

# 首钢 600MPa 级高强度 锚杆用钢冲击性能和组织分析

程四华<sup>1</sup> 周玉丽<sup>1</sup> 邱全康<sup>1</sup> 鲁丽燕<sup>1</sup> 吴迪<sup>2</sup>

(1. 首钢技术研究院, 北京 100043; 2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 主要研究在热轧工艺下 600MPa 级高强度锚杆用钢冲击功和组织。通过系列冲击试验表明 600MPa 级高强度锚杆钢具有良好的冲击性能。室温下冲击功可达 90J, 该钢韧性转变温度为  $-30^{\circ}\text{C}$ 。该钢边部和芯部组织均为珠光体+铁素体, 组织细小、均匀; TEM 观察表明, 珠光体中铁素体上的析出相在起到沉淀强化的同时, 渗碳体片层出现碎化、熔断, 一定程度上改善了钢的强韧性。通过 V-N 复合微合金化的柔性轧制技术, 充分发挥细晶强化和析出强化作用, 能够达到 600MPa 级高强度锚杆钢良好的强度、韧性配合。

**关键词:** 高强度锚杆钢; 冲击功; 细晶强化; 析出强化

**中图分类号:** TB

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-3198(2011)04-0293-02

## 1 引言

锚杆是锚固在煤、岩体内维持围岩稳定的杆状物。锚杆支护是煤矿巷道首选的、安全性高的主要支护方式, 与其它支护相比, 它属于一种主动支护形式, 具有支护工艺简单、支护效果好、材料消耗和支护成本低、运输和施工方便等优点。随着国家煤炭工业的迅速发展和开采规模的不断扩大, 煤炭安全生产已成为制约我国煤矿发展的突出问题之一, 煤炭行业迫切期待更高强度级别的矿用支护锚杆。

由于煤矿巷道支护用锚杆钢在矿井下要承受岩层的错层和位移带来的巨大切应力, 该产品要求很高强度的同时具有很好的延伸塑性和耐冲击性能。目前, 国内  $\text{Re} \geq 520\text{MPa}$ ,  $\text{Rm} \geq 800\text{MPa}$  高强度锚杆钢还是空白, 锚杆钢生产企业生产的锚杆钢多为 335MPa 和 400MPa 级, 也因冲击功不稳定而出现诸多问题。首钢在国内首次利用低合金成本, 采用一火成材热轧开发出冲击韧性优良、高安全性的低成本 600MPa 级高强度煤炭矿用巷道支护锚杆用钢, 成为国内唯一能生产该强度级别锚杆钢的厂家, 并实现了批量供货。本文主要研究在热轧工艺下 600MPa 级高强度锚杆用钢冲击韧性, 优异的韧性性能, 在减少断杆尤其脆断方面, 对安全生产有着重要意义。

## 2 生产技术条件

### 2.1 化学成分

表 1 首钢高强度锚杆钢 SMG600 化学成分(w%)

| 成分 | C           | Si          | Mn          | P            | S            | V           |
|----|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 含量 | $\leq 0.30$ | $\leq 0.85$ | $\leq 1.60$ | $\leq 0.025$ | $\leq 0.015$ | $\leq 0.15$ |

### 2.2 力学性能

表 2 高强度锚杆钢 SMG600 力学性能要求

| 性能     | 屈服强度/MPa<br>$\text{Re} \geq$ | 抗拉强度/MPa<br>$\text{Rm} \geq$ | 延伸率/%<br>$A_5 \geq$ | 冲击功(常温 V 型)/J<br>$A_{kv} \geq$ |
|--------|------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| SMG600 | 600                          | 820                          | 20                  | 34                             |

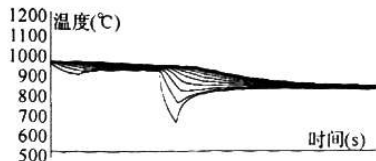


图 1 高强度锚杆钢轧后两级冷却工艺示意图

### 2.3 生产工艺

采用 V-N 复合微合金化, 开轧温度控制在  $1010^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ 。在轧制中通过两级控轧, 细化晶粒; 通过轧后两级分段冷却, 弱化轧后一冷, 提高冲击功, 主要利用轧后二冷进行强制冷却来保证高强度, 最终实现“柔性轧制”, 见图 1。

## 3 生产结果及分析

### 3.1 冲击性能

首钢生产开发的 600MPa 级高强度锚杆用钢, 晶粒度在 9.5~10 级之间, 其屈服强度可达到 660MPa, 抗拉强度达到 880MPa, 延伸率在 20%~25% 之间, 满足产品性能的要求。对高强度锚杆钢进行  $-60^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$  系列标准 V 型缺口冲击试验, 试样规格为  $10 \times 10 \times 55\text{mm}$ , 根据所得的数据绘出试样冲击功和温度的曲线, 如图 2 所示。

