

[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0539- 05

反向挤压力计算式的误差分析与实践^①

邓小民

(安徽工业大学 冶金与材料学院, 马鞍山 243002)

[摘要] 目前, 用于计算反向挤压力的计算式都是根据相应正向挤压时的算式, 并直接令作用在挤压筒壁上的摩擦为零得来的。实践中发现, 计算出的挤压力与实测值差异较大, 无法正确指导生产。造成这种差异的主要原因是忽略了正、反向挤压时变形区中温升及加工硬化程度不同对金属变形抗力的影响, 及采用了与正挤压时相同的变形抗力值。通过实验, 建立了确定反挤压时金属变形抗力的方法及计算式。验证结果表明, 以此为依据计算反向挤压力, 误差不大于 5%, 可以满足工程计算要求。

[关键词] 变形抗力; 挤压力; 计算; 反向挤压

[中图分类号] TG 376. 1

[文献标识码] A

目前, 用于各种条件下的挤压力计算式有几十个^[1~6], 这些算式都是在正向挤压条件下推导出来的, 为了使其也能适用于计算反向挤压时的挤压力, 作者们都采用一种较为简单的处理方法, 即直接令作用在挤压筒壁上的摩擦力为零而其它基本不变。然而在实践中发现, 计算出的挤压力与其实测值差异较大, 且远小于实际值, 无法正确指导生产。这是为什么呢? 作者结合正、反向挤压的对比实验, 分析了造成这种差异的主要原因是忽略了正、反向挤压时变形区中的温升对金属变形抗力的影响不同, 采用了与正向挤压时相同的变形抗力。而这种差异一直未引起人们注意的主要原因: 一是长期以来反向挤压的应用远没有正向挤压普遍, 人们只注重对正向挤压进行研究, 轻视了对反向挤压进行深入研究, 以致于对反向挤压中的许多问题认识还不是很清楚; 二是基于对反向挤压过程中挤压力大小无变化的认识, 即金属一旦流出模孔挤压力就不会发生变化, 反映在示功图上为一水平线^[2, 3, 7, 8], 最大挤压力就是突破阶段的挤压力。忽视了随着主柱塞向前移动挤压力并非不变, 而是呈上升趋势(挤压棒材时), 最大挤压力不是出现在突破阶段而是挤压结束时^[9, 10]。作者还通过大量实验建立了确定反向挤压时的金属变形抗力的方法及计算式。对于某牌号合金其挤压工艺是一定的, 变动范围不是很大, 用于计算其挤压力不会有太大误差, 本文报道的验证结果也证明了这一点。因此, 用此确定反向挤压变形抗力, 计算挤压力是一

种准确性大的简易方法, 在工程上是很适用的。

1 实验 I

1.1 实验材料、设备及方案

实验材料为 2A12, 2A11 铝合金。实验设备为 49MN 正向挤压机, 更换反挤压工具后, 可在其 420 mm 挤压筒上反挤压棒材, 正、反挤压模均为平模, 工作带长度均为 5 mm。把正向挤压棒材时测得的挤压力, 代入下面(1)式中^[1](此时式中 d 为零), 求出相应的金属变形抗力 σ_0 。然后令其中金属与挤压筒和穿孔针的摩擦部分(式中的后项)为零, 用求得的 σ_0 计算反向挤压该合金棒材时的挤压力, 并与其实测值进行对比。

$$p = \beta A_0 \sigma_0 \ln \lambda + 0.577 \sigma_0 \pi (D + d) L \quad (1)$$

式中 p —挤压力, N; A_0 —挤压筒或挤压筒与穿孔针之间环形的断面积, mm^2 ; σ_0 —与变形速度和温度有关的变形抗力, MPa; λ —挤压比; D, d —分别为挤压筒、穿孔针直径, mm; L —镦粗后的锭坯长度, mm; β —修正系数(1.3~ 1.5, 硬合金取下限, 软合金取上限)。

