

α -硼取代羰基类化合物的合成进展陈志豪^a 范奇^b 尹标林^b 李清江^a 王洪根^{*,a}^(a) 中山大学药学院 广东省手性分子与药物发现重点实验室 广州 510006^(b) 华南理工大学化学与化工学院 广东省功能分子工程重点实验室 广州 510640

摘要 α -硼取代羰基类化合物传统被认为是热力学上不稳定的化合物, 容易发生 1,3-硼迁移。近年来, 随着对 sp^3 杂化的硼或是四配位硼基团的研究深入, 合成稳定且可分离的 α -硼取代羰基类化合物的方法被逐渐发展。这些方法包括利用重氮酸酯、硫叶立德等卡宾前体对硼烷的插入反应, α,β -不饱和羰基类化合物的自由基硼氢化反应, 以及含硼化合物的后阶段结构修饰反应等。根据不同的反应类型, 对近年来合成 α -硼取代羰基类化合物的反应进行了综述, 并对现有的挑战及未来的研究方向进行了讨论。

关键词 卡宾; B-H 键插入; 自由基硼化; α,β -不饱和羰基类; 硼酸酯; 炔烃

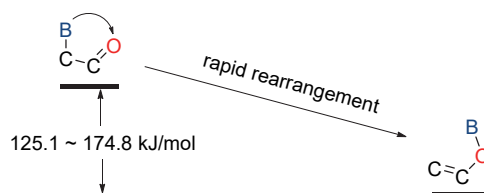
Progress in the Syntheses of α -Boryl Carbonyl CompoundsChen, Zhihao^a Fan, Qi^b Yin, Biaolin^b Li, Qingjiang^a Wang, Honggen^{*,a}^(a) Guangdong Key Laboratory of Chiral Molecule and Drug Discovery, School of Pharmaceutical Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006^(b) Key Laboratory of Functional Molecular Engineering of Guangdong Province, School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640

Abstract α -Boryl carbonyl compounds have traditionally been considered thermodynamically unstable and prone to undergo 1,3-boron migration. In recent years, with the development and understanding of sp^3 -hybridized boron or tetra-coordinated boron, methods for synthesizing stable and separable α -boryl carbonyl compounds have been actively developed. These methods include the insertion reaction of borane with diazo esters, sulfur ylides and other carbene precursors, the free-radical borylation reaction of α,β -unsaturated carbonyl compounds, and late-stage structural modification reactions of boron-containing compounds. The recent advances in the synthesis of α -boryl carbonyl compounds are reviewed based on different reaction types, and the existing challenges and future research directions are discussed.

Keywords carbene precursor; insertion reaction of borane; radical borylation reaction; α,β -unsaturated carbonyl compound; boronate; functionalized alkyne

α -硼取代羰基类化合物是一类热力学不稳定的化合物, 含有特殊的 B—C—C=O 结构片段, 容易发生热力学趋动的 1,3-硼迁移反应, 转变为热力学上更稳定的 C=C—O—B 产物。两种异构体之间的稳定化能差异大约在 125.1~174.8 kJ/mol 之间(Scheme 1)^[1]。这一转化过程类似于羰基类化合物的烯醇式互变, 但这个过程更加快速。因此, 传统认为, α -硼取代羰基类化合物是一类难以获得的产物。

另一方面, α -硼取代羰基类化合物兼具羰基和硼基



图式 1 两种异构体的稳定性差异

Scheme 1 Stability difference between two isomers

这两个具备多样转化能力的基团, 在合成中是一类十分具有潜在价值的合成砌块, 从而吸引了一些科研工作者

* Corresponding author. E-mail: wanghg3@mail.sysu.edu.cn

Received March 17, 2023; revised April 14, 2023; published online April 26, 2023.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 22022114, 21971261), the Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (Nos. 2020A1515010624), and the Local Innovative and Research Teams Project of Guangdong Pearl River Talents Program (No. 2017BT01Y093).

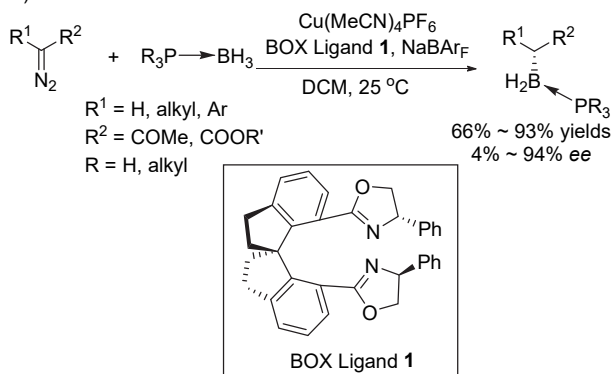
国家自然科学基金(Nos. 22022114, 21971261)、广东省基础与应用基础研究基金联合基金(No. 2020A1515010624)和广东珠江人才计划本土创新科研团队项目基金(No. 2017BT01Y093)资助项目。

不断地寻找合成这类化合物的新方法. 2010 年以前, 关于此类化合物的合成只有零星报道, 且已有前贤对其进行了总结^[2]. 近年来, 随着对 sp^3 杂化硼的深入研究, 稳定的、可分离的 α -硼取代羰基类化合物的合成方法逐渐被发展, 包括基于卡宾 B—H 插入、自由基硼氢化、不饱和硼酸酯的羰基化等, 其作为合成砌块的应用价值也逐渐被开发. 本文对近年来发展的 α -硼取代羰基类化合物的新合成方法进行了综述.

