

# 基于拉伸试验的新型冲压模具镶件用复合材料摩擦学性能分析

周黎明<sup>1</sup> 杨欲晓<sup>1</sup> 李俊颖<sup>1</sup> 王明杰<sup>2</sup>

1. 河南水利与环境职业学院机电工程系,河南 郑州 450003

2. 河南省水电装备与智慧系统工程技术研究中心,河南 郑州 450003

**摘要:** 冲压模具的镶件常用于形状复杂且不易加工的模具中,以替换模具中易损坏的部件。然而镶件会降低整体模具的强度,因此,提高镶件的耐磨性可以保证整体模具的强度。采用 T4 铝合金、H13 钢和 Incoloy800 耐腐蚀镍合金三组板材试样进行了拉伸试验,研究不同材料类型对摩擦因数的影响。Incoloy800 耐腐蚀镍合金和耐高温模具钢 H13 在整个夹紧力范围内的摩擦因数最小值,是在用复合材料制成的压块进行测试时观察到的。T4 铝合金板材在复合材料试验夹紧测试中的摩擦因数最小,随着压力的增大,摩擦因数稳定在 0.2 左右。

**关键词:** 摩擦因数;复合材料;冲压模具

**中图分类号:** TB331

DOI: 10.3969/j.issn.2097-065X.2024.08.038

## 0 引言

冲压加工技术利用金属材料发生塑性变形,控制材料的流动得到相应的形状和尺寸。该技术成功的关键就是材料成形过程的流变条件以及加工过程中或结束后进行的热塑处理<sup>[1]</sup>。

在塑性成形过程中模具材料往往受到较大的压应力和摩擦力,模具表面的耐磨性和可靠性决定了模具的品质和寿命,耐磨性要求确保模具在生产过程中保持其形状在可接受的公差范围内<sup>[2]</sup>。模具表面的磨损降低了冲压件的质量,增加了生产成本。由于工件材料和模具刃口之间的热交换,随着模具刃口温度的升高,模具刃口的强度会下降。为了提高成形效率和可靠性,设计人员需要选用最优的模具材料,在常规的模具刃口磨损的条件下,在满足工件质量要求的前提下,保证冲压工艺的可靠性。

塑性成形过程能否顺利进行主要取决于温度、接触压力和加载历史<sup>[3]</sup>。该过程中产生的摩擦是决定因素,选择合适的刀具材料可确保摩擦在可控范围内进行。为保证耐磨性和形状稳定性,Liewald 和 deSouza (2008) 用工具钢或铸铁制作拉伸工具<sup>[4]</sup>,并且研究了在金属塑性成形中使用聚合物材料(含氢氧化铝和铝粉末填料的聚氨酯)的摩擦学和工具设计方面的问题。他们开发了一种用于测量聚合物/板材磨损的新测试方法:使用最小弹性模量为 11 000 MPa、抗压强度为 110 MPa 的聚合物材料,

可以使用高强度钢生产原型系列。Fontalvo 等<sup>[5]</sup>研究了在 X38CrMoV5-1 钢中加入硅铝对 25~500 °C 高温磨损的影响。Iwabuchi 等<sup>[6]</sup>从另一个角度模拟了高温磨损中氧化物的有益作用,其在室温磨损过程中在钢的磨面上填加氧化物颗粒,使之发生严重磨损向轻微磨损的转变,使得严重磨损体积减少至原来的 1/10。雷雪梅<sup>[7]</sup>等考察环氧/聚氨酯(EP/PU)互穿网络复合材料在宽温域环境中的摩擦学性能以及氧化石墨(GO)的添加对其摩擦学性能的影响。李琬华等<sup>[8]</sup>将高乙烯基溶聚丁苯橡胶(HVSSBR)与 TPU 进行橡塑共混来改善 TPU 材料的摩擦性能,并证明了热塑性聚氨酯这种材料具有非常好的摩擦性能。本文采用 T4 铝合金、H13 钢和 Incoloy800 耐腐蚀镍合金三种板材成形模具用新材料进行摩擦学性能研究。使用试样进行了拉伸试验,研究不同材料类型对摩擦因数的影响。新模具镶件材料包括由聚氨酯(EP/PU)和矿物填料组成的基础复合材料,以及用铝粉和粗纱织物改性的复合材料。在干摩擦条件下,采用带材拉伸试验对其摩擦性能进行了评价。