1.2 结果及分析

实验结果及有关工艺参数见表 1。

从表 1 中可以看出, 根据正向挤压力算式推出的变形抗力 σ_0 , 应用于相应的反向挤压时计算挤压力, 其计算值比实测值小一半以上。其主要原因有

① [收稿日期] 2001- 12- 21; [修订日期] 2002- 02- 04

[作者简介] 邓小民(1959-), 男, 高级工程师, 硕士。

表1 正、反向挤压棒材实验结果

Table 1 Experiment result of direct extrusion and indirect extrusion

Alloy	Extrusion way	Billet	Bar	Container	Die hole	Extrusion ratio, λ	Discard / mm	Temperature of billet, $t/^\circ\text{C}$
ZA12	Direct	$d405\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$	$d91\text{ mm}$	$d420\text{ mm}$	2	10.7	100	400
	Indirect	$d405\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$	$d85\text{ mm}$	$d420\text{ mm}$	2	12.2	30	380
ZA11	Direct	$d405\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$	$d110\text{ mm}$	$d420\text{ mm}$	1	14.6	100	400
	Indirect	$d405\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$	$d110\text{ mm}$	$d420\text{ mm}$	1	14.6	30	390
Alloy		Temperature of container, $t/^\circ\text{C}$	Extrusion speed of stem/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	p / kN	σ_0 / MPa	$p \cdot t$ / kN	Absolute error/ kN	Relative error/ %
ZA12	Direct	400	1.3	49 690	41.4			
	Indirect	400	2.1	47 670		21 531	26 139	- 54.8
ZA11	Direct	400	1.3	47 160	38.4			
	Indirect	420	2.5	43 790		19 969	23 821	- 54.4

以下几方面:

1) 反向挤压时, 金属在进入变形区之前不发生塑性流动, 在其表面层没有剪切变形区。由于变形区靠近模孔, 不存在正向挤压那种很大的剧烈变形区, 金属通过变形区从模孔流出时, 只受到弹性区金属较小的摩擦作用, 故其变形均匀。而正向挤压时, 金属在进入变形区之前由于受到筒壁的摩擦而在其表层发生强烈的剪切变形, 进入变形区后又通过剧烈变形区, 其变形非常不均匀, 产生的变形热很大。

2) 反向挤压时, 一方面金属与挤压筒无摩擦; 另一方面, 死区很小, 对通过变形区的金属所产生的摩擦远比正向挤压时小, 故产生的摩擦热很小。正向挤压时, 金属在进入变形区之前受到挤压筒壁强烈的摩擦, 通过变形区时又受到来自死区锥面的强烈摩擦, 其摩擦热很大。

3) 反向挤压时的变形区体积很小, 紧靠模面, 形状近似圆筒形^[1], 金属通过变形区的时间很短, 硬化系数大^[2], 加工硬化程度大。而正向挤压时的变形区体积很大, 即便挤压速度与反向挤压时相同, 但通过变形区的时间长, 加上其变形热、摩擦热又很大, 金属很容易发生软化, 使其变形抗力降低。

4) 反向挤压速度比正向挤压时快, 应变速率高, 加上变形区的体积小, 使得金属通过变形区的时间更短, 加工硬化程度也更加显著。正向挤压的速度较低, 金属的应变速率低, 加上变形区的体积大, 则通过变形区的时间更长, 也就更容易使金属产生软化。总之, 反向挤压时的变形热、摩擦热小, 变形区中的温升小, 根据反挤 2A11 合金 $d110\text{ mm}$ 棒材时的实测, 其温升只有 25~ 60 $^\circ\text{C}$ 。又由于变形

区体积很小, 变形速率较快, 金属通过变形区的时间很短, 变形抗力升高。而正向挤压时, 变形热、摩擦热很大, 变形区中的温升大。据文献[3]介绍, 正向挤压 2A11 合金时的温升高达 216 $^\circ\text{C}$ 。加上变形区的体积大, 变形速率较慢, 金属通过变形区的时间长, 有足够的时间发生软化, 故其加工硬化程度低, 甚至产生了加工软化。

