

亚磺酸钠参与合成含硫化合物研究进展

黄国保 李秀英 罗金荣 罗志辉* 谭明雄*

(玉林师范学院 广西农产资源化学与生物技术重点实验室 玉林 537000)

摘要 亚磺酸钠(RSO_2Na)性质稳定、合成简单、价格低廉,在有机合成化学领域被广泛应用。综述了最近五年来亚磺酸钠在合成含硫化合物反应中的最新研究进展。分别叙述了其在有机反应中构建 S—C 键、S—杂键(S—S 键、S—N 键以及 S—P 键)的底物适应范围和反应机理,为今后亚磺酸钠的在有机合成中的应用提供参考。

关键词 亚磺酸钠; 含硫化合物; 反应机理

Recent Progress on Synthesis of Sulfur Compounds by Sodium Sulfinates

Huang, Guobao Li, Xiuying Luo, Jinrong Luo, Zhihui* Tan, Minxiong*

(Guangxi Key Laboratory of Agricultural Resources Chemistry and Biotechnology, Yulin Normal University, Yulin 537000)

Abstract Sodium sulfinates (RSO_2Na) is a kind of reagents with stable properties, simple synthesis and low price, which has been widely used in the field of organic synthesis chemistry. The recent progress (2014~2018) on synthesis of sulfur compounds by sodium sulfinates is summarized. In addition, the organic reactions on the building of S—X (S—S, S—N and S—P bond) and other types of reactions are described respectively, with their scope of substrates and reaction mechanism. It is hoped that this review can be referred to the future application in organic synthesis of sodium sulfinates.

Keywords sodium sulfinates; sulfur compounds; reaction mechanism

有机硫化合物广泛存在于自然界和生态系统中,种类繁多,存在形式多种多样。常见含硫化合物为磺酰氯、亚磺酸盐、亚磺酸、磺酸酯、砒、亚砒、硫醚、硫醇等。其中亚磺酸盐因其结构稳定、廉价易得,引起了化学家们的广泛关注。近年来,以芳基亚磺酸钠为底物参与的有机反应也不断被报道,特别是在过渡金属催化的偶联反应中的应用被有机化学家不断拓展^[1]。目前在过渡金属催化的偶联反应中,亚磺酸钠通常与金属催化剂作用实现 C—S 键断裂,为反应提供 C 源,从而进行新的 C—C 键的构筑^[1d,1e]。

近年来,随着有机硫化物的合成及应用范围的不断扩展,有机化学家们对亚磺酸钠的研究兴趣十分浓厚,亚磺酸钠在不同的反应催化体系及反应条件下为有机反应提供 S 源,可以实现 S—C 键, S—杂键的形成。本文对 2014 年~2018 年报道的以亚磺酸钠作为 S 源参与

的有机反应进行了归纳。根据反应类型,按照 S—C 键, S—杂键(S—S 键, S—N 键, S—P 键)的分类介绍了亚磺酸钠在不同反应中的应用及相关的反应机理,希望为今后有机反应中 S 源的引入提供参考。

1 亚磺酸钠作为硫源参与 S—C 键的形成

有机砒类化合物因其独特的生物活性和较大的合成效用受到了科学家们的青睐^[2]。因此,开发合成有机砒类化合物的通用方法是有机化学的一个重要目标。在众多的含硫有机化合物中,以亚磺酸钠作为一种新型的含硫底物原料来构筑 S—C 键成为近年来的研究热点。

1.1 S—C_{sp} 键的反应

2016 年, Kuhakarn 课题组^[3]报道了利用 I_2/TBHP 作为催化体系,亚磺酸钠作为 S 源,在 THF 作为溶剂中实

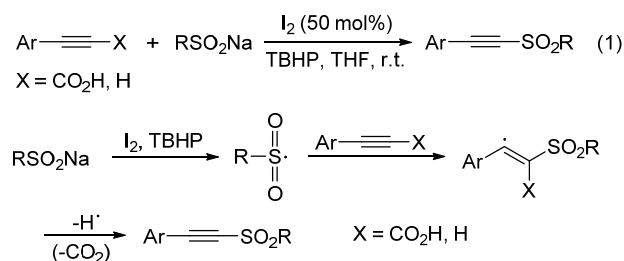
* Corresponding authors. E-mail: Lzhui_1980@163.com; tanmx00@163.com

Received September 25, 2018; revised October 28, 2018; published online November 25, 2018.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 21761033, 21565028), the Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2017GXNSFBA198211), and the Yulin Normal University Research Grant (No. 2018YJKY36).

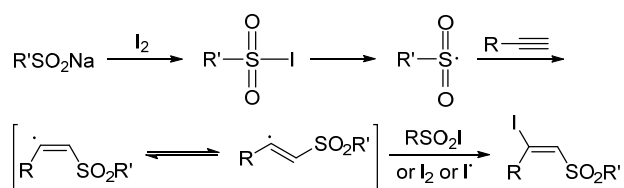
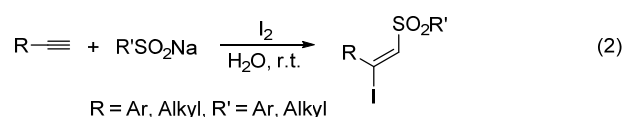
国家自然科学基金(Nos. 21761033, 21565028)、广西自然科学基金(No. 2017GXNSFBA198211)以及玉林师范学院科研(No. 2018YJKY36)资助项目。

现了对芳基炔(炔酸)的偶联, 室温下合成了一系列芳基(杂芳基)炔磺类衍生物(Eq. 1). 该方法反应条件温和, 无金属催化剂参与, 电子效应对该反应有一定的影响. 对反应机理进行了初步的探讨, 推断该反应可能为自由基机理(Scheme 1).



