

含氮硼酸酯对轧制铝板摩擦学性能及表面质量的影响

赵永涛^{1,2}, 孙建林¹, 王成龙¹, 张红松²

(1.北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083;

2.河南工程学院 机械工程学院, 郑州 451191)

摘 要: **目的** 探讨含氮硼酸酯的摩擦学性能及轧制润滑性能。**方法** 合成一种新型含氮硼酸酯挤压抗磨添加剂 (NB)。将合成的含氮硼酸酯分别和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯进行复配后加入铝材轧制基础油中, 配制成多种铝材轧制润滑油。利用四球摩擦磨损试验机考察多种铝材轧制润滑油摩擦学性能, 利用轧制实验考察其轧制润滑性能, 利用扫描电子显微镜观察轧后表面形貌。对多组样品的磨斑直径、摩擦系数、最大无卡咬负荷、轧制压力、轧制摩擦系数、最小可轧厚度和轧后表面质量进行对比, 探究含氮硼酸酯复配比例对铝材轧制润滑油摩擦学性能和轧制润滑性能的影响。**结果** 当含氮硼酸酯和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯的复配系数为 0.5 和 0.25 时, 样品的摩擦系数分别降低了 35.2% 和 18.4%, 磨斑直径分别降低了 48.4% 和 19%, 表现出比单体添加剂更好的抗磨减摩效果。轧制实验也表明, 添加含氮硼酸酯后, 实验轧制压力降低到了 164 MPa 和 160 MPa, 轧制摩擦系数降低到了 0.076 和 0.078, 最小可轧厚度分别减少了 23% 和 21%。轧后铝板表面平整, 犁沟深浅均一, 表面质量好。**结论** 铝材轧制基础油中加入含氮硼酸酯后, 改善了摩擦学性能和轧制润滑性能。含氮硼酸酯分别与磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯复配后具有良好的协同效应, 轧件表面质量好。

关键词: 含氮硼酸酯; 铝材; 轧制; 润滑性能; 摩擦学性能; 协同效应; 表面质量

中图分类号: TG356.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0098-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.015

Effects of Nitrogen-containing Borate Ester on Tribological Properties and Surface Quality of Rolled Aluminium Sheet

ZHAO Yong-tao^{1,2}, SUN Jian-lin¹, WANG Cheng-long¹, ZHANG Hong-song²

(1.School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2.School of Mechanical Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

ABSTRACT: The work aims to study tribological properties and rolling lubrication performance of nitrogen-containing borate ester. A new extreme pressure anti-wear additive of nitrogen-containing borate ester (NB) was synthesized. The synthesized nitrogen-containing borate ester was firstly mixed with tributyl phosphate, tricresyl phosphate, respectively. Then the mixture

收稿日期: 2018-05-13; 修订日期: 2018-07-13

Received: 2018-05-13; **Revised:** 2018-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51274037); 教育部“春晖计划”项目 (Z2012080); 河南省高校科技创新团队 (18IRTSTHN005)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of China(51274037); "Chunhui Project" of Ministry of Education (Z2012080) and Science and Technology Innovation Team of Henan University (18IRTSTHN005)

作者简介: 赵永涛(1979—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为轧制润滑, 摩擦磨损。

Biography: ZHAO Yong-tao(1979—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: friction and wear of metal material, rolling lubrication.

通讯作者: 孙建林 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轧制工艺润滑。

Corresponding author: SUN Jian-lin(1963—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: rolling lubrication.

was added to aluminum rolling base oils in proper proportion, and finally aluminum rolling lubricating oil was prepared. Tribology properties of various lubricating oils for aluminum rolling were investigated by a four-ball friction-wear tester. Rolling lubrication performance was analysed by performing rolling experiment, rolled surface morphology was observed by scanning electron microscope. By comparing wear scar diameter, friction coefficient, maximum non-seizure load, rolling pressure, friction coefficient of rolling, minimum rolling thickness and rolled surface quality, the influences of mixing proportion of nitrogen-containing borate ester on tribological properties and rolling lubrication performance were investigated. When the mixing coefficient of nitrogen-containing borate ester to tributyl phosphate, tricresyl phosphate was 0.5 and 0.25, respectively; friction coefficient of the sample decreased by 35.2% and 18.4%, respectively; and wear scar diameter decreased by 48.4% and 19%, respectively, which showed better anti-wear and anti-friction effects than monomer additives. The rolling pressure reduced to 164 MPa and 160 MPa, respectively; the friction coefficient of rolling reduced to 0.076 and 0.078, respectively; and the minimum rolling thickness decreased by 23% and 21%, respectively. Rolled surface was smooth and of good quality with uniform furrows. Tribological properties and rolling lubrication performance are improved by nitrogen-containing borate ester, mixture of the two has good synergistic effect, and rolled pieces are of good surface quality.

