

杏 劍

(北京建工新型建材科技股份有限公司, 100015, 北京)

**摘 要:** 钢筋与混凝土之间的粘结强度是保证两者能够共同工作、协同变形的基础, 超高性能混凝土具有超高的力学性能、延性和耐久性, 工程使用的钢筋种类越来越多, 研究超高性能混凝土与不同钢筋的粘结性能具有深远意义。本文研究了不同强度 (HRB 600、HRB 500、HRB 400) 和不同构造 (带肋钢筋、光圆钢筋) 钢筋与超高性能混凝土的粘结机理, 对比分析了它们和超高性能混凝土之间的粘结性能。

**关键词:** 超高性能混凝土; 带肋钢筋; 光圆钢筋; 粘结性能

中图分类号: TU 5

文献标志码:A

文章编号: 1000-4726(2023)19-2336-05

XING Jian

(Beijing Construction Engineering New Building Materials Technology Co., Ltd., 100015, Beijing, China)

**Abstract:** The bonding strength between steel bars and concrete is a basis for simultaneous action and deformation coordination. Ultra-high-performance concrete has ultra-high mechanical properties, ductility and durability. More and more steel bars are applied in engineering. Therefore, research on the bonding performance of ultra-high-performance concrete and steel bars is of far-reaching significance. The mechanism of bonding between steel bars with different strengths (HRB 600, HRB 500 and HRB 400) and structures (ribbed steel bars and round steel bars) and ultra-high-performance concrete was studied, and the bonding strength between them was compared and analyzed.

**Keywords:** ultra-high-performance concrete; ribbed steel bar; round steel bar; bonding performance

超高性能混凝土展现着超高的力学性能、延性和

耐久性等独特的优势，已经成功应用于桥梁、高层建筑、核电站等大型建筑中。钢筋混凝土结构是钢筋和混凝土两种材料的组合，利用两者的优势，使钢筋混凝土结构能够很好地承受各种荷载工况的作用。钢筋

收稿日期：2023-06-23

作者简介: 杏剑(1993—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士, e-mail: 1813649942@qq.com.

表 4 性能试验结果

等级	坍落度及扩展度/mm	28d 抗压强度/MPa	渗水高度/mm
C30	230/620	46.1	20.9
C35	235/630	48.6	17.6
C40	220/600	55.7	15.0
C45	225/610	59.9	10.3
C50	240/620	65.3	8.6

展绿色生态经济的理念，对保护环境和节约资源具有重要的意义。

### 3 结论

(1) 方案 1, 当掺入 5% 的加密硅灰, 水泥在总胶材中用量降低 10% 时, 混凝土前 60 d 龄期的抗压强度增长较慢, 至 90 d 龄期时抗压强度才超过方案 2 及空白组中相应混凝土的抗压强度。

(2) 方案 2, 当加密硅灰内掺 5%, 水泥在自身用量的基础上降低 10% 时, 制备的 C30~C60 各强度等级混凝土, 其早期抗压强度增长较快, 28d 后抗压强度增长相对较慢, 7d、28d、60d 抗压强度均大于方案 1 中相应混凝土的抗压强度。

(3) 在方案 1 和方案 2 中, 掺入加密硅灰混凝土抗水渗透性能与空白组混凝土基本相当, 且随着混凝土强度等级增大, 混凝土抗水渗透能力逐渐提高。

(4) 在实际工程应用中, 参考方案 2 确定了施工配合, 取得了良好的效益。

## 参考文献

- [1] 何小芳, 卢军大, 李小楠, 等. 硅灰对混凝土性能影响的研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(3): 423-428.
- [2] 李信贵. 论硅灰的特性及其在工程中的应用 [J]. 建筑技术, 2014, 45(S1): 50-53.
- [3] 张波. 不同形态硅灰在高强混凝土中的作用机理 [D]. 北京: 清华大学, 2015.

