

煤矿立井玻璃钢复合材料罐道的研究

曾宪桃¹, 郭晋蒲²

(1. 焦作工学院土木建筑工程系, 河南焦作 454000; 2. 中国矿业大学建工学院, 江苏徐州 221008)

[摘要] 针对煤矿立井井筒装备腐蚀严重的现状, 研究开发了一种新型的玻璃钢复合材料罐道, 该罐道采用一种经改性后的具有抗静电、阻燃、耐磨损的玻璃钢, 部分地取代了钢材。对这种罐道的耐腐蚀特性、耐磨损特性、玻璃钢与钢材层合面纵向抗剪性能等进行了研究。试验和分析表明, 玻璃钢复合材料罐道中, 玻璃钢与钢材能协调工作, 其耐腐蚀性能满足煤矿井筒使用要求, 耐腐蚀寿命与耐磨损寿命同步, 均能达到30年以上。

[关键词] 立井; 玻璃钢; 罐道

[中图分类号] TD262.4; TU502+.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)12-0071-06

1 前言

立井装备的罐道、罐梁是保证提升容器安全运行的承载和导向设施, 罐道除承受井筒高湿、酸、碱环境的腐蚀外, 还要承受罐耳在其上作用的水平力及滑动或滚动磨损, 腐蚀和磨损常使钢轨或型钢组合罐道寿命减少到10~15年, 短的仅有七八年。

复合材料罐道是为提高使用寿命达到30年而研制的。这是根据罐道承受的最大水平力所需强度和刚度, 选用一定厚度的钢板焊接或轧制成方形或矩形钢芯, 经除锈处理后, 在其外表面敷一定厚度的玻璃钢(GFRP, glass fiber reinforced plastic)作为防腐、耐磨层, 内表面浇灌一层防腐树脂, 其截面型式为全封闭组合型式(图1)。

2 复合材料罐道耐腐蚀特性研究

因复合材料罐道采用全封闭组合型式, 玻璃钢的防腐研究就处在突出的位置。质量分析报告表明, 在一定浓度的强酸、强碱溶液中浸泡1~6个月, 其质量变化一般在1%以内, 耐酸性优于耐碱性。

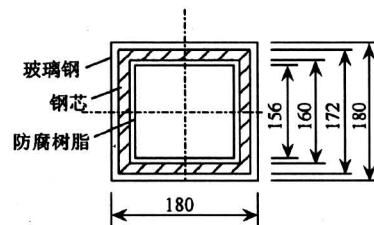


图1 钢和玻璃钢复合罐道

Fig.1 Composite guide of steel and GFRP

煤矿井筒环境的水质 $\text{pH} = 6 \sim 7$, 呈弱酸性, 而玻璃钢可在10%的硫酸中长期使用^[1], 所以, 对于煤矿井筒来说, 玻璃钢的耐腐蚀特性主要集中在其水浸泡特性和老化特性上。试验表明, 玻璃钢在水中浸泡30d以后, 其抗拉强度的保留率大于90%, 弯曲强度保留率大于87%, 弹性模量保留率大于82%, 吸水量小于1%, 浸泡3年以后, 强度保留率仍在80%以上, 3年后其力学性能基本趋于稳定。同时, 依据美国W. Wegenes教授的理论, 玻璃钢在水中煮沸24h相当于冷水浸泡1年, 对玻璃钢进行了加速老化试验, 图2是玻璃钢40年人工老化试验曲线^[2]。图2可见, 若给玻璃

[收稿日期] 2002-01-31; **[修回日期]** 2002-07-17

[基金项目] 建设部施工企业新产品试制(技术开发)资助项目(90-1-7)