KEY WORDS: nitrogen-containing borate ester; aluminum; rolling; lubrication performance; tribological properties; synergistic effect; surface quality

铝材轧制过程中，磷酸酯作为润滑油添加剂很早就开始广泛使用，含磷添加剂会在摩擦表面形成一层由磷酸盐组成的边界润滑薄膜，从而具有良好的极压抗磨性能，但酸性磷酸盐易产生化学腐蚀，含磷化合物还对环境有一定的污染^[1-3]。高速、宽幅、大压下率是新型铝材轧制的发展方向，这对铝材轧制润滑油提出了更高的要求。国内外的研究表明，能够替代现有极压抗磨添加剂的方向是极压抗磨活性元素和杂环官能团结合在同一分子内的含 N 杂环衍生物。此类新型添加剂具有高效、环保的特点，得到推广应用。如将 N 元素引入到硼酸酯中，可以和 B 原子形成较稳定的配位键，制成的含氮硼酸酯在一定程度上提高了抗磨减摩的效果。如果将含氮硼酸酯和传统磷酸酯类添加剂复配，具有更好的抗磨减摩效果^[4-8]。为了在铝材高速轧制条件下得到良好的轧材，本文合成了一种新型含氮硼酸酯，并将合成的含氮硼酸酯分别和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯复配后加入铝材轧制基础油中，考察其复配后的摩擦学特性。利用轧制实验观察轧制过程中的摩擦系数、轧制压力和最小可轧厚度

的变化，最后观察轧后表面质量。结果证明了合成的含氮硼酸酯作为铝材轧制油添加剂的可行性，以及含氮硼酸酯和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯在摩擦学性能和轧制润滑性能上的协同效应。

1 实验

1.1 材料

实验中的铝板选用 1100 工业纯铝作为轧制实验材料，其化学成分见表 1。实验中所用轧制基础油选用商用 T80、T90 和 T100 铝箔和铝板轧制油，其主要理化性能指标见表 2。

表 1 实验用工业纯铝的化学成分
Tab.1 Chemical composition of commercial pure aluminum for experimental use

wt%					
Element	Al	Si+Fe	Cu	Zu	Mn
Content	99	≤0.95	0.05~0.20	0.10	0.05

表 2 实验用基础油主要理化性能指标
Tab.2 Physicochemical properties indicators of base oils for experimental use

Parameter	Density (20 ℃)/(g·cm ⁻³)	Kinematic viscosity (40 ℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	Open flashing point/℃	Acid value/ (mg KOH·g ⁻¹)	Distillation range/℃	Content of aromatic hydrocarbon/%
T80	0.81	1.79	80	<0.01	198~260	<0.2
T90	0.82	2.03	85	<0.01	223~261	<0.2
T100	0.85	2.29	90	<0.01	235~265	<0.2
Method	GB/T265—1998	GB/T 265—1988	GB/T 261—2008	GB/T 264—1983	GB/T 6535—2010	SH/T 0409—1992

实验用油性剂选用混合脂肪醇和脂肪酸酯，极压抗磨剂选用新型含氮硼酸酯和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯进行复配，考察它们的协同效应。