和混凝土是两种不同的材料,能够共同工作并能有效承受外部荷载。除了两者线膨胀系数相近以外,另一个重要原因是两者之间具有很好的粘结作用,能够协调变形,共同受力。但钢筋的种类也很多,光圆钢筋是用于钢筋混凝土和预应力混凝土结构的配筋,是工程结构中使用量最大的钢筋品种之一。

HRB 600 钢筋是一种新型热轧带肋钢筋,具有较高的强度和良好的延性,工程中采用 HRB 600 钢筋呈现出节省钢筋用量、方便钢筋布置等优点;HRB 500 钢筋在强度、延性、耐高温、低温性能、抗震性能和疲劳性能等方面都有很大的提升,在高层、超高层建筑、大跨度桥梁等高标准建筑工程中得到了良好的应用。目前在超高性能混凝土中的研究较多;HRB 400 在现代建筑的应用量已经占到相当的比例,在框架结构中梁钢筋的使用量占总工程的 36%,在混凝土板中的使用量占总工程量的 18%,主要应用是结合普通混凝土应用,比较经济、节省材料、提高强度。不同种类的钢筋与混凝土的粘结机理和粘结性能不同,值得探究。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

(1) 混凝土。混凝土采用超高性能混凝土,主要包括 52.5 普通硅酸盐水泥、硅灰、石英砂、玻璃砂、石英粉、钢纤维、水和减水剂,材料的化学成分和物理特性不变,粒径分布也相同,钢纤维和高效减水剂均由同一厂家提供。

(2) 钢筋。采用多种不同的钢筋,具体包括 HRB 600、HRB 500、HRB 400 和光圆钢筋等,对于钢筋进行了拉拔试验(图 1),得到钢筋的一些基本性能指标,通过与厂家提供的指标进行对比,检验钢筋是否达标及钢筋的性能问题带给试验的误差。

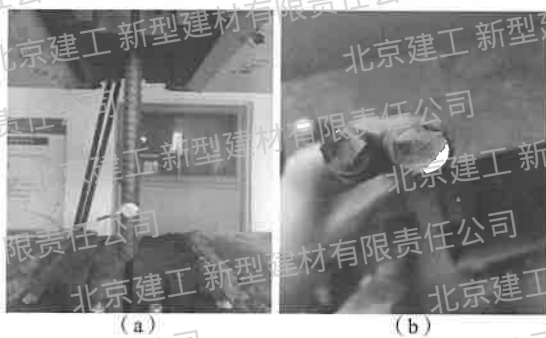


图 1 拉拔试验  
(a) 加载; (b) 拉断

### 1.2 配合比设计

本次研究水胶比为 0.19, 钢纤维体积掺量为

2%, 玻璃砂替换率确定为 50%。试验原材料配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比设计

kg/m<sup>3</sup>

项目	配合比
水泥	850
硅灰	195.5
石英砂	467.5
玻璃砂	467.5
石英粉	331.5
钢纤维 /2%	148.75 (13 mm)
水	161.5
减水剂	42.5

### 1.3 试件制作与养护

为使混凝土结构均匀,避免钢纤维结团,所有混凝土混合料均采用搅拌机进行搅拌。首先将水泥、硅灰、骨料、石英粉等干燥组分按表 1 所列混合料的配合比例倒入搅拌机内,低速搅拌 3 min 后准备加入水和减水剂;然后在一半用量的水中稀释一半用量的减水剂,在 2 min 内逐渐加入,在下一个 2 min 的搅拌过程中逐渐加入其余的水和减水剂;最后缓慢加入钢纤维,继续搅拌 8 min,直至纤维均匀分布。

拌和结束时,采用坍落度试验测定混凝土拌合物的工作性能,以表征其和易性。同时,将新鲜的混合料浇筑到安装好的钢筋模具中,在 20℃ 和 95%RH 下放置 24 h,然后在 20℃ 和 95%RH 的标准养护室中脱模养护至 28 d,每次试验制备 3 份重复样品,并以相应的平均值作为代表值。

### 1.4 拉拔试验

根据试验标准 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行中心拉拔试验。混凝土棱柱试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm。钢筋全部采用全埋深 150 mm,钢筋全长 50 cm。通过使用 1000 kN 的万能试验机在设计钢架上进行拉拔试验。钢筋受力端在位移控制下承受单调拉伸荷载。在钢筋的自由端安装千分表,测量记录钢筋的滑移量。钢筋与混凝土之间的平均粘结应力可通过式(1)计算:

$$\tau = \frac{F}{\pi dl} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为平均粘结应力;  $F$  为钢筋上施加的力;  $d$  为钢筋的直径;  $l$  为钢筋的埋置深度(粘结长度)。

