

电化学绿色合成 β -酮砜的新方法

王 超, 阿布都热西提·阿布力克木*

新疆师范大学化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2023年4月13日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

通过电化学合成, 在三水合高氯酸锂($\text{LiClO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)作为电解质的条件下, 末端炔烃和苯亚磺酸钠类化合物在35°C的条件下反应生成相应的 β -酮砜类化合物, 反应中依靠电子转移促进反应进行, 在无过渡金属催化、无外部添加剂的条件下提供了9种 β -酮砜, 产率为34%~62%。该反应体系简单、高效, 采用了绿色合成方法及溶剂, 具有操作处理简单、条件温和等优点, 所有合成产物均经 ^1H NMR、 ^{13}C NMR结构确证。

关键词

β -酮砜, 有机电化学合成, 电子转移, 绿色合成

A New Method for Electrochemical Green Synthesis of β -Ketosulfone

Chao Wang, Abudurexit Abulikemu*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi Xinjiang

Received: Apr. 13th, 2023; accepted: May 24th, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

Through electrochemical synthesis, in the presence of lithium perchlorate trihydrate ($\text{LiClO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) as an electrolyte, terminal alkynes and sodium benzene sulfonate compounds react at 35°C to form corresponding β -Ketosulfone compounds, which rely on electron transfer to promote the reaction, provide 9 without transition metal catalysis and external additives β -Ketosulfone, with a yield of 34%~62%. The reaction system is simple, efficient, uses green synthesis methods and solvents, and has the advantages of simple operation and mild conditions. All synthesized products have been confirmed by ^1H NMR and ^{13}C NMR analysis.

*通讯作者。

Keywords

β -Ketosulfone, Organic Electrosynthesis, Electron Transfer, Green Synthesis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

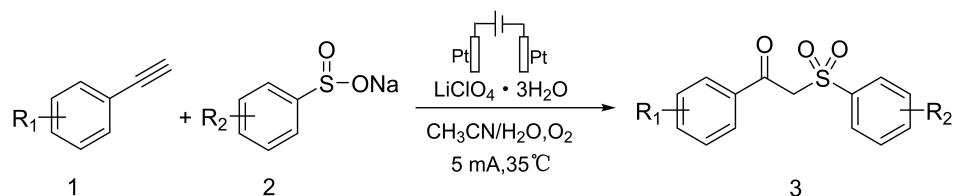
砜衍生物的合成是有机化学的一个探索方向, 在生物活性化合物中有着广泛的应用[1] [2] [3]。 β -酮砜的创新制备途径一直是有机化学领域的热点问题, 特别是随着电催化有机合成的发展。基于电催化自由基磺酰化形成 C-S 键的文章的增长是显著的。 β -酮砜是有机化学中一类非常重要的含氧化合物[4], 用途极为广泛。由于其特殊的生物学性质, 以及广泛应用于合成天然产物[5]和各种重要的有机化合物, 如乙烯砜、烯、酮和具有光学活性的 β -羟基砜, 它极大地吸引了有机合成化学家们以及激发了大家的研究兴趣[6]。鉴于其具有广泛的用途, β -酮砜的合成已经取得了阶段性的突破。常见合成 β -酮砜的方法有: 硝基乙烷引发[7]、O₂ 氧化[8]、AgNO₃/K₂S₂O₈ 体系催化[9]、FeCl₃/K₂S₂O₈ 体系催化[10]、双蛋白体系催化[11]、光催化[12]、重氮砜与醛的反应[13]、IBX/I₂ [14], 以及磺酰氯与芳基乙炔的反应[15]。然而, 这些方法大部分都存在局限性, 比如需要使用昂贵的氧化剂、反应条件苛刻、副产物较多、需要多步反应来合成等。因此, 发展一种不使用金属催化剂和外加氧化剂的合成方法来合成 β -酮砜具有十分重要的意义。电化学合成是采用电子为氧化还原试剂、不使用金属催化剂便可发生反应的合成方法, 不仅后处理简单, 而且很大程度上可以减少对环境的污染, 是一种非常绿色的合成方法。基于本课题组前期研究工作[16], 本工作利用电化学方法促使末端炔烃和金属芳烃亚硫酸盐合成 β -酮砜, 该反应避免了使用金属催化剂和外部添加剂。该研究具有操作简单、反应条件温和、对环境绿色友好等特点。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