[作者简介] 曾宪桃(1963-), 男, 湖南汉寿县人, 博士, 焦作工学院教授

钢一定的强度储备或只用玻璃钢作防腐层,玻璃钢产品即复合材料罐道的使用寿命可在30年以上。

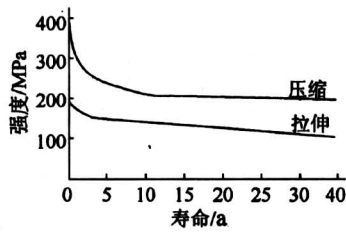


图2 玻璃钢人工老化试验曲线
Fig.2 Ageing test curve of GFRP

3 耐磨性能试验研究

磨损性能试验在MM-200型磨损试验机上进行,该机有上、下2个试样轴,在双速电机驱动下,下试样轴以200 r/min(或400 r/min)转动,上试样轴以180 r/min(或360 r/min)转动(图3)。当上、下试样轴同时转动且两试样直径相等时,上、下试样间有10%的滑动率(上、下试样的转速不同所致);若改变试样直径,可使滑动率增大或减小;当滑动率为零时,为纯滚动摩擦。

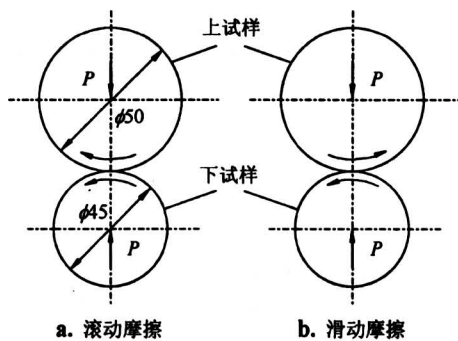


图3 摩擦副安装示意图

Fig.3 The schematic plan of friction test

3.1 上、下试样尺寸的确定

鉴于MM-200磨损试验机上、下试样轴间距仅能在50 mm以内调整,欲使上、下试样实现图3b的纯滚动摩擦,如图3和图4所示,可取 $R_u = 25$ mm, $R_x = 22.5$ mm。试样厚度按上、下试样轴与试样套装部分重叠厚度确定为 $\delta = 10$ mm。

3.2 上、下试样压力的确定

罐道和罐耳实际安装时要施加预紧力,该力即为罐耳与罐道滚动的正压力,实验中用上、下试

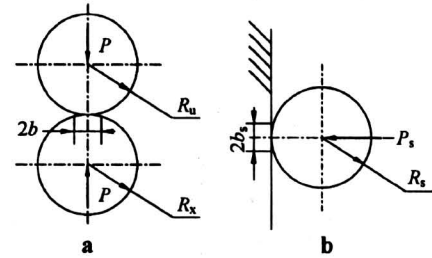


图4 罐耳与罐道间的接触应力

Fig.4 The contact stress of cage shoe and guide

样间的轴向压力进行模拟,MM-200型试验机上、下试样轴间压力用弹簧调整,以保证模拟罐耳与罐道间的接触应力与实际罐耳、罐道间的接触应力相等(图4a)。上、下两试样圆柱体在轴间压力 P 作用下,其接触应力 σ 和接触宽度 b 按下式计算^[3],

$$\sigma = \sqrt{\frac{P(R_u + R_x)}{L\pi^2(K_u + K_x)R_uR_x}}, \quad (1)$$

$$b = \sqrt{\frac{4P(K_u + K_x)R_uR_x}{L\pi^2(R_u + R_x)}}. \quad (2)$$

式中 L 为上、下试样圆柱接触长度, $L = \delta = 10$ mm, K_u, K_x 为上、下试样圆柱的弹性常数, $K = K_u = K_x = (1 - \mu^2) / \pi E$ 。

立井装备罐耳和罐道的实际接触如图4b所示,即 $R_u \rightarrow \infty$,式(1)和式(2)可写成:

$$\sigma = \sqrt{P_s / L_s \pi^2 (K_u + K_x) R_s}, \quad (3)$$

$$b = \sqrt{4P_s (K_u + K_x) R_s / \pi^2 L_s}. \quad (4)$$

式中 R_s 为实际罐耳半径:100, 125, 150, 175, 200 mm, L_s 为实际罐耳与罐道的接触长度,即罐耳厚度,80 mm, P_s 为罐耳与罐道的预紧力,1~4 kN^[4]。