## 2 不同强度钢筋与超高性能混凝土粘结滑移性能对比分析

### 2.1 试验结果

本试验通过控制变量法研究不同强度钢筋与超高性能混凝土的粘结性能,保持3种强度钢筋的直径(22mm)、埋深(150mm)、总长度(50cm)相同,试验加载方式(应力控制和位移控制)和加载速率(2MPa/s和2mm/min)一致,通过3组共9个试件的拉拔试验,得到的试验结果见表2。

表2 不同强度钢筋拉拔试验结果

试验组号	滑移量/mm	极限荷载/kN	粘结强度/MPa	破坏模式
HRB600-1	8.6	290.30	28.02	劈拉破坏
HRB600-2	7.8	281.54	27.17	劈拉破坏
HRB600-3	8.1	294.80	28.45	劈拉破坏
HRB500-1	7.5	262.69	23.42	劈拉破坏
HRB500-2	6.9	251.62	24.28	劈拉破坏
HRB500-3	0.8	242.70	25.35	劈裂破坏
HRB400-1	6.8	229.20	22.12	劈拉破坏
HRB400-2	6.4	221.80	21.41	劈拉破坏
HRB400-3	5.8	213.40	20.59	劈拉破坏

### 2.2 粘结滑移曲线

通过对每组试件数据进行处理,将荷载按照公式(1)换算为粘结强度,并将千分表读取的自由端钢筋滑移量和粘结强度对应起来,绘制每个试件的粘结滑移曲线,结果如图2~图4所示。

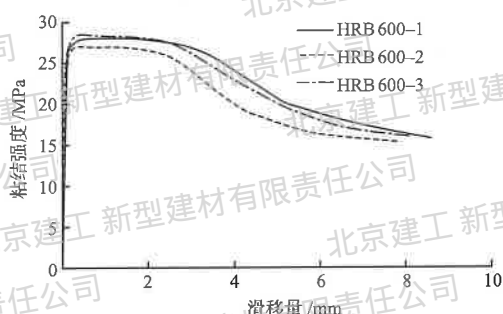


图2 HRB600的粘结滑移曲线

(1) HRB600钢筋。图2为HRB600试验组3个试件的粘结滑移曲线,发现最大荷载相差不大,即图中的粘结强度相差2~3MPa左右,滑移量也各不相同,主要取决于试件自身的因素,与荷载相关,但不是完全对应的关系,曲线下降段的斜率也有差异。曲线整体趋势相同,同时将粘结滑移曲线分为微滑移段、滑移段、加速滑移段和下降段4个阶段。

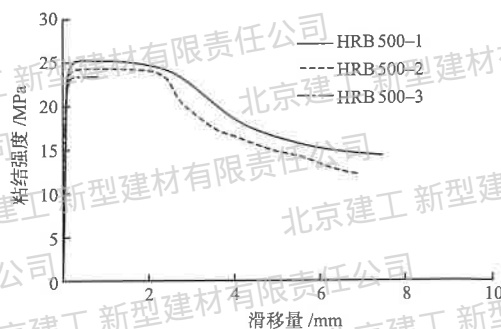


图3 HRB500的粘结滑移曲线

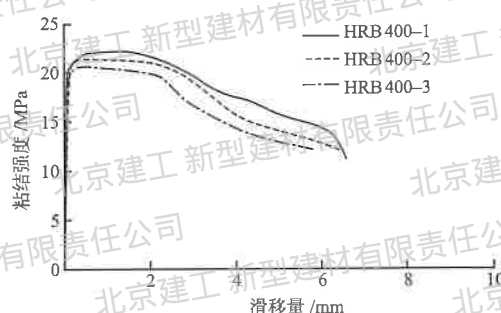


图4 HRB400的粘结滑移曲线

(2) HRB500钢筋。图3为HRB500试验组3个试件的粘结滑移曲线,发现试件1和试件2曲线整体趋势相同,可以将粘结滑移曲线分为微滑移段、滑移段、加速滑移段和下降段4个阶段,在最大粘结强度和滑移量等稍有不同。

