DOI:10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2011.05.031

双高强锚杆悬吊单轨吊技术及应用

窦孟华
(山西潞安矿业 (集团) 有限责任公司，山西 长治 046204)

[摘 要] 为了解决高应力破碎围岩条件下单轨吊悬吊问题，针对具体的应用环境，进行围岩锚固性试验，探讨了悬吊结构中锚杆受力状况，分析了锚杆悬吊技术的可行性，借助有限差分数值计算程序 FLAC，模拟研究了悬吊载荷对巷道围岩应力分布和变形影响。结果表明，悬吊结构对巷道变形和稳定影响极小；根据 S2106 工作面两巷顶板条件，设计采用双高强锚杆进行单轨吊悬吊，将悬吊结构安装在井下巷道中，通过运输液压支架检验其合理性和可靠性，结果表明该技术可使工作面支架安装速度提高 50%。

[关键词] 单轨吊；双高强锚杆；数值模拟；悬吊结构
[中图分类号] TD353.6 [文献标识码] B [文章编号] 1006-6225 (2011) 05-0054-03

Technology of Monorail Crane Suspended by Double Anchored-bolt with High Strength

近两年来，潞安矿区煤巷锚杆支护技术发展十分迅速，取得多项突破性进展。解决了综采开采中遇到的巷道支护难题[1-3]，显著扩大了锚杆支护使用范围和使用量，取得巨大的技术经济效益和社会效益，使潞安矿区巷道支护技术水平上了一个新台阶。余吾煤业近两年完成了多条示范巷道支护工程，特别是在综采放顶煤工作面沿煤层底板掘进的煤顶巷道中第 1 次采用单轨吊辅助运输系统，由于顶板松软、破碎，对单轨吊轨道悬吊带来很大困难。尽管潞安矿区的漳村煤矿、常村煤矿采用过单轨吊[4-7]，但余吾煤业由于煤体松软、破碎，因此，与其他煤矿的悬吊方式差别很大，没有较多的经验可借鉴。为了有效解决单轨吊轨道和起重悬吊问题，提高其安全程度，有利于快速运输和设备安撤，有必要对单轨吊和起重悬吊技术进行全面、系统的研究，开发出适合余吾煤业条件和设备的悬吊方式。

1 锚杆悬吊单轨吊可行性分析

1.1 围岩锚固性能分析

在 S2106 工作面两巷、南二进风下山和 S2106 辅助运输巷均为锚杆支护巷道，为了使 S2106 工作面尽早回采，设计采用单轨吊来解决支架的运输问题，因此，为验证悬吊锚杆的施工过程中，对锚杆的锚固力进行了抽检。其中在 S2106 工作面两巷、南二进风下山各抽检 4 组锚杆，对 S2106 辅助运输巷锚杆抽检 2 组，为保证锚杆不失效及使用要求，根据巷道中采用直径 22mm，钢号 335 号的左旋无纵筋螺纹钢锚杆，破断载荷为 186kN，剪切强度为 130 kN，设计锚固力抽检以达到锚杆屈服载荷为 127kN 为合格，检测结果见表 1 所示。

表 1 锚杆拉拔测试结果

	1 组/kN	2 组/kN	3 组/kN
S2106 回风巷	127	130	130
S2106 胶带巷	127	130	130
南二进风下山	130	127	127
S2106 辅助运输巷	130	127	129

由表 1 可以看出，锚杆锚固力全部达到了要求，施工质量较好，为高强锚杆悬吊单轨吊轨道使用奠定了基础。

1.2 双强锚杆悬吊结构力学分析

煤矿井下单轨吊在运输过程中，对悬吊点施加的载荷随单轨吊距离悬吊点的远近而变化。也就是说，悬吊点所受的载荷是变化的，属于动载行为。国内不少研究成果认为单轨吊在悬吊点引起的载荷变化可以近似服从正弦变化规律，如图 1。则悬吊点所受载荷可以用下面的公式表示:

$$P = P_1 + \frac{1}{2}P_2(1 + \sin\alpha) \quad (1)$$

式中，P 为悬吊点所受载荷，kN；P_1 为悬吊点所承受的轨道重量引起的载荷，kN；P_2 为悬吊点所承受的由单轨吊及货物所引起的最大载荷，kN。

在 (1) 式中，当单轨吊运行至该悬吊点正下方时，即 $\alpha = \pi/2$，这时悬吊点所受载荷最大，即

[收稿日期] 2011-06-07
[作者简介] 窦孟华 (1963-)，男，山西武乡人，博士，高级工程师，现任山西潞安环保能源开发股份有限公司人力综合部部长。

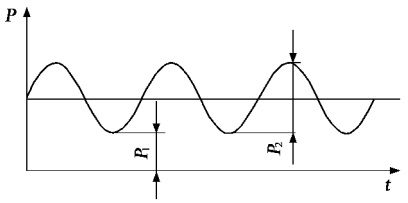

图 1　单轨吊引起的交变应力特征

$P=P_1+P_2$。当单轨吊远离该悬吊点时，即 $\alpha=-\pi/2$，这时悬吊点所受载荷最小，即 $P=P_1$。考虑单轨吊轨道的重量相对于单轨吊机车和货物的总重量比值很小，可以忽略，(1) 式可简化为:

$$P=\frac{1}{2}P_2(1+\sin\alpha) \tag{2}$$

式 (2) 是悬吊点所受动载的计算公式，该载荷应小于悬吊构件所允许的最小载荷 $[P]$，即:

$$P\leqslant[P] \tag{3}$$

因此，由式 (2) 和 (3) 可知，根据余吾煤业井下输送重物要求，预计单轨吊服务期间，承受的最大载荷为液压支架，最大载荷为 320kN，就双强锚杆悬吊结构理想工作状态下而言，最大载荷由 4 个节点承担，每个节点由 2 根锚杆承担，锚杆与拉链之间的夹角为 θ，考虑顶板不平因素，θ 一般为 15 ~ 30°，则每根锚杆承受的垂直拉力最大为 40kN，水平拉力最大 23kN，结合该条件下围岩锚杆拉拔试验结果和锚杆屈服载荷、剪切强度，双强锚杆悬吊结构能够满足单轨吊悬吊技术要求。

2　锚杆悬吊对巷道变形影响分析

为了研究锚杆悬吊对巷道变形的影响，采用数值模拟软件 FLAC，根据 S2106 回风巷和运输巷围岩条件，建立数值模型，对锚杆分别承受 50kN，100kN，150kN 和 200kN 条件下巷道围岩受力和变形进行模拟，图 2 为锚杆受力 150kN 下应力分布特征。

根据数值模拟结果可知:

(1) 随着锚杆承受载荷的加大，顶板下沉量逐渐增加，悬吊载荷从 50kN 到 150kN 时，巷道顶板几乎没有变形，当悬吊载荷为 200kN 时，顶板下沉量达到最大，总的下沉量约 5mm。

(2) 垂直应力在锚杆周围形成一个环状拉伸区，在锚杆端部形成应力集中，靠近顶板表面处拉应力最大。在巷道两帮产生应力集中显现，靠近锚杆侧应力集中明显。从图 2 上可以看出，最大应力值达 15×10^4Pa，应力值较小。

