

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.017

混合乳化液车削 5083 铝合金时的冷却润滑性能研究

王战,杜晓旭,李宗高,付林泊,陈月涛,杨双,卢伟龙,程家威

(郑州三磨超硬材料有限公司,河南 郑州 450001)

摘要:为降低矿物油切削液的使用,制备了蓖麻油/花生油混合乳化液,并将其与矿物油、花生油和蓖麻油乳化液在浇注和微量润滑条件下进行车削 5083 铝合金试验,观察前刀面磨损形貌与元素成分,分析混合乳化液的冷却润滑性能。结果表明:前刀面磨损形式均以粘结磨损和微崩刃为主。同时,由于混合乳化液在刀屑界面形成了减摩效果更好的协同润滑膜,故粘结磨损和微崩刃程度最低。

关键词:混合乳化液;协同润滑;5083 铝合金;车削试验;摩擦磨损

中图分类号:TG506 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)03-0083-05

Research on Cooling and Lubrication Performance of Mixed Emulsion When Turning 5083 Aluminum Alloy

WANG Zhan, DU Xiaoxu, LI Zonggao, FU Linbo, CHEN Yuetao, YANG Shuang, LU Weilong, CHENG Jiawei

(Zhengzhou Sanmo Super Hard Materials Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To reduce the use of mineral oil cutting fluids, a castor oil/peanut oil mixed emulsion was prepared. Turning tests on 5083 aluminum alloy were conducted under flood and minimum quantity lubrication (MQL) conditions using this mixed emulsion, as well as mineral oil, peanut oil, and castor oil emulsions. The wear morphology and elemental composition of the rake face were observed, and the cooling and lubrication performance of the mixed emulsion was analyzed. The results show that the wear types on the rake face were mainly adhesive wear and micro-chipping. At the same time, due to the formation of a synergistic lubrication film with better anti-friction effect on the tool-chip interface by the mixed emulsion, the degrees of adhesive wear and micro-chipping were the mildest.

Keywords: mixed emulsion; synergistic lubrication; 5083 aluminum alloy; turning test; friction and wear

0 引言

矿物油切削液成本高、有毒性且难降解,对环境和人类健康造成严重威胁^[1-2]。为此,国内外学者提出绿色切削概念,探究植物油代替矿物油的可能性。一些学者通过摩擦磨损试验发现植物油乳化液的润滑性能优于矿物油乳化液^[3-5]。刘晓帆^[6]通过拉削试验证实,在特定工艺条件下,蓖麻油乳化液可有效应用于金属切削过程,具备可靠的减磨润滑性能与技术可行性。此外,一些学者还发现当乳化液中植物油的质量分数为 10% 左右时,在降低切削温度和刀具磨损方面优于矿物油乳化液^[7-8]。

此外,国内外学者还对如何减少切削液的使用开展了很多的研究,主要包括干切削、低温冷却切削及微量润滑切削等技术。综合对比可知,微量润滑切削的适用场景更为广泛。一些学者发

现,使用超声波雾化的植物油乳化液所获得的切削力更低^[9]。同时,在最小微量润滑(minimal quantity lubrication, MQL)条件下,刀具的磨损程度显著减小^[10]。与此同时,一些学者还对 MQL 的雾化效果进行了研究^[11-12],发现气流差越大且黏度越小,雾粒直径就越小,渗透性越强,润滑性越好。同时,在最小微量润滑下的植物油乳化液的润滑性能更优^[13]。

综上所述,目前还未有开展混合植物油乳化液对车削 5083 铝合金冷却润滑性能的研究,基于此,本文制备了混合型乳化液,通过切削 5083 铝合金来试验研究其润滑性能,为进一步分析混合植物油乳化液的冷却润滑性能提供依据。

1 试验条件

1.1 乳化液的制备

将花生油与蓖麻油混合,制备得到一种新型

第一作者简介:王战(1982—),男,河南郑州人,高级工程师,本科,研究方向为晶圆切割和封装切割用划片刀产品研发,19525327625@163.com。

的混合乳化液作为研究对象即花生油/蓖麻油乳化液(H/B)。其目的在于发挥两种植物油的协同作用,提高润滑效果。同时,以矿物油乳化液(M)、花生油乳化液(H)以及蓖麻油乳化液(B)作为对照,三种基础油的物理特性如表1所示。