GRX199-HY3005MT 型直流稳压电源; RE-52C 型旋转蒸发仪(上海兴创仪器设备有限公司); TBZ-14H 型磁力加热搅拌器(上海隆拓仪器设备有限公司); XT4-100B 型熔点仪(北京市科仪电光仪器厂); Varian Inova-400 型核磁共振谱仪(美国 Varian 公司); Varian Inova-600 型核磁共振谱仪(美国 Varian 公司); 芳基炔类化合物(分析纯), 上海泰坦科技股份有限公司; 芳基亚磺酸钠类化合物(分析纯), 上海泰坦科技股份有限公司; 其余所用化合物、试剂均为分析纯。

2.2. β -酮砜的合成(以 3a 为例)



以合成化合物 3a 为例, 向反应瓶中依次加入磁子、0.3 mmol LiClO₄·3H₂O、0.45 mmol 对甲基苯亚磺

酸钠(2a)和3 mL 溶剂($\text{CH}_3\text{CN}/\text{H}_2\text{O} = 2:1$)，继续加入0.3 mmol 苯乙炔(1a)，插入Pt/Pt电极并通入 O_2 ，然后将反应瓶置于35℃的油浴锅中搅拌10 min后，通入5 mA电流进行恒流电解。用薄层色谱(TLC)监测反应进程。反应结束后，使用氯化钠饱和溶液和乙酸乙酯进行萃取，干燥，浓缩。粗产物通过柱层析法进行纯化，洗脱剂为石油醚/乙酸乙酯(V:V = 9:1)，用柱层析法分离纯化得到50.8 mg白色固体1-苯基-2-对甲苯磺酰基乙酮(3a)，分离产率62%。m.p.106~107℃ (lit. [17] 105~107℃); ^1H NMR (600 MHz, CDCl_3), δ : 7.94 (d, $J = 12.0$ Hz, 2H), 7.76 (d, $J = 12.0$ Hz, 2H), 7.61 (t, $J = 6.0$ Hz, 1H), 7.47 (t, $J = 12.0$ Hz, 2H), 7.32 (d, $J = 6.0$ Hz, 2H), 4.72 (s, 2H), 2.44 (s, 3H)。

用类似的方法合成3b~3i。

1-对氯苯基-2-对甲苯磺酰基乙酮(3b): 39.7 mg 白色固体，产率43%。m.p.136~137℃ (lit. [18] 136~138℃); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3), δ : 7.86 (d, $J = 8.8$ Hz, 2H), 7.71 (d, $J = 9.6$ Hz, 2H), 7.42 (d, $J = 8.4$ Hz, 2H), 7.30 (d, $J = 8.0$ Hz, 2H), 4.66 (s, 2H), 2.42 (s, 3H)。

1-对氟苯基-2-对甲苯磺酰基乙酮(3c): 42.2 mg 白色固体，产率48%。m.p.130~131℃ (lit. [17] 128~130℃); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3), δ : 7.96 (m, 2H), 7.71 (d, $J = 8.4$ Hz, 2H), 7.31 (d, $J = 8.0$ Hz, 2H), 7.11 (t, $J = 17.2$ Hz, 2H), 4.67 (s, 2H), 2.42 (s, 3H)。

1-对溴苯基-2-对甲苯磺酰基乙酮(3d): 38.1 mg 白色固体，产率36%。m.p.142~143℃ (lit. [17] 141~144℃); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3), δ : 7.78 (d, $J = 8.8$ Hz, 2H), 7.71 (d, $J = 8.4$ Hz, 2H), 7.59 (d, $J = 8.4$ Hz, 1H), 7.31 (d, $J = 8.0$ Hz, 2H), 4.56 (s, 2H), 2.43 (s, 3H)。

