

文章编号: 1004 - 0609(2003) 03 - 0599 - 07

铝合金挤压时的摩擦与摩擦因数^①

邓小民, 孙中建, 李胜祗, 方木云, 曹 杰
(安徽工业大学 冶金与材料学院, 马鞍山 243002)

摘 要: 对挤压铝合金时锭坯与工模具接触面上摩擦的性质和行为进行了研究。结果表明, 由于铝锭坯与粘附在挤压筒内壁、穿孔针和模具工作带上的铝套或铝层是同种金属, 粘着变形使得接触表面微结构自发地趋于相称, 从而导致很大的摩擦; 其摩擦因数与铝合金的牌号和变形抗力有关。建立了摩擦因数与变形抗力的关系式。

关键词: 摩擦因数; 变形抗力; 挤压; 铝合金

中图分类号: TG 376. 1

文献标识码: A

近年来, 利用传统的侧向挤压技术所产生的附加强烈剪切变形来细化铝合金晶粒及提高合金力学性能的侧向摩擦挤压、等通道转角挤压技术已成为研究的热点之一^[1-2]。用空心锭不润滑穿孔针的方法挤压铝合金管材, 可消除润滑挤压时管材内表面常见的擦伤缺陷, 是生产高精度、高质量铝合金薄壁管材的重要手段, 也是我国铝合金管材生产中的一个重要研究课题^[3-4]。

由于铝与工模具之间有很强的粘结性, 在挤压过程中, 锭坯表层的金属因与挤压筒发生粘结而不能流动, 于是沿着其次表层发生剪切变形。事实上这只符合用新工模具挤压第一块锭坯时的情况, 当第一块锭坯挤压完毕, 在挤压筒内壁和穿孔针表面(不润滑穿孔针时)留下一个完整铝套。在挤压第二块锭坯时, 锭坯不是与工模具本体金属(钢)直接接触, 而是与其上的铝套接触, 从而使得摩擦的行为和性质会发生变化。

关于铝合金挤压时的摩擦因数, 由于使用的挤压力算式在不同文献中各有不同^[5-7], 差异较大。有些文献对摩擦因数的选取考虑了温度的影响, 有些则对于所有金属的无润滑挤压都选取相同的值。而对于挤压过程中的挤压力、穿孔力、工模具的磨损、变形及损坏等因影响金属变形抗力而对摩擦因数有何影响, 目前还未见到相关报道。

本文作者对挤压铝合金时锭坯与工模具接触面上摩擦的性质和行为进行了研究。研究了铝合金牌号和变形抗力与摩擦因数的关系, 建立了相应的关系式。同时对有关挤压理论中关于摩擦因数的选取

进行了研究。

1 铝与工模具之间的摩擦

挤压铝合金时基本上都是采用无润滑工艺, 在挤压过程中, 铝与挤压筒内壁、穿孔针(不润滑时)及模具工作带直接接触。由于铝在铁中的固溶度大, 合金化能力强, 在高温、高压作用下, 与接触面上的元素相互发生扩散, 与工模具产生粘结^[7-10]。锭坯表面层金属与挤压筒内壁、挤压管材用空心锭坯内孔表面层金属与穿孔针之间由于发生粘结而不能正常流动, 从而在锭坯的次表层发生剪切变形。接触面上铝与铁之间的摩擦逐渐转变为锭坯表面层金属的内摩擦, 使得接触面上摩擦的性质和行为发生变化, 由铝与铁之间的滑动摩擦自发地转变为锭坯内部金属的剪切变形, 接触面由微观结构上的不相称(晶体尺度和取向不同, 铝与铁性质不同)自发地趋于相称, 从而导致很大的摩擦。这是因为, 从能量学角度来看, 当接触表面微结构处于相称时, 可达到能量最低状态, 即势能处在某个谷底时, 表面必须克服势垒才能发生相对运动, 从而表现出很大的摩擦。这就是静摩擦力产生的机制。如果接触表面微观结构不相称, 由于分子间作用势的随机叠加, 就不可能形成能量最低的势谷, 其摩擦力就会相对减小。这与 Robbins 等^[11]关于界面摩擦的研究结果的理论解释是一致的, 也与 Cieplak 等^[12]对晶体与其表面上单分子固体吸附层之间摩擦力的计算机模拟结果一致, 即当吸附层的分子结构与晶