联立式(3)和式(1),得

$$P = LR_u R_x P_s / L_s R_s (R_u + R_x). \quad (5)$$

3.3 滚动与滑动磨损寿命试验

下试样用目前现场使用较多的滚动罐耳材料聚氨酯制成,上试样用玻璃钢或钢制成,即可进行玻璃钢复合材料与聚氨酯滚动罐耳间的滚动磨损试验;当上试样换成钢,则可进行钢罐道与聚氨酯滚动罐耳的滚动磨损试验,见图3。

若将上试样轴反向转动,下试样轴转向保持不变,可进行玻璃钢罐道或钢罐道与聚氨酯滚动罐耳间的滑动磨损试验,见图3b。

3.4 磨损试验结果分析

用称重法，即试样在试验机上磨损前、后质量之差值来评定耐磨性能。将试样在磨损机上磨损一定时间后，在精度 0.000 1 g 的 DTG 160 分析天平上称其质量。试件试验前、后必须严格除去油污并烘干，否则，残余油污会影响准确性。

根据摩擦原理^[5]，磨损规律分三个阶段：第一阶段为磨合磨损阶段，摩擦副开始运行，其磨损率随时间增加而降低；第二阶段为稳定磨损阶段，即摩擦副工作时期，磨损率保持稳定；第三阶段为剧烈磨损阶段，其磨损率随时间延长而迅速增加，工作条件急剧恶化，导致摩擦副完全失效。

对煤矿立井提升容器罐耳和罐道这对摩擦副来说，其宏观磨损规律也遵循上述三个阶段，只是摩擦副之间压力较小，提升间隙较大，运转频率低，稳定磨损阶段更长。

用计算机模拟出立井提升高度（300~1 000 m）、提升终端荷载（60~400 kN）和提升速度（8~18 m/s）相匹配的各种工况条件下 30 年提升循环次数（986~530）万次，然后再根据 MM-200 型磨损试验机运转速度以及磨损原理，确定磨损试验机上模拟罐耳与罐道在实际工况条件下（30 年）进行的模拟磨损时间（试验机 400 r/min 转动时，磨损时间 t 在 221~410 h 之间）。只要测出罐耳和罐道在一定的模拟磨损时间内（每个试件实测 85 h 左右）稳定的磨损率，就可推算出未来 30 年摩擦副磨损量大小。磨损试验曲线如图 5 所示。根据磨损特征曲线及模拟时间（221~410 h）可得到 30 年玻璃钢（与聚氨酯）和钢（与聚氨酯）的磨损量见表 1。

