

2) 屈服阶段。当荷载增大，试件应力超过一定值时，应变增加的速度大于应力增长速度，应力与应变不再成比例，开始产生塑性变形。钢材受力达屈服点后，变形即迅速发展，尽管尚未破坏但已不能满足使用要求。

3) 强化阶段。钢材从弹性阶段过渡到屈服阶段，其性质从弹性转化为塑性，发生了质的变化，反映了钢材内部组织起了变化，晶格的一部分相对另一部分，沿着一定的晶面产生滑移。过屈服点后钢材的内部组织重新建立了新的平衡，抵抗变形能力又重新提高。

4) 颈缩阶段。当钢材强化达到最高点后，在试件薄弱处的截面将显著缩小，产生“颈缩现象”。由于试件断面急剧缩小，塑性变形迅速增加，拉力也随着下降，最后发生断裂。

实验得出锚尾端渐进破坏示意图 $P-\Delta L$ 曲线如图 3 所示。

采用该方法效果：经过热处理锚尾内部组织不发生变化，使螺纹钢的强度和延伸率都得到了提高；另一方面锚杆尾部公称直径大于锚杆杆体直径，锚杆尾部强度高于杆体。经过这两个工序使锚杆的性能得到了显著的提高，当锚杆达到屈服极限时锚杆尾部螺纹部分不破坏，破断位置发生在杆体。这样使杆体的强度和延伸率都得到了充分发挥。

4.2. 减小螺纹处摩擦力

减小螺纹处摩擦力有两种途径，第一，提高螺纹加工精度，减小螺纹制造缺陷，第二，在螺纹处涂抹润滑油。

提高螺纹加工精度的影响因素有[7]：1) 锚杆材质。对螺纹加工性能很大程度取决于锚杆钢材的性质。随着锚杆钢材强度的不断提高，材料对螺纹加工的影响越来越突出。一般情况下，显著提高钢材的抗拉强度后，钢材的延伸率、冲击韧性会不同程度地降低。如果锚杆材料的延伸率、冲击吸收功(描述冲击韧性的指标)太低，不能满足技术要求，会导致锚杆螺纹加工困难，出现一系列加工缺陷，甚至锚杆在螺纹加工过程中就出现裂纹。这种有缺陷的锚杆应用于井下巷道支护，导致锚杆破断、失效，引起顶板事故。

2) 加工工艺。锚杆杆尾采用螺纹结构，螺纹加工是锚杆生产的关键工艺。杆尾螺纹部分是受力最复杂、易发生破坏的部位。螺纹部分不仅受拉，而且受到锚杆预紧时产生的扭力作用，受偏载条件下还会出现弯曲变形；螺纹部分直径与杆体不相等，变径会导致局部应力集中，产生 2~3 倍的集中应力，对杆体的承载能力极为不利。