1-对甲苯基-2-对甲苯磺酰基乙酮(3e): 46.7 mg 白色固体，产率54%。m.p.104~105℃ (lit. [17] 103~105℃); ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3), δ : 7.81 (d, $J = 8.4$ Hz, 2H), 7.72 (d, $J = 8.4$ Hz, 2H), 7.29 (d, $J = 8.0$ Hz, 2H), 7.23 (d, $J = 8.4$ Hz, 2H), 4.67 (s, 2H), 2.39 (d, $J = 6.8$ Hz, 6H)。

1-苯基-2-苯磺酰基乙酮(3f): 43.6 mg 白色固体，产率56%。m.p.94~95℃ (lit. [17] 93~95℃); ^1H NMR (600 MHz, CDCl_3), δ : 7.85 (d, $J = 12.0$ Hz, 2H), 7.82 (d, $J = 6.0$ Hz, 2H), 7.58 (t, $J = 6.0$ Hz, 1H), 7.53 (t, $J = 6.0$ Hz, 1H), 7.46 (t, $J = 6.0$ Hz, 2H), 7.39 (t, $J = 6.0$ Hz, 2H), 4.67 (s, 2H)。

1-对甲苯基-2-对氟苯磺酰基乙酮(3g): 48.2 mg 白色固体，产率55%。m.p.157~158℃; ^1H NMR (600 MHz, CDCl_3), δ : 7.93 (dd, $J = 6.0, 5.0$ Hz, 2H), 7.85 (d, $J = 6.0$ Hz, 2H), 7.30 (d, $J = 6.0$ Hz, 2H), 7.22 (t, $J = 12.0$ Hz, 2H), 4.74 (s, 2H), 2.44 (s, 3H)。

1-对甲苯基-2-苯磺酰基乙酮(3h): 42.7 mg 白色固体，产率54%。m.p.124~125℃ (lit. [17] 120~123℃); ^1H NMR (600 MHz, CDCl_3), δ : 7.89 (d, $J = 6.0$ Hz, 2H), 7.83 (d, $J = 6.0$ Hz, 2H), 7.66 (t, $J = 6.0$ Hz, 1H), 7.54 (t, $J = 6.0$ Hz, 2H), 7.27 (d, $J = 12.0$ Hz, 2H), 4.71 (s, 2H), 2.42 (s, 3H)。

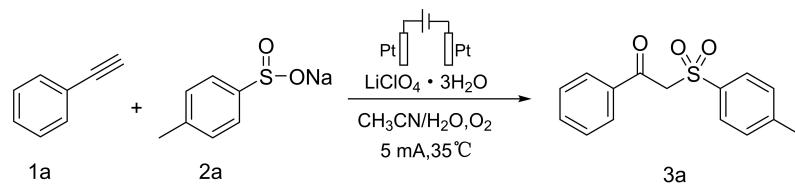
1-对溴苯基-2-对氟苯磺酰基乙酮(3i): 36.3 mg 白色固体，产率34%。m.p.180~181℃; ^1H NMR (600 MHz, CDCl_3), δ : 7.90 (dd, $J = 6.0, 5.0$ Hz, 2H), 7.82 (d, $J = 12.0$ Hz, 2H), 7.65 (d, $J = 12.0$ Hz, 2H), 7.24 (dd, $J = 6.0, 8.2$ Hz, 3H), 4.70 (s, 2H)。

3. 结果与讨论

3.1. 反应条件的优化

为获得合成 β -酮砜类化合物的最优条件，以对苯乙炔(1a)和对甲基苯亚磺酸钠(2a)为底物建立模板反应，实验过程中分别考察了电极的种类、电解质的种类、电流的大小、温度、溶剂等因素对模板反应的影响。首先以二氯乙烷(DCE)为溶剂，四丁基四氟硼酸铵($n\text{-Bu}_4\text{NBF}_4$)作为电解质，使用Pt/Pt电极，通入5 mA电流在室温下进行了初步尝试，实验结果如表1所示。当使用Pt/Pt电极时，得到了目标产物3a，但是收率不高，仅为20% (Entry 1)；当使用Pt/C电极时，3a的收率下降为15% (Entry 2)；当使用C/C电