表1 乳化液基础油的物理特性

类型	矿物油	蓖麻油	花生油	水
黏度/($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	40	535.3	50.5	1
导热系数/($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	0.2	0.18	0.21	0.54

基于绿色环保理念,选择亲水性的 Tween 80 和亲油性的 Span 80 为表面活性剂来制备乳化液,其具体过程如下:

将矿物油、蓖麻油、花生油以及蓖麻油/花生油混合油(质量比 1:1)分别与质量分数为 4% 的复配乳化剂(Span80 与 Tween80)混合,然后与水按照 1:9 的质量比混合,利用超声波清洗器超声乳化 10 min,并保持加热温度在 40 °C - 50 °C 之间,分别制备出质量分数为 10% 的矿物油乳化液(M)、蓖麻油乳化液(B)、花生油乳化液(H)和蓖麻油/花生油混合乳化液(B/H)。

由图1可以看出,静置 1 h 后得到的 4 种乳化液黏度与其原始黏度相差不大,黏度降幅较小,由此说明 4 种乳化液的分散稳定性较好。

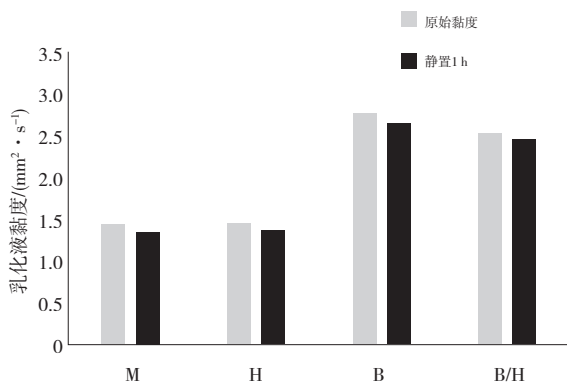


图1 静置 1 h 前后乳化液黏度变化

1.2 试验方案

采用 YG8 硬质合金刀具在 CA6140 车床上车削铝合金。刀片参数为:前角 $\gamma_o = 0^\circ$,后角 $\alpha_o = 11^\circ$,刃倾角 $\lambda_s = 0^\circ$,主偏角 $\kappa_r = 75^\circ$ 。研究在浇注(Flood)与微量润滑(MQL)条件下,切削长度为 400 mm 时乳化液的冷却润滑性能,切削过程统一采用表2中的工艺参数,具体如下:

表2 工艺参数

参数	数值
切削速度/(m/min)	110
进给量/mm	0.1
切削深度/mm	0.5
流量(Flood)/(L/h)	60
MQL/(m/h)	500
供气压力/MPa	0.5

利用压电晶体测力仪(JR-YDCL-III05B)测量切削三向力,采用 AS852B+型手持式测温枪测量刀具前刀面温度,利用扫描电镜和 X 射线能谱仪(EDS)分别观测前刀面磨损形貌与刀具前刀面的元素成分。

2 试验结果与分析

2.1 切削力

由图2可知,在相同条件下,H和B对应的切削三向力均小于M,由此证明植物油替代矿物油的可能性。同时,将H和B混合进一步减小了切削力,较H和B体现出了一定优势。就主切削力而言,B/H相对于M,在Flood和MQL情况下分别下降了7.1%、7.0%。