图式 1 可能的反应机理
Scheme 1 Possible reaction mechanism

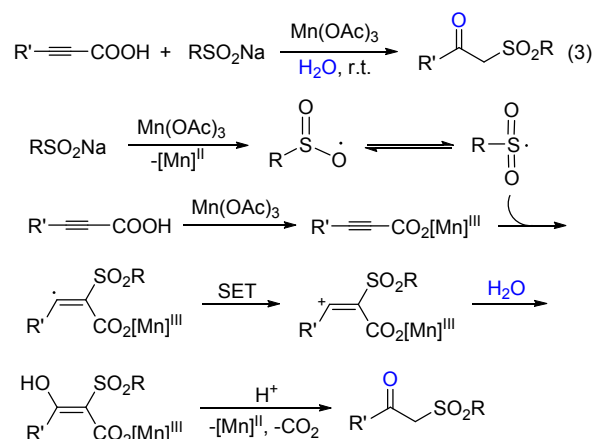
磺酰基取代的碘乙烯是一种有价值的合成结构单元, 在许多偶联反应中都有利用. Liu 小组^[4]用亚磺酸钠和芳基乙炔作为反应底物, 在 I_2 的催化作用下, 以水为溶剂在室温下实现了对各种炔烃进行选择性的碘磺酰基化(Eq. 2), 反应迅速, 方法简单, 得到主要产物为具有较高立体选择性的(*E*)- β -磺酰基-烯基碘(Scheme 2). 反应条件温和, 符合绿色环保理念. 该方法避免了传统方法中使用磺酰氯所带来的缺点, 各种芳基和烷基取代的炔烃在该反应条件下都有较高的产率. 对反应机理进行了初步研究, 使用不同剂量的 TEMPO 作为自由基捕捉剂, 产物随着 TEMPO 的增加而减少, 由此判断该反应可能为自由基机理.



图式 2 可能的反应机理
Scheme 2 Possible reaction mechanism

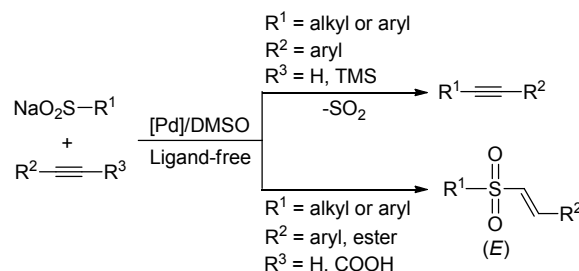
最近, 中山大学鲁桂和翁江课题组^[5]报道锰催化的芳基丙炔酸和亚磺酸钠的反应得到 β -羰基磺类化合物(Eq. 3), 其中水既作为反应溶剂也参与了反应, 为反应提供了 O 源. 反应条件温和, 后处理简单, 具有较强的合成实用价值(Scheme 3). 值得注意的是, 扩大反应底物至 10 mmol 时, 产物的收率也不会有较大的影响. 该

方法为以克级来制备 β -羰基磺类化合物提供了一条可行途径. 关于机理, 该小组提出在 $\text{Mn}(\text{OAc})_3$ 催化作用下, 亚磺酸钠失去一个电子生成自由基, 同时芳基丙炔酸与 $\text{Mn}(\text{OAc})_3$ 形成金属-有机中间体, 然后二者结合得到新的自由基中间体, 通过单电子转移(SET), 在水参与下失去质子和 CO_2 , 得到目标产物.



图式 3 可能的反应机理
Scheme 3 Possible reaction mechanism

2014 年, 华南理工大学江焕峰小组^[6]报道金属钯催化炔炔(炔酸)和亚磺酸钠交叉偶联反应选择性合成不对称(*E*)-烯基磺类化合物(Scheme 4). 反应无需添加任何配体, 但是不同的炔底物对反应的影响较大. 当炔烃为末端芳基乙炔或者芳基炔-TMS 时, 得到的是新的炔化合物, 当炔烃为烷基炔或者芳基丙炔酸时, 得到的是不对称烯基磺类化合物(Scheme 5). 该小组通过使用 D_2O , 确认了 H_2O 在整个反应过程中作为质子化试剂提供烯烃位的 H. 对反应机理也进行了探讨, 针对不同的炔底物的反应机理也不同.

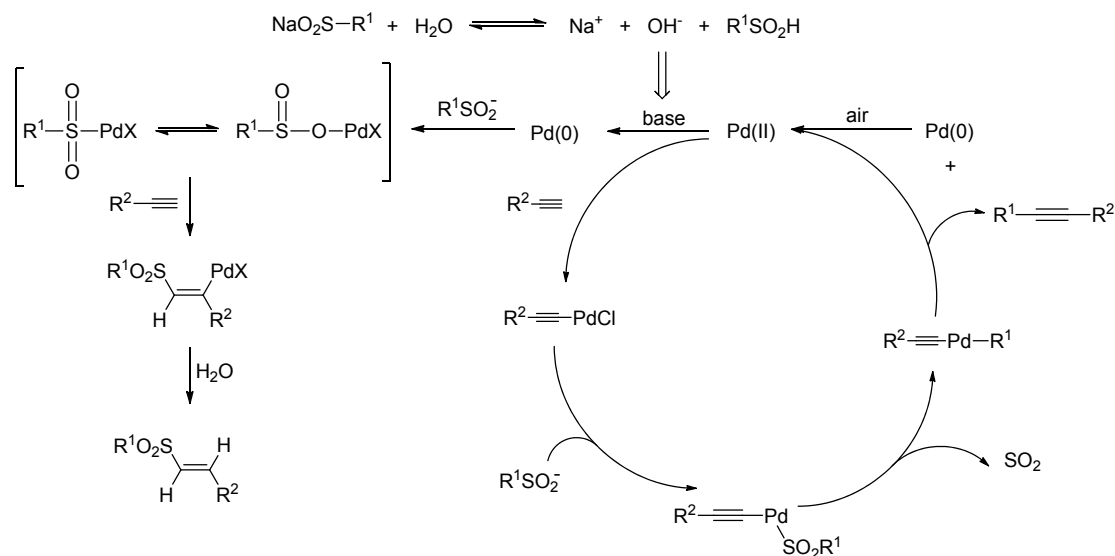


图式 4 钯催化炔炔(炔酸)和亚磺酸钠交叉偶联反应选择性合成不对称 *E*-烯基磺

Scheme 4 Synthesis of unsymmetrical internal alkynes or vinyl sulfones via palladium-catalyzed cross-coupling reaction of sodium sulfonates with alkynes