极时, 反应时间变长, 收率更低, 仅为 13% (Entry 3)。因此, 在后续的条件优化中, 选择 Pt/Pt 电极作为反应电极。下一步工作中考察了乙醇(EtOH)、甲醇(MeOH)、乙腈(CH₃CN)、乙酸乙酯/水(EA/H₂O)、乙腈/水(CH₃CN/H₂O)等溶剂对反应的影响, 研究过程中发现, 溶剂对反应的影响较大, 当以 MeOH、CH₃CN、EA/H₂O 为反应溶剂时, 几乎没有目标产物 3a 生成(Entry 4~6); 当以 EtOH 为溶剂时, 反应收率为 15% (Entry 7); 当以 CH₃CN/H₂O 为溶剂时, 反应收率上升, 收率为 30% (Entry 8)。接下来又考察了四丁基碘化铵(*n*-Bu₄NI)、四丁基溴化铵(*n*-Bu₄NBr)、四丁基硫酸氢铵(*n*-Bu₄NHSO₄)、四丁基高氯酸铵(*n*-Bu₄NClO₄)、三水合高氯酸锂(LiClO₄·3H₂O)等电解质对反应的影响, 研究过程中发现, 当以 *n*-Bu₄NI、*n*-Bu₄NBr 为电解质时, 没有目标产物 3a 生成(Entry 9~10); 当以 *n*-Bu₄NHSO₄、*n*-Bu₄NClO₄ 为电解质时, 反应收率下降 (Entry 11~12); 但是当以 LiClO₄·3H₂O 作为电解质时, 反应收率显著上升, 收率为 62% (Entry 13)。接下来对通入电流进行了考察, 当通入电流为 10 mA 时, 基本没有目标产物 3a 生成(Entry 14)。下一步工作对温度进行了考察, 当反应温度为 50℃ 时, 反应收率下降为 41% (Entry 15); 当反应温度为 80℃ 时, 没有目标产物生成(Entry 16)。接下来又进行了两组对照实验探究: 1) 当筛选出的其它反应条件不变, 不通入 O₂ 时, 几乎没有目标产物 3a 生成(Entry 17)。2) 当筛选出的其它反应条件不变, 反应不进行通电时, 没有目标产物生成(Entry 18)。

Table 1. Optimization of reaction conditions**表 1.** 反应条件的优化

Entry	Electrode	Slovent/mL	Electrolyte	Current/mA	Gas	Temp/°C	Time/h	Yield/%
1	Pt/Pt	CH ₃ CHCl ₂	<i>n</i> -Bu ₄ NBF ₄	5	O ₂	35	16	20
2	Pt/C	CH ₃ CHCl ₂	<i>n</i> -Bu ₄ NBF ₄	5	O ₂	35	20	15
3	C/C	CH ₃ CHCl ₂	<i>n</i> -Bu ₄ NBF ₄	5	O ₂	35	24	13
4	Pt/Pt	EA:H ₂ O	<i>n</i> -Bu ₄ NBF ₄	5	O ₂	35	12	0
5	Pt/Pt	MeOH	<i>n</i> -Bu ₄ NBF ₄	5	O ₂	35	12	0
6	Pt/Pt	CH ₃ CN	<i>n</i> -Bu ₄ NBF ₄	5	O ₂	35	12	Trace
7	Pt/Pt	EtOH	<i>n</i> -Bu ₄ NBF ₄	5	O ₂	35	12	15
8	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	<i>n</i> -Bu ₄ NBF ₄	5	O ₂	35	12	30
9	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	<i>n</i> -Bu ₄ NI	5	O ₂	35	12	0
10	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	<i>n</i> -Bu ₄ NBr	5	O ₂	35	12	0
11	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	<i>n</i> -Bu ₄ NHSO ₄	5	O ₂	35	12	22
12	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	<i>n</i> -Bu ₄ NClO ₄	5	O ₂	35	12	12
13	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	LiClO ₄ ·3H ₂ O	5	O ₂	35	8	62
14	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	LiClO ₄ ·3H ₂ O	10	O ₂	35	8	Trace
15	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	LiClO ₄ ·3H ₂ O	5	O ₂	50	8	41
16	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	LiClO ₄ ·3H ₂ O	5	O ₂	80	8	0
17	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	LiClO ₄ ·3H ₂ O	5	-	35	8	Trace
18	Pt/Pt	CH ₃ CN/H ₂ O	LiClO ₄ ·3H ₂ O	-	O ₂	35	10	0