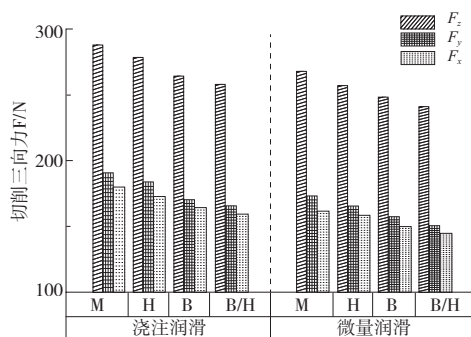


图2 乳化液类型对切削三向力的影响

此外,根据图2中切削力求出前刀面平均摩擦因数 $\mu^{[14]}$

$$\mu = \tan\left(\gamma_o + \arctan \frac{F_y}{F_z}\right) \quad (1)$$

式中: γ_o 为刀具前角; F_y 为径向力平均值; F_z 为切向力平均值。

由图3可知,在浇注和微量润滑条件下,M对应的刀具前刀面平均摩擦因数最大,H和B次之,B/H最小。再次表明,B/H的减摩润滑效果最好。

由图1可知,乳化液M和H的黏度相差不大,单位时间内进入刀屑界面的乳化液分子量基

本相同,但由于乳化液 H 中的花生油含有较多极性基团与极性分子,其在工作界面的吸附性与成膜性远高于 M,不仅降低了前刀面的平均摩擦因数,还减小了刀屑界面的切应力^[15],故切削过程更为稳定,切削力相对较小。同时,与 H 相比,虽然 B 的黏度较高,在刀屑界面的渗透能力较差,但蓖麻油酸含有特殊的羧基,使其吸附性和成膜性远高于 H,故 B 的润滑性优于 H,平均摩擦因数和切削力低于 H。

此外,将两种植物油混合得到的乳化液 B/H,综合了花生油的高渗透性与蓖麻油高吸附性、成膜性的优势,使其在刀屑接触区可以发挥协同润滑作用(具体过程见 2.4 节),形成稳定性强的协同润滑膜,延长润滑膜在刀屑界面的有效作用时间,故切削过程更为稳定,切削力与平均摩擦因数更低。

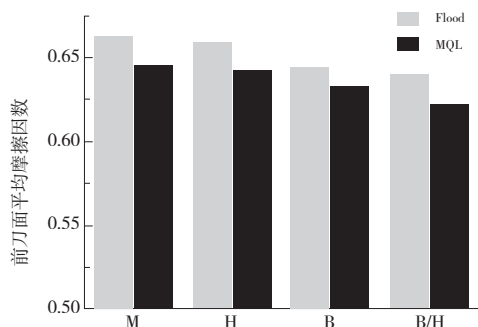


图3 乳化液类型对前刀面平均摩擦因数的影响

2.2 刀屑接触长度

由金属切削原理可知,前刀面的摩擦力主要来自于粘结区的摩擦力,因此粘结区长度对前刀面的摩擦力以及切削力有较大的影响。

首先,由式(1)计算出摩擦角 β ,浇注条件下 M、H、B、B/H 的摩擦角分别为 33.544° 、 33.384° 、 32.781° 、 32.620° ;微量润滑下 M、H、B、B/H 的摩擦角分别为 32.822° 、 32.700° 、 32.330° 、 31.880° 。然后代入剪切角 φ 的计算公式

$$\beta + \gamma_0 - \varphi = \pi/4 \quad (2)$$

式中:浇注条件下 M、H、B、B/H 的剪切角分别为 11.456° 、 11.616° 、 12.219° 、 12.380° ;微量润滑条件下 M、H、B、B/H 的剪切角分别为 12.178° 、 12.300° 、 12.670° 、 13.200° 。

最后,将上述结果代入刀屑接触总长度公式^[16]和粘结区长度公式分别计算出刀屑接触总长度、滑动区长度和粘结区长度。由图4可知,在两种润滑条件下,B/H 对应的刀屑接触长度最

小。就刀屑接触总长度而言,在浇注条件下,B/H 相较于 M、H、B 分别缩短了 7.3%、4.3%、2.2%;微量润滑条件下 B/H 相较于 M、H、B 分别缩短了 7.7%、6.7%、5.6%。由前述可知,B/H 在刀屑接触区的成膜率高,加之花生油与蓖麻油的协同润滑作用,使部分粘结区向滑动区转变,粘结区长度有所缩短,所以摩擦力减小,切削力也减小。

