专家论坛

板材与管材成形性能的研究与进展

张士宏，袁安营
（中国科学院金属研究所，沈阳 110016）

摘要：介绍了塑性加工领域近年来发现的一些提高金属材料塑性变形能力的方法和机理，包括板材增量成形中拉弯伴随成形、局部接触、反复弯曲、交变加载、高静水压力等方式下引起的板材局部增塑机理；波动液压加载状态下管材液压成形能力的提高机理（有轴向进给）、AISI 304 不锈钢管材的液压成形增塑机理（有、无轴向进给状态下）；AISI304 管材多次拉伸/卸载状态下的增塑机理。这些增塑机理还存在于其它一些塑性加工工艺中，对其合理运用将有效提高产品成形质量和材料利用率，并减少加工道次，甚至可以产生一些新的塑性加工工艺。

关键词：成形性能；应力状态；管材；增量成形；奥氏体不锈钢
中图分类号：TG394　　**文献标识码：**A
文章编号：1674-6457(2009)01-0001-06

Research and Development on Formability of Sheets and Tubes

ZHANG Shi-hong, *YUAN An-ying*
(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Methods and mechanisms of improvement of metal formability appeared in the field of plastic processing recent years were introduced in this paper, including the mechanisms inducing formability improvement of sheets through the methods such as bending-under-tension, local contact, repeated bending, cyclical alternating loading and high hydrostatic pressure in incremental sheet forming; the mechanisms of formability improvement of tubes in pulsating hydroforming with axial feeding; mechanisms of formability improvement of AISI 304 stainless steel tubes in pulsating hydroforming with and without axial feeding; and mechanisms of formability improvement of AISI 304 stainless steel tubes under repeated loading and unloading. These mechanisms also exist in other plastic processing technologies. The quality of products and material utilization will be effectively improved and the processing passes can be reduced with the suitable use of these mechanisms; and some new plastic processing technologies will even appear.

Key words: formability; stress state; tube; incremental forming; austenitic stainless steel

近年来，随着一些新的塑性成形工艺的发展，人们发现金属材料在一定条件下还会表现出超乎寻常的变形能力。这些能力一般与工艺条件相关，或者说与材料所受的特殊应力状态或加载方式相关；对于某些材料由于特殊应力状态或应变历史，还可以诱发材料微观组织结构发生演变，例如诱发孪晶、诱发相变、诱发新相的析出与溶解，这也会导致材料塑性变形能力发生显著提高。

收稿日期：2009-05-04
作者简介：张士宏（1962-），男，辽宁营口人，博士研究生，研究员，博士生导师，中国机械工程学会塑性工程分会副理事长，国际合作工作委员会主任，中科院“百人计划”获得者，主要研究方向为镁合金、高温合金与钛合金塑性加工技术，管材与板材制备成形先进工艺。

金属的基本性质包括可延展性。然而金属延展性的表征需要一定的检验标准,这些标准即变形条件,包括试样形状尺寸和状态标准、温度、变形速度、加载方式、摩擦条件等。普通的拉伸试验可以表征目前常用塑性成形工艺中的塑性变形能力。如果改变加载方式,材料的延展性可能提高很多,例如金属薄板在轧制状态下其伸长率要远高于其单向拉伸试验中的延伸率,原因是板材轧制时承受了局部接触和比较大的压缩应力,板材的延伸是在高的静水压力条件下实现的,变形过程中裂纹等缺陷受到抑制,无法扩展。由此可见,提高金属材料塑性变形能力有很多途径,改变加载方式或利用材料组织演变将为材料增塑提供很多可能性,这是应该进一步开发的领域。

板材增量成形与常规板成形工艺相比塑性变形能力提高非常显著,利用常规理论很难解释。拉弯伴随成形、局部接触、较大的静水压力、反复弯曲或周期弯曲都有可能是其增塑的原因,这些机理值得深入探讨。管材波动液压成形是管材在变形过程中发生了松紧效应, 起皱不断产生与消除,法向压力不断波动降低了摩擦力,工艺条件使管材应力状态发生变化引起增塑;不锈钢 304 管材波动液压成形更因多次加载、卸载导致马氏体相变与逆相变,从而增塑。这些都与加载方式密切相关,或与材料组织演变相关。