1.2 方法

有机硼酸酯作为一种绿色环保型的添加剂得到

了广泛的关注,文中合成了一种含氮硼酸酯,该化合物结构式为 $C_{18}H_{37}-N-(CH_2CH_2OH)_2-B-OH$ 。采用红外光谱分析仪(Nicolet 6700 美国 Thermo Fisher)对合成的含氮硼酸酯进行了结构分析,分析结果如图1所示。由图1可见,在 $1310\sim 1380\text{ cm}^{-1}$ 处出现吸收峰,说明化合物中存在有机硼酸酯 $B-O$ 键,而在 $1000\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ 处出现吸收峰,说明该化合物有 $C-N$ 键存在,证明该化合物为含氮类硼酸酯。另外图1中的 $2800\sim 3000\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰说明存在 CH_2 、 CH_3 ,而在 $3300\sim 3400\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰则说明存在 $B-OH$ 键,进一步证明了该化合物为长链含氮硼酸酯。

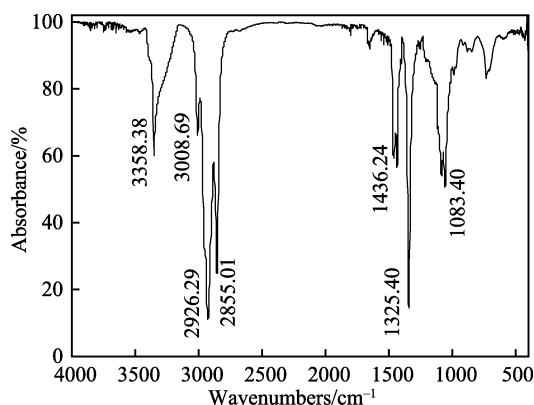


图1 含氮硼酸酯的FTIR分析结果

Fig.1 FTIR analysis results of nitrogen-containing borate ester

将得到的含氮硼酸酯和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯按一定比例进行复配,加入到基础油中得到铝轧制油。采用四球摩擦磨损试验机(MR-S10 济南试金)对轧制油的摩擦学性能进行测试,测试的标准符合GB/T 12583—1998 标准方法,测试可得到该轧制油的最大无卡咬负荷值(测试条件:载荷为196 N,转速为1760 r/min,室温为25℃,时间为10 s)、摩擦系数值(测试条件:载荷为392 N,转速为1200 r/min,室温为25℃,时间为30 min),并通过带度数刻度的显微镜观察记录四球实验后的磨斑值。

在四辊可逆式实验轧机(J2Q500-23)上进行铝材轧制模拟实验,轧制润滑油采用配制的铝轧制油。轧制实验中的规范见表3,铝板坯料的初始厚度为

表3 轧制实验中的轧制规范
Tab.3 Mill conditions of rolling experiment

Rolling pass	Thickness/mm	Rolling reduction/mm	Relative draught/%
1	24	6	20
2	14.4	9.6	40
3	7.5	6.9	47.9
4	4	3.5	46.7
5	2.5	1.5	37.5
6	2	0.5	25

30 mm。轧制压力和轧制摩擦系数可由实验轧机直接获得。在实验轧制上用厚度为1 mm的铝板做最小可轧厚度实验,测量最小可轧厚度。线切割实验后的铝板,并利用扫描电子显微镜(Quanta 250, 捷克 FEI 公司)观察样品形貌。

2 结果与讨论

2.1 摩擦学性能

将含氮硼酸酯(NB)分别和磷酸三甲苯酯(TCP)、磷酸三丁酯(TBP)按一定质量分数比例进行复配,加入到基础油中得到铝轧制油。复配情况见表4和表5,表中 x 为复配比例系数。复配后极压抗磨剂在轧制油中的质量分数控制在1%。

表4 含氮硼酸酯(NB)和磷酸三甲苯酯(TCP)复配结果

Tab.4 Mixing results of NB and TCP

Number of samples	C1	C2	C3	C4	C5
$NB_xTCP_{(1-x)}$	$x=0$	$x=0.25$	$x=0.5$	$x=0.75$	$x=1$

表5 含氮硼酸酯(NB)和磷酸三丁酯(TBP)复配结果
Tab.5 Mixing results of NB and TBP

Number of samples	B1	B2	B3	B4	B5
$NB_xTBP_{(1-x)}$	$x=0$	$x=0.25$	$x=0.5$	$x=0.75$	$x=1$