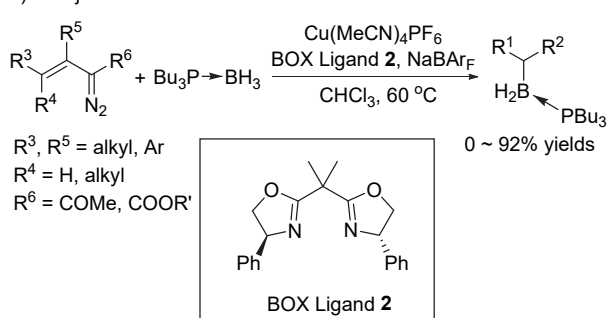
1 基于卡宾对硼烷加合物的 B—H 插入反应合成 α -硼取代羰基类化合物

利用重氮羰基底物对硼烷加合物的 B—H 键进行插入构建 α -硼取代羰基产物是一类受到广泛关注的方法. 该类方法涉及到不同金属卡宾中间体的生成. 2013 年周其林院士和朱守非课题组^[3]利用廉价的铜催化剂以及手性双齿配体, 实现了重氮酸酯对硼烷加合物的不对称 B—H 键插入, 反应具有产率高、立体选择性优异的特点(Scheme 2a). Vilotijevic 课题组^[4]对该方法进行了发展, 将该反应应用于烯基重氮酸酯类底物上, 也能以较好的产率获得相应产物(Scheme 2b).

a) Zhou and Zhu's work



b) Vilotijevic's work

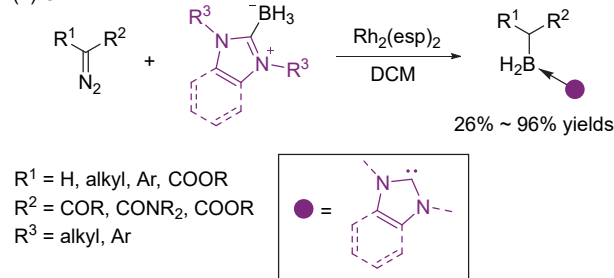


图式 2 铜催化重氮化物对硼烷的不对称 B—H 键插入反应
Scheme 2 Copper-catalyzed asymmetric B—H bond insertion of diazo compounds into boranes

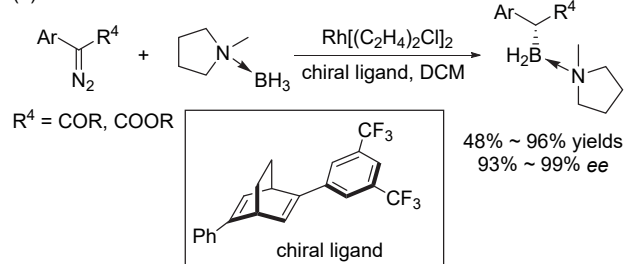
Curran 课题组^[5]则发展了活性二价铑卡宾物种对 B—H 键进行插入的方法, 能以较好的收率实现重氮化

物到 α -硼取代羰基类化合物的转化. 底物不受限于重氮酸酯、重氮酮、重氮酰胺等, 均可发生反应, 且对不同的氮杂环卡宾(NHC)-硼烷也能有不错的效果(Scheme 3a). 有意思的是, 徐明华课题组^[6]采用手性二烯配体配合一价铑为催化剂, 实现了对叔胺基硼烷的 B—H 键插入反应. 反应以优秀的对映选择性、较好的产率实现了 α -硼取代羰基类化合物的合成. 该方法对重氮酸酯、重氮酮均有较好效果, 重氮基团 α 位多为芳基(Scheme 3b). 这类一价铑卡宾催化体系还被应用于多类 X—H 键的插入反应^[7]. 其他一些方法, 包括单质碘催化或酶催化的卡宾插入 B—H 键反应也被报道, 如 Curran 课题组^[8]发展的碘催化形成的碘硼烷中间体与重氮酸酯反应, 也能较好地实现重氮酸酯与 NHC-硼烷的 B—H 键插入反应(Scheme 4a). Arnol 课题组^[9]则是利用生物体内的酶实现了 NHC 硼烷与重氮酸酯或三氟甲基重氮化合物的不对称 B—H 键插入反应, 即使是克级规模下对映选择性也能得到保留(Scheme 4b).