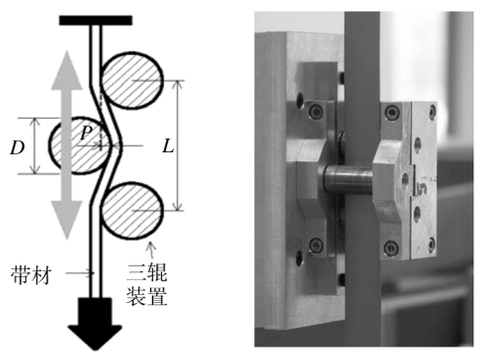
1 板材增量成形中的增塑机理

板材增量成形工艺近年来发展很快,并获得了一定程度的应用。人们发现,在该工艺中可以得到很大的局部应变,可以远远超过成形极限图 FLD 的成形范围。这些工艺的特点是,变形只在很小的范围内发生,即局部变形,且局部变形一般以某种方式在变形体逐步移动,最后掠过整个坯料,使材料发生整体变形,总的说来,是一种渐进型的变形。在局部区域形成特殊条件,使得板材的成形性得以大幅度提高。类似变形还在很多其它工艺中存在,例如板带轧制、筒形件旋压、摆动辗压、高压水冲击旋压成形(water jet ISF spinning)。人们对以这一工艺中存在的复杂变形机理认识不断深入,已经提出多种假设,例如拉弯伴随成形(Bending under tension,有反复弯曲),附加剪应力成形,接触状态向下的局部成形,周期交变载荷条件下的成形性,以及高静水压力下局部成形性。这些研究成果不但有助于人们对板材增量成形工艺的认识,还有助于人们对其他相关工艺的深入认识,并可望在这些研究成果基础上进一步开发,完善有关塑性加工工艺,甚至提出或发展一些新的塑性加工工艺。

以上问题获得了很多学者的研究兴趣,荷兰 CORUS 研发中心的 Emmens 等学者[1-3]进行了大量研究工作,2008 年 10 月他在芬兰赫尔辛基的一个学术研讨会(Seminar NSF08)上做了一次全面总结,在一些近年来发表的论文中也多有论述。他总结了板材增量成形领域解释塑性成形能力提高的几种机理,同时也是一些悬而未决的问题,值得人们思考和探索。这里对其提出的一些观点进行了讨论和分析,还引用了 Emmens 报告会上一些图形(图 1-5)。

1.1 拉弯伴随成形(BUT)假设

Emmens 等人[1]提出了一个拉弯伴随成形试验(BUT 试验,如图 1 所示),板件拉伸时允许反复弯



a 示意图 b 试验装置照片

图 1 拉弯伴随成形试验原理

Fig. 1 Test principle of bending-under-tension

曲。经研究认为:拉弯伴随成形条件下,即使弯角很小也会促使大的均匀应变发生;变形特点是,任何瞬间只有被弯曲部分的材料在发生变形,如果拉力或拉速过大则失效;坯料的实际弯曲半径远大于旋轮半径(该旋轮引起弯角或压入深度);随着弯角的增大,可以得到一个在增加的最大均匀应变,并且存在一个最佳拉速;材料硬化水平受周期弯曲与反弯曲次数影响很小。应力状态特点是:板材部分区域为压缩状态;减少了拉伸方向的屈服应力,在一定的应变增量范围内形成了一个稳定延伸状态;变形局部

化;产生辅加稳定效应。与屈服和硬化行为或应变水平无关。

东京大学 Sawada(2001 年)应用有限元法对这一问题进行了研究,Emmens 于 2004 年给出了实验研究结果。进行反复弯曲试验研究的学者还有印度理工大学 Benedyk (1971, 2002 年), 试验结果为延伸率 26%140% (随材料而变化);研究材料表征的有丹麦技术大学 Jongenburger /Mols (1972 年), 试验结果为延伸率达到 30%110% (随材料而变化);研究拉伸-校平(tension-levelling)的有荷兰三一大学的 Hadoush (2007 年), 给出了钢的延伸率达到 200%,Emmens 于 2007 年发表了增量成形中钢的试验结果,延伸率达到 430%。