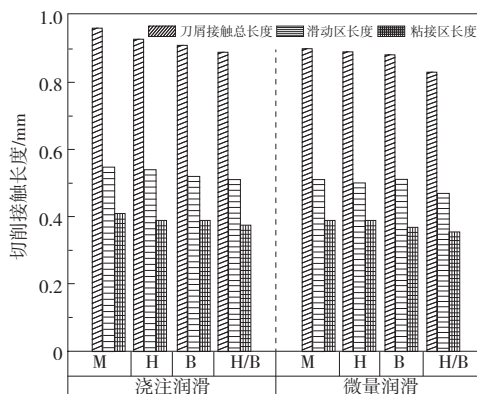


图4 乳化液类型对刀屑接触长度的影响

2.3 切削温度

图5为乳化液类型对切削温度的影响。在两种润滑条件下,B/H 对应的切削温度最小,冷却效果最好。其中,浇注条件下 B/H 相较于 M、H、B 分别下降了 12.5%、9.3%、6.8%;微量润滑条件下 B/H 相较于 M、H、B 分别下降了 12.5%、9.7%、5.3%。

在两种润滑条件下,切削液在刀屑接触区的冷却效果由直接冷却与间接冷却共同决定,其中直接冷却的作用机制为热传导,间接冷却机制为提高润滑性能,减小摩擦生热。由表1可知,3种基础油导热系数相当,根据乳化液导热系数计算公式^[17-18]可知,相同浓度的4种乳化液导热系数差别不大,所以4种乳化液的直接冷却作用相当,故冷却效果由间接冷却(润滑效果)决定。由2.1节分析可知,B、H的润滑效果优于M,因此其对应的切削温度低于M,同时,B/H的润滑效果优于B和H,因此B/H的切削温度也低于B和H。