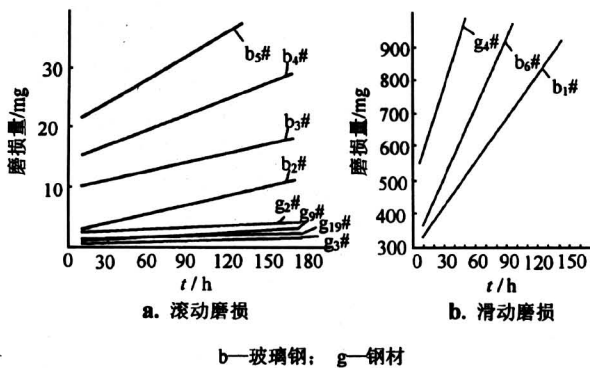


图 5 磨损试验曲线

Fig.5 The test curve of rolling and break-away friction

表 1 玻璃钢 30 年预计磨损量

Table 1 Wear extent of GFRP in 30 years

型号	编号	磨损 型式	轴间压 力/N	30 年磨损量 /mg	30 年磨损厚度 /mm
玻璃钢	2	滚动	20	131.01~221.73	0.042~0.071
	3	滚动	20	197.35~282.40	0.063~0.090
	4	滚动	30	328.06~484.95	0.104~0.154
	5	滚动	30	481.91~721.94	0.153~0.230
	1	滑动	30	1 241.96~2 058.46	0.395~0.656
钢材	6	滑动	20	1 860.51~3 202.41	0.593~1.020
	2	滚动	30	39.42~52.63	0.013~0.017
	9	滚动	30	23.86~37.11	0.008~0.012
	3	滚动	10	14.21~20.26	0.005~0.006
	19	滚动	10	21.50~30.19	0.007~0.010
	4	滑动	20	2 497.15~4 215.16	0.759~1.342

4 钢、玻璃钢层合面抗剪性能研究

复合材料罐道在投入使用后，玻璃钢和钢材的粘接面在水平力作用下承受剪力的作用，如果此层合面抗剪强度不够，玻璃钢就会从钢芯上脱落下来，起不到为钢芯防腐的作用，故对层合面的抗剪强度进行了研究。

用三点弯曲试验测定复合材料层合面的抗剪强度，所采用的试件形状和尺寸如图 6 所示。在 20 kN 的万能材料试验机上对试件进行加载，对不同尺寸和规格以及试件受试状态（玻璃钢分别处于受拉区或受压区）的不同，分别测得应力应变的数量关系，从而求得弯曲强度。

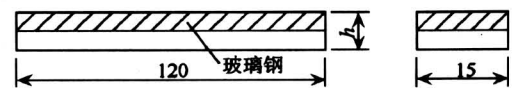


图 6 受弯试件形状和尺寸

Fig.6 The form and dimension of test sample

对于钢、玻璃钢复合而成的小试件，尽管两种材料的弹性模量不同（相差 10~15 倍），但只要层合面不分层，平面假定仍然适用^[6]，即有

$$\epsilon = z/\rho, \tag{6}$$

式中， ρ 为试件曲率。

根据虎克定律及式（6）得横截面上距中性轴为 z 处的正应力 σ_x 的表达式为

$$\sigma_x = \epsilon_x E_x = E_x z / \rho, \tag{7}$$

式中, E_x 为距中性轴为 z 处材料 x 方向的弹性模量。

由式 (7) 可知, σ_x 是 z , E_x 的函数。对钢和玻璃钢两种材料组合起来的复合材料有

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \epsilon_b E_b = E_b z / \rho, \\ \sigma_g &= \epsilon_g E_g = E_g z / \rho. \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 下标 b 代表玻璃钢; 下标 g 代表钢材。

由式 (8) 知, 应力是 z 的函数, 在两种材料的层合面上, 应力会发生突变, 如图 7 所示。

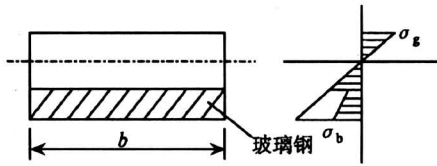


图 7 界面处应力发生突变

Fig.7 Strain saltation of interface

由式 (8) 出发, 根据静力平衡条件有

$$\left. \begin{aligned} \int_A \sigma_x dA &= 0 \\ \int_A (\sigma_x dA) z &= M \\ \sigma_x^b &= \frac{ME_x^b \cdot z}{\int_A E_x z^2 dA} \end{aligned} \right\}, \quad (9a)$$

$$\left. \begin{aligned} \int_A \sigma_x dA &= 0 \\ \int_A (\sigma_x dA) z &= M \\ \sigma_x^g &= \frac{ME_x^g \cdot z}{\int_A E_x z^2 dA} \end{aligned} \right\}, \quad (9b)$$