① 基金项目: 安徽省教育自然科学基金资助项目(2001kj026)
作者简介: 邓小民(1959-), 男, 硕士, 副教授。
通讯联系人: 邓小民, 副教授; 电话: 0555 - 2483463

收稿日期: 2002 - 08 - 23; 修订日期: 2002 - 12 - 15

体结构相称时,摩擦力在启动瞬间迅速增大,此后大体保持不变,明显表现出静摩擦的特征。

金属流出模孔时,与模具工作带上所形成的铝元素的扩散层接触,其摩擦为同种金属间的摩擦,比铝与铁之间的滑动摩擦要大。但由于工作带内金属塑性变形不明显,作用在工作带上的金属正压力显著低于此时金属的变形抗力,虽然摩擦较大,但由于挤压铝合金的模具工作带长度一般只有3~5 mm,远小于锭坯与挤压筒和穿孔针的接触长度,故对挤压过程的摩擦力不会产生明显影响。

挤压结束后,在挤压筒和穿孔针的表面形成一个完整的铝套。当挤压第2块锭坯时,这个铝套无法清除。因此,除第1块锭坯外,在随后的挤压过程中,锭坯事实上都不与挤压筒和穿孔针直接接触,而是与这个铝套相接触,接触面上的摩擦事实上就是铝锭坯与铝套进行同种金属间的摩擦。

根据挤压制品的品种、合金成分、挤压方式的要求不同,半连续铸造的铝合金锭坯分车皮和不车皮两种,这些锭坯绝大部分还要进行长时间的高温均匀化退火处理。对于不车皮锭坯来说,在锭坯的表面上存在着铸造过程中形成的偏析瘤、冷隔、重叠、氧化物等缺陷。对于车皮锭坯来说,虽然上述缺陷得以消除,但在长时间的高温均匀化处理过程中,在其表面形成了一层厚而坚硬的氧化膜,锭坯在挤压前的加热过程中也同样会形成较厚的氧化膜。而且锭坯在存放过程中其表面上还会有灰尘等脏物。总之,锭坯表面上的这些缺陷、氧化膜及脏物等,在挤压过程中都会存在于锭坯与工模具上的铝套之间,即接触面上并非是纯净的金属。这些缺陷、氧化膜及脏物的存在,必然会影响到接触表面上摩擦的性质和行为。特别是铝的氧化膜,其硬度远远大于基体金属^[7],非常脆,而且无延展性,在变形过程中易破碎,也可能在高温均匀化退火—冷却—挤压前加热过程中,由于冷热循环而使膜内产生较大压力而破裂^[13],使新鲜金属表面袒露出来,造成接触面上产生强烈的粘结。而破碎的氧化膜存在于接触面上,必然会对沿着接触面的滑动剪切变形产生明显的影响。

2 挤压铝合金时的摩擦因数

挤压铝合金时摩擦因数大小的选择,在不同的挤压力计算式中各不相同,即使是同一计算式,不同作者选取值也不相同^[5, 14],使用者难以作出正确判断,易发生计算错误。目前,常用的铝合金挤压

力的计算式中,其摩擦因数的取值归纳起来主要有3种:第1种是0.25~0.35^[6],在挤压温度为450~500℃时取0.25~0.30,300~450℃时取0.30~0.35;第2种是在无润滑热挤压条件下,无论任何金属均取0.50或0.58^[7];第3种是在无润滑热挤压且金属剧烈粘结工具的情况下,无论任何金属均取1.0^[5]。

影响摩擦因数的因素很多,其中工件的加工温度是影响摩擦的重要因素,在上述的第1种取值中,将温度作为唯一的变化参数,具有一定的片面性。温度对摩擦因数的影响并不是直接的,主要是由于温度改变了金属氧化膜的成分、性质以及材料的接触压缩屈服应力。20世纪40年代,摩擦学研究曾经有过一个较大的飞跃,鲍登—泰伯用粘着点上材料的剪切应力与表面粗糙峰接触的平均压缩屈服应力的比值来表示摩擦因数^[7],成功地解释了粘着变形等许多摩擦现象。

摩擦因数与金属的强度性质有关,而金属的强度与其变形抗力密切相关。那么摩擦因数与金属的变形抗力有什么样的关系呢?我们知道,影响金属变形抗力的主要因素是变形温度和变形速度。下面通过对3种不同牌号铝合金的挤压实验,研究不同挤压温度、速度条件下金属的变形抗力与摩擦因数的关系。