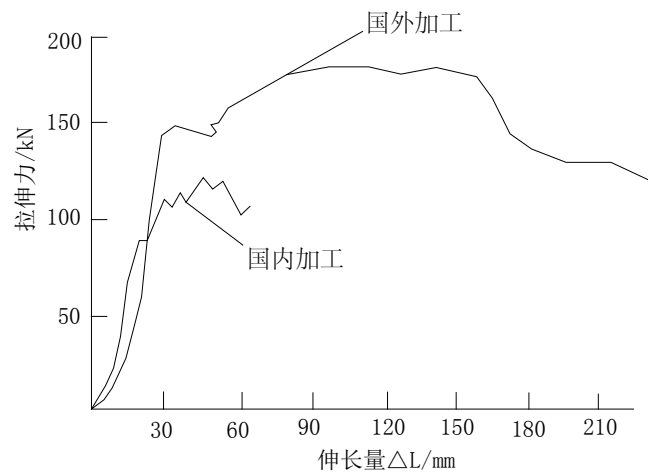


Figure 3. The P- ΔL curve of metal bolt with big end
图 3. 金属粗尾锚杆 P- ΔL 曲线

国内加工锚杆尾部螺纹大多采用剥皮、滚丝，或先滚圆后滚丝的工艺，以提高锚杆尾部螺纹的强度，使其接近或等于杆体强度。并且采用滚丝工艺有如下优点[8]：

1) 效率大大提高，采用滚丝工艺，滚制一个工件只需几秒或几十秒钟就可以完成，效率远高于车丝工艺，生产效率高。

2) 表面光洁度高，滚丝工艺滚制出来的螺纹一般可达到 $R_a1.6\sim R_a6.3$ 微米，滚制精度可达到 6 g 级，远好于车丝工艺。

3) 由于滚丝压力层深度较大，因而表面疲劳寿命大大增加，特别是对直径较大的螺纹，其表面强化效果尤为明显，与切削加工的相同螺纹相比，其疲劳寿命可提高接近 5 倍。

但国内锚杆螺纹加工普遍比较粗糙，存在明显的缺陷与损伤。这些缺陷不仅会造成螺旋副摩擦因数的增大，导致对锚杆施加预紧力时扭矩转换率低，而且会在损伤部位造成很大的应力集中而破坏，导致锚杆的支护作用不能充分发挥。国内锚杆加工使用的滚丝机类型很多。这些设备在加工低强度(屈服强度小于 400 MPa)螺纹钢锚杆杆尾螺纹时，基本能满足生产要求。但随着锚杆强度的不断提高，锚杆杆体材质的硬度越来越大，滚丝加工难度也随之增大。

图 4(a)是锚杆直径 25 mm、螺纹规格为 M27 试件的扭矩与预应力的关系。由图可知，锚杆预应力基本上随着螺母扭矩的增加而线性增大。当扭矩小于 150 N·m 时，两种锚杆的预应力相差很小。说明在扭矩较小的情况下，螺纹精度对锚杆预应力影响不大。随着螺母扭矩不断增加，两种锚杆在相同扭矩下预应力的差值越来越大。当扭矩为 300 N·m 时，美国加工的锚杆比国内加工锚杆预紧力提高 29.5%；当扭矩为 400 N·m 时，预应力提高 30.3%；扭矩到 500 N·m 时，预应力提高 30.9% [9]。

图 4(b)是锚杆直径 22 mm、螺纹规格为 M24 试件的扭矩与预应力的关系。锚杆预应力与螺母扭矩的关系基本与图 4(a)相同。主要区别是当螺母扭矩较小时，两种锚杆的预应力就有差别。当螺母扭矩为 300 N·m 时，美国加工的锚杆比国内加工锚杆的预应力提高 30.3%；当扭矩为 400 N·m 时，预应力提高 34.9%；当扭矩为 500 N·m 时，预应力提高 28.8%，提高比例略有降低。

图 5(a)是美国加工锚杆试件的扭矩与预应力关系。可见，螺纹涂润滑油和不涂润滑油的锚杆预应力没有明显差别。说明锚杆螺纹精度高，能有效消除摩擦损耗。国内加工锚杆的试验结果如图 5(b)所示，可见，螺纹段涂润滑油后锚杆预应力可提高 27%~41%，提高幅度显著，说明我国加工的锚杆螺纹比较粗糙。

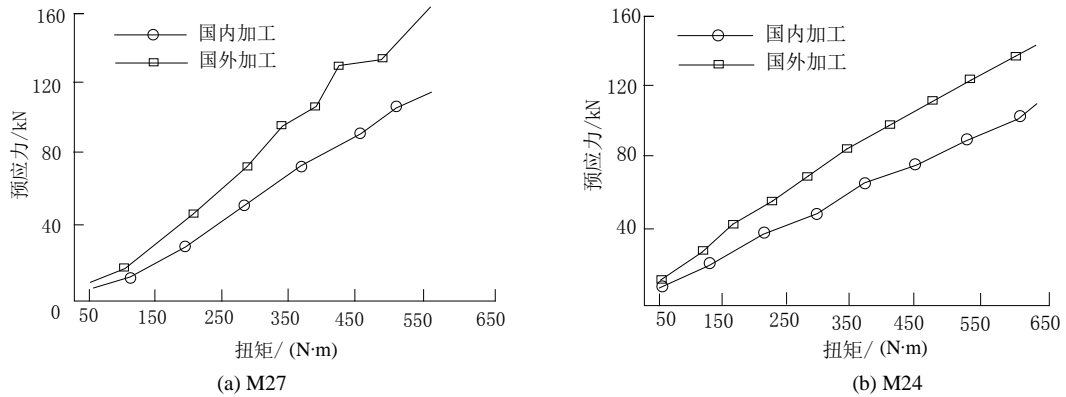


Figure 4. The relationship between different types of prestressed bolt torque and at home and abroad
图 4. 国内外不同型号锚杆扭矩与预应力的关系