(a) Curran's work



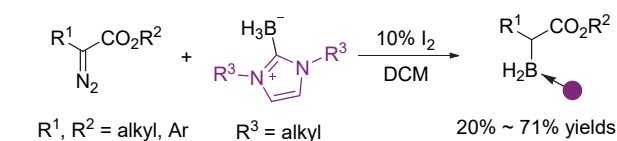
(b) Xu's work



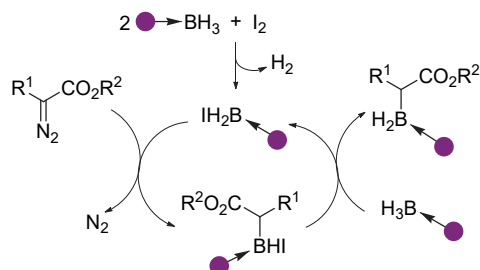
图式 3 铑催化重氮化物对硼烷的 B—H 键插入反应
Scheme 3 Rhodium-catalyzed B—H bond insertion of diazo compounds into boranes

以硫叶立德作为卡宾前体, 实现对 B—H 键进行插入的工作也时有报道^[10]. 该类反应中硫叶立德在铑催化剂的作用下离去 DMSO, 产生了卡宾中间体, 对脂肪胺配位的硼烷进行插入, 反应过程高效, 底物使用范围广, 后续转化也丰富(Scheme 5a). 周其林和朱守非课题组另辟蹊径, 用氮氧化物与端炔产生的卡宾前体, 在金催化剂的作用下对三甲胺配位的硼烷进行插入^[11]. 该方法可用于一些含碳-碳叁键天然产物的结构改造, 具有底物应用范围广, 效率高的特点(Scheme 5b).

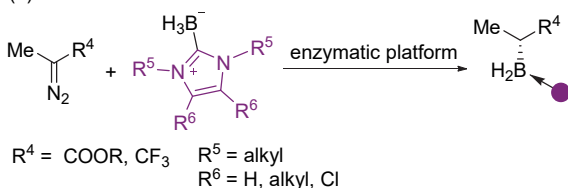
(a) Curran's work



Mechanism

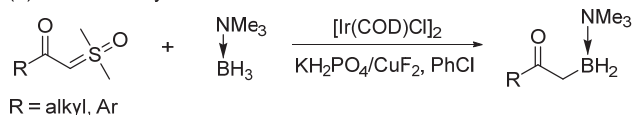


(b) Arnold's work

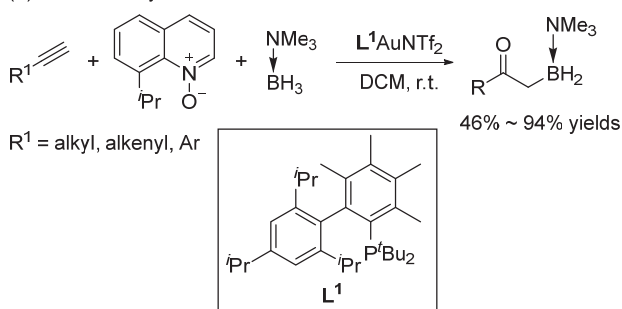


图式 4 其他类型重氮化物对 NHC-硼烷的 B—H 键插入反应
Scheme 4 B—H bond insertion reactions of diazo compounds into NHC-borane using other methods

(a) Sulfoxonium ylides



(b) Terminal alkynes



图式 5 硫叶立德/端炔作为卡宾前体的硼烷插入反应

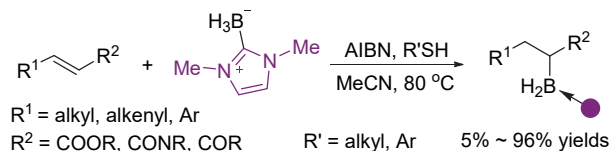
Scheme 5 B—H insertion reaction using sulfoxonium ylides/terminal alkynes as carbene precursors

2 α,β -不饱和羰基类化合物的自由基硼氢化构建 α -硼基-羰基类化合物

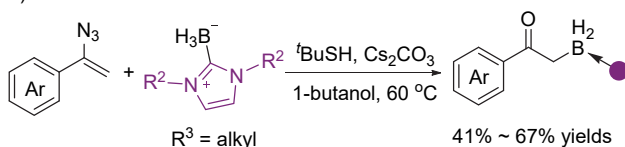
自由基硼氢化反应也是合成 α -硼基-酮化合物的重要方法. 该类反应底物多为 α,β -不饱和酸酯、酰胺等, 与 NHC-硼烷发生自由基加成反应. 汪义丰、周晓国与傅尧课题组^[12]发展的自由基硼化反应, 实现了 α,β -不饱和酸

酯、酰胺等的 α -硼化反应. 选用偶氮二异丁腈(AIBN)作为自由基引发剂, 硫醇作为氢转移催化剂, 可在酰基的 α 位引入 NHC-硼烷(Scheme 6a). 类似地, 刘小卒等^[13]使用烯基叠氮作为底物, 硫醇作为催化剂, 得到的亚胺中间体水解后也能合成 α -硼基酮产物(Scheme 6b). 戴文和 Curran 等^[14]用光催化剂也实现了这类反应. 当 R^4 为芳基时, 能选择性地酰基 α 位引入硼基团, 而 R^4 为烷基时, 则在羰基 β 位引入硼基团(Scheme 6c).