1.2 S—C_{sp2} 键的反应

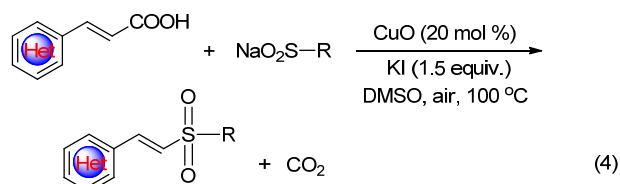
同年, 湖南大学郭灿城小组^[7]使用 CuO/KI 共催化



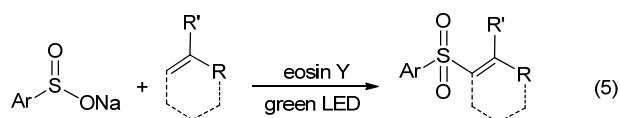
图式 5 可能的反应机理

Scheme 5 Possible reaction mechanism

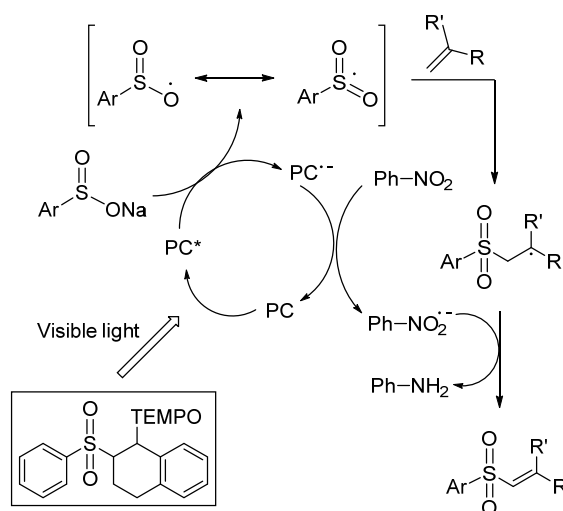
体系实现了对芳基(杂芳基)烯酸与亚磺酸钠的磺酰化, 合成了一系列具有高度立体选择性的(*E*)-烯磺类化合物(Eq. 4). 反应底物范围较广, 且不受取代基的影响, 为合成烯磺类化合物提供了一条较好的合成途径.



2015 年, König 小组^[8]报道利用有机染料黄色曙红 PC 作为光催化剂, 硝基苯作为氧化剂, 在光照下实现了芳基亚磺酸钠与烯烃得到烯磺类化合物(Eq. 5). 反应实现了无金属参与, 且底物适用范围较好(Scheme 6). 对于芳基亚磺酸钠, 无论芳环上连接是吸电子基团还是供电子基团, 反应依然具有较好的收率. 为了较好地探讨烯烃底物的适用范围, 反应溶剂更换成 DMF/H₂O 体系, 发现反应收率不受芳基烯烃取代基的影响. 对于反应机理, 该小组用分光光谱以及电化学法做了详细的研究, 并用 TEMPO 捕捉到反应过程中的自由基中间体, 证实其为自由基反应历程.



2017 年, Moradi 小组^[9]利用虫漆酶催化对苯二酚或茶儿酚衍生物与芳基亚磺酸钠进行氧化偶联反应(Scheme 7), 在磷酸缓冲溶液中室温下反应可以得到磺酰基苯二酚类化合物. 底物不同, 得到的产物类型也各



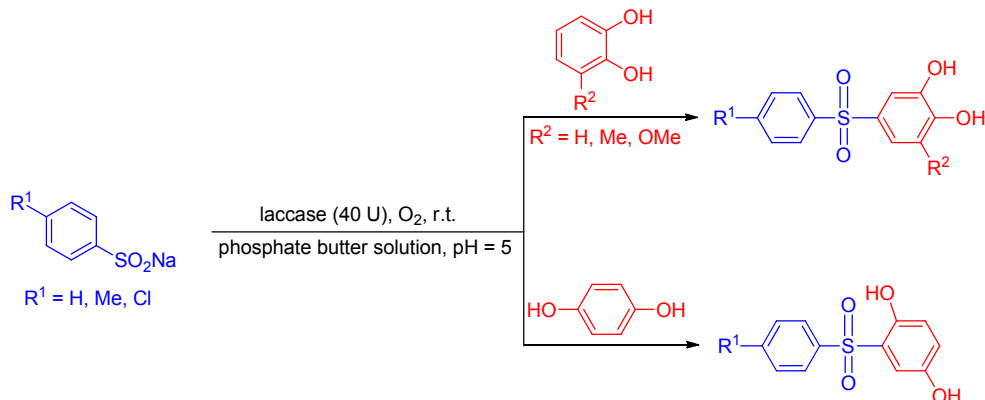
图式 6 可能的反应机理

Scheme 6 Possible reaction mechanism

不相同, 且底物也具有一定的局限性. 对于反应机理, 该小组提出首先酚在虫漆酶与氧气的催化氧化条件下形成不同的醌类中间体, 芳基亚磺酸钠在酸性条件下与醌类中间体加成后发生质子迁移得到目标产物.

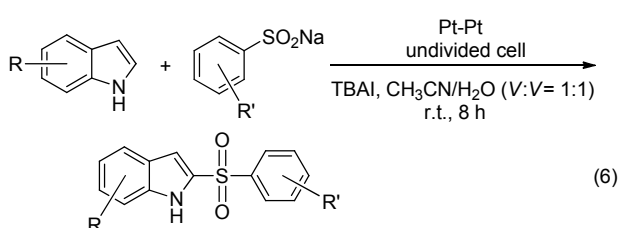
四川大学余孝其小组^[10]通过电化学催化法实现了对呋喃类化合物的磺酰化(Eq. 6). 对反应条件进行了详细的筛选, 用乙腈/水(*V*:*V*=1:1)作为反应溶剂体系, 在四丁基碘化铵的作用下, 无需加入任何氧化剂, 反应条件温和, 底物适用范围较广, 含不同取代基的亚磺酸钠在该反应条件下均表现出良好的活性.