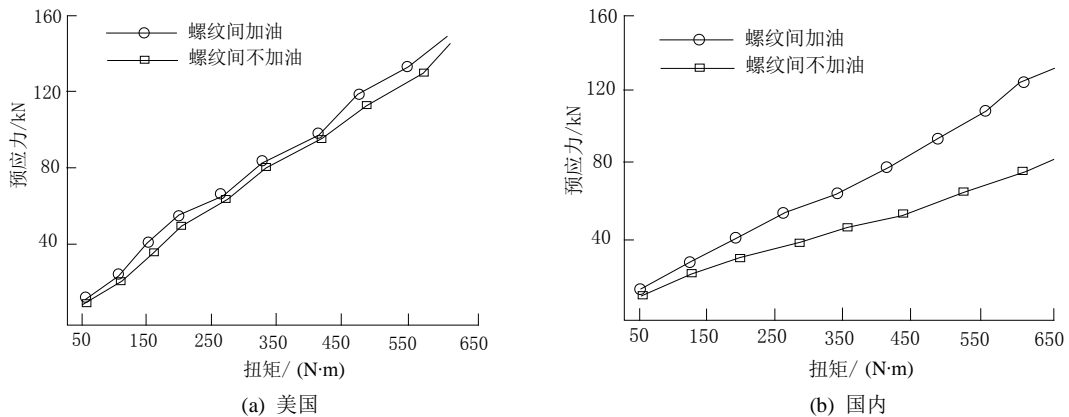


Figure 5. The influence of the lubricant on bolt torque and prestress
图 5. 螺纹间加油对锚杆扭矩与预应力影响

5. 结论

1) 通过本次调查研究发现锚杆支护具有非常明显的优势，锚杆支护是一种主动支护形式，支护成本低，支护速度快，劳动强度低，尤其极大地简化了采煤工作面端头支护和超前支护工艺，为采煤工作面快速推进提供了安全保障。是我国煤矿近些年发展的一项重要支护技术。

2) 锚杆支护在应用过程中在一段时间内尾部问题十分突出，由于偏心载荷的存在导致，尾部的强度不够，延展率不够，导致支护效果变差，对于这一问题，高强度粗尾锚杆的锚尾经过特殊加工，尾部组织晶粒得到细化，提高了锚尾的塑形和强度，改变了之前的热处理工艺造成锚杆的脆性加大的缺陷，既提高了锚杆尾部的强度，也提高了锚杆尾部延伸率。现场应用中也证明，这一技术具有更大的优越性。

3) 锚杆尾部螺纹的加工精度不高造成的摩擦力在较大程度上影响锚杆预紧力的大小，提高锚杆尾部的螺纹加工精度，在尾部涂抹润滑油可以有效的消除摩擦损耗，减少拧紧力矩在摩擦力上的损耗，提高预紧力。涂抹润滑油需要单独操作，增加了作业工序，不能从根本上解决螺纹部的摩擦，只有通过提高螺纹加工精度才能从根本上减小尾部螺纹处的摩擦。

参考文献 (References)

- [1] 康红普, 王金华, 林健 (2010) 煤矿巷道支护技术的研究与应用. *煤炭学报*, **11**, 1809-1814.
- [2] 康红普, 王金华, 林健 (2010) 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析. *岩石力学与工程学报*, **4**, 649-664.

-
- [3] 石建军, 刘洪涛, 马念杰 (2011) 高强度金属锚杆力学性能试验研究. *煤炭工程学报*, **3**, 102-104.
 - [4] 李国彪 (2011) 锚杆尾部螺纹加工精度对预应力影响的实验研究. *煤炭学报*, **11**, 1821-1825.
 - [5] 陈昭志 (2004) 简析滚丝工艺及其应用. *现代零部件*, **5**, 72-73.
 - [6] 孔恒, 王梦恕, 马念杰, 张成平, 杨振茂 (2003) 锚杆尾部的破断机理研究. *岩石力学与工程学报*, **3**, 383-386.
 - [7] 康红普, 王金华, 林健 (2010) 煤矿巷道支护技术的研究与应用. *煤炭学报*, **11**, 1809-1814.
 - [8] 王金华 (2007) 我国煤巷锚杆支护技术的新进展. *煤炭学报*, **2**, 113-118.
 - [9] 马念杰, 刘少伟, 邓广涛, 师皓宇 (2005) 巷道锚杆尾部破断机理及合理结构的设计. *煤炭学报*, **3**, 327-331.