3.2. 底物的拓展

选用最佳模板条件: 室温下以 Pt/Pt 电极、 $\text{LiClO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 作为电解质、 $\text{CH}_3\text{CN}:\text{H}_2\text{O} = 2:1$ 为溶剂, 通入 O_2 , 5 mA 电流直接进行电解。分别考察了不同取代基的芳基炔和不同取代基的苯亚磺酸钠合成 β -酮砜类化合物的反应情况, 反应结果如图 1 所示。对于芳基炔类化合物, 无论芳环的对位上含吸电子基团(氟、氯、溴), 还是对位含供电子基团(甲基), 均可实现相应 β -酮砜的合成, 产率为 34%~62% (**3a~3i**)。芳环上取代基的种类会对 β -酮砜合成产率有显著的影响, 当芳基炔上带有供电子基团时, 产物收率较高(**3e**), 当芳基炔上带有吸电子基团时, 产物收率下降(**3b~3d**)。当苯亚磺酸钠芳环上带有供电子基团时, 反应收率要高于苯亚磺酸钠芳环上带有吸电子基团(**3e** 和 **3g**)。

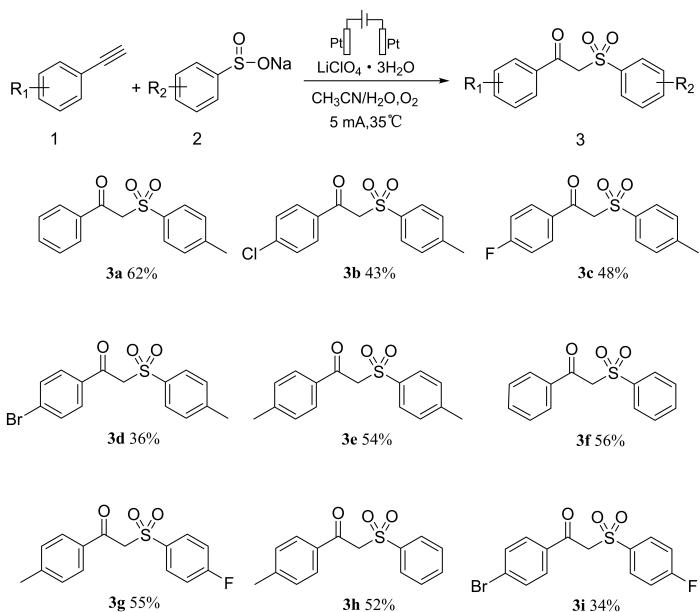


Figure 1. Application range of β -Ketosulfones substrate
图 1. β -酮砜的底物适用范围

3.3. 反应机理

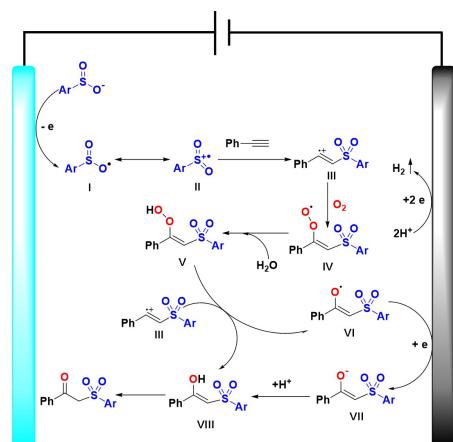


Figure 2. Reaction mechanism of β -ketosulfone compounds
图 2. β -酮砜类化合物的反应机理

