文章编号：1673-3363-(2015)02-0273-06

树脂全长锚固锚杆外形尺寸优化数值模拟研究

林健，任硕

(天地科技股份有限公司开采设计事业部，北京 100013)

摘要 锚杆全长预应力锚固支护方式是解决复杂困难巷道支护的有效手段，但是由于施工困难，一直制约着它的应用与推广。本文致力于通过优化锚杆外形的方法，在保证锚杆锚固性能前提下，解决煤矿巷道全长锚固施工困难的问题。论文采用数值模拟的方法，对锚杆外形与锚杆锚固性能之间的关系进行了研究，提出锚杆外形相关参数的合理值。优化后的锚杆横肋高度由原来的 1.46 mm 降低为 1.20 mm，横肋间距由原来的 11 mm 增加到 30 mm，横肋宽度由 3 mm 增加到 10 mm。优化后的锚杆在锚固性能不降低的情况下，搅拌阻力降低 50%左右，搅拌效果理想，达到了优化的目的。

关键词 全长锚固；横肋间距；横肋高度；横肋宽度；数值模拟；优化

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.02.016

Numerical simulation optimization research of bolt profile configuration with resin full-length anchoring

LIN Jian，REN Shuo

(Coal Mining and Design Department，Tiandi Science and Technology Co. Ltd，Beijing 100013，China)

Abstract Bolting with resin full-length anchor and high prestress is an effective means to solve support problem of complex and difficult roadway, but its application and promotion have always been restricted due to the construction difficulties. This paper is committed to solving the difficult problem of coal mine roadway full-length anchoring through optimized anchor shape under the premise of the guarantee of anchor performance. The numerical simulation methods have been used to research the relationship between the bolt shape and anchorage bolt performance. Optimized bolt cross rib height is reduced from 1.46 mm to 1.20 mm; bolt cross rib spacing is increased from 11 mm to 30 mm; and the bolt cross rib width is increased from 3 mm to 10 mm. The optimized bolt shearing resistance is reduced by about 50% under the condition of not reducing in the anchorage performance. Consequently, mixing effect is ideal, achieving the goal of the optimization.

Key words full-length anchor；bolt cross rib spacing；bolt cross rib height；bolt cross rib width；numerical simulation；optimization

随着我国煤矿开采深度和强度的不断增加，地质条件的不断复杂化，涌现了大量复杂困难巷道，如深井高应力软岩巷道、极破碎围岩巷道、松软膨胀围岩巷道、特大断面巷道、强烈动压影响巷道等。

收稿日期：2013-07-12
基金项目：国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAB13B02)；开采生产力转化基金项目(KJ-2013-TDKC-07)
作者简介：林健(1969—)，男，山东省曹县人，研究员，硕士生导师，主要从事煤矿巷道支护技术方面的研究。
E-mail：linjian_w@163.com **Tel**：010-84264127

这些巷道围岩变形剧烈，在服务期限内需要多次维修，给煤矿的正常生产造成极大的困扰[1-3]。针对这一问题，煤炭科学研究总院开采设计研究分院提出了全长预应力锚固的理念，并在山西潞安动压巷道、内蒙古平庄软岩巷道、新汶千米深井巷道等进行了现场应用，有效地控制了复杂困难巷道围岩变形，支护效果得到明显改善，为解决复杂困难巷道支护提供了一条有效途径。

但是，全长预应力锚固技术在推广上却遇到了较大阻碍。主要原因是锚杆安装阻力比较大，特别是巷道两帮锚杆需要通过人力推进来实现安装，由于全长锚固所需树脂锚固剂数量多，大大增加了搅拌阻力和安装锚杆所需的推力，致使锚杆未安装到预定位置锚固剂就固化的问题时有发生，造成锚杆的大量浪费。煤炭科学研究总院开采设计研究分院前期从降低锚固剂黏稠度方面进行了大量研究与试验，取得一定效果，但是没有完全解决这一难题，帮锚杆的安装仍需要 3~4 人合力完成。