同年, 华南理工大学江焕峰课题组^[11]利用自由基反应策略实现了银催化氧化 1,6-烯炔类衍生物与亚磺酸钠的环化反应(Eq. 7). 无论是芳基还是烷基亚磺酸钠都能

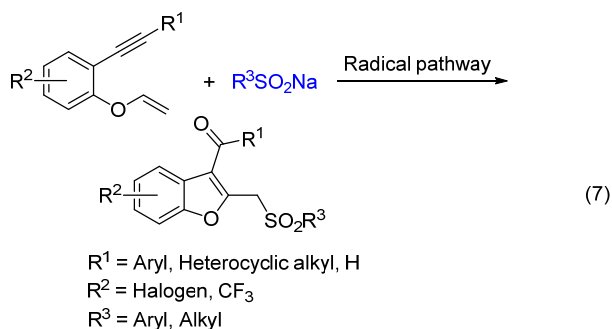


图式 7 虫漆酶催化对苯二酚或茶儿酚衍生物与芳基亚磺酸钠进行氧化偶联反应

Scheme 7 Laccase-catalyzed aerobic oxidative coupling of benzenediol derivatives with sodium benzenesulfonates



(6)

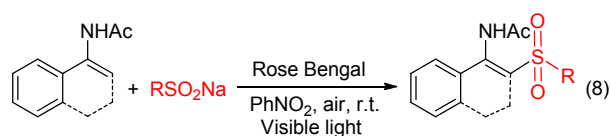


(7)

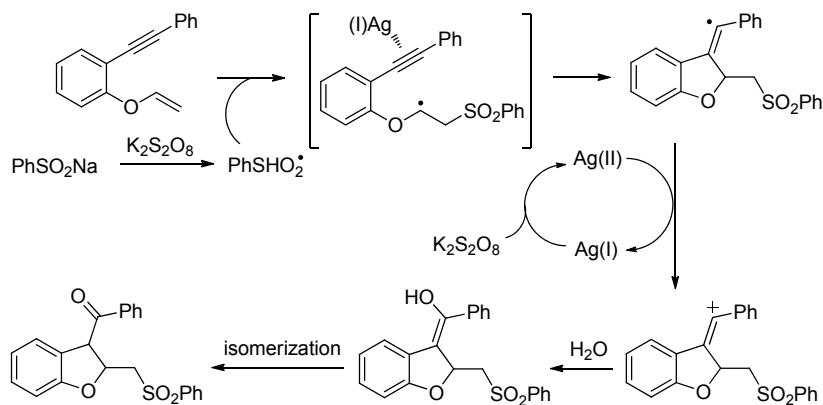
够很好的与一系列 1,6-烯炔类衍生物发生分子内环化反应得到香豆酮类产物. 一锅法同时实现了香豆酮骨架的形成以及磺酰化基团的引入, 体现该方法的高效和经济性(Scheme 8). 该小组提出了自由基反应机理. 亚磺酸

钠在 $K_2S_2O_8$ 作用下形成自由基中间体, 与 1,6-烯炔在银的催化作用下得到新的中间体, 进而转化成碳正离子中间体, 在水的参与下发生分子内异构化得到目标产物. 在反应体系中加入自由基捕获剂 TEMPO 或自由基抑制剂 BHT, 反应都不能发生. 通过 ^{18}O 原子示踪法, 发现目标分子中的氧原子来自于水.

2018 年, 同济大学张荣华课题组^[12]利用可见光诱导-氧化烯胺与亚磺酸钠发生自由基交叉偶联反应构建 β -乙酰氨基芳基磺类化合物(Eq. 8). 反应以有机染料玫瑰红(RB)作为光催化剂, 硝基苯($PhNO_2$)和空气作为氧化剂, 在 DMF/ H_2O 作为反应溶剂体系中, 光照(5 W)诱导下能够较高产率得到各种 β -乙酰氨基芳基磺类(Scheme 9). 该小组详细地探讨了反应的机理, 通过加入自由基捕获剂 TEMPO 以及各种对比实验证实其为自由基反应历程.

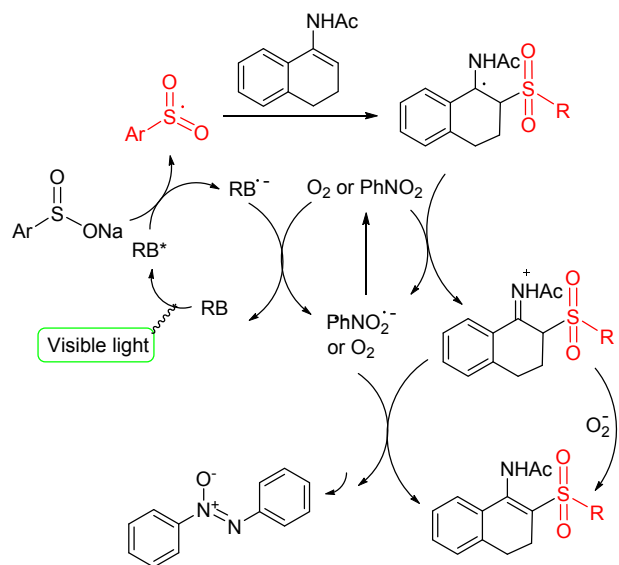


(8)