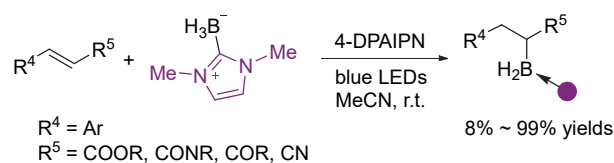
a) Wang, Zhou and Fu's work



b) Liu's work



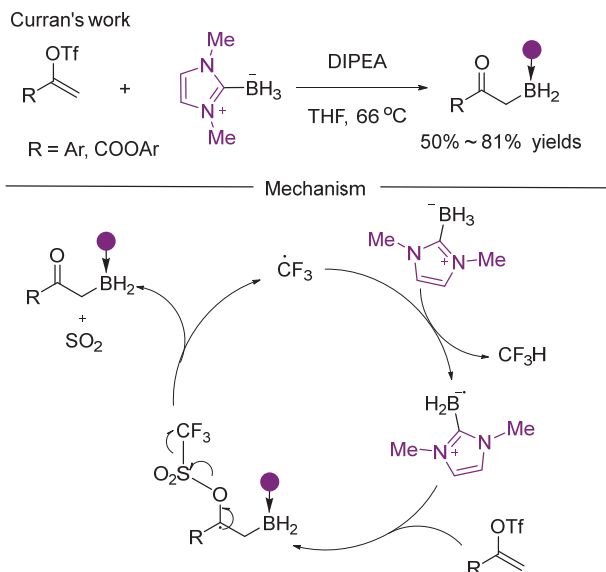
c) Dai and Curran's work



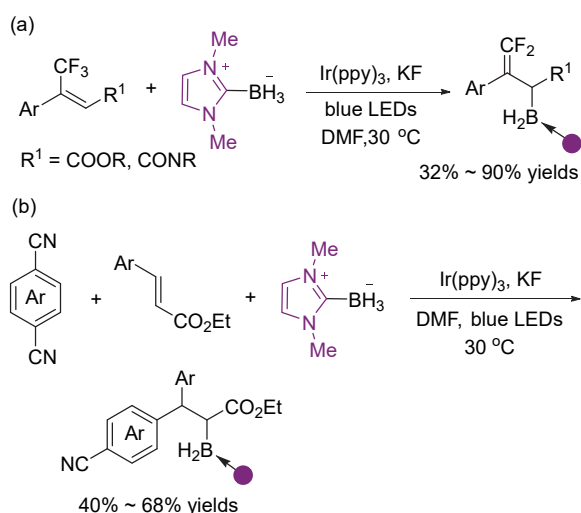
图式 6 自由基介导 α,β -不饱和羰基底物的 α -硼化反应
Scheme 6 Radical-mediated α -borylation reaction of α,β -unsaturated carbonyl compounds

Curran 课题组^[15]在 2019 年报道了以烯基三氟甲磺酸酯作为底物的自由基硼化反应. 在脂肪胺的作用下, 产生少量的三氟甲基自由基启动了该反应. 三氟甲基自由基从 NHC 硼烷上攫取了一个氢原子, 产生的硼自由基对底物双键进行加成, 在形成碳氧双键的强大驱动力下, 三氟甲磺酸酯离去一个二氧化硫, 重新产生三氟甲基自由基, 继续参与到下一个循环中反应, 得到 α -硼基酮产物(Scheme 7). 该反应适用于芳基乙烯类以及羰基与 α,β -不饱和酸酯相连的底物, 产率大多中等.

汪义丰课题组^[16]以氟作为离去基团, 也发展了一种自由基硼化反应. 在光催化剂的作用下三氟甲基取代烯烃脱去一个氟构建出一类含有偕二氟片段的 α -硼取代羰基类产物. NHC 硼烷被激发后的光催化剂氧化, 产生硼自由基. 同时还原后的光催化剂对底物分子单电子还原, 与硼自由基发生自由基偶联, 三氟甲基上离去一个氟得到脱氟硼化产物(Scheme 8a). 该体系还可以应用到肉桂酸酯的自由基硼化反应上, 也能获得 α -硼取代羰基类产物(Scheme 8b)^[16]. 刘培均和刘小卒课题组运用



图式 7 烯基三氟甲磺酸酯作为底物的自由基硼化反应
Scheme 7 Radical-mediated borylation of alkenyl triflates