1.2　附加剪切变形假设

另一种假设为:材料发生了剪切变形(如图 2 所示)。剪切应力减小了拉伸状态下的屈服应力,

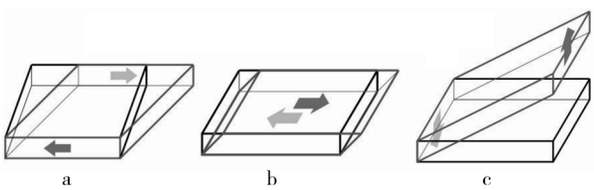


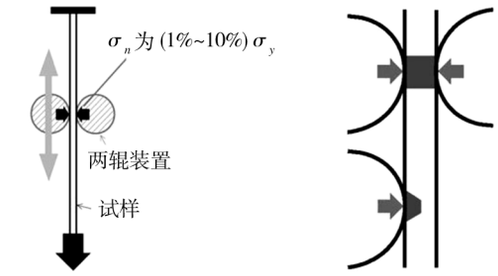
图 2　拉伸伴随剪切(附加剪切变形)

Fig. 2　Shear occurring in incremental sheet forming

提高了材料的颈缩极限。东京大学的 Sawada 在 2001 年通过有限元法分析了这一现象,德国阿亨大学 Bambach 在 2003 年也进行了同样的工作, Tekkaya(2006 年)、Eyckens (2007,2008 年) 和剑桥大学的 Allwood/Jackson(2007 年)等进行了有限元和实验研究。Allwood 提出了“paddle forming”工艺,也得到了高水平的均匀延伸率。

1.3　局部接触假设

第三种假设是局部接触应力,认为表面压缩应力减小了拉伸状态下的屈服应力,从而提高了材料的颈缩极限(如图 3 所示)。很多学者近年来提出或研究了这一观点。德国阿亨大学的 Bambach (2003 年)和比利时列文大学的 Eyckens (2008 年) 应用有限元法分析了局部接触压缩条件下静水压力的作用,日本的 Gotoh (1995 年),美国的 Huang



a　拉伸伴随剪切　　b　接触应力

图 3　拉伸状态下的局部接触压缩

Fig. 3　Local contact compression under tensile state

(2008 年),Smith 和 Matin (2003, 2005 年), 斯洛文尼亚的 Banabic (2008 年)都发表了相关工作。历史上,一些学者还发表了一些实验结果,例如 Taraldsen (1956, 1964, 1972 年)发表了铜棒拉伸试验结果,延伸率达到 600%;Rijken (1965 年)发表了带钢试验结果,延伸率达到 100%;Olejnik (1987 年)发表了钢棒试验结果,延伸率达到 590%。

分析表明,拉伸伴剪切、局部压力接触两种原理都影响应力状态,都减小拉伸变形使得屈服应力降低,使变形局部化;均使成形能力提高到一定水平,增加变形稳定性。剪切与接触应力假设都因为应变状态的变化而减少了拉伸方向的屈服应力;能够产生一定绝对量的变形。而拉弯伴随成形情况下,则减少了弯曲瞬间的拉伸屈服应力,产生相对高水平的变形。

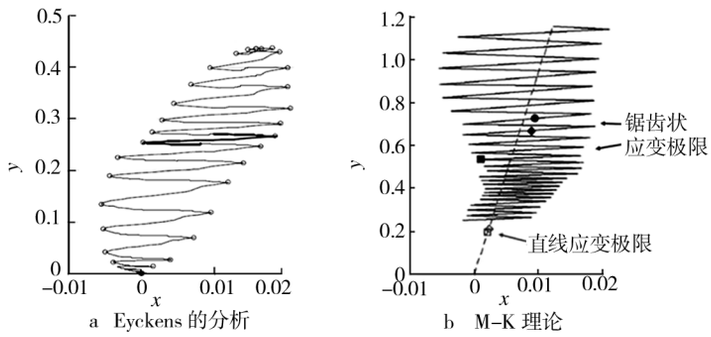
1.4　交变周期效应

研究发现,增量成形工艺中存在强烈的周期性交变循环效应,即反复的弯曲与反弯曲变形(如图 4 所示)。这方面的研究工作有:德国阿亨大学 Bambach(2003 年)应用 M-K 理论进行了分析。Eyckens (2007 年)和 Van Bael (2007 年)也发表了研究结果。