安装阻力影响因素主要有以下几个：① “三径匹配”的关系；② 树脂锚固剂的黏稠度和充填骨料粒径；③ 锚杆杆体外形。前 2 个因素前人已经做了详细研究并得出了有益结论[4-5]，而锚杆杆体外形目前主要参考建筑行业螺纹钢标准，是基于水泥基锚固条件下的研究成果。建筑行业采取植筋安装，无须搅拌锚固剂。而基于树脂基锚固的锚杆外形优化国内外研究较少且不系统。由于树脂锚固剂固化后无论在单轴抗压强度、黏结强度和弹性模量等方面均比水泥基材料高得多，因此目前锚杆杆体外形存在进一步优化的可能。

在基于水泥基黏结材料的螺纹钢外形方面，国内外做了大量而详细的研究工作。在混凝土用钢筋的设计中，认为相对肋间距和相对肋高与黏结有关，常用相对肋面积作为综合评价变形钢筋的外形参数[6]。土耳其苦卡劳法大学的 A.kilic 等人通过在圆钢上加不同齿形角的横肋，研究水泥砂浆全长锚固状态下钢筋横肋齿形角对锚固力的影响[7-9]。钢铁研究总院赵晓丽等通过分别对横肋对称钢筋和不对称钢筋在混凝土中的拉拔试验，研究横肋对称性对锚固性能的影响[10]。通过对混凝土用钢筋大量的研究和实践，《钢筋混凝土用钢》(GB 1499.2—2007)“热轧带肋钢筋”部分对带肋钢筋横肋的设计做出了详细规定。

在基于树脂锚固的螺纹钢锚杆外形方面，相关研究表明，横肋的高度对搅拌效果、锚固效果、热轧工艺和螺纹的抗弯强度有影响，横肋高度越大，锚固性能和搅拌效果越好；但锚杆安装时搅拌阻力也大，横肋的抗弯强度变低，且对热轧工艺不利，轧制过程中不易成型。横肋底宽对材料利用率和螺纹剪切强度有影响，宽度大，材料利用率不好，但横肋剪切强度高[11-13]。横肋上升角对搅拌效果和搅拌阻力有直接影响，横肋上升角大， 对搅拌效果和材料利用率有利。横肋上升角的大小，直接影响着搅拌阻力的大小。

为了研究横肋对锚固效果的影响，澳大利亚 N. J. Aziz 等人对 3 种不同肋高、肋间距的锚杆钢筋进行了对比研究[14-16]。研究发现：当锚固长度由 75 mm 增加到 150 mm 时，肋高较大的试件所需拉拔力明显增大，而肋高相对较小试件的增加量相对较小。拥有最大肋间距的试件的残余强度可以达到最大载荷的 70%，表明横肋间距对锚杆受力状态的影响非常明显。拥有较大肋间距的试件载荷峰值处的位移明显大于其他 2 组试件，这说明肋间距对锚杆和锚固剂相互作用力的传递机制的影响要比肋高对它的影响大得多。随着横肋间距的增加，达到峰值时的位移量也随之增加，这将有利于对大变形围岩的控制，特别是对于软岩的控制能力将大幅度提高[17]。为了进一步验证肋间距对锚杆锚固性能的影响，并找到合理的肋间距区间，澳大利亚 N. J. Aziz 等又做了一系列研究[18-20]，选用直径为 22 mm、肋间距分别为 12.5，25，37.5，50 mm 的螺纹钢进行拉拔试验。试验结果表明：随着肋间距的增大，锚杆的拉拔力明显增加；但肋间距大于 37.5 mm 时拉拔力又呈下降趋势。

本文采用 ANSYS 有限元数值模拟的方法，模拟不同外形参数锚杆的拉拔试验，研究不同横肋参数的锚杆拉拔力以及锚杆与锚固剂在拉拔试验中的受力状态，并得出锚杆合理的外形参数值。