图2给出了含氮硼酸酯分别和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯按一定比例进行复配后,磨斑直径WSD的变化曲线。轧制油中含1%的含氮硼酸酯、磷酸三甲苯酯和磷酸三丁酯时,磨斑直径分别为0.54、0.62、0.42 mm。可以看出,单体NB和TBP的抗磨性能优于TCP。一般抗水解性能好的,极压抗磨性能反而差,TCP由于苯环的共轭效应而使其具有较好的水解性能,抗磨性能不明显^[9]。当NB按比例加入TCP后,WSD大幅度减小,特别是当复配比例 $x=0.5$,即NB和TCP的质量比为1:1时,WSD的减小幅度为48.4%,达到最优抗磨效果,说明两者在抗磨性能上具有良好的协同效应。当复配比例 $x=0.25$ 时,NB和TBP复配达到最佳比例,WSD的减小幅度最大,达到了19%,达到最优抗磨效果,同样说明在抗磨性能上两者具有良好的协同效应。

图3给出了含氮硼酸酯分别和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯按一定比例进行复配后,摩擦系数 μ 的变化曲线。轧制油中含1%的NB、TCP、TBP时,摩擦系数分别为0.084、0.105、0.076,单体添加剂的 μ 较大,减摩性能不明显。当NB按比例加入TCP后, μ 大幅度减小,特别是当复配比例 $x=0.5$ 时, μ 值为0.068,降幅达到了35.2%,达到了最佳减摩效果。当NB按比例加入TBP后,复配比例 $x=0.25$ 时, μ 的减小幅度最大,达到了18.4%,达到最佳减摩效果。说明在减摩性能上,NB与TCP、TBP都具有良好的协同效应。

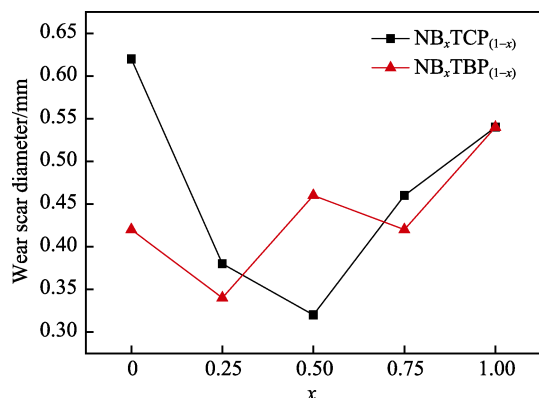


图 2 不同油样的磨斑直径

Fig.2 Wear scar diameter of different samples

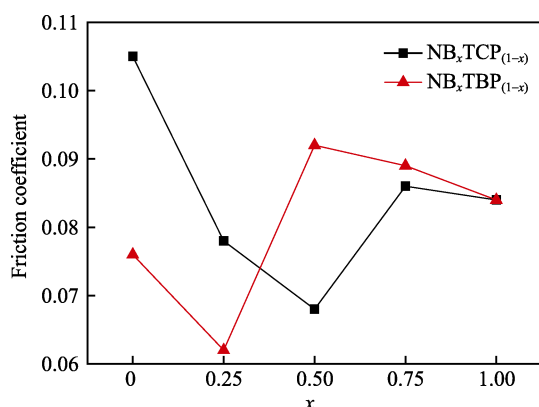


图 3 不同油样的摩擦系数

Fig.3 Friction coefficient of different oil samples

图 4 给出了含氮硼酸酯分别和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯按一定比例进行复配后,最大无卡咬负荷的变化曲线。最大无卡咬负荷代表着吸附油膜的极限,当载荷大于 P_B 值时,表面吸附油膜破裂,其值与油性剂和极压剂密切相关^[10]。单体 TCP 和 TBP 都具有良好的极压性能,单体 NB 的极压性能远不如极压添加剂 TCP 和 TBP。当含氮硼酸酯分别和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯按一定比例进行复配后,最大无卡咬负荷出现了不同程度的下降。NB 的加入在一定程度上稀释了极压添加剂的浓度,而油品的极压性能主要