2.1 实验

2.1.1 实验材料和设备

实验材料选用2A12、2A11、5A02等3种铝合金。半连续铸造的空心锭坯,经车皮、镗孔后在480~495℃均匀化退火12 h。锭坯规格:2A12合金为 $d\ 255/76\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$,2A11和5A02合金均为 $d\ 255/76\ \text{mm} \times 640\ \text{mm}$ 。

挤压机为西北铝加工厂25 MN反向挤压机,是目前国内惟一带有穿孔针拉力测量与保护装置的挤压机。挤压筒直径为 $d\ 260\ \text{mm}$,穿孔针直径 $d\ 75\ \text{mm}$ 。加热炉为675 kW工频感应炉,用插式热电偶测量锭坯前后端面温度。挤压和加热过程均由计算机控制,显示并记录有关参数。

2.1.2 实验方案

要确定不同挤压温度、速度条件下的金属变形抗力与摩擦因数的关系,按照传统方法是通过测量挤压力,然后利用有关挤压力计算式反推出摩擦因数。由于影响挤压力的因素有很多,在推导这些计算式时都作了一些假设,假设是否合理,直接影响到计算的准确性,所以根据挤压力计算式反推摩擦

因数的误差相对较大。为此, 我们采用了直接测量作用在穿孔针上摩擦拉力确定摩擦因数的方案。作用在穿孔针上的摩擦拉力与摩擦因数及金属的塑性剪切应力有如下关系:

$$F=1.5\pi DL\mu S \tag{1}$$

式中 F —作用在穿孔针上的摩擦拉力, N; D —穿孔针针杆直径, mm; L —镦粗后的锭坯长度, mm; μ —摩擦因数; S —金属塑性剪切应力, 根据 Mises 理论^[15], $S=0.577\sigma_k$, MPa; σ_k —与变形温度、速度有关的金属变形抗力, $\sigma_k=C_v\sigma_s$, MPa; C_v —应变速度系数, 可根据变形抗力的应变速度系数图^[16]来确定; σ_s —变形温度下的金属变形抗力^[16], MPa。

式(1)就可以写成

$$F=2.72DL\mu C_v\sigma_s=2.72DL\mu\sigma_k \tag{2}$$

采用不润滑穿孔针工艺挤压 2A11 合金 $d\ 71\ \text{mm}\times 5.5\ \text{mm}$, 2A12、5A02 合金 $d\ 70\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 管

材。
2.1.3 实验结果
实测穿孔针拉力、挤压速度、锭坯加热温度(取其前后端面温度平均值), 根据实测值由式(2)计算出摩擦因数见表 1。

2.2 摩擦因数与变形抗力的关系

根据表 1 的实验结果, 利用回归分析方法得到挤压铝合金时的摩擦因数 μ 与不同挤压温度、速度条件下金属变形抗力 σ_k 的关系见图 1。摩擦因数计算如式(3):

$$\left. \begin{aligned} \mu &= 2.136\ 6-0.035\ 3\ \sigma_k \quad (5A02\ \text{合金}) \\ \mu &= 1.538\ 0-0.017\ 0\ \sigma_k \quad (2A11\ \text{合金}) \\ \mu &= 1.047\ 0-0.006\ 1\ \sigma_k \quad (2A12\ \text{合金}) \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