1 模拟方法及模型建立

1.1 模型建立

使用 ANSYS 有限元模拟软件分别建立锚杆、锚固剂、钢管的三维模型。锚杆采用 SOLID95 单元进行模拟，长度 175 mm，直径 22 mm。锚杆采用月牙形横肋，横肋参数根据具体模拟要求进行确定。钢管采用 SOLID95 单元进行模拟，内径为 28 mm，外径 50 mm，长度 130 mm。钢管和锚杆之间的锚固剂采用 SOLID65 单元进行模拟，要求锚固

剂在 125 mm 的锚固长度内与锚杆、钢管密切配合并且不产生渗透。锚杆、锚固剂、钢管均采用四面体单元进行划分，锚杆横肋以及锚固剂与锚杆横肋接触的部分进行网格的局部细化。

1.2　材料属性和接触类型

模型建立完毕后，需定义各材料的力学参数，按表 1 进行模型力学参数定义。模拟中假设锚固剂与钢管接触面不发生破坏，所以锚固剂与钢管的接触面采用面面接触单元 CONTA174 和 TARGE170，接触方式选择绑定接触 Bonded(always)，选择自动闭合间隙减少渗透选项。锚杆与锚固剂的接触面也采用面面接触单元 CONTA174 和 TARGE170 进行模拟，接触方式选择 Standard，并且设置摩擦因数为 0.35，黏结强度为 17 MPa。

表 1　拉拔试验模拟的模型力学参数

Table 1　Mechanical parameters of model drawing test simulation

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	抗压强度/MPa	泊松比	摩擦因数	弹性模量/GPa	黏结强度/MPa
锚固剂	—	—	80	0.3	0.35	16	17
锚杆	1 000	800	—	0.3	0.35	200	—
钢管	1 000	800	—	0.3	0.35	200	—

1.3　约束条件和力的加载

在钢管底部节点上施加位移约束，使节点在各个方向上的位移均为零。在锚杆露出端的端面上施加轴向的拉力，使用 0~400 kN 逐步递增的加载方式(kbc，0)。为了保证计算更容易收敛，设置收敛准则为力的收敛，采用 2-范数控制收敛，收敛精度设置为 2%。

1.4　模拟方案

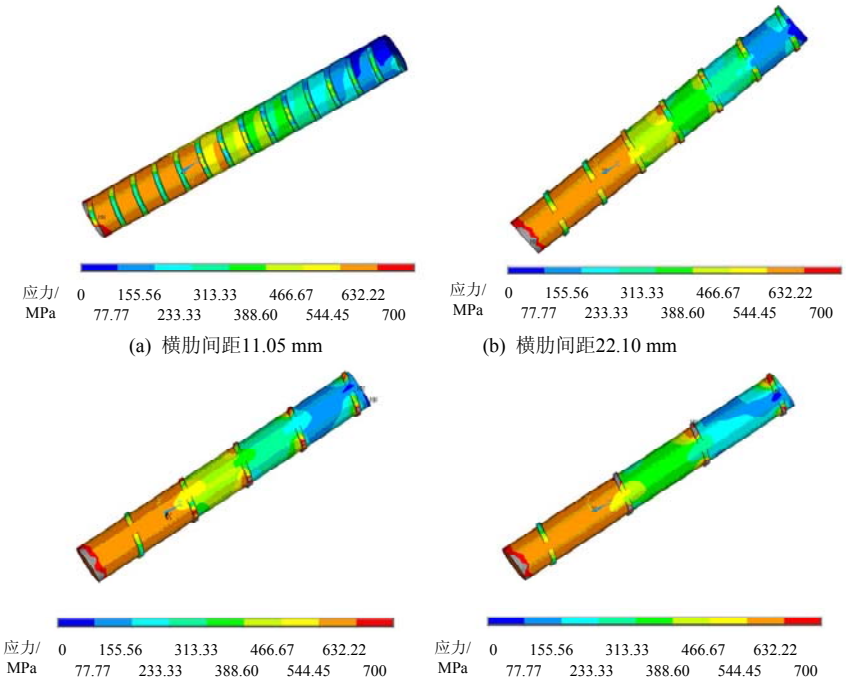
1) 分别模拟锚杆横肋间距为 11.05，22.10，33.15，44.20 mm 时的拉拔试验。