(3) 锚杆悬吊结构引起的应力影响范围小，

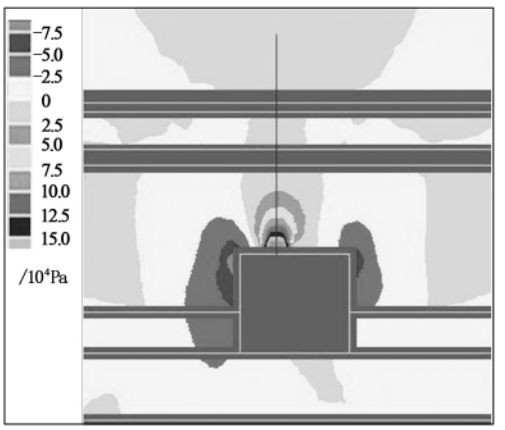

图 2　巷道围岩垂直应力分布

应力值小，不会引起巷道变形，不影响巷道稳定。

3　双强锚杆悬吊技术应用

3.1　工程概况

S2106 工作面位于南二采区，地面标高 931.2 ~964.8m，工作面标高 443.6 ~ 485.2m，东侧为 S2105 工作面，已经回采完毕，西有 S2107 设计工作面，北面为实体煤，南接南二采区 2 号回风下山、胶带下山 (均已掘)。S2106 工作面开采煤层主要为 3 号煤层，该煤层整体为一单斜构造，赋存比较稳定，东北方向高，西南方向低，煤层局部含 0 ~0.25m 泥岩夹矸，钻孔煤层结构显示，煤层厚度为 4.83 ~ 5.95m，平均厚度为 5.35m。结构为 4.4 (0.25) 0.7。由北向南，煤层倾角-8 ~3°，平均-2°。S2106 工作面地质柱状如表 2 所示。三维地震资料显示，S2106 工作面回采区域内不发育落差超过 3.5m 的断层和直径超过 20m 的陷落柱，断层附近 3 号煤层顶底板及煤体可能较为破碎。地应力测试结果显示，最大水平主应力最大为 9.15MPa，最小水平主应力为 4.97MPa，最小为 2.74MPa；垂直主应力最大为 11.45MPa，3 号煤地应力水平属于低地应力区。

表 2　S2106 工作面地质状况

岩性	厚度/m	岩性特征
粗粒砂岩	7.65	浅灰色，厚层状，以石英为主，大型锲状交错层理为主。
砂质泥岩 粉砂岩	4.31	黑色，薄层状，以脉状层理为主。含丰富不完整植物化石。
3 号 煤	5.35	黑色，强油脂光泽，镜煤为主。
泥岩	3.25	黑色，厚层状。
粉砂岩	7	黑色，薄层状，含泥岩包体。以小型交错层理为主。

3.2　双高强锚杆悬吊单轨吊方案

针对余吾煤业 S2106 工作面两巷围岩情况，保

证单轨吊悬吊效果，设计采用 2 根高强锚杆进行单轨吊悬吊。具体方案如下：采用 2 根 ϕ22mm 左旋无纵筋高强螺纹钢锚杆，钢号为 335 号，长 2600mm，端部螺纹为 M24，螺纹长 150mm，配合工字钢小横梁悬吊；采用 3 支树脂锚固剂锚固，1 支 K2335 和 2 支 Z2360，锚固长度约 1500mm；采用 11 号矿工钢作为小横梁，长度为 1000mm，中间 700mm 间距割 2 个长孔，配合厚度为 10mm 的小钢垫板和标准螺母；工字钢构件每隔 3m 安装 1 根。双高强锚杆悬吊单轨吊轨道装置如图 3 所示。

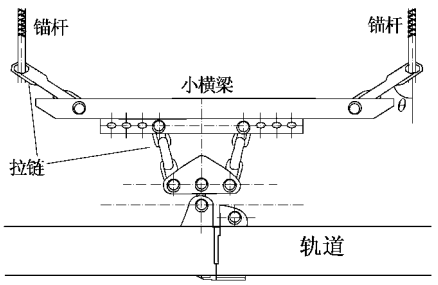

图 3　双强锚杆悬吊单轨吊轨道装置

3.3　施工工艺

首先在巷道顶板确定出单轨吊方向和锚杆的位置，采用 ϕ28mm 的钻头，打设孔深为 2400 ± 30mm；锚杆孔钻好后，为保证锚干锚固效果，向孔中装入 3 支锚固剂，要充分搅拌，等待直至完全凝固；锚杆打设后，将工字钢小梁套在 2 根锚杆上，工字钢小梁和顶板之间预留 70mm 间隙，然后上垫板、螺母，预紧到预定位置；严格控制小梁布置间距，允许误差为 ±50mm；当巷道顶板严重不平时，可适当改变 2 根锚杆位置，尽量使 2 根锚杆的外露部分等长，以利于工字钢小梁的安装；确实无法找到合适的锚杆位置时，打锚索进行悬吊；施工时要确保锚杆安装质量，发现不合格锚杆（特别是搅拌过程中），应立即进行补打，严禁拖到下一班进行补打。

4　应用效果分析

S2106 运输巷和回风巷全部采用双高强锚杆悬吊单轨吊轨道技术，为了检验该悬吊结构的合理性，对单轨吊悬吊最重载荷（液压支架）过程中进行检测，并分析单轨吊对工作面支架安装速度的影响。