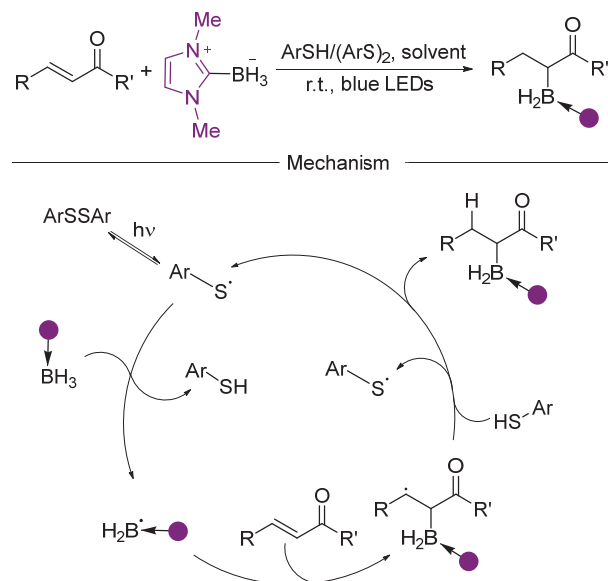


图式 8 光催化的自由基脱氟硼化/芳硼化反应

Scheme 8 Photoredox radical defluoroborylation/arylborylation reaction

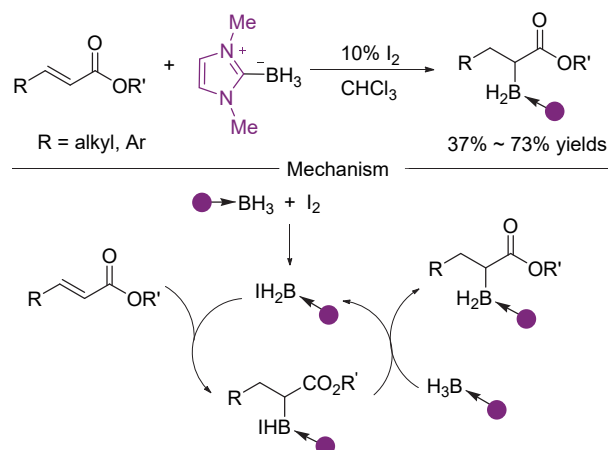
光催化剂和硫醇介导的体系也能实现类似的脱氟硼氢化反应^[17].

王玉斌和安媛媛课题组^[18]发展了光催化硫自由基介导的 α,β -不饱和羰基类化合物的氢硼化反应. 陈学年等^[19]使用硫醇作为催化剂, 也发展了香豆素衍生物的自由基氢硼化反应, 对于非环状底物也适用这一体系. 这类反应中均由硫自由基对硼烷进行攫氢产生硫醇. 硼自由基随后对 α,β -不饱和羰基底物的双键进行加成, 产生碳自由基再去从产生的硫醇中获得氢原子, 得到目标的 α -硼化产物(Scheme 9). Michael 等^[20]使用碘催化的方法也能很好地实现 α,β -不饱和酸酯的硼氢化反应(Scheme 10).



图式 9 光催化硫自由基介导的 α -硼化反应

Scheme 9 Photo-induced sulfur radical-catalyzed α -borylation reaction



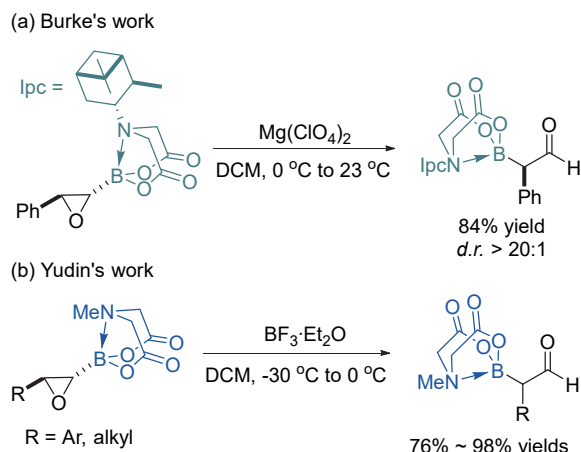
图式 10 碘催化 α,β -不饱和酸酯的 α -硼化反应

Scheme 10 I₂-catalyzed α -borylation reaction of α,β -unsaturated esters

3 含硼化合物的后阶段结构修饰反应构建 α -硼取代羰基类化合物

以上介绍的构建 α -硼取代羰基类化合物的方法多是通过构建碳硼键来实现. 近年来, 基于稳定含硼底物的后阶段结构修饰方法, 也为有机硼的合成提供了新的思路^[21].

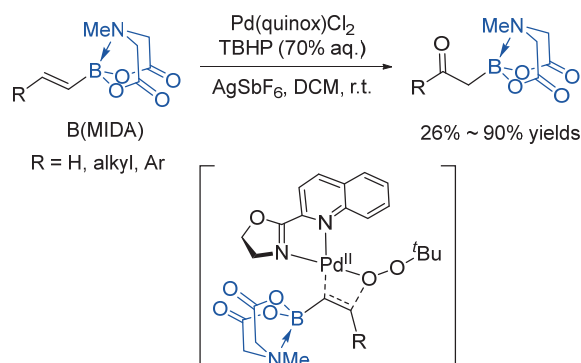
2011 年, Burke^[22]和 Yudin 课题组^[23]几乎在同一时间报道了环氧乙基硼酸酯的硼迁移开环反应. 两份工作中均涉及到 Lewis 酸对环氧的开环以及硼的 1,2 迁移过程, 最终得到 α -硼取代醛产物(Scheme 11). 反应具有产率高, 选择性好的特点, 产物的稳定性相较以往也有了提高.



图式 11 环氧乙基硼酸酯的硼迁移开环反应

Scheme 11 Boryl-migrative ring-opening reaction of epoxy vinyl boronates

Yudin 课题组^[24]运用钯催化的方法实现了烯基硼酸酯 *N*-甲基亚氨二乙酸酯[B(MIDA)]的 Wacker 氧化反应. 在该反应中, 由于钯催化剂对与硼酸酯相连碳的特殊相互作用, 导致过氧化物亲核进攻, 选择性发生在硼酸酯的 β 位. 计算也说明钯与硼 α 位碳的相互作用, 使得整个过程的能量相对于另一边的更低(Scheme 12).