2) 锚杆横肋间距为 33.15 mm 时，其他条件不变，分别模拟横肋高度为 0.4，0.8，1.2，1.6，2.0 mm 的锚杆拉拔试验。

3) 锚杆横肋间距为 33.15 mm 时，其他条件不变，分别模拟横肋宽度为 3，6，9，12，15，18，21 mm 时的拉拔试验。

2　不同横肋间距锚杆拉拔试验模拟

分别模拟锚固长度为 125 mm 情况下 4 种不同横肋间距锚杆的拉拔试验。拉力为 200 kN 时锚杆的等效应力分布如图 1，锚杆等效应力沿轴向分布曲线如图 2。



(a) 横肋间距11.05 mm　(b) 横肋间距22.10 mm

(c) 横肋间距33.15 mm　(d) 横肋间距44.20 mm

图 1　拉力 200 kN 时不同横肋间距锚杆杆体等效应力云图

Fig.1　Bolt equivalent stress nephogram of different rib spacing of bolts under pull 200 kN

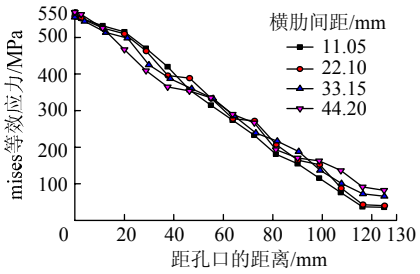


图 2 拉力 200 kN 时不同横肋间距锚杆等效应力沿轴向分布曲线

Fig.2 Equivalent stress distribution curve along the bolt axial direction of different rib spacing under 200 kN

由图 1，2 可看出，等效应力最大值在锚杆受力端，并且应力值由受力端向另一端方向逐渐减小。锚杆横肋间距越大，拉力向孔口内传播得越深。如果把 200 kN 的拉力看作锚杆预应力，则可以得出锚杆横肋间距越大，对预应力向钻孔深处的扩散越有利。这一特性对于全长预应力锚固尤为重要，锚杆预应力扩散越深，越能充分发挥全长预应力锚固的支护作用。

表 2 给出了横肋间距与拉拔力之间的关系。可以看出，4 种锚杆中，横肋间距为 33.15 mm 的锚杆拉拔力最大。综合上述分析，锚杆横肋间距为 33.15 mm 较为合理。

表 2 不同横肋间距锚杆拉拔力

Table 2 Bolt with different rib spacing pullout data

横肋间距/mm	11.05	22.10	33.15	44.20
拉拔力/kN	221	230	237	216

3 不同横肋高度锚杆拉拔试验模拟

在锚杆横肋间距为 33.15 mm 时，分别模拟横肋高度为 0.4，0.8，1.2，1.6，2.0 mm 时锚杆拉拔试验情况。拉力 200 kN 时锚杆等效应力沿锚杆轴向分布曲线如图 3。

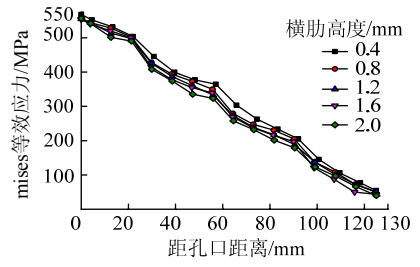


图 3 拉力 200 kN 时不同横肋高度锚杆等效应力沿轴向分布曲线

Fig.3 Equivalent stress distribution curve along the bolt axial direction of different rib height under 200 kN