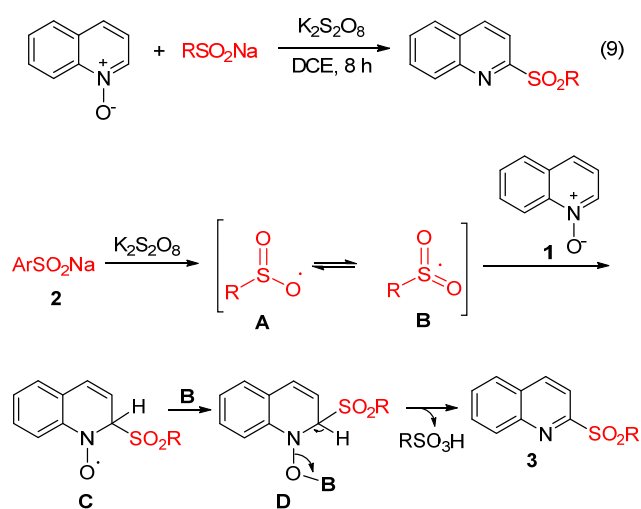
图式 8 可能的反应机理

Scheme 8 Possible reaction mechanism



图式 9 可能的反应机理
Scheme 9 Possible reaction mechanism

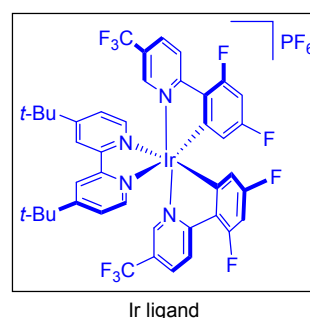
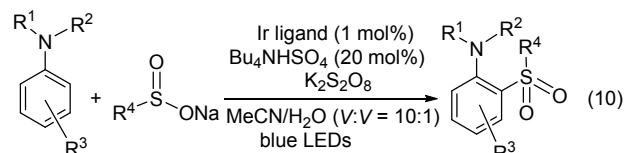
同年, He 小组^[13]利用当量的 $K_2S_2O_8$ 作为催化剂, 以喹啉氮氧化物为反应底物, 可以与一系列的芳基亚磺酸钠反应实现了喹啉的磺酰化(Eq. 9), 该反应无金属, 无任何还原剂参与. 亚磺酸钠不仅作为反应底物提供含硫试剂, 而且充当了活化剂的角色. 反应催化剂单一, 且不受底物取代基效应的影响(Scheme 10). 对于反应机理, 该小组提出了自由基反应历程. 在 $K_2S_2O_8$ 的作用下, 亚磺酸钠形成的氧自由基 A 通过电子转移(SET)得到硫自由基 B, 然后与底物喹啉氮氧化物用过米尼希自由基反应(Minisci-like radical reaction)得到新的中间体 C; 在另外一分子自由基 B 的加成作用下得到自由基 D, 然后释放出一分子磺酸得到目标产物.



图式 10 可能的反应机理
Scheme 10 Possible reaction mechanism

Willis 小组^[14]报道了可见光催化活化亚磺酸钠与苯

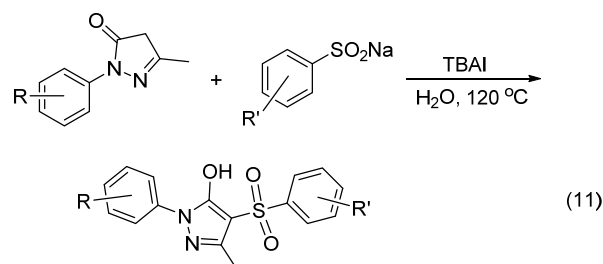
胺类化合物的磺酰化反应(Eq. 10). 在光诱导催化剂铱金属和 $K_2S_2O_8$ 作用下, 以乙腈与水($V:V=10:1$) 作为混合溶剂, 光照下一步反应直接得到了一系列苯胺的磺酰化. 反应条件温和, 底物适用范围较广, 且反应不受底物取代基的影响. 该小组提出了光诱导自由基反应机理, 也对其进行了较为详细的研究探讨.



1.3 S—C_{sp3}键的反应

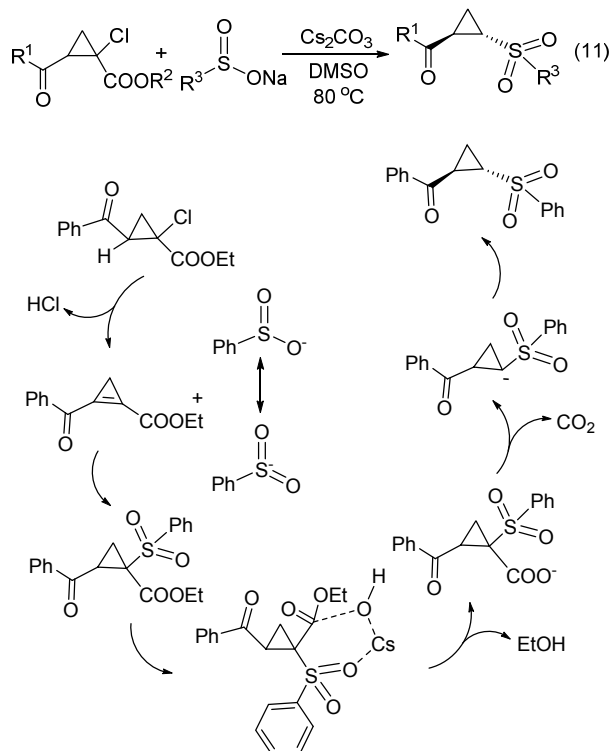
C_{sp^3} —H 键较 C_{sp^2} —H 键更为稳定, 在一定条件下不易断裂, 所以不易参与到有机反应当中. 自 Lam 小组^[15]报道芳基亚磺酸钠与卤代烷烃在一定条件下发生磺酰化反应以来, 就很少有文献报道^[16].

Wang 小组^[17]报道在水作为溶剂中四丁基碘化胺催化的芳基吡唑酮和亚磺酸钠的磺酰化反应, 能够得到一系列较高产率的磺酰化吡唑酮类化合物(Eq. 11). 然而该反应对底物具有一定的局限性, 只有芳基吡唑酮与芳基亚磺酸钠才能够发生反应. 对反应机理也做了一定的探究, 当加入 2 equiv. 的 TEMPO 时, 该反应不能够发生, 推测该反应可能为自由基反应历程.