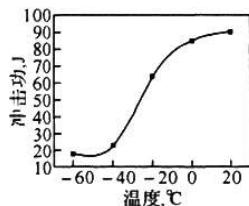


图 2 高强度锚杆钢冲击功-温度曲线

由图 2 可以看出, 室温条件下, SMG600 高强度锚杆钢冲击功最高为 90J ( $\geq 34\text{J}$ ), 且  $-20^{\circ}\text{C}$  时冲击功达到了 65J,  $-40^{\circ}\text{C}$  时冲击功也达到了 22J。如果按冲击功降低常温数值 50% 来判定韧性转变温度 (DBTT), 则该钢的韧性转变温度应该在  $-40^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$  之间, 约为  $-30^{\circ}\text{C}$ , 表明采用低成本 V-N 复合微合金化, 通过控制钢质纯净度和机间两级控轧冷却的柔性轧制技术开发的 600MPa 级高强度锚杆用钢具有优异抗冲击能力。

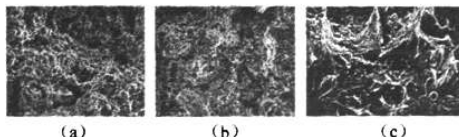


图 3 冲击断口扫描 (a) 室温; (b)  $-20^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $-40^{\circ}\text{C}$

### 3.2 断口分析

将低温冲击后的试样经酒精浸泡后迅速吹干, 在扫描

电镜上对断口形貌进行观察,如图3所示。从图中可以看出,随着冲击温度的降低,试样宏观上表现为由韧性断裂向脆性断裂过渡,微观断裂机制则逐渐由韧窝断裂转变为解理断裂,温度降至 $-40^{\circ}\text{C}$ 时有明显的脆断倾向。 $-40^{\circ}\text{C}$ 时断口呈现准解理的脆性特征,准解理断口有明显的撕裂棱,有放射状花样,并且起源于孔洞,此时接近解理断裂。 $-20^{\circ}\text{C}$ 和室温下试样断裂为韧性断裂,韧断机制是微孔聚合。韧窝是微孔长大的结果,韧窝内大多包含着一个夹杂物或第二相,这证明微孔多萌生于夹杂物和第二相与基体的界面上。另外,也可以看出在试样中的第二相粒子或夹杂物颗粒相对比较细小,较均匀的弥散分布在金属中,从而形成相对较多的细小韧窝,也说明了这种600MPa级高强锚杆钢具有良好的冲击性能。

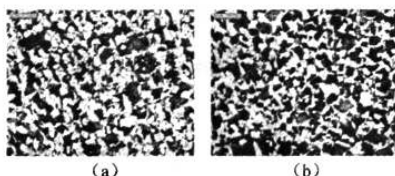


图4 SMG600 高强锚杆钢光学显微组织  
(a) 边部 $\times 500$ ; (b) 芯部 $\times 500$

### 3.3 组织分析

从图4中可以看出,600MPa级高强锚杆钢边部和芯部显微组织均为珠光体+铁素体,组织细小、且比较均匀,晶粒尺寸在 $10\mu\text{m}$ 左右。

根据晶粒细化强化的 Hall-Petch 公式:  $\sigma_s = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$ , 晶粒细化对屈服强度的贡献与有效晶粒尺寸  $d$  的 $-1/2$ 次方成正比,即晶粒越细小,强化效果越显著。金相组织的晶粒大小对低温脆性转变温度有一定的影响,晶粒尺寸减小,能提高冲击韧性值,并降低低温脆性转变温度。一般理解为,晶粒细小时,晶界增多,而晶界能够阻碍裂纹扩展;晶界前塞积的位错数减少,有利于降低应力集中;晶界总面积增加,则晶界上杂质浓度减少,避免产生沿晶脆性断裂。

对 SMG600 试样进行 TEM 观察分析,发现在试样渗碳体片层间的铁素体上有细小弥散的第二相析出粒子,EDS 能谱分析认为是 V、Ti 的碳氮析出物,如图5(a)、(b)、(d)、(e),同时从图5(c)中还可以看到,渗碳体片层出现了碎化、熔断。

晶粒细化能够在提高强度的同时改善韧性,是最主要的强化方式;珠光体中铁素体上的析出相在起到沉淀强化的同时,渗碳体片层出现碎化、熔断,这也在一定程度上改善了钢的强韧性。通过 V-N 微合金化细化晶粒和沉淀析出,充分发挥了细晶强化和沉淀强化两种强化方式的作用,能够达到 600MPa 级高强锚杆钢良好的强度、韧性配合。