从式(3)可以看出, 挤压铝合金时的摩擦因数是变化的, 与不同挤压温度、速度条件下金属的变

表 1 不同条件下的摩擦因数

Table 1 Friction coefficients under different extrusion conditions

Alloy	$t/^\circ\text{C}$	F/kN	σ_s/MPa	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	C_v	σ_k/MPa	μ	Alloy	$t/^\circ\text{C}$	F/kN	σ_s/MPa	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	C_v	σ_k/MPa	μ
5A02	497	2 830	11.2	0.4	1.096	12.3	1.84	2A11	395	4 350	36.0	0.8	1.174	42.3	0.83
	496	2 920	11.6	0.7	1.197	13.9	1.69		388	4 190	37.4	0.7	1.146	42.9	0.79
	491	3 220	13.6	0.9	1.235	16.8	1.54		387	4 390	37.6	0.8	1.166	43.8	0.81
	490	3 030	14.0	0.8	1.214	17.0	1.43		385	4 250	38.0	0.8	1.164	44.2	0.77
	490	3 220	14.0	0.3	1.064	14.9	1.73		382	4 260	38.6	0.9	1.174	45.3	0.75
	490	3 280	14.0	0.4	1.093	15.3	1.72		376	4 160	39.8	0.8	1.155	46.0	0.73
	488	3 100	14.8	0.7	1.196	17.7	1.4		372	4 260	40.6	0.9	1.163	47.2	0.72
	488	3 230	14.8	0.9	1.234	18.3	1.42		371	4 250	40.8	0.9	1.162	47.4	0.71
	476	3 770	19.6	1.05	1.256	24.6	1.23		368	4 420	41.4	1.0	1.171	48.5	0.73
	463	3 420	24.8	0.6	1.146	28.4	0.97		359	4 420	43.2	1.0	1.16	50.1	0.71
	463	3 680	24.8	0.9	1.222	30.3	0.97		435	2 980	36.5	0.4	1.09	39.8	0.77
	452	3 640	29.2	0.7	1.183	34.5	0.85		422	3 190	37.8	0.5	1.106	41.8	0.79
	449	3 750	30.3	1.1	1.253	38.0	0.79		418	3 340	38.2	0.6	1.136	43.4	0.79
	446	3 680	31.2	1.05	1.241	38.7	0.77		415	3 360	38.5	0.7	1.17	45.0	0.77
	444	3 750	31.8	1.1	1.251	39.8	0.75		414	3 260	38.6	0.4	1.082	41.8	0.80
2A11	442	3 720	32.4	0.9	1.212	39.3	0.76		411	3 240	38.9	0.4	1.08	42.0	0.79
	442	3 730	32.4	1.05	1.239	40.1	0.74	2A12	409	3 380	39.1	0.8	1.189	46.5	0.75
	437	3 580	33.9	1.15	1.258	42.6	0.68		395	3 560	41.0	0.5	1.098	45.0	0.81
	435	3 720	34.5	0.9	1.209	41.7	0.71		393	3 650	41.4	0.7	1.155	47.8	0.78
	430	3 680	36.0	1.05	1.233	44.4	0.67		386	3 360	42.8	0.5	1.092	46.7	0.74
	432	4 190	31.8	0.6	1.133	36.0	0.94		386	3 610	42.8	0.7	1.149	49.2	0.76
	421	4 230	32.9	0.6	1.131	37.2	0.91		383	3 540	43.4	0.6	1.115	48.4	0.75
	418	4 120	33.2	0.5	1.109	36.8	0.89		379	3 720	44.2	0.7	1.143	50.5	0.75
	413	4 230	33.7	0.7	1.158	39.0	0.87		378	3 650	44.4	0.6	1.11	49.3	0.76
	413	4 280	33.7	0.7	1.158	39.0	0.88		376	3 630	44.8	0.7	1.14	51.1	0.73
	411	4 140	33.9	0.6	1.128	38.2	0.87		372	3 560	45.6	0.6	1.107	50.5	0.72
	407	4 350	34.3	0.8	1.181	40.5	0.86		371	3 700	45.8	0.6	1.105	50.6	0.75
	406	4 390	34.4	0.8	1.181	40.6	0.86		371	3 510	45.8	0.7	1.136	52.0	0.70
	402	4 280	34.8	0.8	1.179	41.0	0.84		370	3 680	46.0	0.7	1.135	52.2	0.72
	397	4 350	35.6	0.8	1.176	41.9	0.83		366	3 680	46.8	0.7	1.132	53.0	0.72