(3) HRB400钢筋。图4为HRB400试验组3个试件的粘结滑移曲线,发现最大荷载相差不大,即图4中的粘结强度相差2~3MPa左右,滑移量也各不相同,主要取决于试件自身的因素,与荷载相关,但不是完全对应的关系,曲线下降段的形状各异。

### 2.3 粘结性能对比分析

根据上述粘结滑移曲线分析,在每组中选取1个试件进行对比分析,选取试件分别为HRB600-1、HRB500-2和HRB400-1。在以钢筋滑移量为横坐标、以换算的粘结强度为纵坐标的坐标系中进行对比,结果如图5所示。

从图5可以看出,3种不同强度等级钢筋与超高性能混凝土的粘结滑移曲线和时间-滑移量曲线形状相似,说明粘结机理相同,粘结滑移过程相似,但也有很多不同。

(1) 钢筋强度等级越高,极限荷载越大,即粘结强度越高。因为钢筋强度越高,其屈服强度就越高,在与超高性能混凝土的粘结滑移过程中,由于超高性能混凝土的强度比普通混凝土高得多,粘结力也会提高很多,在中心拉拔试验中,每组试验钢筋都超过了

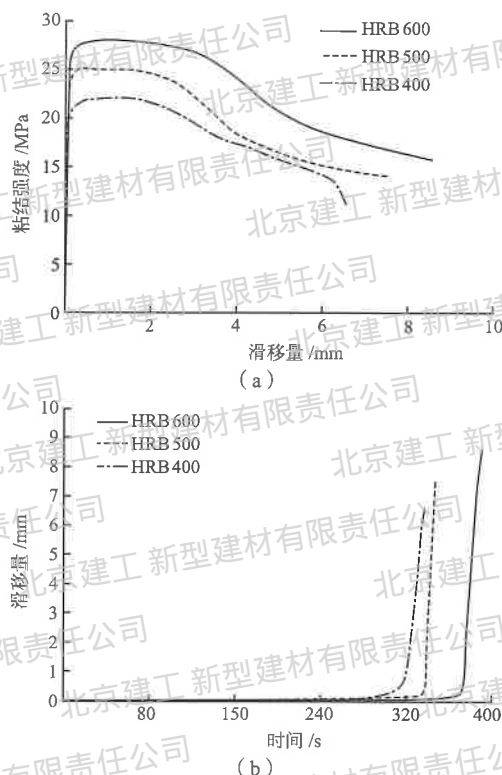


图5 每组试件对比

(a) 粘结滑移曲线对比; (b) 时间-滑移量曲线对比

屈服阶段,而强度低的钢筋会先进入屈服阶段,进入屈服阶段后,钢筋不再是弹性,发生塑性形变,极限荷载也随之提前到来,混凝土发生劈裂破坏,最终导致极限粘结强度的差异。

(2) 钢筋强度等级越高,其滑移量越大。因为钢筋强度带来的极限荷载增大,在到达极限荷载后,强度更高的钢筋和混凝土之间的粘结力更高,在混凝土破坏过程中会变慢。也就是说,混凝土从极限荷载衰减的时间更长,这个过程滑移量会更大。

(3) 钢筋强度等级越高,粘结滑移时间越长。是因为钢筋屈服强度越高,进入屈服阶段的时间更晚,而且在极限荷载后的衰减时间也 longer,合起来粘结滑移的时间更长。

综上对比分析,HRB 600 钢筋在粘结性能上和超高性能混凝土的粘结时间更长,且在加速滑移后也能和混凝土协同作用更长时间,能够使混凝土和钢筋二者更好地发挥协同受力作用。

### 3 不同构造钢筋与超高性能混凝土粘结滑移性能对比分析

#### 3.1 试验结果

试验通过控制变量法研究不同构造钢筋与超高性能混凝土的粘结性能,保持3种强度的钢筋的直径

(22mm)、埋深(150mm)、总长度(50cm)相同,试验加载方式(应力控制和位移控制)和加载速率(2MPa/s和2mm/min)一致,通过2组共6个试件的拉拔试验,得到的试验结果见表3。