基于上述得到的结果, 同时结合已报道的文献[17] [18]提出了可能的反应机理(图 2)。起初, 对甲基苯亚磺酸钠失去一个电子生成对甲基苯亚磺酸自由基 I, I 异构化生成磺酰自由基 II, 再将磺酰自由基与苯乙炔集合生成活性自由基 III。随后, 过氧自由基 IV 由自由基 III 捕获二氧生成, IV 受到反应溶剂中水的作用生成中间体 V, 再通过还原生成化合物 VI, 最后化合物 VI 通过异构化反应生成 β -酮酚(**3a**)。在机理探究过程中, 做了两组对照实验。第一组, 在最优反应条件下, 不通入 O_2 进行实验, 发现目标产物 **3a** 的收率严重下降, 几乎没有产物生成, 因此说明该反应中 O_2 直接参与反应。第二组, 在最优反应条件下, 不进行恒流电解, 连续反应 10 h 发现并没有目标化合物生成, 因此说明该反应在不通电的条件下无法发生反应。以上结果说明电化学促进 β -酮砜的合成需要有 O_2 参与反应, 并且需要进行恒流电解。

4. 结论

综上所述, 通过电化学合成方法促使芳基炔和芳烃亚磺酸钠在 35℃下反应生成相应的 β -酮砜类化合物。芳基炔的芳环上无论含有吸电子基团, 还是含有供电子基团, 都可以和芳烃亚磺酸钠实现相应 β -酮砜类化合物的合成。同样地, 芳烃亚磺酸钠的芳环上无论含有吸电子基团, 还是含有供电子基团, 也都可 以和芳基炔实现相应 β -酮砜类化合物的合成。相较其它合成 β -酮砜类化合物的方法而言, 该方法具有无金属催化和外加添加剂、后处理简单、反应条件温和、溶剂绿色等优点。

基金项目

新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学重点项目(NO. XJEDU2020I015)资助项目; 新疆维吾尔自治区新疆师范大学 2022 年硕士研究生科研创新项目(NO. XSY202201007)资助项目。