## 1 实验

### 1.1 试验材料选用

本试验采用含有聚氨酯(EP/PU)复合材料的四组压块进行摩擦试验,该复合材料由多元醇和多元异氰酸酯,并添加矿物材料(粉状氢氧化铝 Al(OH)<sub>3</sub>)而成,再通过添加铝粉(质量分数 10%)和粗纱(质量分数 5%)进行改性。长度为 35 mm 的长方形压块横截面形状尺寸如图 1 所示,组成成分如表 1

**基金项目:** 河南省科技攻关项目“超硬磨料磨粒族有序化排布砂轮数字化设计及磨削关键技术研究”(242102230147)

所示。T4 铝合金、H13 钢和 Incoloy800 耐腐蚀镍合金三种板材厚度为别为 2 mm、1 mm、1 mm。

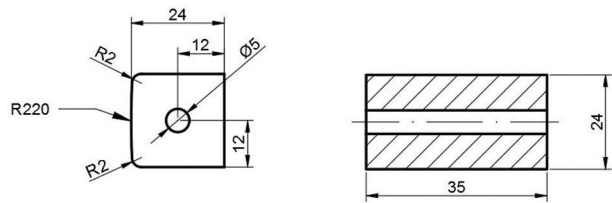


图 1 压块截面的形状和尺寸

表 1 压块类型及组成 %

压块类型	铝粉质量分数	粗纱质量分数
I (基本型)	—	—
II	—	6
III	12	—
IV	12	6

使用三丰便携式粗糙度仪 SJ-310 测量板料和压块的基本表面粗糙度参数值,见表 2。

表 2 压块与板材的表面粗糙度参数

对象	材料类型	$Sq(\mu\text{m})$	$Ssk$	$Sku$	$Sp(\mu\text{m})$	$Sv(\mu\text{m})$	$Sa(\mu\text{m})$
压块	I 基本型	3.13	0.468	6.32	25.6	10.6	2.14
	II	3.35	-0.108	2.23	11	12.8	2.6
	III	3.74	1.06	5.89	25.4	12.4	2.65
	IV	4.67	0.275	2.98	23.9	15	3.67
板材	T4 铝合金	0.381	-0.245	2.28	0.98	1.26	0.312
	H13 钢	0.254	-2.88	33.1	1.05	5.76	0.11
	Incoloy800 镍合金	0.210	-0.376	3.89	0.817	2.19	0.158

1.2 板材拉伸试验

采用摩擦试验机进行板材拉伸试验,确定摩擦因数(COF)值。测试示意图如图 2 所示,板材拉伸试验装置安装上水平放置的复合材料压块,在压块之间放置 300 mm、宽 15 mm 左右的金属板材,该装置需安装在型号为力显 HZ1007E 的拉力试验机中使用。

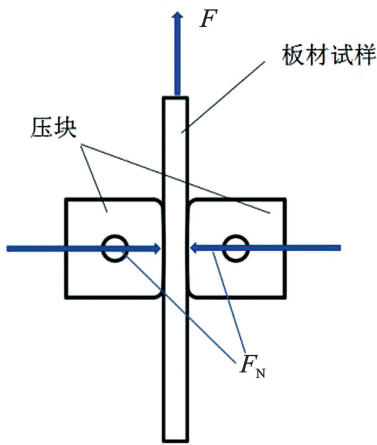


图 2 板材拉伸试验示意图

对复合材料压块施加一定压力挤压板材试样,压力  $F_N$  分别取:22、44、66、88、110、132、154 N。记录板材试样在压块之间移动的过程中,试验机的测量系统记录摩擦力  $F$  的值。摩擦因数  $\mu$  的值是通过摩擦力  $F$  和压力  $F_N$  计算得到的:

$$\mu = \frac{F}{2F_N} \tag{1}$$

最终计算出在不同压力水平下的摩擦因数  $\mu$  的平均值即可。

2 结果和讨论

随着夹紧力  $F_N$  的增大,摩擦因数  $\mu$  有减小的趋势,并且当夹紧力值超过 100 N 时,摩擦因数  $\mu$  的值起伏不明显。由此看出当夹紧力超过一定载荷值后,摩擦力与夹紧力之间的关系是非线性的,摩擦因数会随着压力的增大而变化,摩擦力也不与夹紧力成比例地变化。

Incoloy800 耐腐蚀镍合金板材的摩擦因数  $\mu$  在各组复合材料压块中的差值范围为 0.0134( $F_N = 156$  N)至 0.0311( $F_N = 104$  N),在一系列夹紧力范围内,观察了由复合材料 I 和 II 制成的压块的摩擦因数(图 3)。