2016 年, 华中科技大学龚跃法课题组^[18]报道了在碱 $CsCO_3$ 的作用下亚磺酸钠和氯代环丙烷酯作为反应底物, 通过取代脱羧反应一步实现了环丙烷的磺酰化(Eq. 11). 反应条件温和, 底物的适用性较好, 目标产物产率较高. 其反应机理(Scheme 11)是氯代环丙烷酯首先通过分子内的 1,2-消除反应失去 HCl 得到活泼的环丙烯

中间体, 在亚磺酸钠的进攻下发生特定的 1,4-迈克尔加成反应, 然后水解脱羧得到目标产物。



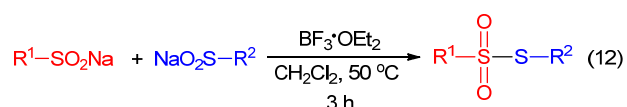
图式 11 可能的反应机理
Scheme 11 Possible reaction mechanism

2 亚磺酸钠作为硫源参与 S—C 键的形成

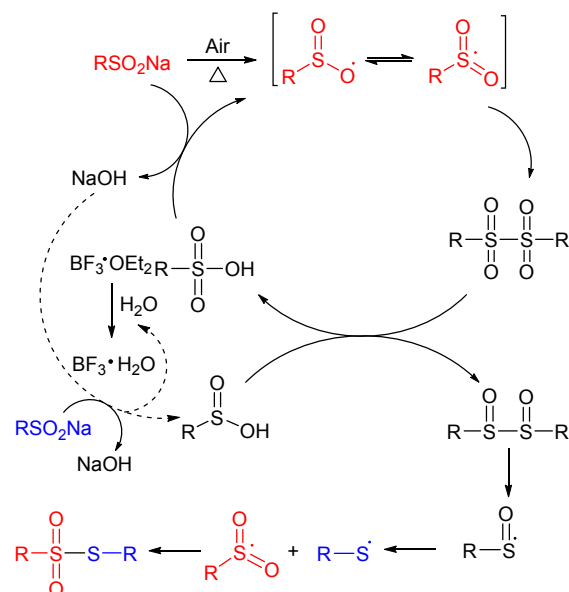
已有不少文献报道了亚磺酸钠作为一种新型的含硫底物原料来构筑 S—C 键, 用来构筑 S—杂键的报道却相对较少。而 S—杂键广泛存在于天然活性有机物、药物分子的骨架中, 例如硫代磺酸、硫醚、磺酰胺、二硫化物等。因此寻找高效构筑 S—杂键的方法也逐渐引起了化学家们的关注。

2.1 S—S 键的反应

华南师范大学汪朝阳小组^[19]报道 $\text{BF}_3 \cdot \text{OEt}_2$ 催化亚磺酸钠偶联反应合成对称/不对称的硫代磺酸, 实现了一种利用亚磺酸钠构建 S—S 键的新方法(Eq. 12)。该反应条件温和, 无金属催化剂的参与; 反应底物不受取代基的影响, 无论是芳基还是烷基亚磺酸钠都能够有较好的反应, 产率较高(Scheme 12)。加入 2 equiv. 的 TEMPO, 原反应明显被抑制, 推测该反应可能是通过自由基途径进行。

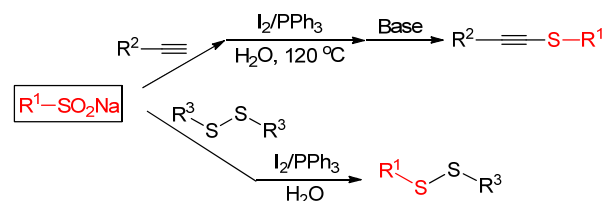


南京理工大学易文斌小组^[20]最近报道了以芳基亚



图式 12 可能的反应机理
Scheme 12 Possible reaction mechanism

磺酸钠为硫源一锅两步法高效合成炔硫醚和不对称二硫醚化合物的新方法(Scheme 13)。该方法以水作为溶剂, 具有无嗅、产率高和无需使用过渡金属催化剂和有机溶剂等优点。芳基亚磺酸钠在 I_2/PPh_3 体系中首先与炔烃反应形成 β -烯硫化合物, 在碱性条件下进一步脱 HI 得到最终的目标产物炔硫醚。此外, 同样在水相 I_2/PPh_3 体系中, 芳基亚磺酸钠可以与对称二硫醚反应合成不对称硫醚。

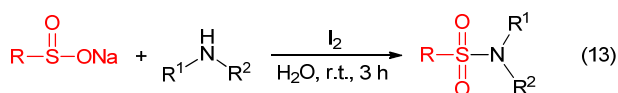


图式 13 芳基亚磺酸钠为硫源一锅两步法高效合成炔硫醚和不对称二硫醚化合物

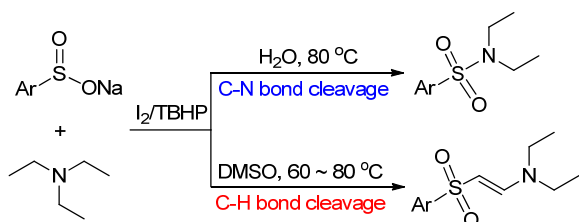
Scheme 13 Synthesis of alkynyl sulfides and asymmetric disulfides from sodium arylsulfinate

2.2 S—N 键的反应

华南理工大学江焕峰小组^[21]报道了 Cu 金属催化亚磺酸钠与一级胺、二级胺的反应, 通过 S—N 键的构筑来合成磺酰胺类化合物。为了克服该反应条件苛刻, 金属催化剂以及有毒溶剂使用等缺陷, 该小组^[22]对反应进行了优化。2015 年报道了 I_2 催化亚磺酸钠与一级胺、二级胺合成磺酰胺的反应(Eq. 13)。以水作为反应介质, 室温下反应 3 h 可以得到较高产率的磺酰胺类化合物。反应不受底物影响, 后处理简单, 环境友好, 为磺酰胺类有机物的合成提供了一条便利的途径。