由图 3 看出，锚杆杆体等效应力沿着锚杆轴向由锚杆受力端向另一端方向逐渐减小。由图 3 还可以看出：锚杆横肋高度为 0.4 mm 时，锚杆受到 200 kN 的拉力作用后，其沿轴向的等效应力均大于其他类型锚杆，锚杆横肋高度越高，其在距孔口同一位置处的等效应力越低。同样的，如果把 200 kN 的拉力看作锚杆预应力，则可以得出锚杆横肋高度越低，对预应力在锚固剂中的扩散越有利。从预应力全长锚固的预应力传播效果来说，锚杆横肋越低，越有利于预应力向深处的传播。

通过模拟得到了不同横肋高度锚杆的拉拔力如表 3。模拟结果显示，随着锚杆横肋高度的增加，拔出锚杆所需的拉拔力也随之增加。当横肋高度达到 1.20 mm 以上时，横肋高度再继续增加锚杆的拉拔力的增幅较小。综合上面的分析，把锚杆横肋高度定为 1.20 mm。

表 3 不同横肋高度锚杆拉拔力

Table 3 Bolt with different rib height pullout data

横肋高度/mm	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
拉拔力/kN	205	218	236	240	242

4 不同横肋宽度锚杆拉拔试验模拟

分别模拟横肋间距 33.15 mm、横肋高度 1.20 mm 条件下，横肋宽度为 3，6，9，12，15，18，21 mm 时锚杆拉拔试验情况。

根据模拟结果(如表 4 和图 4)，对于肋间距 33.15 mm、横肋高度 1.20 mm 的锚杆，其横肋宽度为 9 mm 时，拉拔力最大；当横肋宽度超过 12 mm 以后，拔出锚杆所需的拉拔力急剧降低。

表 4 不同横肋宽度锚杆拉拔力

Table 4 Bolts with different rib width pullout data

横肋宽度/mm	3	6	9	12	15	18	21
拉拔力/kN	236	240	246	245	232	228	223

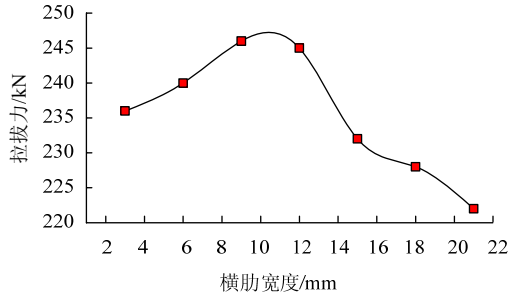


图 4 横肋宽度与拉拔力关系曲线

Fig.4 Relation curve between rib width and drawing force

5　优化后锚杆搅拌阻力和搅拌效果试验

5.1　搅拌扭矩阻力试验

采用煤炭工业北京锚杆产品质量监督检验中心的 MZ-1 型锚杆综合试验台进行搅拌扭矩对比试验。对比试验结果如图 5，优化后的锚杆比常规锚杆搅拌扭矩减小约 40%，非常有利于锚杆安装。优化后的锚杆不仅可以减小最大扭矩的数值，还可以延迟最大扭矩的产生位置。

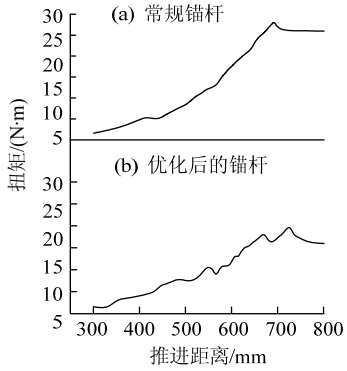


图 5　锚杆安装扭矩-位移曲线

Fig.5　Bolts installation torque-displacement curve

5.2　搅拌效果分析

对搅拌扭矩阻力试验后的试件剖开如图 6 所示。常规锚杆试件如图 6a，锚固剂与钢管的接触面非常致密，并且锚固剂颜色比较均匀，整体性非常强。锚固剂与锚杆接触面整体性强，并且锚固剂比较密实，不存在空隙等现象，这说明常规锚杆搅拌效果很好。图 6b 为优化后的锚杆搅拌效果，从图中可看出，优化后的锚杆对锚固剂的搅拌效果也很好。从剖开结果来看，锚固剂比较密实，并且无论与钢管还是锚杆都接触得非常好，整体性也很强。