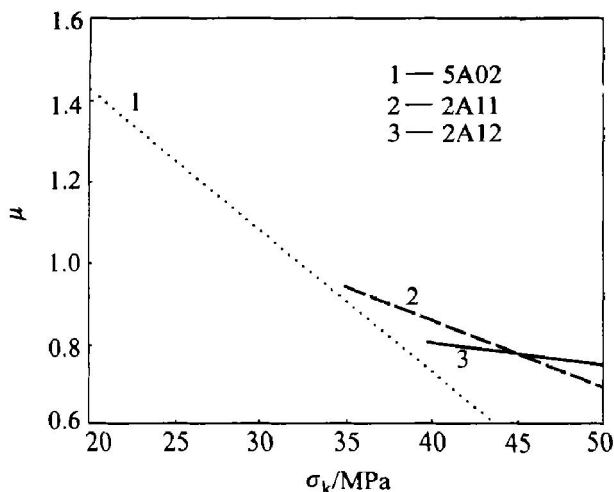


图 1 摩擦因数 μ 与变形抗力 σ_k 的关系

Fig. 1 Relation between friction coefficient μ and deformation resistance σ_k

形抗力成反比, 随着变形抗力增大, 摩擦因数减小。影响金属变形抗力的主要因素是变形温度和变形速度, 也就是说挤压温度和速度的变化都会对摩擦因数产生一定的影响。随着挤压温度提高, 金属的变形抗力降低, 摩擦因数会增大。而速度对摩擦因数的影响, 是通过影响其变形抗力起作用的。在温度比较低时, 速度变化对变形抗力的影响较小, 对摩擦因数的影响也较小。当温度比较高时, 由于加工硬化作用明显, 速度的影响作用也更明显。

根据粘着摩擦理论和鲍登—泰伯的焊合摩擦理论^[7], 粘着变形时的摩擦因数可用下式表示:

$$\mu = \tau_s / \sigma_s \quad (4)$$

式中 τ_s — 材料的剪切强度极限; σ_s — 材料的压缩屈服极限。

如果接触面上没有其他物质, 由于 τ_s 和 σ_s 都是同一金属的强度性质, 两者是同时变化的, 其比值对于极不相同的金属来说也大致相同, 则各类金属彼此之间的摩擦因数相差很小。当温度发生变化时, 由于 τ_s 和 σ_s 同时随之变化, 则温度变化不会对摩擦因数产生明显影响。如果采用 Tresca 屈服准则^[15], $\tau_s = 0.50 \sigma_s$, 则有 $\mu_{\max} = 0.50$; 如果采用 Mises 屈服准则^[15], $\tau_s = 0.58 \sigma_s$, 则有 $\mu_{\max} = 0.58$ 。但是, 挤压铝合金时则不同, 由于接触面上存在前面所分析的中间物质(氧化物、夹杂、灰尘等), 特别是铝的氧化物, 其硬度远远大于基体金属^[7], 破碎的氧化物分布在接触面上, 就相当于在软的基体中加入了硬度很高的第二相粒子, 从而使得接触面上的金属强度明显提高。由于接触面上材料剪切强度提高, 而金属基体的屈服极限不变, 则根据式

(3), 其摩擦因数必然比纯净接触面的大。也就是说, 在这种情况下, 鲍登—泰伯提出的简单摩擦粘着理论受到限制, 这时的摩擦因数也就不是简单粘着理论所阐述的摩擦因数。如果我们仍然用纯净接触表面的粘着摩擦因数来处理或研究象铝合金挤压这种接触面上存在着中间物质的粘着变形问题, 就有可能产生较大误差。

铝合金的挤压温度都低于其锭坯的均匀化退火温度, 因此, 挤压温度的变化对其锭坯表面的氧化膜的性质不会产生明显影响, 即便是不均匀化的锭坯, 在挤压温度范围内, 其氧化膜的性质也不会有明显变化, 则温度的变化对接触表面的剪切强度不会产生大的影响。但温度的变化对基体金属的屈服极限会产生很大的影响, 随着温度升高, 基体金属的屈服极限降低。所以, 随着温度升高, 其摩擦因数增大。

不同牌号的铝合金, 其变形抗力是不同的。在不同挤压温度、速度条件下金属的变形抗力越低, 其基体金属的屈服极限就越低, 其摩擦因数越大。上述实验中 2A11 合金的摩擦因数比 2A12 合金的大, 5A02 合金在高温下的摩擦因数更大也都说明了这一点。从 5A02 合金的实验结果还可以看出, 当其变形抗力随温度升高明显降低时, 其摩擦因数会显著增大。

不同牌号的铝合金的变形抗力随着温度、速度条件的变化, 其变化速率是不同的, 即加工硬化程度不同, 其摩擦因数的变化也不同。上述的实验结果很明显地说明了这一点, 由于 5A02 合金的加工硬化程度很高, 其摩擦因数的变化也很大, 而 2A11 和 2A12 合金摩擦因数的变化就相对较小。

3 验证

3.1 穿孔针拉力计算

1) 在 25 MN 挤压机上, 用 d 255/97 mm $\times$ 350 mm 锭坯, 无润滑挤压 2A12 合金 d 90 mm $\times$ 4 mm 管材。