表3 不同构造钢筋拉拔试验结果

试验组号	滑移量/mm	极限荷载/kN	粘结强度/MPa	破坏模式
HRB600-1	8.6	290.30	28.02	劈拉破坏
HRB600-2	7.8	281.54	27.17	劈拉破坏
HRB600-3	8.1	294.80	28.45	劈拉破坏
光圆-1	22.4	124.8	12.04	拔出破坏
光圆-2	20.6	116.6	11.25	拔出破坏
光圆-3	21.8	109.6	10.58	拔出破坏

#### 3.2 粘结滑移曲线

(1) 带肋钢筋。带肋钢筋 HRB 600 钢筋试验组3个试件的粘结滑移曲线如图2所示,发现最大荷载相差不大,即图中的粘结强度相差2~3MPa左右,滑移量也各不相同,主要取决于试件自身的因素,与荷载相关,但不是完全对应的关系,曲线下降段的斜率也有差异。曲线整体趋势相同,同时将粘结滑移曲线分为4个阶段,即微滑移段、滑移段、加速滑移段和下降段。

(2) 光圆钢筋。图6为光圆钢筋试验组3个试件的粘结滑移曲线。

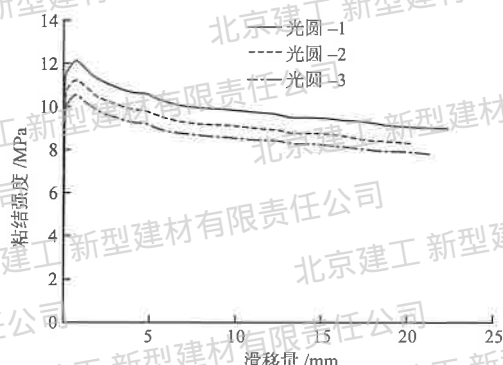


图6 光圆钢筋的粘结滑移曲线

由图6发现,曲线形状完全相同,极限荷载不相同,主要取决于混凝土试件自身的影响因素。将粘结滑移曲线分为3个阶段,即微滑移段、滑移段和下降段。1) 微滑移段是试验开始加载到钢筋产生0.001mm滑移量,粘结滑移曲线这一段是和x轴垂直的。根据混凝土的配合比不同,导致混凝土的强度不同,所以这段的分界点即起始滑移时间和起始滑移荷载都各不相同。这一阶段钢筋和混凝土的粘结力主要有摩擦力和化学附着力组成,混凝土基本没有裂缝产生。2) 滑移段是钢筋开始滑移到到达极限荷载之

前, 粘结滑移曲线在这一段是近似的直线段。开始滑移后初期, 滑移速度较慢, 这一段的滑移量基本都在1mm以内, 滑移时间较长, 因为持续到荷载几乎快达到极限荷载值。这一段主要是钢筋和混凝土之间的摩擦力。3) 下降段是到达极限荷载后开始卸载到试验停止时间, 粘结滑移曲线这一段几乎是规则的斜向下曲线。这段持续时间很长, 并且滑移量很大, 如果不手动停止, 整个钢筋可以完全拔出混凝土。达到极限荷载后, 混凝土有小裂缝产生, 但无大裂缝产生, 整个试验结束, 混凝土没有发生劈裂破坏。

### 3.3 粘结性能对比分析

根据粘结滑移曲线分析(图6), 在每组中选取1个试件进行对比分析, 选取试件HRB600-1和光圆-2, 同时以钢筋滑移量为横坐标, 以换算的粘结强度为纵坐标的坐标系中进行对比, 如图7所示。