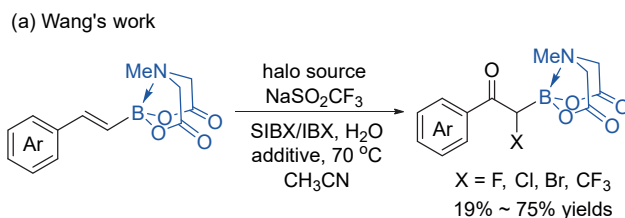


图式 12 烯基硼酸酯的 Wacker 氧化反应

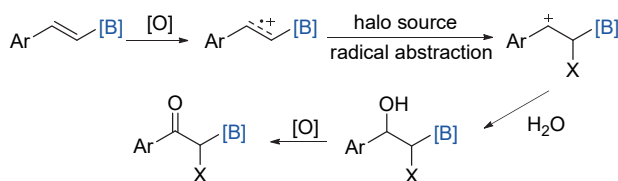
Scheme 12 Wacker oxidation reaction of alkenylboronates

2016 年, 王洪根课题组^[25]报道了芳基乙烯基 B(MIDA)的氧化双官能团化反应. 反应不仅在硼酸酯 β 位引入了羰基, 还在其 α 位引入卤素、三氟甲基等基团, 能以中等收率获得 α -硼基酮产物. 在其氧化卤化反应中, 苯乙烯 B(MIDA)发生单电子氧化, 再与卤素正离子结合产生苄位正离子, 被水进攻后产生的羟基再被氧化为羰基. 所得产物具有的双亲核位点可用于各种杂环硼酸酯结构的构建, 具有潜在应用价值. 而在其氧化三氟甲基化反应中, 三氟甲磺酸阴离子被氧化后产生的三氟甲基自由基加成到苯乙烯 B(MIDA)上, 产生的苄位自由基与氧气结合, 最终得到三氟甲基取代的 α -硼基酮 (Scheme 13a). Grygorenko 课题组^[26]发展了乙烯基 B(MIDA)通过两步反应实现双官能团化的方法, 也能得到 α -

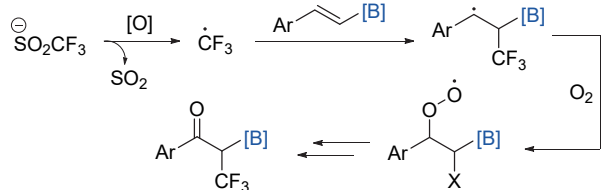
溴代- α -硼基酮产物. 反应先用 *N*-溴代丁二酰亚胺(NBS)和水对双键发生加成反应, 再用 Dess-Martin 氧化剂(DMP)将羟基氧化为羰基, 两步产率最高可达 94%, 底物应用范围广, 且产率中等至优秀(Scheme 13b).



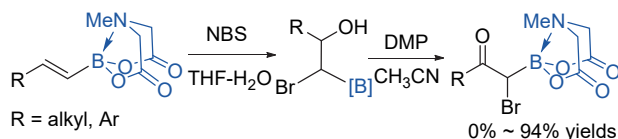
Mechanism of oxidative halogenation reaction



Mechanism of oxidative trifluoromethylation reactions



(b) Grygorenko's work

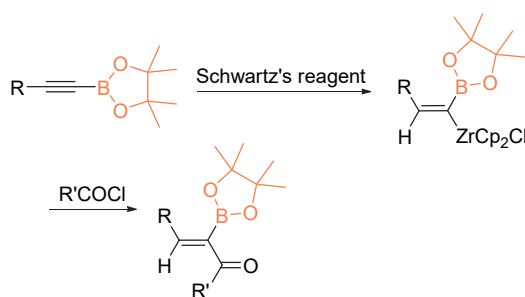


图式 13 氧化双官能团化反应合成 α -硼基酮

Scheme 13 Synthesis of α -boryl-ketones via oxidative difunctionalization reaction

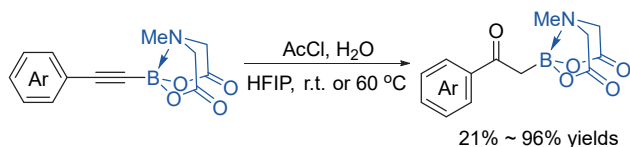
使用烯基或其衍生物(环氧乙基)来构建 α -硼基酮结构的报道较多, 有一系列较为成熟的方法. 通过对炔烃的加成反应引入羰基也是一类高效的引入羰基的方法. Srebnik 等^[27]使用 Schwartz 试剂与炔基硼酸酯发生加成反应, 再与相应的亲电试剂反应, 可在硼酸酯的 α 位引入酮羰基(Scheme 14). Albarghouti 等^[28]也通过类似的方法合成了 α -硼基酮化合物. 该类方法大多收率为中等至优秀, 比较实用. 这类金属对与硼相连的碳碳叁键的加成反应体现出独特的位置选择性, 选择性发生金属与硼 α 位碳的成键反应. 这可能与硼基的诱导效应有关.