式中, M 为横截面的弯矩; $\int_A E_x z^2 dA$ 为横截面对中性轴的抗弯刚度, 用 \bar{E}_J 表示。

要对 σ_x^b 、 σ_x^g 进行计算, 就必须先确定受弯小梁横截面上中性轴的位置, 如图 8 是 N 层层合梁的横截面。设 NA 是截面的中性轴, NA 到梁上表面 $N'A'$ 的距离为 Δ , d_k 是自 $N'A'$ 到第 k 层下表面的距离, 第 k 层材料的抗拉刚度为 $E_x^k A_k$, $A_k = b(d_k - d_{k-1})$ 为第 k 层的横截面面积, 则整个截面的抗拉刚度 \bar{E}_A 为

$$\bar{E}_A = \sum_{k=1}^N E_x^k A_k = \sum_{k=1}^N E_x^k b (d_k - d_{k-1}). \quad (10)$$

由于合力之矩等于各分力矩之和, 可得抗拉刚度 \bar{E}_A 对 $N'A'$ 轴的静矩为

$$\bar{E}_A \cdot \Delta = \sum_{k=1}^N E_x^k b (d_k - d_{k-1}) \cdot \frac{1}{2} (d_k + d_{k-1}), \quad (11)$$

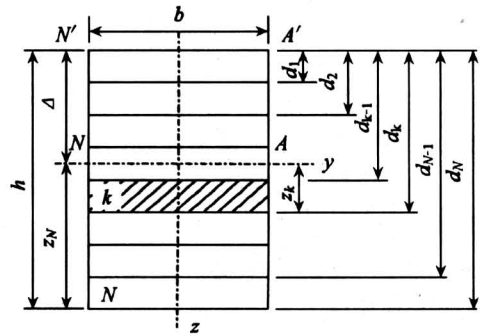


图 8 层合梁中性轴位置

Fig.8 The central axis of laminated beam

于是有

$$\Delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{k=1}^N E_x^k (d_k^2 - d_{k-1}^2)}{\sum_{k=1}^N E_x^k (d_k - d_{k-1})}. \quad (12)$$

梁中的剪应力为 $\tau = Q \int_z^{z_N} E_x z dA / (\bar{E}_J b)$, 其中, Q 为梁中剪力; $\int_z^{z_N} E_x z dA$ 为离中性轴 z 以外到 z_N 部分横截面抗拉刚度对中性轴的静矩。

由以上计算公式及试验结果, 整理得到层合面抗剪强度、小梁弯曲强度, 如表 2 所示^[7]。

表 2 层合梁层合面抗剪强度数据

Table 2 Shear strength of interface

试件编号及 受试状态	试件 数目	最大应力 $\sigma_{max} / N \cdot mm^{-2}$		层合面剪应力 / $N \cdot mm^{-2}$
		σ_g	σ_b	
W44gx	4	581.54	99.08	5.17
W44bx	2	503.15	85.72	4.17
W45gx	2	659.78	126.34	7.86
W45bx	2	503.33	96.36	5.93
W46gx	4	570.74	116.62	8.54
W46bx	3	342.88	70.06	5.06
W64gx	5	907.00	127.90	4.75
W64bx	4	812.79	115.89	6.54
W65gx	5	815.31	127.36	8.62
W65bx	5	793.56	123.98	8.38
W66gx	4	888.58	154.14	12.23
W66bx	4	797.62	110.61	10.61

注: bx 为玻璃钢位于受拉区; gx 为钢材位于受拉区。

5 分析与结论

从图 5 及表 1 可以看出, 若摩擦副之间为滚动磨损 (图 5a), 则玻璃钢的磨损量较钢材的磨损量大, 如果规定罐道报废的表面磨损厚度为 1 mm, 则在滚动磨损情况下, 无论是玻璃钢复合材料罐道还是钢罐道, 其磨损寿命均能达到 30 年乃至更高, 当为滑动磨损时 (图 5b), 玻璃钢的耐磨性能优于钢材的耐磨性能。在实验室条件下, 钢材的磨损量对摩擦副之间压力响应较小, 即随着轴间压力的上升, 钢材的磨损量不明显, 而玻璃钢的磨损量上升幅度较大, 所以在采用玻璃钢复合材料做井筒罐道时, 对罐耳和复合材料罐道之间的预紧力应仔细测定, 其大小应慎重取舍, 以提高复合材料罐道的耐磨寿命。