(a) 常规锚杆试件　　(b) 优化后的锚杆试件

图 6　锚固试验后的试件剖开图

Fig.6　Images of anchorage test specimens after cut open

5.3　锚杆安装推力试验

试验锚杆采用常规锚杆和优化后的锚杆 2 种，锚杆长度均为 2.4 m。采用内径 30 mm、长度 2.3 m 的无缝钢管模拟钻孔。试验采用 3 根 MSZ2360 低黏度树脂锚固剂，锚固长度为 2 300 mm。试验设备主要有 ZMS15 型强力岩石电钻、航天工业总公司七 O 一所生产的 BK-2 型传感器(量程 20 kN，k=0.15 με/N)和 YJk4500 型静态电阻应变仪。采用人工顶推的方法模拟煤矿井下帮锚杆的安装。

试验曲线如图 7 所示。当安装时间为 30 s 左右时，优化后锚杆的最大推力为 0.73 kN，仅为原有锚杆的 54.8%；可见优化后的锚杆大幅降低了安装推力，一个工人即可轻松完成全长锚固锚杆的安装，达到了对锚杆外形参数优化的目标。

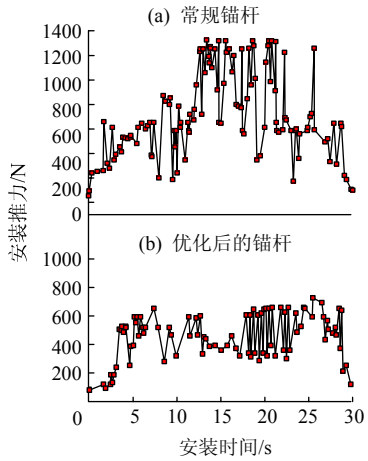


图 7　锚杆安装推力与时间关系曲线

Fig.7　Relation curve of bolts thrust force and time

6　结　论

1) 不同横肋参数锚杆周围锚固剂受力状态有所不同，但是应力最大值均出现在锚固剂与锚杆横肋下表面接触处。

2) 4 种不同横肋间距锚杆中，横肋间距为 33.15 mm 的锚杆拉拔力最大，横肋间距的合理值在 30 mm 左右。

3) 随着锚杆横肋高度的增加，拔出锚杆所需的拉拔力也随之增加，锚杆横肋高度越低，对预应力向钻孔深处的扩散越有利。当横肋高度达到 1.20 mm 以上时，横肋高度再继续增加锚杆的拉拔力的增幅较小。横肋高度的合理值在 1.20 mm 左右。

4) 对于肋间距 33.15 mm、肋高 1.20 mm 的锚杆，其横肋宽度为 9 mm 时，拉拔力最大；当横肋宽度超过 12 mm 以后，锚杆拉拔力急剧降低。横肋宽度的合理值在 10 mm 左右。

5) 实验室试验证明，优化后的锚杆不仅搅拌阻力大大降低，对锚固剂的搅拌效果也非常理想，一个工人即可轻松完成全长锚固锚杆的安装，达到了对锚杆外形参数优化的目标。

参考文献：

[1] 康红普，王金华，等．煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]．北京：煤炭工业出版社，2007：256-257．

[2] Rock Mechanics Technology Ltd．Coal mine roadway support system handbook[M]．Health and Safety Executive，2004：2-5．

[3] 侯朝炯，郭励生，勾攀峰．煤巷锚杆支护[M]．徐州：中国矿业大学出版社，1999：5-6．

[4] 杨振茂，马念杰，官山月，等．锚杆钻孔、杆体、树脂卷直径的合理匹配[J]．岩石力学与工程学报，2003，22(4)：659-663．
YANG Zhenmao，MA Nianjie，GUAN Shanyue，et al．Reasonable matching of diameters among borehole，bolt and resin[J]．Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2003，22(4)：659-663．