参考文献

- [1] Dunbar, K.L., Scharf, D.H., et al. (2017) Enzymatic Carbon-Sulfur Bond Formation in Natural Product Biosynthesis. *Chemical Reviews*, **117**, 5521-5577. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00697>
- [2] Zheng, L.W., Yang, C., Xu, Z.Z., Gao, F. and Xia, W.J. (2015) Difunctionalization of Alkenes via the Visible-Light-Induced Trifluoromethylarylation/1,4-Aryl Shift/Desulfonylation Cascade Reactions. *The Journal of Organic Chemistry*, **80**, 5730-5736. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.5b00677>
- [3] Ilardi, E.A., Vitaku, E. and Njardarson, J.T. (2014) Data-Mining for Sulfur and Fluorine: An Evaluation of Pharmaceuticals to Reveal Opportunities for Drug Design and Discovery. *Journal of Medicinal Chemistry*, **57**, 2832-2842. <https://doi.org/10.1021/jm401375q>
- [4] Elattar, K.M., Fekri, A., et al. (2017) Sulfones in Heterocyclic Synthesis: Advances in the Chemistry of Phenyl Sulfonylacetophenone. *Research on Chemical Intermediates*, **43**, 4227-4264. <https://doi.org/10.1007/s11164-017-2869-8>
- [5] Yang, H., Carter, R.G. and Zakharov, L.N. (2008) Enantioselective Total Synthesis of Lycopodine. *Journal of the American Chemical Society*, **130**, 9238-9239. <https://doi.org/10.1021/ja803613w>
- [6] Barry, M.T. and Dennis, P.C. (1981) Chemoselective Oxidation of Sulfides to Sulfones with Potassium Hydrogen Persulfate. *Tetrahedron Letters*, **14**, 1287-1290. [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(01\)90298-9](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(01)90298-9)
- [7] Sreedhar, B. and Rawat, V. (2012) A Regioselective Catalyst- and Additive-Free Synthesis of β -Ketosulfones from Aryl Acetylenes and Sodium Arenesulfonates. *Synlett*, **23**, 413-417. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1290318>
- [8] Lu, Q.Q., Zhang, J., Zhao, G.L., Qi, Y., Wang, H.M. and Lei, A.W. (2013) Dioxygen-Triggered Oxidative Radical Reaction: Direct Aerobic Difunctionalization of Terminal Alkynes toward β -Ketosulfones. *Journal of the American Chemical Society*, **135**, 11481-11484. <https://doi.org/10.1021/ja4052685>
- [9] Singh, A.K., Chawla, R. and Yadav, L.D. (2014) Aerobic Oxysulfonylation of Alkynes in Aqueous Media: Highly Selective Access to β -Ketosulfones. *Tetrahedron Letters*, **55**, 2845-2848. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2014.03.078>
- [10] Cui, P., Liu, Q., et al. (2019) One-Pot Synthesis of Chiral β -Hydroxysulfones from Alkynes via Aerobic Oxysulfonylation and Asymmetric Reduction in MeOH/H₂O. *Green Chemistry*, **21**, 634-639. <https://doi.org/10.1039/C8GC03671C>
- [11] Li, F.X., Su, J.L., et al. (2021) A Glucose Oxidase-Hemoglobin System for Efficient Oxysulfonylation of Alkenes/Alkynes in Water. *Molecular Catalysis*, **500**, Article ID: 111336. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2020.111336>
- [12] Pampana, V.K., Charpe, V.P., et al. (2021) Oxy-Sulfonylation of Terminal Alkynes via C-S Coupling Enabled by Copper

- Photoredox Catalysis. *Green Chemistry*, **23**, 3569-3574. <https://doi.org/10.1039/D1GC00736J>
- [13] Holmquist, C.R. and Roskamp, E.J. (1992) Tin(II) Chloride Catalyzed Addition of Diazosulfones, Diazo Phosphine Oxides, and Diazophosphonates to Aldehydes. *Tetrahedron Letters*, **33**, 1131-1134. [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(00\)91877-X](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(00)91877-X)
- [14] Samakkanad, N., Katrun, P., et al. (2012) IBX/I₂-Mediated Reaction of Sodium Arenesulfinate with Alkenes: Facile Synthesis of β -Ketosulfones. *Synthesis*, **44**, 1693-1699. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1290952>
- [15] Lai, C.B., Xi, C.J., Jiang, Y.F. and Hua, R.M. (2005) One-Pot Approach for the Regioselective Synthesis of β -Ketosulfones Based on Acid-Catalyzed Reaction of Sulfonyl Chlorides with Arylacetylenes and Water. *Tetrahedron Letters*, **46**, 513-515. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2004.10.176>
- [16] 吕进强, 曾竟, 阿布都热西提·阿布力克木. 原位产生二氧化锰催化构建 S-S 键[J]. 有机化学, 2020, 40(8): 2483-2490.
- [17] Yavari, I. and Shaabanzadeh, S. (2020) Electrochemical Synthesis of β -Ketosulfones from Switchable Starting Materials. *Organic Letters*, **22**, 464-467. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.9b04221>
- [18] Binoyargha, D., Bhisma, K.P., et al. (2022) Visible-Light-Mediated Synthesis of β -Ketosulfones Using g-C₃N₄ as a Recyclable Photocatalyst under Sustainable Conditions. *Green Chemistry*, **24**, 7122-7130. <https://doi.org/10.1039/D2GC02254K>