2016 年, 华南理工大学袁高清小组^[23]报道了 I_2 催化亚磺酸钠与三级胺的反应, 进一步拓宽了合成磺酰胺底物的范围(Scheme 14). 该小组以亚磺酸钠和三乙胺为反应底物, 在 I_2/TBHP 的催化体系下, 通过改变反应溶剂实现分子间的磺酰化以及得到 β -芳基烯胺类化合物(Scheme 15). 当向反应体系中加入 0.6 mmol TEMPO 时, 反应被抑制, 推测该反应可能为自由基反应类型. 对于反应机理进行了详细的研究, 在 TBHP 的作用下先将三级胺的 α -H 夺走形成自由基, 通过极化作用后失去电子得到 N 正离子中间体, 当水作为反应介质时, N 正

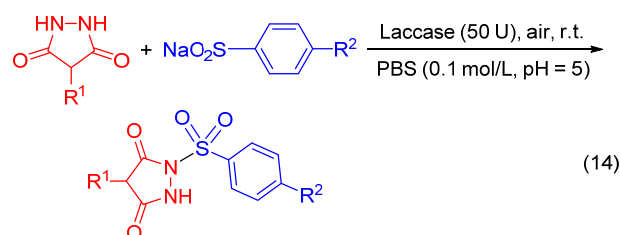


图式 14 I_2 催化亚磺酸钠与三级胺的反应合成磺酰胺
Scheme 14 I_2 -catalyzed synthesis of sulfonamides from sodium sulfonate and tertiary amines

离子中间体分解得到二级胺以及对应的醛, 二级胺继续

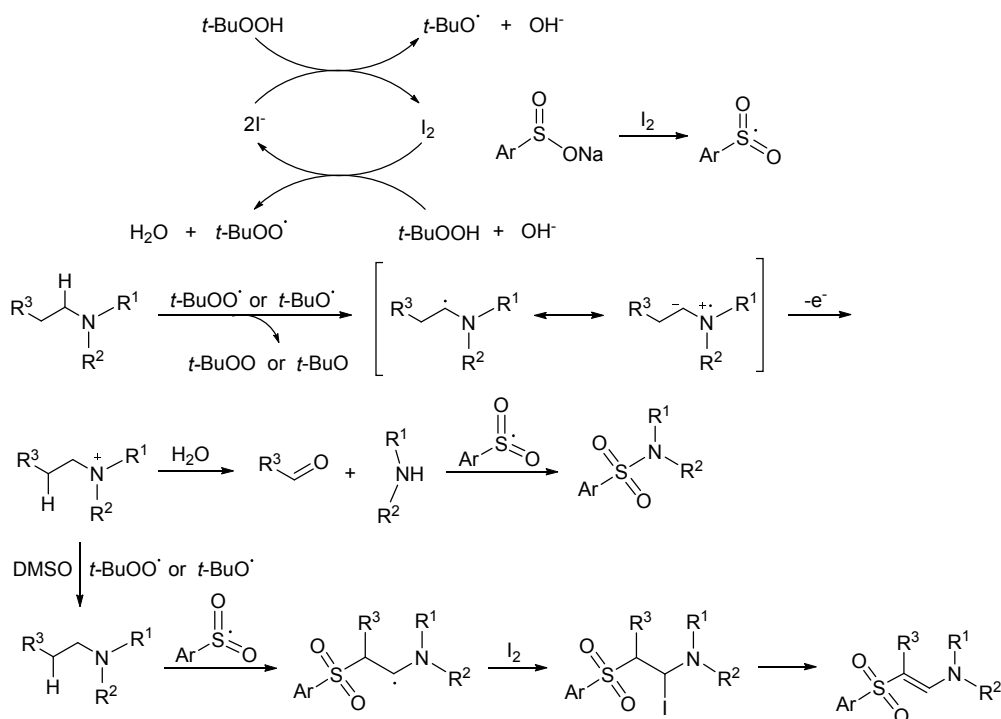
与 S 自由基结合得到磺酰胺类化合物; 当 DMSO 作为反应介质时, N 正离子中间体失去质子与 S 自由基结合得到 β -芳基烯胺类化合物.

Mallakpour 小组^[24]报道酶催化 4-取代脲唑和亚磺酸钠得到芳基磺酸三唑类有机化合物的反应(Eq. 14). 以氧气作为氧化剂, 反应条件温和, 催化剂高效, 可以得到较高产率的目标产物, 实现了一种构建 S—N 键的新方法.

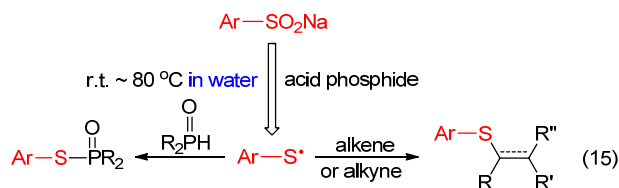


2.3 S—P 键的反应

南京理工大学易文斌小组在亚磺酸钠参与的有机反应中有广泛的兴趣. 2017 年该小组^[25]继续报道了 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{PPh}_3$ 作为催化体系, 在水介质中芳基亚磺酸钠分别与炔烃, 烯烃以及氧化膦等的反应, 不仅实现了 S—C 键的构筑, 而且也初次合成了含有 S—P 键的有机化合物(Eq. 15). 反应避免使用金属及有机溶剂, 环境友好. 对于反应机理, 该小组通过了对比实验以及理论化学计算等方法推测该反应可能为自由基反应机理.