除此之外, 通过炔烃的水合反应也是一类较为经典的引入羰基的方法. 传统的水合反应多用到一些金属催化剂如汞、金、银等, 或是用很强的酸, 高温高压等, 条件过于剧烈, 容易造成污染, 安全性不佳^[29]. 2023 年,

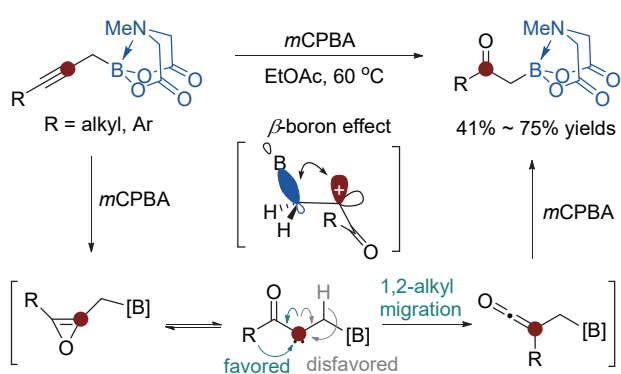
图式 14 基于炔基硼的 α -硼基酮合成

Scheme 14 Synthesis of α -boryl-ketones from alkynyl boronates

(a) Hydration reaction



(b) Oxidative carbon deletion

图式 15 氧化/水合反应构建 α -硼基-酮化合物

Scheme 15 Synthesis of α -boryl-ketones via oxidative/hydration reactions

王洪根课题组^[30]发展了乙酰氯/水在六氟异丙醇(HFIP)中实现炔烃水合反应的体系, 该反应具有反应条件温和, 安全绿色的优点, 合成了系列 α -硼基芳基乙酮的结构(Scheme 15a)。在同一个工作中, 另一类构建 α -硼基酮产物的炔丙基硼酸酯的氧化碳删除反应也被报道。反应过程中炔丙基硼酸酯被间氯过氧苯甲酸(mCPBA)氧化为环氧乙烷中间体, 受碳硼键的超共轭稳定作用(β -硼效应)^[30], 这一中间体可定向重排为卡宾, 随后发生取代基的 1,2-迁移, 得到的烯酮中间体再被 mCPBA 氧化得到碳删除的产物, 保留下来的碳也经由同位素实验确证为硼 β 位碳。底物可用于芳基、烷基的碳删除羰基化, 产率中等至良好(Scheme 15b)。

4 小结与展望

α -硼取代羰基类化合物同时含有羰基和硼基两种

具有多种多样转化能力的基团, 是具有实用价值的合成砌块。近年来这类化合物的合成主要是利用卡宾前体对硼烷加合物的 B—H 插入, α,β -不饱和羰基化合物的自由基硼氢化以及不饱和硼酸酯的羰基化反应。近年来得益于 sp^3 硼相关研究的深入, 通过对含硼不饱和体系的后阶段结构修饰, 也为 α -硼取代羰基类化合物的合成提供了简便途径。尽管如此, 有几个问题仍然值得去解决: (1)目前方法大多只适用于一级、二级硼的合成, 对于适用于三级硼的合成方法仍比较少。(2)现有的 α -硼取代羰基产物结构仍然过于简单, 合成含有更多可转化官能团的产物对拓展相应的化学空间仍然具有吸引力。(3)对于 α -硼取代羰基类化合物的转化类型仍然过于单一, 相信未来它们可以在更多的反应中找到更大的价值。