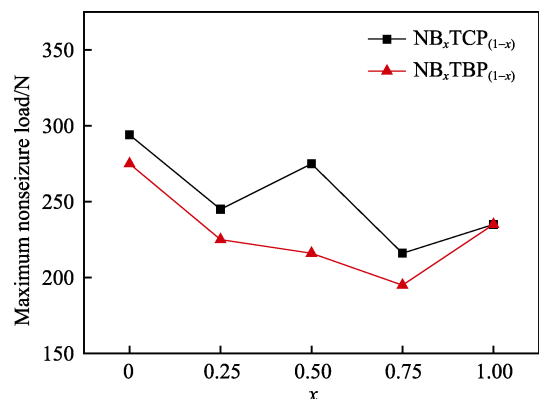


图 4 不同油样的最大无卡咬负荷

Fig.4 Maximum non-seizure load of different oil samples

取决于极压剂和油性剂^[11]。还有可能的原因在于极压实验条件下,实验钢球接触点部分表面磨损,新的铁表面不断出现,含有大量电子的新的铁表面将会吸引 B 原子和 P 原子形成新的吸附薄膜,NB 的加入使得新的铁表面 P 原子含量下降,极压性能随之下降^[8]。含氮硼酸酯的加入一定程度降低了 P_B 值,但仍能满足一般工况条件下的使用。

2.2 轧制润滑性能

轧制过程中,轧制油在铝材和轧辊之间形成润滑油膜,能够有效地减小摩擦系数,降低轧制压力^[12-14]。由图 5 和图 6 可以看出,NB 和 TCP 复配,当复配系数为 0.50 时,轧制压力降低到了 164 MPa,轧制摩擦系数降低到了 0.076;NB 和 TBP 复配,当复配系数为 0.25 时,轧制压力降低到了 160 MPa,轧制摩擦系数降低到了 0.078。其规律性符合减摩抗磨性能试验规律,同时证明 NP 与两者复配后具有良好的协同效应。

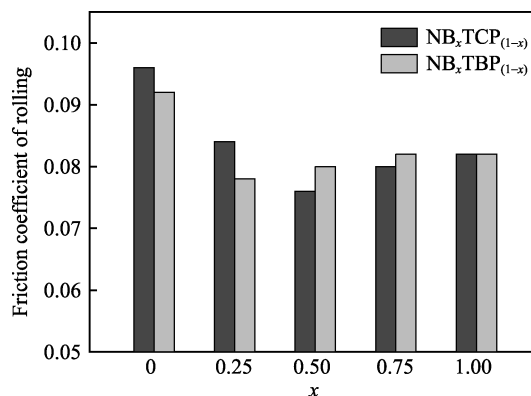


图 5 轧制摩擦系数

Fig.5 Friction coefficient of rolling

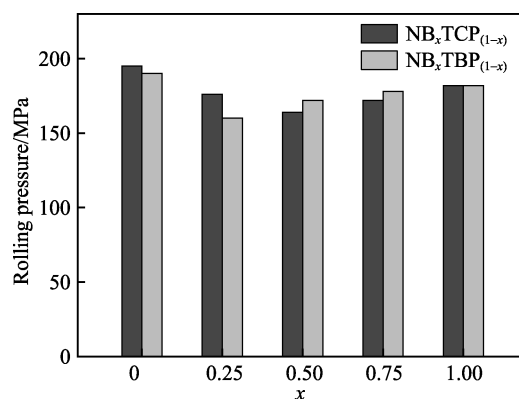


图 6 轧制压力

Fig.6 Rolling pressure

由 Stone 推导出的最小可轧厚度公式^[15-16]可知,如果其他条件确定,变形区的摩擦系数和最小可轧厚度成正比例关系。虽然许多学者的研究发现,试验测定的最小可轧厚度远小于 Stone 公式计算得到的结果^[17-18],但两者依然保持正比例关系。由图 7 和图 8 可知,NB 和 TCP 复配系数为 0.50,NB 和 TBP 复配