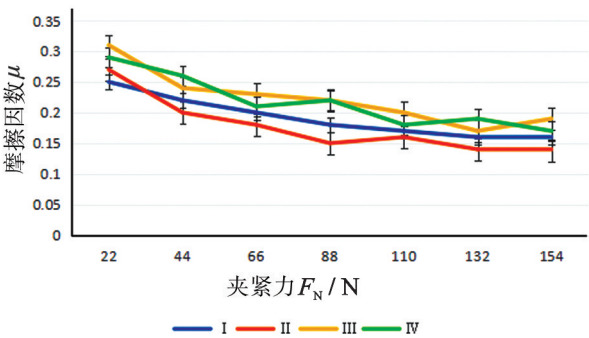


图 3 夹紧力对 Incoloy800 镍合金板材摩擦因数  $\mu$  的影响

H13 钢板材的摩擦因数  $\mu$  在各组复合材料压块中的差值范围为 0.0163( $F_N = 52$  N)和 0.0364( $F_N = 26$  N)。在夹紧力  $F > 100$  N 的范围内,复合材料基本型 I 号的摩擦因数  $\mu$  值最小,约为 0.148(图 4)。在一系列夹紧力范围内,复合材料 IV 号摩擦因数  $\mu$  值最大。

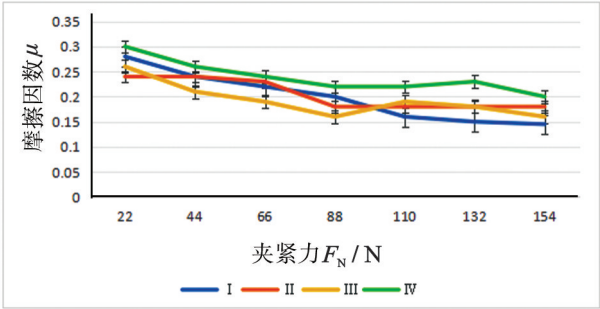


图 4 夹紧力对 H13 钢板摩擦因数  $\mu$  的影响

铝合金 T4 板在一系列夹紧力范围内,复合材料 IV 号的摩擦因数  $\mu$  最大。II 号复合材料提供了摩擦因数的最小值,在达到约 0.191 时趋于相对稳定(图 5)。AMS5510 板的摩擦因数  $\mu$  的 NN 差异在 0.0129( $F = 138\text{ N}$ )和 0.0254( $F = 69\text{ N}$ )之间(反样的各个变体)。

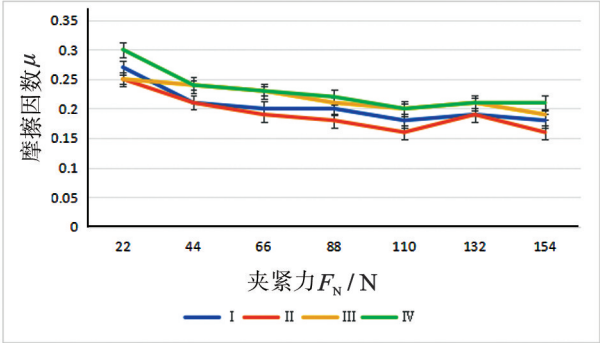


图 5 夹紧力对铝合金 T4 板摩擦因数  $\mu$  的影响

图 6~图 8 显示了不同材料的板材摩擦试验中,各种改性的复合材料压块的摩擦因数相对于基本型复合材料的百分比变化。在 Incoloy800 耐腐蚀镍合金板材的摩擦试验中,铝粉含量为 10% 的复合材料压块在整个夹紧力范围内的摩擦因数  $\mu$  的差异百分比甚至达到 12% 左右(图 6)。在夹紧力  $F$  为 44~110 N 范围内,粗纱含量 5% 的复合材料压块的摩擦因数  $\mu$  减少了 2%~4%。

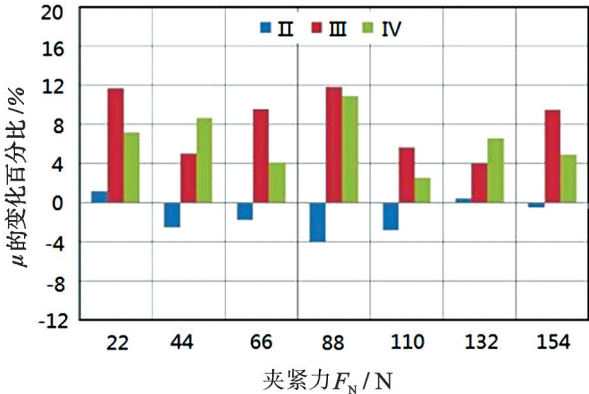


图 6 改性复合材料压块的摩擦因数  $\mu$  变化 (Incoloy800 耐腐蚀镍合金)