References

- [1] (a) Matteson, D. S. *J. Am. Chem. Soc.* **1960**, 82(16), 4228.
(b) Matteson, D. S.; Mah, R. W. H. *J. Org. Chem.* **1963**, 28(9), 2171.
- [2] (a) Product Subclass 29: α -Boryl Carbonyl Compounds. In *Cate-gory 1, Organometallics*, Georg Thieme Verlag K. G., Stuttgart, **2005**, Vol. 6.
(b) Dembitsky, V. M.; Tolstikov, G. A.; Srebnik, M. *Eurasian Chem.-Technol. J.* **2002**, 4, 87.
- [3] Cheng, Q.-Q.; Zhu, S.-F.; Zhang, Y.-Z.; Xie, X.-L.; Zhou, Q.-L. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, 135(38), 14094.
- [4] Drikermann, D.; Mößel, R. S.; Al-Jammal, W. K.; Vilotijevic, I. *Org. Lett.* **2020**, 22(3), 1091.
- [5] Li, X.; Curran, D. P. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, 135(32), 12076.
- [6] Chen, D.; Zhang, X.; Qi, W.-Y.; Xu, B.; Xu, M.-H. *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, 137(16), 5268.
- [7] (a) Loskutova, N. L.; Shvydkiy, N. V.; Nelyubina, Y. V.; Perekalin, D. S. *J. Organomet. Chem.* **2018**, 867, 86.
(b) Liu, B.; Xu, M.-H. *Chin. J. Chem.* **2021**, 39(7), 1911.
(c) Sun, Y.-T.; Rao, X.; Xu, W.; Xu, M.-H. *Org. Chem. Front.* **2022**, 9(13), 3467.
(d) Wang, T.-Y.; Chen, X.-X.; Zhu, D.-X.; Chung, L. W.; Xu, M.-H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, 61(34), e202207008.
(e) Zhu, D.-X.; Xia, H.; Liu, J.-G.; Chung, L. W.; Xu, M.-H. *J. Am. Chem. Soc.* **2021**, 143(6), 2608.
(f) Chen, D.; Zhu, D.-X.; Xu, M.-H. *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, 138(5), 1498.
- [8] Allen, T. H.; Kawamoto, T.; Gardner, S.; Geib, S. J.; Curran, D. P. *Org. Lett.* **2017**, 19(13), 3680.
- [9] (a) Kan, S. B. J.; Huang, X.; Gumulya, Y.; Chen, K.; Arnold, F. H. *Nature* **2017**, 552(7683), 132.
(b) Chen, K.; Huang, X.; Zhang, S.-Q.; Zhou, A. Z.; Kan, S. B. J.; Hong, X.; Arnold, F. H. *Synlett* **2019**, 30(4), 378.
(c) Huang, X.; Garcia-Borrás, M.; Miao, K.; Kan, S. B. J.; Zutshi, A.; Houk, K. N.; Arnold, F. H. *ACS Cent. Sci.* **2019**, 5(2), 270.
- [10] (a) Li, J.; He, H.; Huang, M.; Chen, Y.; Luo, Y.; Yan, K.; Wang, Q.; Wu, Y. *Org. Lett.* **2019**, 21(22), 9005.
(b) Zhang, S.-S.; Xie, H.; Shu, B.; Che, T.; Wang, X.-T.; Peng, D.; Yang, F.; Zhang, L. *Chem. Commun.* **2020**, 56(3), 423.
- [11] Yang, J.-M.; Zhao, Y.-T.; Li, Z.-Q.; Gu, X.-S.; Zhu, S.-F.; Zhou, Q.-L. *ACS Catal.* **2018**, 8(8), 7351.
- [12] Ren, S.-C.; Zhang, F.-L.; Xu, A.-Q.; Yang, Y.; Zheng, M.; Zhou, X.; Fu, Y.; Wang, Y.-F. *Nat. Commun.* **2019**, 10(1), 1934.
- [13] Zhang, Y.; Liao, Y.; Liu, P.; Ran, Y.; Liu, X. *Org. Biomol. Chem.* **2022**, 20(17), 3550.
- [14] Li, G.; Huang, G.; Sun, R.; Curran, D. P.; Dai, W. *Org. Lett.* **2021**, 23(11), 4353.

- [15] Dai, W.; Geib, S. J.; Curran, D. P. *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*(31), 12355.
- [16] Qi, J.; Zhang, F.-L.; Jin, J.-K.; Zhao, Q.; Li, B.; Liu, L.-X.; Wang, Y.-F. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, *59*(31), 12876.
- [17] Chen, G.; Wang, L.; Liu, X.; Liu, P. *Adv. Synth. Catal.* **2020**, *362*(14), 2990.
- [18] Liu, X.; Shen, Y.; Lu, C.; Jian, Y.; Xia, S.; Gao, Z.; Zheng, Y.; An, Y.; Wang, Y. *Chem. Commun.* **2022**, *58*(60), 8380.
- [19] Miao, Y.-Q.; Li, X.-Y.; Pan, Q.-J.; Ma, Y.; Kang, J.-X.; Ma, Y.-N.; Liu, Z.; Chen, X. *Green Chem.* **2022**, *24*(18), 7113.
- [20] Radcliffe, J. E.; Fasano, V.; Adams, R. W.; You, P.; Ingleson, M. J. *Chem. Sci.* **2019**, *10*(5), 1434.
- [21] Li, J.; Ballmer, S. G.; Gillis, E. P.; Fujii, S.; Schmidt, M. J.; Palazzolo, A. M. E.; Lehmann, J. W.; Morehouse, G. F.; Burke, M. D. *Science* **2015**, *347*(6227), 1221.
- [22] Li, J.; Burke, M. D. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*(35), 13774.
- [23] He, Z.; Yudin, A. K. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*(35), 13770.
- [24] Corless, V. B.; Holownia, A.; Foy, H.; Mendoza-Sanchez, R.; Adachi, S.; Dudding, T.; Yudin, A. K. *Org. Lett.* **2018**, *20*(17), 5300.
- [25] Lv, W.-X.; Zeng, Y.-F.; Li, Q.; Chen, Y.; Tan, D.-H.; Yang, L.; Wang, H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*(34), 10069.
- [26] Ivon, Y. M.; Kuchkovska, Y. O.; Voitenko, Z. V.; Grygorenko, O. O. *Eur. J. Org. Chem.* **2020**, *2020*(23), 3367.
- [27] Deloux, L.; Skrzypczak-Jankun, E.; Cheesman, B. V.; Srebnik, M.; Sabat, M. *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, *116*(22), 10302.
- [28] Albarghouti, G.; Rayyan, S. *Org. Prep. Proced. Int.* **2020**, *52*(1), 1.
- [29] Hintermann, L.; Labonne, A. *Synthesis* **2007**, *2007*(8), 1121.
- [30] Chen, Z.-H.; Su, X.-X.; Li, Q.; Wu, J.-Q.; Ou, T.-M.; Wang, H. *Org. Lett.* **2023**, *25*(7), 1099.

(Li, L.)