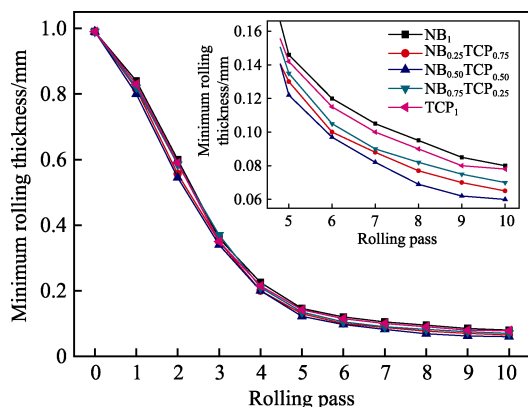


图7 TCP添加NB后的最小可轧厚度
Fig.7 Minimum rolling thickness of NB-doped TCP

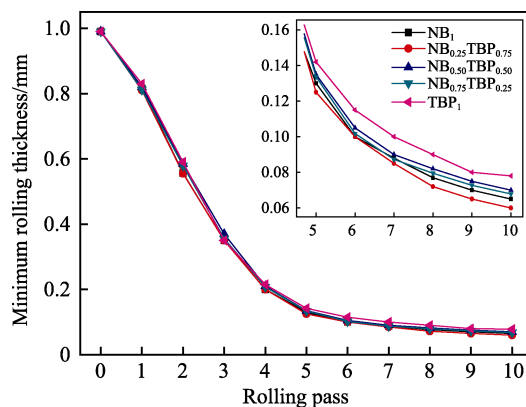


图8 TBP添加NB后的最小可轧厚度
Fig.8 Minimum rolling thickness of NB-doped TBP

系数为 0.25 时,和单体添加相比,最小可轧厚度分别下降了 23% 和 21%,其规律性和轧制变形区的摩擦系数变化规律一致。

2.3 轧后表面质量

从图 9 中的 C1、B1 可以看出,单体 TCP 和 TBP

加入轧制油后,都具有较好的轧制润滑性能。当含氮硼酸酯分别和磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯按一定比例进行复配后,轧制润滑性能进一步提升,轧件表面质量进一步改善。由图 9 中的 C2、C3、C4 和 B2、B3、B4 可以看出,加入 NB 后,轧件表面平整,表面粗糙度明显改善,轧件表面存在着均匀细小的犁沟,表

