

大锻件拔长工艺研究进展与展望

(合肥工业大学材料科学与工程学院, 合肥 230009) 王雷刚¹ 黄 瑶³
(燕山大学机械学院, 秦皇岛 066004) 刘助柏²

摘 要: 综述了拔长工艺研究进展, 重点阐述了近期以系统观点研究拔长而获得的拔长工艺理论、临界砧宽比、临界料宽比的最新成果, 展望了拔长工艺未来研究趋势。

关键词: 大锻件; 拔长; 进展; 砧宽比; 料宽比

1 引 言

拔长是决定大锻件质量的主要锻造工艺。大锻件锻造的目的主要是打碎碳化物、锻合先天性疏松、孔洞型冶金缺陷, 同时不萌生新的裂纹源, 以获得均质致密的锻件。由于钢锭内部不可避免地具有不同程度的内部疏松、孔洞与夹杂物, 因此采用何种有效的工艺去锻合内部这些缺陷, 如何创造有利的力学条件, 使之在锻造过程中不出现新裂纹或夹杂性裂纹, 一直是锻造工作者关心与研究的问题。

自 20 世纪 50 年代以来, 各国的锻造工作者开展了大量探索研究, 在平砧拔长研究的基础上, 先后提出了一系列新拔长方法, 这些方法的共同点是采用宽砧、大压下量来消除心部轴向拉应力和锻合内部缺陷, 为此, 进行了一系列模拟实验, 研究各种拔长方法的砧宽比、变形特点、锻造效果及孔洞锻合机理。但由于各研究者得到了不同的不产生轴向拉应力的临界砧宽比, 对宽砧、大压下量锻造, 没有从系统观点来认识拔长, 当拔长翻转 90°以后, 如何控制砧宽比等问题, 直到近 10 年, 随着科学技术的进步和人们认识的提高, 提出了拔长新理论及新工艺, 统一了临界砧宽比, 使拔长的研究上升到一个新的高度。综观大锻件拔长工艺的研究过程, 反映了人们认识规律的逐步升华过程。

2 平砧拔长的早期研究

平砧拔长是最早采用的拔长方法, 由于工具简单适应性强一直广泛采用, 在小锻件锻造时代, 主

要考虑拔长效率, 而对拔长质量未作过高要求。随着大锻件的出现, 钢锭内部的疏松、空洞、微裂纹缺陷增多, 对锻造提出了更高的要求。从此开始研究平砧拔长。

50 年代, 前苏联学者把拔长当成局部镦粗加刚端影响, 以镦粗时当高径比 $h/d > 2$ 时产生双鼓形为基础, 根据变形协调条件, 论述了当砧宽比 $w/h < 0.5$ 时, 连续两砧之间的中心轴线上产生拉应力^[1] (见图 1a), 这是早期的轴向拉应力分析模型, 也是大锻件拔长时最早提出的砧宽比限制条件。

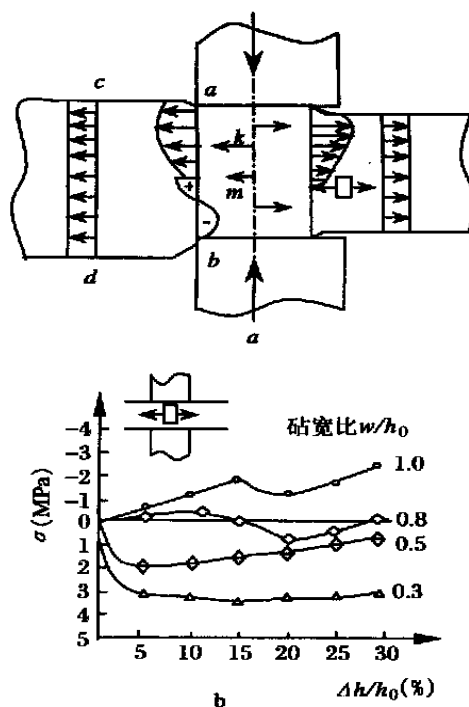


图 1 拔长应力和变形图

Fig. 1 Distribution of stress and deformation of stretching blank

70 年代, 日本河合正吉等在塑料泥中埋入传感器, 测试了不同砧宽比下平砧拔长内部应力分布。

实验结果表明:当砧宽比 $w/h < 0.9$ 时,砧子下面变形体中心轴线上存在轴向拉应力^[2],即 Mannesmann 效应(如图 1b)。这里要指出的是,两者研究的着眼点不是同一处,前者研究的是砧子侧面连线与毛坯轴线的交点处,后者研究的着眼点是变形区垂直中心线与毛坯轴线的交点处。无疑,前人的这些研究具有重要的意义,它否定了镦粗体内三向压应力的传统说法,为正确认识和评价镦粗起到了积极的推动作用,是大锻件拔长时制定合理砧宽比的理论依据。但在实际生产中,即使砧宽比得到严格的控制,拔长体内部仍会出现横向裂纹缺陷,超声波探伤不合格,这说明单从轴向拉应力的角度来研究拔长体内部的应力状态是不够的,在拔长时还存在另外萌生裂纹并使其扩展的变形机理。