由此可见, 即便在条件完全相同的情况下, 反向挤压时金属的实际变形抗力也比正向挤压时高, 在计算挤压力时, 应采用不同于正向挤压时的变形抗力值。如果采用与正向挤压相同的变形抗力, 就会使计算值远小于实际值, 以此来制订工艺, 就会造成因实际挤压力过大, 发生“闷车”事故, 甚至损坏工具(特别是空心挤压轴和将模子等固定在其上的专用工具套)。然而, 金属的变形抗力值是很难直接得到的, 加上反向挤压时变形区的体积很难确定, 实际挤压时的温度、速度等条件的变化对热效应及加工硬化程度的影响, 不同金属的加工硬化程度不同, 从而很难准确地知道金属在变形区中的硬化情况, 也就难以保证计算精度。为此, 利用有显示和记录各挤压参数的现代化反向挤压机做进一步试验, 测得了大量实际工艺和力学数据, 代入挤压力计算式, 反推出相应条件下的变形抗力。对于某牌号的合金其挤压工艺是一定的, 变动范围不是很大, 故将推出的变形抗力用于计算相应牌号合金的挤压力将不会有太大误差。

2 实验 II

2.1 实验材料、设备及方案

实验材料仍选用 2A12, 2A11 铝合金, 其锭坯

的化学成分见表 2。实验设备为 25MN(最大挤压力为 27.5MN) 棒管反向挤压机, 由计算机控制, 挤压速度可在 0~ 23mm/s 范围内调节, 自动显示并记录挤压力和挤压速度的大小及变化。在其 260 mm 挤压筒上, 用 75 mm 穿孔针、 $d255/76 \text{ mm} \times 640 \text{ mm}$ 空心锭坯, 无润滑反向挤压 2A11 合金 $d71 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ 管材, 出模孔速度控制在 2.0~ 2.5 m/min; 用 $d255/76 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 空心锭坯, 挤压 2A12 合金 $d70 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 管材, 出模孔速度控制在 1.5~ 1.7 m/min。挤压模为平模, 工作带长度 5 mm。

表 2 锭坯的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions of billet (mass fraction, %)

Element	2A11	2A12
Cu	4.1	4.3
Mg	0.65	1.40
Mn	0.52	0.57
Si	0.49	0.49
Fe	0.36	0.35
Ni	< 0.05	< 0.05
Zn	< 0.2	< 0.2
Ti	< 0.05	0.057

2.2 实验结果

将测得的挤压力及有关参数代入(1)式(此时式中 D 为零), 反推出不同温度、速度下金属的变形抗力 σ_0 (见表 3)。表 3 中的速度 v 是根据锭坯温度设定的值, 与实测值相同。由于挤压速度对金属变形抗力的影响只有在速度变化很大时才能明显表现出来, 而实际生产中控制速度的变化范围是比较小的, 故对变形抗力的影响较小, 在计算时可以忽略。最后回归得到变形抗力 σ_0 与温度 t 的关系:

$$\left. \begin{aligned} 2A11 \text{ 合金: } \sigma_0 &= 126.8 - 0.155t \\ 2A12 \text{ 合金: } \sigma_0 &= 121.5 - 0.124t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3 验证及分析

在 49MN 挤压机上反向挤压 2A11, 2A12 合金棒材; 在 25MN 挤压机上, 用 95 mm 穿孔针无润滑反向挤压 2A12 合金管材, 以验证用(2)式确定的变形抗力在不同挤压机上、挤压不同品种产品时计算

挤压力的准确性。挤压模为平模, 工作带长度 5 mm。验证用锭坯规格、挤压制品规格、实测锭坯温度、挤压速度及验证结果见表 4。

从表 4 中可以看出, 最大的绝对误差为 1 128 kN, 相对误差为 4.9%。造成这种误差的主要原因是验证试验与推测变形抗力实验在以下几方面不完全一致的结果:

1) 不同熔次合金成分波动对其变形抗力的影响不同。标准规定每种牌号合金中各元素的含量都有一定的波动范围, 这种原材料成分的差异, 加之每一炉熔炼中的烧损不同及炉前分析时因搅拌不均造成的补料的差异和因各成分密度不同造成的铸锭前后端成分的差异。从而造成不同熔次、同一铸次前后合金成分的波动, 引起变形抗力的差异。

2) 不同炉次均匀化退火温度差异对其变形抗力的影响不同。均匀化退火温度有一个范围, 加上炉子不同时期状况可能不同, 都会造成不同炉次均匀化退火温度的差异; 对于同一炉次, 由于炉子本身存在着冷、热端, 处于炉中不同部位金属的实际温度是不一样的。这就造成不同炉次、同一炉中不同部位锭坯实际的均匀化退火温度不同, 引起变形抗力的不同。

3) 挤压速度不同对变形抗力的影响不同。挤压速度不同, 变形的热效应不同, 变形区中的温升不同, 对金属的软化作用不同; 挤压速度不同, 则变形速率不同, 通过变形区的时间不同, 其加工硬化程度也不同, 从而造成变形区中金属的变形抗力不同。

4) 不同规格制品挤压比不同, 其变形的热效应不同, 对变形抗力的影响也不同。

5) 锭坯出炉迟早所造成的温降不同对其变形抗力的影响, 以及测量误差等。

虽然以上因素都有可能造成用(2)式确定的变形抗力与其实际值的差异, 但对于某一牌号合金, 只要其成分符合标准规定, 锭坯充分进行均匀化退火, 采用稳定合理的挤压工艺制度, 其波动范围是很小的。因此, 用(2)式确定的变形抗力计算相应牌号合金的反向挤压力, 不会有太大误差。根据文献[3], 对于工程计算来说, 误差在 20% 以内其计算式就是可用的。本文中的误差不大于 5%, 完全可以满足工程计算的需要。

尽管本文中只建立了确定 2A11, 2A12 两种最常用铝合金反向挤压时的变形抗力的方法, 对于其它牌号的铝合金也可按此方法来确定, 还可以推广应用到其它金属的反向挤压生产。

表3 反向挤压时金属的变形抗力(σ_0)

Table 3 Deformation resistance (σ_0) of indirect extrusion

No.	2A11				2A12			
	$t/^\circ\text{C}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	p_t/kN	σ_0/MPa	$t/^\circ\text{C}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	p_t/kN	σ_0/MPa
1	424	0.8	21 491.4	62	441	0.5	23 353.4	67
2	416	0.8	21 991.2	63	435	0.5	23 882.6	69
3	409	0.8	22 079.4	63	428	0.5	24 127.6	69
4	400	0.8	22 344.0	64	413	0.5	24 460.8	70
5	392	0.9	22 632.2	65	398	0.5	24 539.2	71
6	387	0.9	23 011.4	66	386	0.6	25 470.2	73
7	372	0.9	23 821.2	68	377	0.6	25 832.8	74
8	360	0.9	24 696.0	71	370	0.6	26 744.2	77
9	354	0.9	25 127.2	72	360	0.6	26 822.6	77
10	348	0.9	25 725.0	74	352	0.6	27 263.6	79

表4 挤压力实测值与计算值的对比

Table 4 Comparison of measured extrusion force with calculated

Alloy	Billet	Product	$t/^\circ\text{C}$	$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	p_t/kN		Error/%
					Calculated	Measured	
2A12	$d405\text{ mm}\times 800\text{ mm}$	$d105\text{ mm}$	365	1.6	43 883	42 386	- 3.5
			360	1.4	45 809	43 706	- 4.8
			370	0.9	45 034	43 706	- 3.0
			380	1.1	44 320	42 875	- 3.4
	$d255\text{ mm}\sim 97\text{ mm}$ $\times 350\text{ mm}$	$d98\text{ mm}\times 4\text{ mm}$	404	0.6	22 139	23 086	4.1
			406	0.6	22 077	23 205	4.9
			411	0.6	21 860	22 730	3.8
2A11	$d405\text{ mm}\times 1\ 000\text{ mm}$	$d110\text{ mm}$	365	4.5	37 809	38 483	1.8
			375	2.0	37 001	38 137	3.0
			380	3.4	36 570	36 750	0.5
			390	2.8	35 762	36 750	2.7