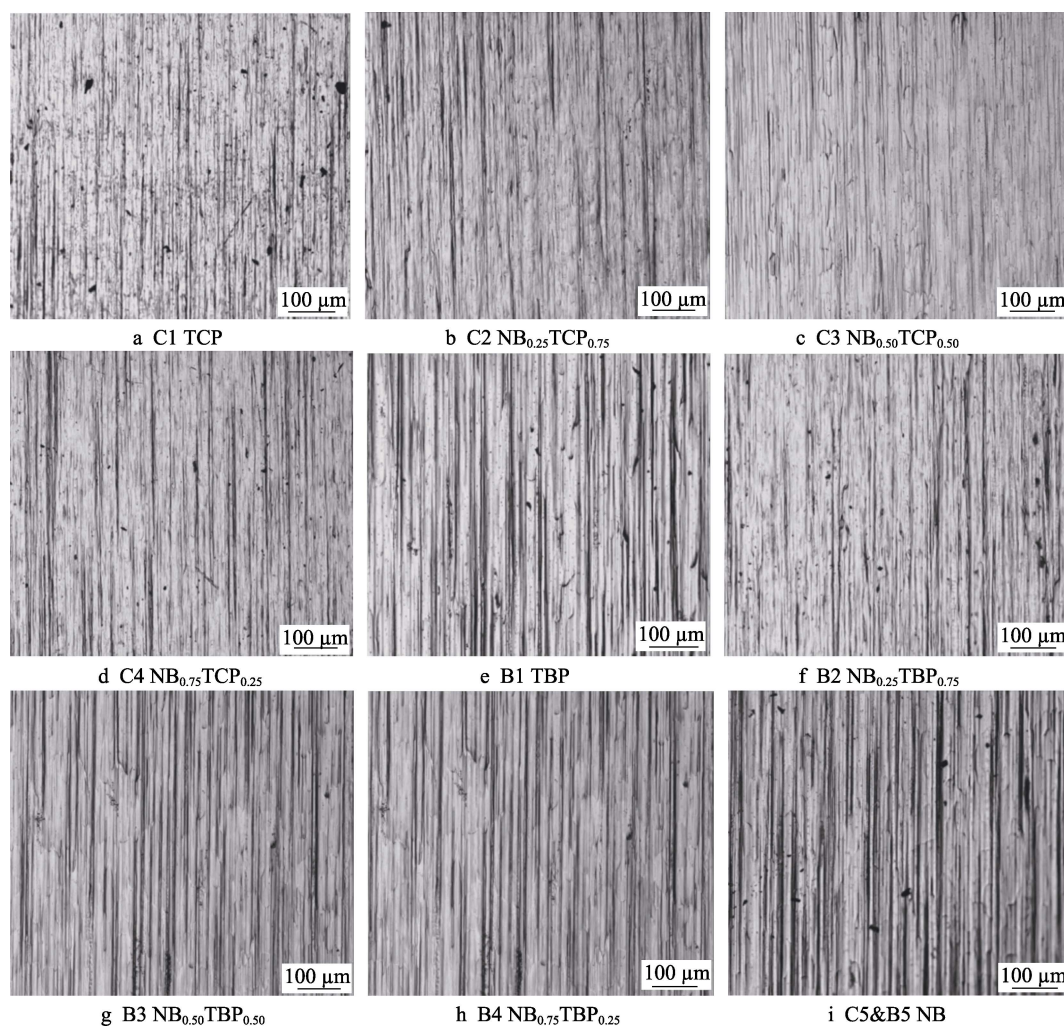


图9 不同润滑条件下轧后铝材表面形貌
Fig.9 Surface morphology of rolled aluminium sheet under different lubrication conditions

明摩擦表面形成了明显的摩擦保护膜,同时也证明了摩擦系数对轧制润滑质量的影响。NB 和 TCP、TBP 中的活性 N 和 P 原子与摩擦表面发生摩擦化学反应,反应产物为有机含氮硼酸酯金属络合物。其电负性高,易于吸附在金属表面形成润滑薄膜,有效地减少了轧制润滑区的摩擦系数,使得铝板带轧制变形区处于边界润滑状态,明显改善了轧件轧后表面质量,特别是在 NB 和 TCP 复配系数为 0.50, NB 和 TBP 复配系数为 0.25 时。图 9 中 C3 和 B2 是轧件轧后表面质量最好的,同样证明了 NB 分别与 TCP、TBP 之间的协同效应^[19-20]。

3 结论

1) 含氮硼酸酯分别与磷酸三甲苯酯、磷酸三丁酯按一定比例进行复配后,当复配系数分别为 0.50 和 0.25 时,达到了最佳复配效果。磨斑直径分别下降了 48.4% 和 19%,说明抗磨效果明显;摩擦系数分别下降了 35.2% 和 18.4%,说明减摩性能突出,证明两者复配后具有很好的协同效果;极压性能虽然有所降低,但不影响正常工况下的使用。

2) 轧制润滑实验表明,含氮硼酸酯的加入明显降低了轧制摩擦系数和轧制压力,轧制摩擦系数分别减小了 21% 和 15.2%,轧制压力分别降低了 15.9% 和 15.7%。最小可轧厚度实验进一步证明了含氮硼酸酯加入后复配效果良好。轧件表面质量也证明了最佳复配系数下,轧制效果最佳,轧件表面平整,犁沟深浅均一,轧件表面质量好。

参考文献:

- [1] 万勇, 薛群基. 含磷抗磨、极压添加剂在铝-钢摩擦副中摩擦学特性的研究[J]. 石油学报(石油加工), 1996, 12(4): 108-114.
WAN Yong, XUE Qun-ji. An investigation of tribological properties of p-containing AW and EP additives in lubricated aluminum-on-steel contact[J]. Acta petrolei sinica (petroleum processing section), 1996, 12(4): 108-114.
- [2] 徐敏. 航空润滑油极压抗磨剂的摩擦学性能研究[J]. 润滑油, 2001, 16(4): 60-64.
XU Min. Study on tribological behaviors of aviation lubricating oils with different AW & EP additives[J]. Lubricating oil, 2001, 16(4): 60-64.
- [3] 刘维民, 夏延秋, 薛群基. 磷氮型极压抗磨添加剂对钢-铝摩擦副摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(5): 331-335.
LIU Wei-min, XIA Yan-qiu, XUE Qun-ji. Effect of P-N type extreme pressure and anti-wear additive on the friction and wear behaviour of aluminum-steel sliding pair[J]. Tribology, 2000, 20(5): 331-335.
- [4] 李莉. 聚酰胺酰亚胺涂层制备工艺及摩擦性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [5] LI Li. Study on preparation and friction properties of polyamide imide coatings[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [6] 龚殿婷, 李风华, 张宏军. 一种含磷硼酸酯润滑油添加剂的制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 210-213, 218.
GONG Dian-ting, LI Feng-hua, ZHANG Hong-jun. Synthesis and property of phosphorus-containing borate as lubricant additive[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(1): 210-213, 218.
- [7] ZHANG Ya-wen, ZENG Xiang-qiong, WU Hua, et al. The tribological chemistry of a novel borate ester additive and its interaction with ZDDP using XANES and XPS[J]. Tribology letters, 2014, 53(3): 533-542.
- [8] YAN Jin-can, ZENG Xiang-qiong, REN Tian-hui, et al. The tribological performance and tribochemical analysis of novel borate esters as lubricant additives in rapeseed oil[J]. Tribology international, 2014, 71(1): 149-157.
- [9] 范冰极, 李建昌, 任天辉. 含氮硼酸酯与磷酸酯添加剂在 PAO10 中的摩擦特性协同效应[J]. 润滑与密封, 2016, 41(8): 19-23.
FAN Bing-ji, LI Jian-chang, REN Tian-hui. Synergistic effect of tribological performances of n-containing borate ester and phosphate ester as additives in PAO10[J]. Lubrication engineering, 2016, 41(8): 19-23.
- [10] 黄文轩. 润滑油添加剂性质及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
- [11] HUANG Wen-xuan. Properties and application of lubricant additive[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012.
- [12] 孙令国, 王永刚, 张立, 等. 含磷酸酯胺盐官能团硼酸酯衍生物的摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(1): 52-55.
- [13] SUN Ling-guo, WANG Yong-gang, ZHANG Li, et al. Tribological properties of a novel borate derivative containing amine phosphate[J]. Lubrication engineering, 2010, 35(1): 52-55.
- [14] 孙建林. 材料成形摩擦与润滑[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [15] SUN Jian-lin. Material forming friction and lubrication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.
- [16] PANAGOPOULOS C N, GEORIOU E P. Cold rolling and lubricated wear of 5083 aluminium alloy[J]. Materials and design, 2010, 31(3): 1050-1055.
- [17] LE H R, SUTCLIFFE M P F. Analysis of surface roughness of cold-rolled aluminium foil[J]. Wear, 2000, 244(1): 71-78.
- [18] 周亚军, 毛大恒, 肖刚, 等. 绿色环保型的铝材轧制润滑添加剂的研制及其性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 1038-1040.
- [19] ZHOU Ya-jun, MAO Da-heng, XIAO Gang, et al. Development of environmental friendly lubricant additives used in rolling aluminum and its properties[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2003, 13(4): 1038-1040.
- [20] STONE M D. Rolling of thin strip[J]. Iron and steel en-

- gineer, 1953, 30(2): 61.
- [16] STONE M D. Rolling of thin strip part II [J]. Iron and steel engineer, 1956, 33(12): 55.
- [17] TATENO J, HIRUTA T, KATSURA S, et al. Experimental analysis of thickness reduction limits in ultra-thin stainless steel foil rolling[J]. ISIJ international, 2011, 51(5): 788-792.
- [18] 任忠凯, 肖宏, 刘晓. 极薄带最小可轧厚度理论及试验分析[J]. 钢铁, 2017, 52(8):60-64.
REN Zhong-kai, XIAO Hong, LIU Xiao. Theoretical and experimental analysis of minimum thickness in ultra-thin strip rolling[J]. Iron and steel, 2017, 52(8): 60-64.
- [19] 熊桑, 孙建林, 徐阳, 等. 基于分子动力学理论制备含氮磷酸酯添加剂及其摩擦学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1721-1729.
XIONG Sang, SUN Jian-lin, XU Yang, et al. Preparation of nitrogen- and phosphorus-containing boric acid ester additive based on molecular dynamics theory and its tribology properties[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2015, 25(6): 1721-1729.
- [20] LI J C, LI Z P, REN T H, et al. Hydrolytic stability and tribological properties of n-containing heterocyclic borate esters as lubricant additives in rapeseed oil[J]. Tribology international, 2014, 73: 101-107.