另外, 从式 (3) 和式 (4) 可知, 当滚动磨损时, 罐耳与罐道接触中心的最大接触应力与其接触宽度和罐耳半径的平方根成反比, 所以, 要减少罐耳、罐道磨损量, 提高其耐磨寿命, 从理论上讲, 可以增加罐耳的厚度和半径。由于增加罐耳半径, 势必带来井筒直径的加大或井筒中的构件安全间隙的减小, 所以适当增加罐耳与罐道的接触宽度, 即增加罐耳厚度来减少罐耳与罐道的接触应力, 从而提高罐耳耐磨寿命的方法是可行的。

图 9 (玻璃钢位于受拉区) 是钢、玻璃钢复合材料层合梁典型的弯曲试验曲线。当荷载较小时, 试件处于弹性受力状态, 其表面没有任何损伤破坏现象。当荷载增加到某一值时, 图 9 中 a 点, 若玻璃钢位于受压区, 此时试件加载点附近区域存在显著的应力集中, 玻璃钢表面加载点附近开始由于表层纤维局部微屈曲所引起的横向裂纹^[7], 过了 a 点之后, 加载点附近受压区的裂纹随荷载的增加而向梁内深部扩展, 且第一条裂纹附近又出现新的横向裂纹, 纤维开始断裂。当压缩损伤扩展到一定深度时, 由于两种材料的粘接面上所受剪应力超过了粘接面的抗剪强度, 此时层合梁分层, 图 9 中 b 点对应的峰值荷载 P_b , b 点过后, 荷载迅速下降, 原来的层合梁变成两种材料的叠合梁, 共同承受荷载, 随着荷载再增加, 玻璃钢下部纤维被分次拉断, 使弯曲曲线出现了一个比一个低的台阶, 荷载再增大, 钢材进入塑性状态, 玻璃钢失去承载能力, 出现挠度不断增加、荷载基本不变的情形; 若玻璃钢位于受拉区, 从图 9 中 a 点开始, 即有少

数玻璃纤维被拉断。当断裂纤维达到一定数量时, 荷载达到极大值, 粘接面被剪坏, 试件分层, 荷载迅速下降到 c 点, 随后还是叠合梁继续承载, 尚未破坏的玻璃钢由于更多数量的纤维断裂而再次卸载, 这个后继的一次比一次低落的加载—卸载波动过程经过几个回合, 直到玻璃钢完全断裂。

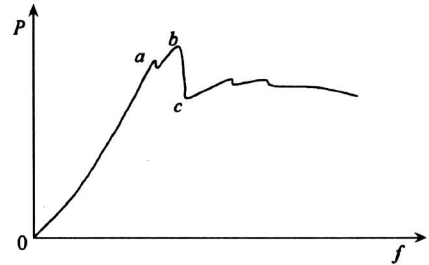


图 9 层合梁受弯特性曲线

Fig.9 Characteristic curve of the beam in bending test

从试验结果看, 试验得到的复合材料的弯曲强度即最大边缘应力偏高。原因在于材料分层时, 两种材料实际上已进入塑性状态。从这一点看, 层合面的抗剪强度不是层合梁使用的强度控制条件。

根据试验结果和以上分析, 可得到如下结论:

1) 鉴于滑动摩擦对罐道寿命影响较大, 所以正常提升时应尽量避免出现滑动磨损, 从表 1 看出, 玻璃钢 30 年寿命的最大 (滑动) 磨损厚度仅 1 mm 多, 考虑其老化后的强度折减及工厂成型要求和玻璃布的每层厚度, 为保证复合材料罐道的使用寿命超过 30 年, 建议复合材料罐道中玻璃钢的最小厚度为 4 mm。