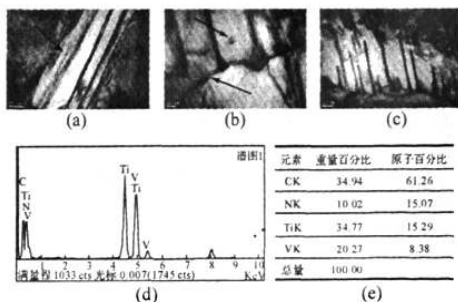


图5 SMG600 高强锚杆钢 TEM 薄膜观察(a)(b)第二相析出;  
(c)渗碳体片层碎化、熔断;(d)(e)析出物能谱及成分

### 3.4 有效晶粒研究

所谓有效晶粒,一般情况下,是指通过对比由电子背散射衍射(EBSD)所确定的组织中的“晶体学单元”和由夏比 V 型缺口冲击(CVN)试验的裂纹扩展路径及解理面单元所确定的“形貌单元”而确定的。

Diaz-Fuentes 等人利用 EBSD 研究低碳钢的韧性行为,分析了与 $-60^{\circ}\text{C}$ 夏比冲击试样相对应的最小裂纹反射角,发现只有那些晶界取向差大于 $15^{\circ}$ 的组织单元才是对其组织性能起作用的有效晶粒。关于该现象的解释,文献认为,在 $>15^{\circ}$ 时晶界能的主要来源是由于屏蔽效应所引起的静电能。不管大角度取向差引起晶界能变化原因何在,都可以看到当取向差接近 $15^{\circ}$ 后,晶界能达到最大值,并且保持不变,因而在该晶界角度,晶界的阻力最大,也即当裂纹扩展到晶界取向差为 $\geq 15^{\circ}$ 的晶界时,需要克服和消耗的能量最大,从而起到止裂的作用。借鉴于 Diaz-Fuentes 等人的研究成果,推断高强锚杆钢对材料韧性有贡献的晶界取向差也应该是 $>15^{\circ}$ 的晶界,利用 EBSD 得到 $>15^{\circ}$ 晶界取向差的锚杆钢有效晶粒数据,见表3。

表3 锚杆钢有效晶粒数据

| 钢种     | 有效晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$ | 所占比例/% | 晶粒度/级  |
|--------|-----------------------|--------|--------|
| SMG600 | 4.0~5.0               | 2.1    | 9.5~10 |

根据 EBSD 结果表明,在所分析的高强锚杆钢中, $\geq 15^{\circ}$ 晶界的晶粒平均尺寸和金相显微镜的结果不同,这说明常规的金相晶粒度级别并不能准确表征高强度材料晶粒尺寸参数,实际上,高强度钢种的强韧性和有效晶粒尺寸相关,更高级别的钢种其有效晶粒尺寸会更小,同时有效晶粒的细化也促使韧-脆转变温度的降低。

### 4 结论

(1)首钢利用低合金成本,采用一火成材,通过控制钢质纯净度、机间柔性轧制和轧后两级控冷开发的 600MPa 级高强锚杆钢,既具有较高的强度,又具有优异的韧性,提高了深埋煤矿巷道的支护效果,为安全生产提供了更好的保障。

(2)600MPa 级高强度锚杆钢具有良好的冲击性能。在室温下冲击功可达 90J, $-40^{\circ}\text{C}$ 时冲击功也有 22J。该钢脆性转变温度为 $-30^{\circ}\text{C}$ 。随着冲击温度的降低,试样表现为由韧性断裂向脆性断裂过渡, $-40^{\circ}\text{C}$ 时断口呈现准解理的脆性特征; $-20^{\circ}\text{C}$ 和室温下试样断裂为韧性断裂,韧性端口中均匀弥散分布的细小韧窝,也说明了该钢具有良好的冲击性能。

(3)600MPa 级高强锚杆钢边部和芯部组织均为珠光体+铁素体,组织细小、均匀;TEM 观察表明,珠光体中铁素体上的析出相在起到沉淀强化的同时,渗碳体片层出现碎化、熔断,一定程度上改善了钢的强韧性。通过 V-N 复合微合金化的柔性轧制技术,充分发挥细晶强化和析出强化作用,能够达到 600MPa 级高强锚杆钢良好的强度、韧性配合。

### 参考文献

- [1] 侯朝炯,郭励生,勾攀峰,等. 煤巷锚杆支护[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1999;(1),10-37.
- [2] David N Bigby, Developments in British Rockbolting Technology [J]. Coal International, 1997, 245(3): 111-116.
- [3] 崔德仁. 国内外锚杆支护技术现状及发展趋势[J]. 煤, 1997(1): 40-42.
- [4] 袁永文. 树脂锚杆钢筋冲击韧性研究[J]. 轧钢, 2009, 26(5): 23-26.