3 拔长方法的大量出现

在研究平砧拔长的同时,人们逐步认识到应力应变状态对锻合大锻件内部缺陷的重要性,因此各国的锻压工作者一直在寻求通过改变边界条件以获得最佳的锻合条件,从上下平砧拔长发展为上平砧、下 V 型砧拔长^[3],后来通过改变拔长砧形和工艺条件,又发展了 FM 锻造法^[2]、WHF 锻造法^[4]、KD 锻造法^[5]、SUF 锻造法^[6]、TER 锻造法^[7]、JTS 锻造法^[8]、FML 锻造法^[9]和 AVD 锻造法^[9],这些方法都已成功应用于大锻件生产。其中,最具代表性的是 JTS 法、FM 法和 WHF 锻造法。

60 年代初期,日本学者 Tefeno 和 Shikano 发明了表面降温的 JTS 法(Japan Tefeno and Shikano 提出并命名),在我国常称为硬壳锻造法或中心压实法。该法自提出以来,先后在美、苏、西德、捷克等国家得到了应用,取得了良好的效果,按照鹿野等人的调查统计,250 根采用 50t 以上钢锭锻成的转子和大轴,采用 JTS 法,产品的合格率由平砧的 35% 提高到 83.5%^[8]。但 JTS 法由于表面降温需喷水或喷雾,增加了工序和投入,恶化了车间状况,同时由于表层冷,变形抗力增加,所需设备吨位大大提高,约为普通平砧拔长的 2.5~3 倍左右,所以 JTS 法的应用受到限制,只用于质量要求特别高的转子等轴类大锻件。

70 年代日本学者河合正吉等根据滑移线理论的解析结果,提出拔长时采用上平砧下平台的 FM 法(Free from Mannesmann effect),即免除曼内斯曼效应的锻造法。通过实验研究,FM 法的砧宽比

$w/h \geq 0.4 \sim 0.5$,轴向不产生拉应力,这与上、下平砧拔长轴向不产生拉应力的砧宽比 $w/h \geq 0.8 \sim 0.9$ 相比,要小一倍以上,所需锻压力,前者只为后者的 $2/3$ ^[29],FM 法省力,使现有设备和工具拔长大钢锭成为可能,是大型模块锻造的重要方法。

4 模拟研究及主要结论

锻造变形是复杂的大塑性变形,经典的塑性理论很难求出精确解,对内部应力、应变场的分析更是无能为力,物理模拟和数值模拟是求解应力应变场和分析金属流动规律的有效方法,在锻造模拟中,塑料泥、密栅云纹和有限元方法应用最多,为人们正确认识拔长和评价拔长方法提供了依据。

早在 50 年代 Cook 等人用塑料泥对平砧进行了研究^[10~12],日本中岛等人首次对平砧拔长、JTS 法、FM 法进行对比研究^[14~16],中岛用塑料泥加传感器研究了 3 种拔长方法变形体内的应力应变特性,以及锻造方法、应力应变条件对孔洞压合的影响。认为内部变形主要取决于 w/h 和锤砧布置等几何因素,而不是温度差,对于平砧, $w/h \geq 0.95$,对于 FM 法, $w/h \geq 0.4$,即使无温差,均产生三向压应力。且提出静水压和等效应变是孔洞封闭的决定因素,按两者的影响程度大小,可将孔洞封闭形式分为两种,即以静水压为主,以等效应变为主。

我国清华大学曹起骧等用密栅云纹对 V 型砧^[17]、FM 法^[18]、平砧^[19]的应力应变分布进行了对比研究,模拟研究结果表明:V 型砧心部不易产生拉应力,能增加心部等效应变,对空洞的压合有利,至于 V 型砧的角度,试验结果是 135° V 型砧最优, 120° V 型砧次之。对比研究表明:砧宽比 $w/h \geq 0.4$,心部不出现轴向拉应力。这是国内最早较为系统地研究各种拔长方法的文献,为人们正确认识 and 评价拔长方法提供了依据。但研究局限在轴向拉应力和砧宽比上。