把不同温度、速度条件下利用式(3)计算出的摩擦因数值代入式(2)计算出作用在穿孔针上的摩擦拉力, 并与相应的实测值进行对比。其结果见表 2, 作用在穿孔针上摩擦拉力的最大误差为 6%。根据文献[14]介绍, 当其误差不大于 15% 时, 就可以满足要求。

2) 在 34.3 MN 挤压机上无润滑正向挤压管材。

西北铝加工厂 34.3 MN 挤压机是上个世纪 50 年代末期国产设备, 无穿孔针拉力测量装置。以前

表 2 摩擦力测量值与计算值的对比

Table 2 Comparison of measured values of friction force with calculated ones

Sample No.	$t/^\circ\text{C}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	C_v	σ_k/MPa	μ	Measured friction force/kN	Calculated friction force/kN	Error/%
1	405	0.6	1.14	44.13	0.778	2 780	2 948	6
2	407	0.6	1.167	44.94	0.773	2 840	2 982	5
3	407	0.6	1.167	44.94	0.773	2 880	2 892	3.5
4	408	0.8	1.189	45.68	0.768	2 880	3 012	4.6
5	410	0.7	1.175	44.91	0.773	2 820	2 980	5.7
6	413	0.7	1.176	44.61	0.775	2 880	2 968	3.1
7	417	0.6	1.144	42.93	0.785	2 880	2 893	0.5
8	418	0.6	1.144	42.83	0.786	2 760	2 890	4.7

曾进行过无润滑挤压管材试验, 均因断针频繁未能成功, 如在其 d 280 mm 挤压筒上, 用 d 100 mm 穿孔针, 挤压 2A12 合金 d 95 mm $\times$ 8 mm 厚壁管, 挤压两块锭坯即全部断针, 所用锭坯规格为 d 270/106 mm $\times$ 550 mm(润滑穿孔针时锭坯长为 750 mm) 。其主要原因是计算作用在穿孔针上的摩擦拉力时选用的摩擦因数数值偏小(取 0.3) , 选用锭坯过长, 使得作用在穿孔针上的摩擦拉力过大。

根据所挤压合金的挤压温度、速度范围, 确定出相应的金属变形抗力, 利用式(3) 选取合适的摩擦因数, 根据穿孔针的强度, 确定合理的锭坯长度。当改进穿孔针与针支承的连接方式, 加粗连接部位的螺纹直径, 在穿孔针的强度提高的基础上, 用 d 100 mm 穿孔针、 d 270/106 mm $\times$ 400 mm 锭坯, 挤压 2A12 合金 d 85 mm $\times$ 7.5 mm 厚壁管, 投入锭坯 492 块, 以及用 d 130 mm 穿孔针、 d 270/140 mm $\times$ 350 mm 锭坯, 挤压 5A02 合金 d 97 mm $\times$ 5 mm 拉伸用管坯, 投入锭坯 210 块, 均未发生断针事故。用不同规格锭坯挤压了多种规格其他牌号铝合金管材, 也很少发生断针事故。消除了管材内表面擦伤缺陷, 使成品率明显提高。我们虽然不能测出作用在穿孔针上的真实摩擦拉力的数值, 但生产过程中很少断针的事实也间接说明了用挤压温度、速度条件下金属变形抗力确定摩擦因数的合理性。

3.2 挤压力计算

1) 在西北铝加工厂 49 MN 挤压机上挤压 2A12 合金棒材, 挤压筒直径 d 360 mm, 平模, 工作带长度 5 mm。

2) 在 34.3 MN 挤压机上无润滑挤压 6063、3A21、5A02、1060、2A11、2A12 合金的不同规格管材, 挤压筒直径 d 280 mm, 穿孔针直径 d 100 mm 或 d 130 mm(瓶式针, 针尖过渡锥面斜角为 30°) ,