2) 在保证玻璃钢板 4 mm 厚的前提下, 无论是玻璃钢的耐腐蚀寿命还是耐滚动磨损寿命, 都能达到 30 年乃至更高。

3) 在实验条件下, 钢材 (Q235) 的滚动磨损特性要好于玻璃钢, 而滑动磨损特性较玻璃钢差。

4) 实验表明, 罐耳和罐道之间接触应力每增加 50%, 罐道的磨损量会增加 100% (表 1), 所以, 罐耳和罐道间的最大接触应力是影响玻璃钢复合材料罐道耐磨寿命的重要因素。而在预紧力 P_s 和罐耳罐道材质 (K) 不变的情况下, 最大接触应力与罐耳和罐道间的接触宽度 (即罐耳厚度)、罐耳半径成反比, 所以为减小接触应力, 提高罐道耐磨寿命, 可以用适当增加罐耳的厚度的方法部分地加以解决。

5) 滑动磨损使罐耳、罐道耐磨损寿命显著缩短, 所以, 在罐耳罐道投入使用后, 要定期对罐耳的运行情况进行检查, 防止罐耳失去运转能力。

6) 复合材料罐道中, 钢、玻璃钢层合面的抗剪性能良好, 复合材料层合梁不会因层合面的抗剪能力不足而使两种材料性能的发挥受到限制。

7) 玻璃钢受力过程中, 会出现损伤、裂纹和某些层次的破坏, 而且破坏是不可逆过程。基体中的横向裂纹、纤维断裂、分层都会引起其强度和刚度的下降。

6 结语

复合材料罐道于1994年获国家实用新型专利, 1995年2月在邯郸矿务局郭二庄矿马项副井投入工业使用, 并进行了为期6个月的工业性试验, 目前已在郭二庄矿、徐州张小楼矿等12个井筒中安装6万米以上, 达到了耐腐、耐磨的目的, 并具有质量轻、抗静电、阻燃、外观平整光滑等优点, 完

全能满足井筒装备的安全使用要求。为井筒装备防腐技术开辟了一条新途径, 属国内外首创, 具有广阔的推广应用前景及明显的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 哈尔滨建筑工程学院. 玻璃钢结构分析与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981
- [2] 曾宪桃. 立井复合材料罐道耐腐蚀与耐磨损试验研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (5): 491~495
- [3] 徐芝伦. 弹性力学 (下册) [M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [4] 史天生, 田建胜. 刚性井筒装备的设计及作用力计算 [J]. 煤炭科学技术, 1990, (8): 5~8
- [5] 温诗铸. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990
- [6] 王震鸣. 复合材料力学和复合材料结构力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991
- [7] 曾宪桃. 立井复合材料罐道性能及其合理截面参数的研究 [D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 1993

The Research of Steel and Glass Fiber Reinforced Plastic Guide of Mining Shaft

Zeng Xiantao, Guo Jinpu

(1. Department of Civil Engineering and Architecture of Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering of China University of Mining Science and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

[Abstract] A new kind of composite guide that is made of steel and glass fiber reinforced plastic has been developed and researched in view of the present situation that the shaft furniture had been corroded seriously. The GFRP, the properties of which have been changed to have antistatic feature, fire resistance and abrasability, is used to replace the traditional steel partly. The corrosion resistance and wear-resisting property of the guide and the shear strength between the interface of steel and GFRP were researched. It is indicated by test and analyses that steel and GFRP can work in a coordinatied way. The corrosion resistance of the guide can meet the needs of mining shaft use, and the corrosion resistant life of the guide is the same as the wear-resisting life which are thirty years or above

[Key words] mining shaft; glass fiber reinforced plastic (GFRP); guide