随着计算机技术的迅猛发展,数值计算方法在各行各业中应用日益普及。由于有限元提供的信息量全、方法规范,易于计算机实现,在锻造过程中得到了广泛应用。Kobayashi 最早用刚塑性有限元对镦粗进行了研究^[13]。清华大学王祖唐^[20]、哈尔滨工业大学吕炎^[21]、太原重型机械学院孙捷先^[22,23]、东北重型机械学院(现为燕山大学)陶永发^[24]分别对平砧拔长、FM 法、JTS 法进行有限元模拟,得到了内部应力应变场和不产生轴向拉应力的砧宽比

限制条件。

国内外研究者通过大量物理模拟和数值模拟得到了不同的临界砧宽比,到底哪一家正确?作者认为:只要手段正确,结果都可靠,得出不同的临界砧宽比是因为在不同的料宽比下得到的。但是都未从系统观点研究和认识拔长,仅考虑砧宽比,未考虑料宽比。通过作者的进一步研究,将前人的研究成果统一起来,并得出一些新的结论。

5 拔长工艺研究新进展

5.1 拔长新理论及新工艺

进入90年代,我们发现前人的研究只注意到拔长变形体的轴向拉应力问题,忽略了拔长体的横向拉应力,这种“忽略”不是疏忽,而是受时代对科学事物认识的限制。从变形体的塑性条件入手,根据变形的先后,提出了圆柱体镦粗的刚塑性力学模型拉应力理论^[25],发展到方柱体镦粗的刚塑性力学模型,在此基础上,以系统观点提出了拔长新理论^[26]。该新理论论证了只有砧宽比一个工艺参数的不足,提出应补充一个工艺参数料宽比,才能正确描述拔长毛坯变形中心区域的应力状态,以确保质量。在新理论的指导下,提出了同时控制料宽比及砧宽比的LZ锻造法^[27](L、Z为料、砧首写汉语拼音),认为 $w/h = 0.8 \sim 0.9$, $b/h = 0.85 \sim 1.18$,变形体内不会出现轴向和横向拉应力。在FM法基础上同时提出了增加料宽比的新FM法^[28]。认为 $w/h \geq 0.4$, $b/h = 0.83 \sim 1.2$,变形体内不会出现双向拉应力。

应用拔长新理论与新工艺指导锻造生产,取得了显著的经济效益。陕西重型机器厂锻造模块的合格率由普通锻造法的50%提高到96.8%^[25]。二重锻造大轴合格率大大提高^[30]。

5.2 临界砧宽比、料宽比

作者应用ANSYS软件对不同砧宽比、料宽比下拔长进行了定量模拟研究^[31],分析了拔长变形体内部的应力分布规律,当砧宽比较小时,会产生轴向拉应力,当料宽比较小时,会产生横向拉应力,这对大锻件锻造极为不利。临界砧宽比、料宽比如图2所示,从图2a可以看出,临界砧宽比与料宽比有关,从图2b可以看出临界料宽比与砧宽比有关。在不同的料宽比下,临界砧宽比范围在0.64~0.95之间,使前人的结论得到了很好地统一。在不同的砧宽比下,临界料宽比范围在0.75~0.97之间。

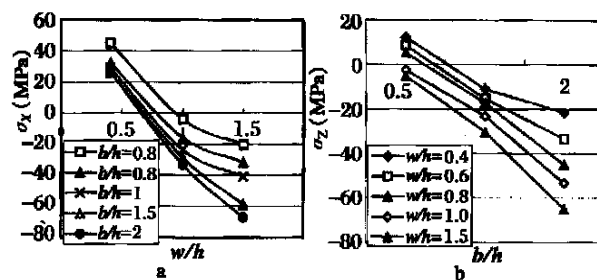


图2 中心点的应力与砧宽比和料宽比的关系

a) 轴向应力与砧宽比的关系; b) 横向应力与料宽比的关系

Fig. 2 Relationship between center point's stress and w/h & b/h

6 拔长工艺研究展望

锻造工作者经过长期的探索研究,取得了显著的成就,为提高大型锻件质量作出了巨大贡献。随着大型锻件尺寸的增大,对锻件质量的要求更高,锻造工艺为了适应这一要求,必须对下列问题开展研究。