锥模, 模角 65° , 工作带长度 5 mm。

挤压力计算选用别尔林算式^[5], 因为该算式是目前所有算式中应用最广的, 也是被实践证明其误差相对较小的, 几乎为所有文献所推荐。对于 5A02、2A11、2A12 合金, 分别按文献[5] 所选摩擦因数(1.0) 和本文式(3) 确定的摩擦因数进行计算比较, 其挤压力分别用 p_1 和 p_2 表示, 与实测值 p 的相对误差分别用 δ_1 和 δ_2 表示; 对于 6063、3A21 和 1060, 则只按文献[5] 所选摩擦因数进行计算, 以验证前述分析的正确性。有关实验参数及计算结果见表 3。从表 3 中可明显看出, 按照本文中利用金属变形抗力所确定的摩擦因数计算的挤压力 p_2 , 与实测挤压力 p 的最大相对误差为 5.3%。而按照文献[5] 所选摩擦因数为 1.0 计算的挤压力 p_1 与实测值的相对误差, 虽然对于 2A12、3A21、6063、2A11 合金来说可以满足要求, 但对加工硬化程度很高的 5A02 合金来说, 其计算值远大于实测值, 说明在此挤压温度、速度条件下摩擦因数取 1.0 过大; 而对变形抗力很低的纯铝 1060 来说, 其计算值确远小于实测值, 说明这时摩擦因数取 1.0 又过小。

挤压力的验证结果清楚地说明, 对于不同牌号的铝合金, 挤压时的摩擦因数是不同的。如果采用相同的摩擦因数进行计算, 虽然对许多合金来说, 其计算结果可满足要求, 甚至个别还有很高的精度(如 2A11) 。但对于变形抗力很低的合金(如纯铝) 和加工硬化程度很高的合金(如 5A02) , 则会出现较大的误差。

从上述 6 种合金挤压力计算与实测的误差还可以清楚地看出, 合金在不同挤压温度、速度条件下的变形抗力越高, 其摩擦因数就越小。

挤压力的验证结果与前述的分析完全一致。

从穿孔针拉力、挤压力的验证结果还可以看出, 根据不同合金挤压温度、速度条件下的变形抗

表 3 挤压力测量值与计算值的对比

Table 3 Comparison of measured extrusion force with calculated one

Alloy	Standard size/mm	Billet size/mm	$t/^\circ\text{C}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	C_v	σ_s/MPa	σ_k/MPa	p/MN	p_1/MN	$\delta_1/\%$	p_2/MN	$\delta_2/\%$
2A12	$d110$	$d350\times1000$	420	1.55	1.130 0	37.24	42.08	45.9	51.522	+ 12.2	43.841	- 4.6
1060	$d93\times5$	$d270/140\times340$	400	8.10	1.534 0	12.30	18.87	23.6	13.284	- 43.7		
3A21	$d88\times5$	$d270/106\times330$	430	0.47	1.085 0	26.66	28.93	31.1	28.206	- 9.3		
6063	$d89\times5$	$d270/106\times300$	420	1.57	1.291 4	21.38	27.61	25.7	23.804	- 7.4		
5A02	$d60\times5$	$d270/106\times300$	420	1.07	1.223 6	38.22	46.76	31.1	43.752	+ 40.7	30.908	- 0.6
2A11	$d88\times5$	$d270/106\times300$	440	0.79	1.167 9	30.38	35.48	32.7	32.247	- 1.4	30.973	- 5.3
2A12	$d83\times5$	$d270/106\times310$	430	0.43	1.075 0	36.26	38.98	33.8	37.887	+ 12.1	33.500	- 0.9

力确定摩擦因数，更能反映出挤压过程中摩擦的真实情况，计算的准确率更高。特别是穿孔针拉力的准确计算，对于在无穿孔针拉力测量与保护装置的挤压机上(除西北铝加工厂 25 MN 挤压机外，我国其它双动挤压机均无此装置)实现铝合金管材的无润滑挤压，减少长期困扰我国管材生产中的内表面擦伤缺陷，提高管材质量更具有重要意义。

4 结论

- 1) 铝合金挤压时铝与工模具接触面上的摩擦，实际上是被挤压铝合金与粘附在其表面上的铝套(或铝层)之间的摩擦。由于同种金属之间粘性很大，粘着变形使得表面微结构自发地趋于相称，导致很大的摩擦。
- 2) 建立了挤压铝合金时的摩擦因数与不同挤压温度、速度条件下金属变形抗力的关系式。实践证明，利用此关系式能更准确地计算出挤压铝合金时的摩擦因数，从而为正确计算挤压力、穿孔针拉力及工模具设计提供依据。
- 3) 对于不同牌号的铝合金，其挤压时的摩擦因数是不同的。不同挤压温度、速度条件下金属的变形抗力越高，其摩擦因数就越小。

REFERENCES

[1] 赵润娴, 张 建, 王志奇. 等通道转角挤压纯铝的组织结构[J]. 有色金属, 2002, 54(2): 8-11.
ZHAO Runxian, ZHANG Jian, WANG Zhiqi. Microstructure of pure aluminium worked by equal channel angular extrusion[J]. Nonferrous Metals, 2002, 54(2): 8-11.