图式 15 可能的反应机理
Scheme 15 Possible reaction mechanism



3 展望

亚磺酸钠能够在有机反应中较好地引入 S 源, 合成许多具有药物活性的含硫有机物, 具有重大的研究意义。亚磺酸钠具有稳定、廉价的特点, 在有机合成化学领域有广泛的应用。但目前研究亚磺酸钠较多的是为有机反应提供 C 源构筑 C—C 键, 如何通过改变反应条件实现 S—C 键、S—杂键的形成将是亚磺酸钠参与有机反应的主要研究方向, 是今后硫化学中有意义的研究内容。

References

- [1] (a) Reddy, M.; Reddy, S.-P.; Sreedhara, B. *Adv. Synth. Catal.* **2010**, 352, 1861.
(b) Li, Y.; Cheng, K.; Lu, X.; Sun, J. *Adv. Synth. Catal.* **2010**, 352, 1876.
(c) Rao, H.; Yang, L.; Shuai, Q.; Lia, C. *Adv. Synth. Catal.* **2011**, 353, 1701.
(d) Li, S. M. S. *Thesis*, Zhengzhou University, Zhengzhou, **2015** (in Chinese).
(李莎, 硕士论文, 郑州大学, 郑州, **2015**).
(e) Hui, R.; Zhang, S.; Tan, Z.; Wu, X.; Feng, B. *Chin. J. Org. Chem.* **2017**, 37, 3060 (in Chinese).
(惠人杰, 张士伟, 谭政, 吴小培, 冯柏年, 有机化学, **2017**, 37, 3060.)
(f) Ueda, M.; Hartwig, J.-F. *Org. Lett.* **2010**, 12, 92.
(g) Maloney, K.-M.; Kuethe, J.-T.; Linn, K. *Org. Lett.*, **2011**, 13, 102
- [2] (a) Uttamchandani, M.; Liu, K.; Panicker, R. C.; Yao, S. Q. *Chem. Commun.* **2007**, 1518.
(b) Steert, K.; El-Sayed, I.; Van der Veken, P.; Krishtal, A.; Van Alsenoy, C.; Westrop, G. D.; Mottram, J. C.; Coombs, G. H.; Augustyns, K.; Haemers, A. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **2007**, 17, 6563.
(c) Ettari, R.; Nizi, E.; Francesco, M. E. D.; Dude, M.-A.; Pradel, G.; Vičik, R.; Schirmeister, T.; Micale, N.; Grasso, S.; Zappalà, M. *J. Med. Chem.* **2008**, 51, 988.
(d) Curti, C.; Laget, M.; Carle, A. O.; Gellis, A.; Vanelle, P. *Eur. J. Med. Chem.* **2007**, 42, 880.
- [3] Meesin, J.; Katrun, P.; Pareseecharoen, C.; Pohmakotr, M.; Reutrakul, V.; Soorukram, D.; Kuhakarn, C. *J. Org. Chem.* **2016**, 81, 2744.
- [4] Sun, Y.; Abdokader, A.; Lu, D.; Zhang, H.; Liu, C. *Green Chem.* **2017**, 19, 1255.
- [5] Xiong, Y.; Weng, J.; Lu, L. *Adv. Synth. Catal.* **2018**, 360, 1611.
- [6] Xu, Y.; Zhao, J.; Tang, X.; Wu, W.; Jiang, H. *Adv. Synth. Catal.* **2014**, 356, 2029.
- [7] Jiang, Q.; Xu, B.; Jia, J.; Zhao, A.; Zhao, Y.; Li, Y.; He, N.; Guo, C. *J. Org. Chem.* **2014**, 79, 7372.
- [8] Meyer, A.; Jäger, S.; Hari, D.; König, B. *Adv. Synth. Catal.* **2015**, 357, 2050.
- [9] Habibi, D.; Rahimi, A.; Rostami, A.; Moradi, S. *Tetrahedron Lett.* **2017**, 58, 289.
- [10] Feng, M.; Xi, L.; Chen, S.; Yu, X. *Eur. J. Org. Chem.* **2017**, 2746.
- [11] Wu, W.; Yi, S.; Huang, W.; Luo, D.; Jiang, H. *Org. Lett.* **2017**, 19, 2825.
- [12] Sun, D.; Zhang, R. *Org. Chem. Front.*, **2018**, 5, 92.
- [13] Xie, L.; Peng, S.; Liu, F.; Chen, G.; Xia, W.; Yu, X.; Li, W.; Cao, Z.; He, W. *Org. Chem. Front.* **2018**, 5, 2604.
- [14] Johnson, T.; Elbert, B.; Farley, A.; Gorman, T.; Genicot, C.; Lallemand, B.; Pasau, P.; Flasz, J.; Castro, J.; MacCoss, M.; Dixon, D.; Paton, R.; Schofield, C.; Smith, M.; Willis, M. *Chem. Sci.* **2018**, 9, 629.
- [15] Li, W.; Chen, Y.; Lam, Y. *Tetrahedron Lett.* **2004**, 45, 6545.
- [16] Xiao, F.; Liu, C.; Yuan, S.; Huang, H.; Deng, G. *J. Org. Chem.* **2018**, 83, 10420.
- [17] Li, L.; Dong, D.; Hao, S.; Wang, Z. *Tetrahedron Lett.* **2018**, 59, 1517.
- [18] Zhu, Y.; Gong, Y. *Tetrahedron* **2016**, 72, 3436.
- [19] Cao, L.; Luo, S.; Jiang, K.; Hao, Z.; Wang, B.; Pang, C.; Wang, Z. *J. Org. Chem.* **2018**, 20, 4754.
- [20] Lin, Y.; Yi, W. *Chin. J. Org. Chem.* **2018**, 38, 1207. (in Chinese).
(林雅玫, 易文斌 有机化学, **2018**, 38, 1207.)
- [21] Tang, X.; Huang, L.; Qi, C.; Wu, X.; Wu, W. Q.; Jiang, H. *Chem. Commun.* **2013**, 49, 6102.
- [22] Pan, X.; Gao, J.; Liu, J.; Lai, J.; Jiang, H.; Yuan, G. *Green Chem.* **2015**, 17, 1400.
- [23] Lai, J.; Chang, L.; Yuan, G. *Org. Lett.* **2016**, 18, 3194.
- [24] Rahimi, A.; Habibi, D.; Rostami, A.; Zolfigol, M.; Mallakpour, S. *Tetrahedron Lett.* **2018**, 59, 383.
- [25] Lin, Y.; Lu, G.; Wang, G.; Yi, W. *J. Org. Chem.* **2017**, 82, 382.

(Li, L.; Fan, Y.)