1) 锻比的重新认识。长期以来用锻比来衡量钢锭的压实程度,为了提高质量,常采用大锻比锻造,即增加镦粗次数。但随着钢锭的日趋大型化,大钢锭镦粗逐渐受到水压机能力的限制,而且大锻比锻造必然增加锻造火次。因此应重新认识锻比,锻比是拔长前后长度之比,是一个宏观的评价指标,不足以评价内部质量,而应该建立一套微观的评价指标,如静水压力、当量等效应变。以此为出发点,重点研究不需镦粗而直接拔长或减少镦粗次数的小锻比锻造。

2) 锻造方法与技术路线的综合评判。不同的锻造方法的锻造效果、能源能耗、生产效率、劳动强度、技术要求各不相同,分别适用于不同的场合,如JTS法中心压实效果好,但劳动条件差、技术要求高,一般仅用于大型轴类锻件的压实。因此在制订具体锻件的变形工艺时,采用何种方法与技术路线应综合考虑。

3) 微观模拟与控制锻造。锻造是在高温、大变形力作用下伴随着动态回复再结晶、静态回复再结晶等微观组织变化的热力过程。在宏观模拟的基础上,应大力开展微观模拟、热力模拟研究,掌握微观组织的演变规律和热力学参数对锻件内部质量的影响规律,以实现控制锻造和质量预报。

参考文献

- [1] В Н Трубин Ковка Крупных Поковок Москва МАШИЗ, 1962
- [2] Masayoshi Kawai. On the Mannesmann Effect Appearing in the Course of Solid Forging of Steel Ingot. Proc. 8th International Forgemasters Meeting, Kyoto, 1997
- [3] R Kallstrom. Improved Forging Technical with Conical V-Shape Tools. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1983, 12
- [4] P M Cook. Dependence of Mechanical Properties of Forgings On Local Strain. Journal of the Iron and Steel Institute, 1959 (4): 250~252
- [5] 谢云岫. 一重转子锻件锻造工艺的演变和发展. 第四届全国锻压学会论文集. 上海, 1987, 1~4
- [6] 田中光之等. 钢锭内部空隙的压合. 日本塑性加工春季讲演会, 1982, (5): 284~288
- [7] D Benkelman, K Forch, M Fleischer, R Kopp. Forging of Heavy Continuous Grain Flow (CGF) Crankshafts Without Intermediate Cooling. Proc. 12th International Forgemasters Meeting, Chicago, 1994
- [8] 关野万吉, 鹿野昭一. 大型锻钢件的温间锻造. 塑性 & 加工, 1966, 7 (55): 299~394
- [9] 渡边司郎, 田村至等. 自由锻时大型锻件的内部变形应力特点. 大型铸锻件文集, 1984, (4): 91~99
- [10] P M Cook. Forging Research Use of Plasticine Models. Metal Treatment and Drop Forging, 1959: 541~545
- [11] J G Wistreich, Shutt. Theoretical Analysis of Bloom and Billet Forging. Journal of the Iron and Steel Institute, 1959: 163~169
- [12] R C Benson, R T H Hunt. Tool for Heavy Forging Work. Journal of the Iron and Steel Institute, 1961, 39~42
- [13] S Kobayashi, C H Lee. Deformation Mechanics and Workability in Upsetting Solid Circular Cylinders. Proc. of the North American Metal Working Research Conf. Hamilton, 1973, 185~190
- [14] 中岛浩卫, 渡边和夫等. 大型热间自由锻造时的内部变形 的特性. 塑性 & 加工, 1981, 22 (246): 697~730
- [15] 中岛浩卫, 渡边和夫等. 大型热间自由锻造时的内部应力 的特性. 塑性 & 加工, 1981, 22 (249): 1035~1042
- [16] 中层法卫, 渡边和夫等. 内部孔隙 的变形 に及 ぼす 锻造条件 おすび应力- ひずみ条件 の影响. 塑性 & 加工 1981, 22 (251): 1230~1234
- [17] 曹起骧等. V 型砧锻造时变形规律的云纹模拟研究. 大型铸锻件, 1987, (2): 1~13
- [18] 曹起骧等. FM 法锻造室变形规律的云纹模拟研究. 大型铸锻件, 1987, (2): 14~23
- [19] 谢冰, 曹起骧等. 宽砧强压锻造效果的常温模拟实验研究. 大型铸锻件, 1987, (2): 24~30
- [20] 王祖唐, 刘庄, 任猛. 大钢锭锻造时内部孔洞性缺陷压合的实验研究. 大型铸锻件, 1987, (1): 1~8
- [21] 吕炎等. 大型锻件非对称拔长工艺的有限元分析. 金属科学与工艺, 1985, (9): 95~100
- [22] 孙捷先. 轴类大锻件心部压实锻造法的模拟实验与有限元分析. 大型铸锻件, 1987, (2): 31~39
- [23] 孙捷先. FM 锻造法的实验与有限元分析研究. 机械工程学报, 1986, 22 (3): 56~61
- [24] 陶永发等. FM 法锻造效果的实验研究. 东北重型机械学院学报, 1985, (11): 4~7
- [25] 刘助柏. 塑性成形新技术及其力学原理. 北京: 机械工业出版社, 1995: 9~86
- [26] Liu Zhubai, et al. Theory of Stretching a Blank with Rectangular Cross Section Between Flat Tools. Proc. 12th International Forgemasters Meeting, Chicago, 1994: 1~5
- [27] 刘助柏, 朱继武. 新拔长理论工艺参数的量值匹配与确定. 机械工程学报, 1994, 30 (5): 83~86
- [28] 刘助柏, 李纬民. 新 FM 锻造法. 机械工程学报, 1994, 30 (4): 79~82
- [29] 刘助柏等. 锻造条件对毛坯内部孔洞闭合的影响. 钢铁, 1988, 23 (7): 25~30
- [30] 孙海燕. 锻件工艺参数对改善超声波探伤缺陷的影响. 大型铸锻件, 2001, (2): 31~39
- [31] Wang Leigang, Liu Zhubai, Deng Dongmei. Three-dimensional finite-element simulation of stretching technological parameters w/h and b/h of heavy forgings. Proc. 14th International Forgemasters Meeting, Wiesbaden, 2000: 475~478