当对 H13 钢板在  $F$  为 110~154 N 的夹紧力范围内进行测试时,所有改性的复合材料压块的摩

擦因数  $\mu$  增加了 4%~18%(图 7)。然而,当对只添加铝粉(10%)或粗纱(5%)改性的复合材料压块进行测试时,在测试的整个夹紧力范围内,摩擦因数均减少。只添加 10% 的铝粉的复合材料在  $F_N$  为 22~88 N 的夹紧力范围内,摩擦因数降低 3.9%~8.4%。

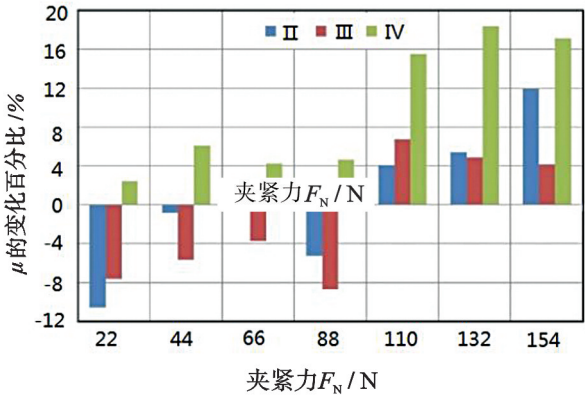


图 7 改性复合材料压块的摩擦因数  $\mu$  变化(H13 钢)

从图 8 可以看出,仅添加粗纱改性的复合材料最适合与 T4 铝合金板一起使用。在整个夹紧力测试范围内观察到摩擦因数  $\mu$  均减小。用铝粉和粗纱改性的材料的摩擦条件较差,摩擦因数  $\mu$  增加了 3.6%~9.7%(图 8)。随着夹紧力的增大,这些材料有一种对摩擦因数产生协同效应的趋势。

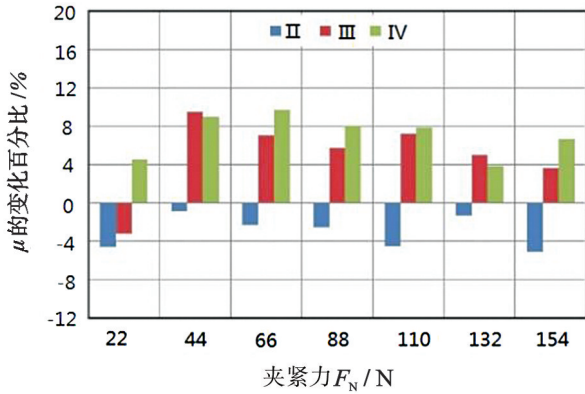


图 8 改性复合材料压块的摩擦因数  $\mu$  变化(铝合金 T4)

### 3 结论

本文采用板材拉伸试验模拟冲压件塑性成形过程中的摩擦条件,来测定所选复合材料的摩擦性能。结果表明,使用 Incoloy800 耐腐蚀镍合金板材进行测试时,用铝粉改性的复合材料压块压块在整个夹紧力范围内的摩擦因数  $\mu$  最小。使用 H13 钢板测试时,用基本型的复合材料压块在整个夹紧力范围内的摩擦因数  $\mu$  达到最大值。对 T4 铝合金板材来说,摩擦因数  $\mu$  的最小值是在仅含粗纱的压块试样中发现的。它们的应用可以使摩擦因数  $\mu$  降低 0.9%~5.1%,这取决于夹紧力的大小。



参考文献：

[1] Birkhold M,Pauli F B,Lechler A,et al. On the development of transform able sheet metalforming tools [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46 ( 16 ): 391-396.

[2] Muro M,Aseguinolaza I,Artola G. Die Material Selection Criteria for Aluminum Hot Stamping[J]. Journal of Manufacturing and Mateirals Processing,2021(1).

[3] Hol J,Cid Alfaro M V,de Rooij M B,et al. Advanced friction modeling for sheet metal formin [J]. Wear, 2012;286-287:66-78.

[4] Liewald M,de Souza J H C. New developments on the use of polymeric materials in sheet metal forming[J]. Production Engineering,2008,2(1):63-72.