[2] 张 建, 崔宏祥, 赵润娴. 等通道转角挤压过程有限元模拟[J]. 重型机械, 2002(3): 43-46.
ZHANG Jian, CUI Hongxiang, ZHAO Runxian. Finite element simulation in the process of equal channel angular extru-

sion[J]. Heavy Machinery, 2002(3): 43-46.

[3] 邓小民. 铝合金管材无润滑挤压穿孔针拉力的计算[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 257-260.
DENG Xiaomin. Calculation of tension acting on arbor in process of extruding aluminium alloy tube without lubrication[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(2): 257-260.

[4] 邓小民. 无润滑挤压铝合金管材时铸锭长度的确定[J]. 重型机械, 2001(4): 39-40.
DENG Xiaomin. The definition of extrusion ingot length when pressing aluminium alloy tube without lubrication[J]. Heavy Machinery, 2001(4): 39-40.

[5] 马怀宪. 金属塑性加工学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 38-44.
MA Huaxian. Plastic Working of Metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997. 38-44.

[6] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000. 538-540.
WANG Zhutang, TIAN Rongzhang. Working Hand Book of Aluminium Alloy[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2000. 538-540.

[7] 姚若浩. 金属压力加工中的摩擦与润滑[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 18-80.
YAO Ruohao. Friction and Lubrication of Plastic Working Process Metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990. 18-80.

[8] 邓小民. 铝合金管材挤压过程中穿孔针粘铝机制分析[J]. 轻合金加工技术, 2000(9): 30-32.
DENG Xiaomin. Analysis of aluminium pick up of stem in aluminium alloy pipe extrusion[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2000(9): 30-32.

[9] Tsuji S, Furusawa T, Saito T, et al. Through the method heating and hardening and nitriding form film of aluminium surface treatment of SKD61 die steel[J]. Journal of Japanese Society for Metals, 1999(2): 145-151.

[10] 夏延秋, 丁津原. 可聚合添加剂对 Al2024 合金磨损特性的影响[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(3): 224-227.

- XIA Yarr qiu, DING Jir yuan. Get together addition influence of Al2024 alloy wear and tear character[J]. Tribology, 1999, 19(3): 224 - 227.
- [11] Robbins M O, Krim J. Energy dissipation in interfacial friction[J]. MRS Bulletin, 1998, 23(6): 23 - 26.
- [12] Cieplak M, Smith E D, Robbins M. Molecular origin of friction the force on adsorbed layers[J]. Science, 1994, 265: 1209 - 1212.
- [13] 辛 丽, 李美栓, 钱余海. 氧化铝膜的破裂行为[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 326 - 329.
- XIN Li , LI Mei suan, QIAN Yu hai. Cracking and spalling behavior of alumina scale[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2000, 10(3): 326 - 329.
- [14] 刘静安. 挤压模具技术的理论与实践[M]. 重庆: 科学技术文献出版社, 1989. 64 - 72.
- LIU Jing an. Comment and Practice of Extrusion Die Art [M]. Chongqing: Science and Technology Document Chongqing Press, 1989. 64 - 72.
- [15] 吴德海, 任家烈, 陈森灿. 近代材料加工原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 170 - 172.
- WU De hai, REN Jia lie, CHEN Sen can. Material Working Principle of Modern Times[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 170 - 172.
- [16] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. 86 - 112.
- XIE Jia x in, LIU Jing an. Theory and Technology for Metal Extrusion [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001. 86 - 112.

Friction and friction coefficient for aluminium alloy extrusion

DENG Xiao-min, SUN Zhong-jian, LI Sheng-zhi, FANG Mu-yun, CAO Jie

(College of Metallurgy and Materials, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: The aspects and behaviors of the friction existing on the interface of the billet and die during the process of aluminium alloy extrusion were studied. The results show that because the billet, the mandrel and the aluminium cohering to the bearing between the inner wall of the container and the die are the same metal, and coherent deformation makes the microstructure on the interface be smooth, then results in large friction. The friction coefficient is related to deformation resistance and the composition of aluminium alloy. The equation of friction coefficient with deformation resistance was derived.

Key words: friction coefficient; deformation resistance; extrusion; aluminium alloy

(编辑 黄劲松)