4.1　技术效果

在单轨吊吊运工作面液压支架时进行测试（液压支架是单轨吊吊运的最重的物体），在正常匀速运行、刹车、启动、起吊和落架时采用 GYS-300 型刚体应变仪对单根锚杆受力进行测试，测试结果见表 3。

表 3　单轨吊运行中单根锚杆受力状况

起吊时最大载荷/kN	落架时最大载荷/kN	静止时最大载荷/kN	行进时最大载荷/kN	刹车时最大载荷/kN	起车时最大载荷/kN
31.4	30.5	31.4	32.1	32.1	30.5
30.5	30.5	30.0	31.0	31.0	30.6

从表 3 中可以看出，单轨吊悬吊支架时，在正常行驶时最大载荷为 32.1kN，静止状态时为 31.4kN，刹车时的载荷最大为 32.1kN。该测量值为综采工作面的端头支架，其实际重量约为 320kN。单轨吊的起吊点为 8 个，从上表数据分析，其在同一地点悬吊单轨吊的 2 根锚杆承受最大外力加起来为 64.2kN。在进行锚杆悬吊时，考虑到吊链在工字钢小梁最不利的位置（即吊链紧贴着一根锚杆），整个最大重量均集中在一根锚杆上，其最大载荷为 64.2kN，而采用高强锚杆屈服载荷为 127kN，可见双强锚杆悬吊结构完全满足余吾煤业井下要求。

4.2　经济效益

2010 年 7 月 23 日，S2106 工作面回风巷单轨吊开始正式运行，截止 2010 年 9 月 10 日工作面支架安装完毕，每班安装 3 组支架，共用一个半月，工作面共安装了 166 组支架，未采用单轨吊之前，每班安装 2 组支架，速度提高了约 50%。在安装运行过程中没有发生一次坠车事故。

5　结论

（1）通过对 S2106 工作面两巷锚杆锚固力检测和锚杆悬吊结构受力分析，结合锚杆抗拉、抗剪强度可知，确定锚杆支护巷道实施双强锚杆悬吊单轨吊具有可行性。

（2）分析锚杆悬吊对巷道变形影响可知，锚杆悬吊结构引起的应力影响范围小，应力值小，不会引起巷道变形，不影响巷道稳定。

（3）针对井下具体状况，提出采用双高强锚杆悬吊单轨吊技术，设计双高强锚杆悬吊结构和施工工艺，并在 S2106 工作面两巷进行应用试验。

该悬吊技术将工作面支架安装速度提高了 50%，且运行过程中没有发生坠车事故。

[参考文献]

[1] 康红普. 煤巷锚杆支护成套技术研究与实践 [J]. 岩石力学与工程学报，2005，24（21）：3959-3964.

（下转 58 页）

综上所述，将液压支架高度确定为 4.2m，可实现机采高度 4.0m，既能保证较高的顶煤回收率又能有效控制工作面片帮和缓解工作面压力。

2.2　工作阻力确定

液压支架工作阻力分别采用理论计算、邻近矿井矿压观测资料和数值模拟 3 种方法进行确定。

理论计算采用顶板结构分析估算法。该计算方法认为液压支架工作阻力主要承受直接顶和顶煤的载荷，并平衡基本顶失稳时对支架的动载影响。支护强度计算公式为:

$$q = K_d(q_d + q_c)$$

$$h = (0.8M)/c_1 - 1$$

式中，q 为工作面支架所需支护强度，MPa；K_d 为基本顶失稳时的动载系数，取 1.1 ~ 1.8；q_d 为直接顶自重，kN；q_c 为支架上方顶煤自重，kN；M 为煤层一次采出厚度，m；c_1 为直接顶碎涨系数。

根据工作面实际地质情况，取煤层厚度为 14m，则:

$$h = (0.8 \times 14)/(1.3 - 1) = 37(\text{m})$$

由于顶煤较厚，基本顶动载系数取 1.4，则:

$$q = 1.4 \times (2500 \times 9.8 \times 37 + 1300 \times 9.8 \times (14 - 3.8)) = 1.45(\text{MPa})$$