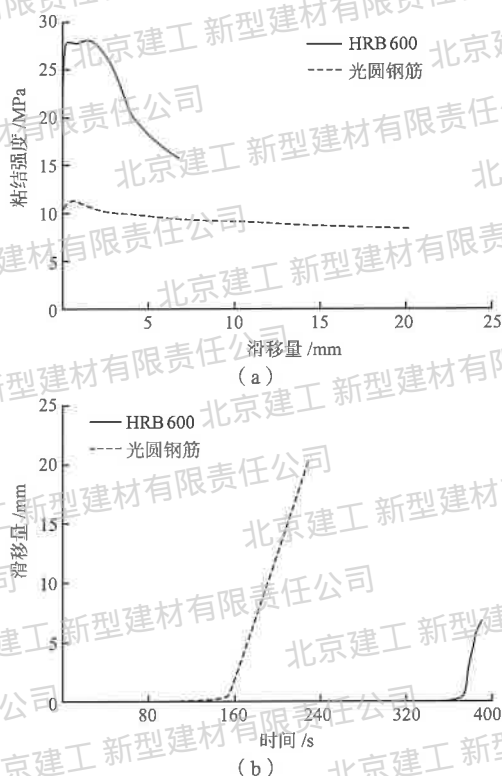


图7 每组试件对比

(a) 粘结滑移曲线对比; (b) 时间-滑移量曲线对比

从图7可以看出, 两种不同构造钢筋与超高性能混凝土的粘结滑移曲线在形状、滑移时间、极限荷载、粘结机理等不同。

(1) 粘结机理不同。带肋钢筋与混凝土之间有化学胶着力、摩擦力和机械咬合力, 光圆钢筋和混凝土只有化学胶着力和摩擦力, 因为它们之间的区别是有无肋, 带肋钢筋因为横肋的存在, 在滑移开始后靠机械咬合力继续保持和混凝土的粘结。光圆钢筋在摩

擦力减小后, 开始快速滑移。

(2) 粘结强度不同。带肋钢筋粘结强度比光圆钢筋高得多, 因为带肋钢筋存在的横肋使得能和混凝土靠着咬合力抵抗外力, 大幅提高了粘结强度, 比光圆钢筋提高了1倍多。

(3) 滑移量不同。带肋钢筋在滑移开始后, 滑移速度较慢, 达到极限荷载后开始下降, 下降到一定值后, 混凝土发生劈裂破坏, 由于其横肋使滑移过程中混凝土发生劈裂。光圆钢筋在到达极限荷载后荷载一直不停下降, 直到钢筋完全拔出混凝土为止。

(4) 粘结时间不同。由于带肋钢筋和混凝土存在机械咬合力, 抵抗滑移的能力更强, 抵抗滑移的时间更久。光圆钢筋到达极限荷载后, 抵抗滑移能力极弱, 钢筋快速滑移, 抵抗滑移时间较短。

综上对比分析所述, 带肋钢筋在粘结性能上更好, 与混凝土的粘结时间更长, 且在加速滑移后也能和混凝土作用更长的时间, 使超高性能混凝土更好地与钢筋二者发挥作用。

## 4 结论

通过4组粘结滑移试验, 研究不同强度钢筋和不同构造钢筋与超高性能混凝土的粘结机理, 得出以下结论。(1) 超高性能混凝土与不同钢筋的试验构件破坏模式, 几乎所有带肋钢筋发生的是劈拉破坏, 所有光圆钢筋发生的是拔出破坏。(2) 不同强度带肋钢筋粘结滑移曲线相似, 可以分为微滑移段、滑移段、加速滑移段和下降段4个阶段, 但在极限荷载、最大粘结强度、滑移量、滑移时间等特征参数上各不相同。(3) 光圆钢筋和带肋钢筋与超高性能混凝土的粘结机理不同。光圆钢筋和混凝土之间不存在机械咬合力, 粘结滑移曲线差别很大, 二者在极限荷载、滑移量都有很大区别。

### 参考文献

- [1] 张遥. 超高性能玻璃砂混凝土力学性能及断裂特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
- [2] 侍刚, 邵旭东, 高立强, 等. HRB400 钢筋与超高性能混凝土粘结性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 61-67.
- [3] 张颖. HRB 500 钢筋与活性粉末混凝土粘结性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(11): 63-66.
- [4] 安明喆, 张盟. 变形钢筋与活性粉末混凝土的粘结性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2007(2): 50-54.
- [5] 贾方方, 贺奎, 安明喆, 等. 钢纤维活性粉末混凝土与钢筋粘结性能研究[J]. 建筑技术, 2014, 45(12): 1094-1096.
- [6] 牛旭宁. 600MPa 级热轧带肋钢筋粘结锚固性能试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [7] 耿红斌, 穆卓辉, 于晓光. 光圆钢筋与混凝土界面粘结滑移本构模型研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9): 3064-3069.