4 结论

1) 根据实验结果分析了以往用公式计算反向挤压力时,产生大的误差的主要原因,是忽略了反向挤压与正向挤压在许多方面不同对其变形抗力的影响不同,而采用了与正向挤压时相同的变形抗力值。

2) 通过实验,建立了求解 2A11, 2A12 铝合金反向挤压时变形抗力与锭坯加热温度之间的关系式。只要知道了金属的挤压温度范围,依据此关系式就能很方便地计算出其反向挤压时的变形抗力值。并经过在不同类型的挤压机上、对不同品种规

格制品的实验,证明其准确、实用,得到了误差不大于 5% 的结果。

3) 虽然只建立了求解两种铝合金反向挤压时的变形抗力的关系式,但对于其它牌号的铝合金以及其它金属,也可按此方法建立起确定其反向挤压时的变形抗力的关系式,从而为合理制订反向挤压工艺提供依据。

[REFERENCES]

[1] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册(修订版) [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000. 490- 491, 538- 540. WANG Zhu-tang, TIAN Rong-zhang. Working Handbook of Aluminium Alloy [M]. Changsha: Central South

- University of Technology Press, 2000. 490– 491, 538– 540.
- [2] 马怀宪. 金属塑性加工学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 32– 43.
MA Huaixian. Plastic Working of Metals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997. 32– 43.
- [3] 刘静安. 铝合金挤压工具与模具(上) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 68– 86.
LIU Jing-an. Ejection Apparatus and Extrusion Die of Aluminium Alloy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990. 68– 86.
- [4] Noetatsuhiko. Pipe backward extrusion of nonferrous metal [J]. Plastic Working, (in Japanese), 1981, 10: 990– 994.
- [5] Sanoshiyuunan. Development of extrusion aluminium alloy [J]. Plastic Working, (in Japanese), 2000, 5: 14– 17.
- [6] 刘静安, 赵云路. 铝材生产关键技术 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997. 25– 26.
LIU Jing-an, ZHAO Yun-lu. Key Technology of Aluminium Produce [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997. 25– 26.
- [7] 李虎兴. 压力加工过程的摩擦与润滑 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 122– 124.
LI Huxing. Friction and Lubrication of Plastic Working Process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. 122– 124.
- [8] 别洛夫 A Ф, 科瓦索夫 Ф Н. 铝合金半成品生产 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982. 180.
Bjelov A F, Kvasov F N. Raw Product Production of Aluminium Alloy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982. 180.
- [9] 刘静安. 金属反向挤压技术及其应用 [J]. 铝加工, 2000, 3: 23– 25.
LIU Jing-an. Technology of metal backward extrusion and it's applying [J]. Aluminium Fabrication, 2000, 3: 23– 25.
- [10] 邓小民. 反向挤压时的挤压力变化规律 [J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 96– 100.
DENG Xiaomin. The varying law of extrusion force in the process of backward extruding [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 96– 100.

Error analysis and practice of extrusion force formulas on backward extrusion

DENG Xiaomin

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

[Abstract] At present, the extrusion force formulas used in calculating backward extrusion are all based on the according direct extrusion's, and the friction between the metals and inside of the container is assumed to become zero. In practice, the calculated extrusion force according to these formulas has much difference with the real figure frequently, which can not guide production. The main reason is to neglect the difference of the temperature rise and strain hardening between the direct extrusion and the backward extrusion. Through the experiment, the backward extrusion force formulas were found. The error of backward extrusion force calculated by the formulas is not more than 5%, so it can be applied in engineering calculation.

[Key words] deformation resistance; extrusion force; calculation; backward extrusion

(编辑 朱忠国)