邻近矿井矿压观测表明来压强度为 1.34MPa。由于工作面支架工作阻力较低，工作面来压期间，立柱安全阀开启频繁。

采用数值模拟不同支护强度下顶板下沉量得出的合理支护强度为 1.3MPa（见图 2）。

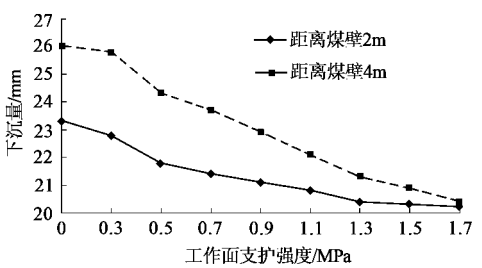

图 2　支护强度与顶板下沉量关系

综合考虑各种影响因素后，确定支护强度为 1.46MPa，对应的支架工作阻力为 15000kN。

3　使用效果分析

8101 工作面倾斜长度 199.5m，共使用液压支架 133 架，于 2009 年 9 月 30 日试生产，2010 年 10 月底回采结束，现场反馈的使用效果如下:

（1）顶煤回收率分析　回采期间试验了多种放煤工艺，最终采用“一采一放”多轮顺序放煤，见矸关闭放煤口的方式。现场观测可知，顶煤破碎充分，容易放出，瞬时煤量大，后部输送机容易超负荷。工作面一般安排 2 个放煤口分段放煤，单架放煤时间一般为 3 ~ 4min，最长 5 ~ 8min。实际顶煤回收率约 78%。

（2）工作面矿压　矿压观测表明工作面来压范围分为 3 个区域：35 ~ 85 号支架为来压强烈区，来压强度大，持续时间长，安全阀开启频繁；34 ~ 22 号，86 ~ 100 号支架，两个区域来压强度相对较小，持续时间相对较短，来压时仅个别安全阀开启；两个端头区域来压不明显，来压时主柱持续增阻，但安全阀开启较少。

工作面初采期间，顶煤没有垮落，支架后方悬顶较长，支架后柱压力大于前柱；开始放顶煤开采后，支架后方悬顶消失，支架前柱压力大于后柱。工作面来压期间，支架后柱工作阻力明显增加了，来压时支架最大工作阻力基本出现在后柱。

4　结论

回采实践表明，ZF15000/27.5/42 型液压支架能够满足 10 ~ 16m 特厚煤层综放开采需要，支架结构合理，适应工作面回采工艺及顶板控制要求。

[参考文献]

[1] 刘俊峰. 塔山矿特厚煤层综放开采矿压显现规律初步研究[J]. 煤矿开采，2008，13（5）：80-82.

[2] 闫少宏，尹希文. 大采高综放开采的几个理论问题的研究[J]. 煤炭学报，2008，33（5）：481-485.

[3] 陈　宇. 高工作阻力大采高放顶煤液压支架设计研究[J]. 煤矿机械，2008，29（12）：47-49.

[4] 范智欣. ZF15000/27.5/42 型大采高放顶煤液压支架的研制[J]. 矿山机械，2010，38（21）：116-117.

[责任编辑：徐亚军]

（上接 56 页）

[2] 康红普，林　健. 煤巷锚杆支护成套技术在潞安矿区的应用[J]. 煤炭学报，2001，26（S）：106-110.

[3] 康红普. 高强度锚杆支护技术的发展与应用[J]. 煤炭科学技术，2000，28（2）：1-4.

[4] 王志清，万世文. 单轨吊辅助运输对巷道支护的影响[J]. 煤炭科学技术，2003，31（5）：19-21.

[5] 张慧红，段建亭. 单轨吊悬吊锚索的悬吊方式与受力分析[J]. 矿业安全与环保，2002，29（1）：228-229.

[6] 段建廷，马玉彬，李广兴，等. 全锚支护底煤巷单轨吊轨道安装及应用[J]. 矿业安全与环保，2002，29（2）：57-59.

[7] 肖亚宁，王志清，林　健，等. 锚杆支护巷道单轨吊悬吊技术及应用[J]. 煤炭科学技术，2003，31（8）：16-18.

[责任编辑：姜鹏飞]