[5] Fontalvo G A,Mitterer C. The effect of oxide-forming alloying elements on the high temperature wear of a hot work steel[J]. Wear,2005,258(10):1491-1499.

[6] Iwabuchi A,Hori K,Kubosawa H. The effect of oxide particles supplied at the interface before sliding on the severe-mild wear transition[J]. Wear, 1988, 128 (2): 123-137.

[7] 雷雪梅,齐慧敏,谷建臻,等. 宽温域环境环氧/聚氨酯复合材料摩擦学性能研究[J]. 表面技术,2024,53(7): 64-75.

[8] 李琬华,郝振源,吴友平. 不同界面条件下 TPU/HVSSBR 复合材料摩擦性能及机理分析[J]. 摩擦学学报,2023,43(8):905-915.

作者简介:周黎明,男,1987 年生,硕士,助教。研究方向为模具设计与制造。杨欲晓,男,1994 年生,硕士,助教。研究方向为电气工程及自动化。李俊颖,女,1996 年生,硕士,助教。研究方向为机械制造与自动化。王明杰,男,1987 年生,硕士,讲师。研究方向为数控技术。

(上接第 48 页)

3.2 降水量对玉米生产的影响

近 32 年水城区年平均降水量为 1 156.9 mm,年内降水主要集中在夏季,其次是春季和秋季,冬季降水量相对较少。虽然玉米关键生育期内的降水量较多,因水城区降水分布不均,一些年份的降水根本不能满足玉米生长发育中对水分条件的需求<sup>[6]</sup>。尤其是持续性的干旱会造成玉米叶片失水萎蔫,抑制玉米植株的生长,还会缩短果穗穗长,降低果粒数量。干旱对玉米的各项生理指标产生影响,缩短了玉米生长周期,使得其成熟期提前。苗期干旱则会延缓玉米生长发育速度,延长了玉米生长发育时间,进而出现枯黄的叶片,制约了光合作用的开展。喇叭口干旱则会造成雌穗发育缓慢,甚至有空穗植株出现,会降低玉米产量和品质。

若是降水量过多,极易引发洪涝灾害,玉米植株上部叶片颜色变浅,下部枯黄,使得生育期时间延长。若是暴雨洪涝出现在玉米喇叭口期,则会增强玉米自身的耐涝性;若是花期降水偏多,在不能及时排除积水的情况下,玉米根系将长期生长在缺氧环境中,会抑制呼吸活动,加快土壤养分流失速率,对玉米的危害会加重。另外,在暴雨洪涝出现时,会造成光照时数减少,再加上温度低、日较差小,将会造成杂草丛生,使得病虫害蔓延,影响玉米植株正常生长发育。

4 结论

(1)1991—2022 年水城区平均气温为 12.9℃,整体呈现出上升趋势,线性变化倾向率为 0.418℃/10 年,上升趋势极为显著;(2)春、夏、秋、冬四季气

温线性变化倾向率分别为 0.472、0.446、0.5、0.208℃/10 年,除了冬季外,其余三季的升温趋势均较为显著,对年升温的贡献最大;(3)1991—2022 年水城区年平均降水量为 1 156.9 mm,降水量变率处于—32.8%~24.9%,整体呈现出增加的趋势,线性变化倾向率为 10.336 mm/10 年,增加趋势并不显著;(4)水城区年内降水主要集中在夏季,其次是秋季和春季,冬季降水量最少,四季降水量增加趋势均不太显著;(5)气候变化对当地玉米生产的影响较大,直接关系到玉米产量和品质,需要高度关注。

参考文献：

[1] 孙雨蒙. 地球气候变化已到临界点[J]. 生态经济, 2021,37(10):5-8.

[2] 王元丰. 气候变化“红色预警”呼唤人类自救[N]. 环球时报,2021-08-12.

[3] 张洁,白青华,马鸿,等. 气候变化对河西走廊中部地区主要农作物的影响[J]. 干旱气象, 2013, 31 (2): 303-308.

[4] 梁玉莲,韩明臣,白龙,等. 中国近 30 年农业气候资源时空变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2015,33(4): 259-267.

[5] 罗晓玲,丁思聪,杨梅,等. 气候变化对石羊河流域生态环境的影响分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022,16(4): 49-56.

[6] 陈辉煌,陈炜钦,陈少明. 德化县气候变化特征分析及对农业生产的影响[J]. 农村实用技术, 2021(5): 168-169.

作者简介:罗通均,男,1981 年生,工程师。研究方向为综合气象业务。