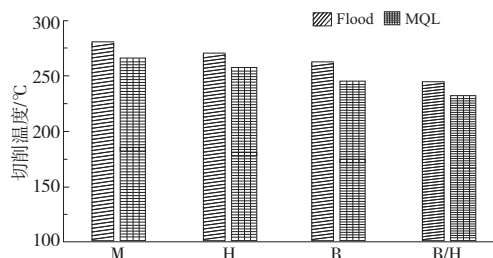


图5 前刀面的切削温度

2.4 前刀面磨损形貌及协同润滑机制

在微量润滑条件下,乳化液 M 和 B/H 作用下前刀面磨损形貌及 EDS 元素检测结果如图 6 和图 7 所示。

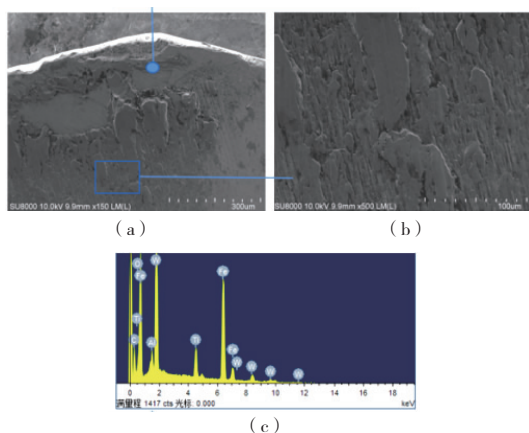


图 6 M 对应的前刀面磨损形貌及 EDS 检测

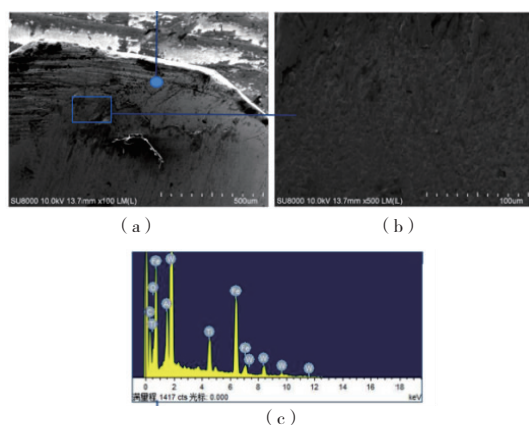


图 7 B/H 对应的前刀面磨损形貌及 EDS 检测

由图 6 可知,在两种润滑条件下 M 对应的前刀面磨损最严重,不仅有大块材料粘结,还有刀尖崩刃现象。在 B/H 润滑下,虽然依然存在刀尖崩刃和材料粘结现象,但是磨损程度大大减轻,磨损区更为平整,且前刀面磨损更为均匀,说明蓖麻油与花生油在刀屑界面充分发挥了协同润滑作用,最大程度地减小了刀具的磨损,延长了刀具的使用寿命。由图 6(a)、图 6(b)可知,在乳化液 M 润滑下,刀屑接触区存在严重的材料粘结现象,从刀尖附近 1 处的元素检测结果可知,刀尖处铁元素和氧元素的质量分数分别为 16.54% 和 35.08%,说明刀尖区域存在氧化磨损和粘结磨损。同时,刀尖存在微崩刃现象。由图 7(a)、图 7(b)可以看出,在乳化液 B/H 润滑条件下,刀尖及主切削刃附近的粘结现象大大减轻,前刀面磨损更加平整,并且刀尖

几乎没有微崩刃发生。从刀尖 1 处的元素检测结果可知,刀尖处 Fe 元素和 O 元素质量分数分别为 14.88% 和 22.17%,说明相对于 B/H 作用下的刀具的氧化和粘结磨损程度有所减轻。

在乳化剂的作用下,花生油和蓖麻油均匀地分散在水中。在供液系统作用下,低黏度的水与花生油会携带高黏度的蓖麻油一同进入刀屑接触区,增强了蓖麻油的渗透性。且在刀屑接触区内部三者存在竞争润湿现象^[19-20],即吸附性强的蓖麻油会优先吸附于工作表面,形成致密的蓖麻油膜,对工件表面起到一定的支撑作用。而黏度小、吸附性较差的花生油在蓖麻油膜外部定向排列,形成强度小且散热效果好的花生油膜。当受到切向载荷的作用时,整个油层沿花生油膜分离,因此减小了摩擦磨损,保护了刀具,如图 8 所示。

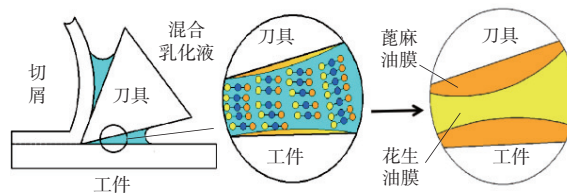


图 8 混合乳化液润滑机制示意图

3 结语

试验结果表明:1)在浇注和微量润滑条件下,植物油乳化液 H 和 B 的冷却润滑性能均优于矿物油乳化液 M。并且花生油与蓖麻油混合之后,可以在刀屑界面形成减摩效果更好的协同润滑膜,进一步减小了摩擦热的产生,并降低了刀具的摩擦磨损。2)虽然 H/B 的冷却润滑效果最优,但前刀面依然存在材料粘结和少量的刀尖磨损现象。

参考文献:

- [1] 朱紫丹,高邦志,季梦夏,等. 切削液的研究进展与趋势[J]. 中国建材科技,2025,34(增刊2):13-18.
- [2] 戴恩期,孔伟伟,熊红旗,等. 环保长效切削液技术与集成应用[J]. 润滑与密封,2023,48(5):164-172.
- [3] 张效天. 菜籽油环氧化异构酯化改性机理与磨削性能评价[D]. 青岛:青岛理工大学,2024.
- [4] 陈成,陈富宽,代芳,等. 植物油基切削液的改性方法与切削性能研究进展[J]. 表面技术,2025,54(21):159-184.
- [5] NOOR EL-DIN M R, MISHRIF M R, KAILAS S V, et al. Studying the lubricity of new eco-friendly cutting oil