[5] 胡滨．全长预应力锚杆树脂锚固剂力学性能研究[D]．北京：煤炭科学研究总院，2011．

[6] 刘明，张炳成，肖树勇．月牙肋钢筋相对投影肋面积的计算和保证[J]．冶金标准化与质量，1999(2)：23-28．
LIU Ming，ZHANG Bingcheng，XIAO Shuyong．Calculation and assurance of the specific projected rib area for crescent ribbed bars[J]．Metallurgical Standardization & Quality，1999(2)：23-28．

[7] KILIC A，YASAR E，ATIS C D．Effect of bar shape on the pull-out capacity of fully-grouted rockbolts[J]．Tunnelling and Underground Space Technology，2003，18(1)：1-6．

[8] COMPTON C S，OYLER D C．Investigation of fully grouted roof bolts installed under in situ conditions[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Ground Control in Mining．Morgantown，2005：302-312．

[9] 杨超，陆士良，姜耀东．支护阻力对不同岩性围岩变形的控制作用[J]．中国矿业大学学报，2000，29(2)：170-173．
YANG Chao，LU Shiliang，JIANG Yiaodong．Controlling effects of support resistance on roadway deformation under different rock conditions[J]．Journal of China University of Mining & Technology，2000，29(2)：170-173．

[10] 赵晓丽，陈颖，王晓峰，等．横肋对称与横肋非对称钢筋黏结锚固性能的试验研究[J]．工业建筑，2008(6)：67-70．
ZHAO Xiaoli，CHEN Ying，WANG Xiaofeng，et al．Experimental study on the bond-anchorage properties for the rebar with symmetrically distributed transverse ribs and the unasymmetrically ones in concrete[J]．Industrial Construction，2008(6)：67-70．

[11] 王云芳，王安国，秦红飞，等．锚杆螺纹钢设计[J]．煤，2001(6)：26-27．
WANG Yunfang，WANG Anguo，QIN Hongfei，et al．Rebar anchor design[J]．Coal，2001(6)：26-27．

[12] 姚建伟．右旋热轧矿用树脂锚杆钢筋开发[J]．山东冶金，2009(3)：15-16．
YAO Jianwei．Development of dextrorotation hot-rolling mine resin anchor steel bars[J]．Shandong Metallurgy，2009(3)：15-16．

[13] 吴明安，赵万顺，皇甫太平．热轧矿用锚杆螺纹钢的研制[J]．山西冶金，2002(2)：38-39．
WU Ming'an，ZHAO Wanshun，HUANGFU Taiping．The development of hot rolled mining twisted bar[J]．Shanxi Metallurgy，2002(2)：38-39．

[14] AZIZ N，JALALIFAR H，CONCALVES J．Bolt surface configurations and load transfer mechanism[C]//Proc 7th Underground Coal Operators Conference．Wollongong，2006：236-244．

[15] AZIZ N．Bolt surface profiles：an important parameter in load transfer capacity appraisal[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Control and Mining Construction．Perth，2004：221-230．

[16] AZIZ N．A new technique to determine the load transfer capacity of resin anchored bolts[C]// 3rd Australian Coal Operators Conference．Wollongong，2002：176-185．

[17] LI Chunlin．Rock support design based on the concept of pressure arch[J]．International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2006，43：1083-1090．

[18] AZIZ N， JALALIFAR H，REMENNIKOV A．Optimisation of the bolt profile configuration for load transfer enhancement[C]// Faculty of Engineering Coal Operators' Conference，2008：125-131．

[19] FERRERO A M．The shear strength of reinforced rock joints[J]．Int J of Rock Mechanics and Min Sci & Geomech Absts，1995，32：595-605．

[20] BLUMEL M．Performance of grouted rock bolts in squeezing rock[C]//Proceedings EUROCK'96，Predictions and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering．Rotterdam：Balkema，1996：885-891．