(下转第 48 页)

K ——双拉条件下的强度系数, $K = 430 \text{ MPa}$
 N ——双拉条件下的应变硬化指数, $N = 0.285$

由此可见, 双向拉伸条件下的强度系数 $K = 430 \text{ MPa}$ 低于单拉条件下的 $k = 534 \text{ MPa}$, 而应变硬化指数 $N = 0.285$ 高于单拉条件下的 $n = 0.236$, 表现出较好的胀形性能。

4 结 论

- 1) 双向拉伸变形条件更有利于发挥材料塑性变形的潜力。
- 2) 不同应力状态下板材的本构方程存在一定的差异。与单向拉伸变形相比, 双向拉伸变形过程中

应力数值较小。

参考文献

- [1] 康永林. 现代汽车板的质量控制与成形性. 北京: 冶金工业出版社, 1999
- [2] 邓陟, 王先进. 汽车用薄板的发展及对策. 钢铁. 1993, 28 (6): 73~78
- [3] 钟志华, 李光耀. 薄板冲压成型过程的计算机仿真与应用. 北京: 北京理工大学出版社. 1998
- [4] 李新军, 万敏, 周贤宾. 数值模拟在汽车覆盖件成形中的应用. 塑性工程学报, 1998, 5 (4): 42~46
- [5] 印雄飞, 阮雪榆. 板料成形过程的数值模拟. 塑性工程学报, 1999, 6 (1): 21~25

Constitutive relationship of cold-rolled St14-T metal sheet under different stress state

JIAN G Hao-min CHEN Xirping WU Hua WANG Cheng-pu
(Bao Steel R & D Center, Shanghai 201900)

Abstract: The stress gradient and strain distribution of sheet metal during double-tension process are analyzed by hydro-bulging test. Meanwhile the strain-stress curve is determined. The constitutive relationships under different stress state are discussed. It is shown that there lies certain difference between the constitutive relationships under different stress states. The plastic potential of metal sheet is easy to be obtained under double-tension state. Compared to the single-tension, double-tension is beneficial to the uniform of sheet deformation and suppress the generation and further development of local neck.

Key words: sheet metal; hydro-bulging; constitutive relationship

(上接第 31 页)

Development and prospective of heavy forgings stretching process

WANG Lei-gang¹ Huang Yao³
(Hefei University, Hefei 230009)
LIU Zhu-bai³

(Mechanical Engineering School of Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Stretching is the main forging process of heavy forgings and the research of stretching is of great significance. The development of stretching research is reviewed and the newest achievements obtained recently in systematic method in the fields of stretching process theory, critical tool width ratio and critical blank width ratio are detailed. The tendency of stretching process is expected.

Key words: heavy forgings; stretching; development; tool width ratio; blank width ratio