- formulation in metal working fluid [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(9): 1569-1579.
- [6] 刘晓帆. 拉削加工过程微量蓖麻油基乳化液应用研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019.
- [7] 倪敬, 刘晓帆, 何利华, 等. 含添加剂蓖麻油切削液的拉削加工性能研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(23): 2849-2856.
- [8] SRIKANT R R, RAMANA V S N V. Performance evaluation of vegetable emulsifier based green cutting fluid in turning of American Iron and Steel Institute (AISI) 1040 steel - an initiative towards sustainable manufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 108: 104-109.
- [9] 杨简彰, 袁尧辉, 郑李娟, 等. 超声绿色复合加工技术与装备发展趋势[J]. 制造技术与机床, 2026(1): 60-72.
- [10] 宋爱利, 岳修杰, 张平, 等. 润滑方式对 7075 铝合金切削加工性能的影响分析[J]. 工具技术, 2025, 59(12): 52-61.
- [11] NARESH BABU M, ANANDAN V, MUTHUKRISHNAN N, et al. End milling of AISI 304 steel using Minimum Quantity Lubrication [J]. Measurement, 2019, 138: 681-689.
- [12] SCHUMSKI L, TONN T, SÖLTER J, et al. Minimum quantity lubrication (MQL) supply through internal cooling channels in drilling processes [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2024, 8(2): 69.
- [13] 邹静洁. 植物油基离子液体气辅式静电雾化切削性能评价与优化[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2025.
- [14] 曹同坤, 徐英涛, 谈庆瑶. 在刀-屑界面持续润滑刀具切削 45 钢的性能及润滑机理[J]. 中国机械工程, 2021, 32(20): 2411-2417, 2426.
- [15] 邢佑强. 多尺度表面织构陶瓷刀具的制备及其切削性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [16] 张伟, 曹同坤, 吕壮. 刀-屑界面持续润滑刀具的结构参数优化[J]. 工具技术, 2022, 56(9): 106-110.
- [17] 任付娥. 冲击载荷下轧辊轴承的乳化液润滑分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- [18] 杨靖. 环境友好型离子液体作为多功能水基润滑添加剂的摩擦学性能研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2025.
- [19] 刘宸旭, 陈朝浪, 张继平, 等. 油水乳化液的边界润滑行为及机理分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 48-54.
- [20] 关浩. 水与润滑油混合条件下 304 不锈钢的摩擦磨损性能研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.

收稿日期: 2026-01-07

(上接第 73 页)

2) 优化后的 CMC 叶型等熵马赫数分布更贴近于目标等熵马赫数分布, 优化后叶型总压损失系数与原始金属叶型相比虽相差 34.75%, 但相较于初始 CMC 叶型降低 17.61%。

3) 通过比较分析原始金属叶型与优化前后 CMC 叶型流场分布可以发现, CMC 叶型损失增大的主要原因是尾迹掺混损失, 优化后叶型损失降低主要是改善了叶栅通道内流场结构, 减少了通道内激波损失。

参考文献:

- [1] 杜昆, 陈麒好, 孟宪龙, 等. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 107-125.
- [2] 张良成, 彭中亚, 郭双全, 等. 航空发动机陶瓷基复合材料涡轮部件研究进展[J]. 航空维修与工程, 2016(12): 41-43.
- [3] 吴波. 航空发动机陶瓷基复合材料涡轮部件研究进展[J]. 企业科技与发展, 2018(8): 120-121.
- [4] 焦健, 齐哲, 吕晓旭, 等. 航空发动机用陶瓷基复合材料及制造技术[J]. 航空动力, 2019(5): 17-21.
- [5] 杨金华, 董禹飞, 杨瑞, 等. 航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展[J]. 航空动力, 2021(5): 55-59.
- [6] TRIGG M A, TUBBY G R, SHEARD A G. Automatic genetic optimization approach to two-dimensional blade profile design for steam turbines [J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(1): 11-17.
- [7] SONODA T, ARIMA T, OLHOFFER M, et al. A study of advanced high loaded transonic turbine airfoils [C]//Volume 5: Turbo Expo 2004, Parts A and B. Vienna, Austria: ASMEDC, 2004: 1275-1283.
- [8] 尚仁操, 乔渭阳. 基于参数法和贝塞尔曲线的涡轮叶片造型及其优化[J]. 机械设计与制造, 2007(8): 16-18.
- [9] 李志, 刘艳, 杨金广, 等. 超声速涡轮叶型全局气动优化设计[J]. 推进技术, 2019, 40(5): 1051-1057.
- [10] PRITCHARD L J. An eleven parameter axial turbine airfoil geometry model [C]//Volume 1: Aircraft Engine; Marine; Turbomachinery; Microturbines and Small Turbomachinery. Houston, Texas, USA: American Society of Mechanical Engineers, 1985: V001T03A058.

收稿日期: 2024-03-01