分析指出,非直线应变路径(serrated yielding)可以产生成形性增加效果。还可以根据非等向硬化效应进行解释。在拉弯伴随成形假设中也意味着周期效应。

1.5　静水压力效应

对于接触压应力假设,原因是最小主应力 $\sigma_3<$



a Eyckens 的分析　　b M-K 理论

图 4　周期性交变应力

Fig. 4　Cyclical alternating stress

0 导致了颈缩变形的延迟。对于压缩型静水压力 $\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3<0$,损伤的发展得到了抑制,但失稳状态没有得到抑制。在对增量成形研究中,德国阿亨大学的 Hirt 和 Bambach 于 2002 和 2003 年发表了有限元分析结果(如图 5 所示)。Silva 于 2008 年发表了解析计算结果。

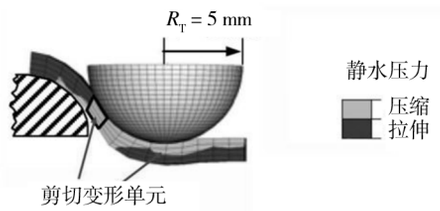


图 5　球形冲头拉伸静水压力状态

Fig. 5　Hydrostatic pressure of spherical punch stretching

实际上,可以理解的是,以上几种机理都可能使变形局部化,都可以提高成形能力,都与增量成形某一方面特征相关。一方面,任意时刻都可以有多种机理同时起作用;另一方面,目前还不清楚在板材增量成形工艺中这些机理是怎样起作用的,以及分别在多大程度上起作用。

2　管材波动液压成形工艺及其增塑机理

近年来,日本学者 Rikimaru[4-5] 提出了一种新的波动型液压加载方式以提高管材的液压成形性能。相关研究表明,这种新的加载方式可以提高管材的成形能力,同时也使得变形分布更加均匀,有利于抑制局部过度减薄。

Mori 等人[6] 对该技术进行了研究。他们对管材进行自由液压成形实验。加载路径如图 6a 所示,3 条加载路径分别是:波动载荷 $P_0=17.7+3\sin(2\pi\cdot0.67)$ MPa;高恒压值加载 $P_0=20.5$ MPa;低恒压值加载 $P_0=17.7$ MPa,轴向冲头以 1.5 mm/s 的速度进给。结果证明波动型加载方式可以有效地抑制或消除液压成形过程中管材的破裂和起皱。

3 种不同加载路径下的实验得到的试验结果如图 6b 所示,通过波动加载的管材壁厚较均匀,且没有产生明显起皱,形状也比较均匀。

笔者[7-9] 研究了加载方式对工业纯铜

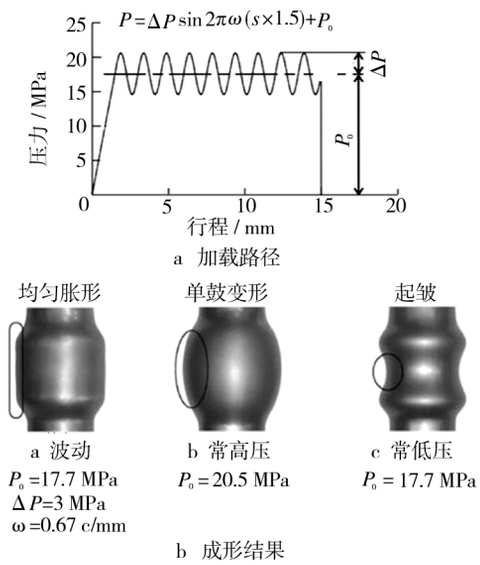


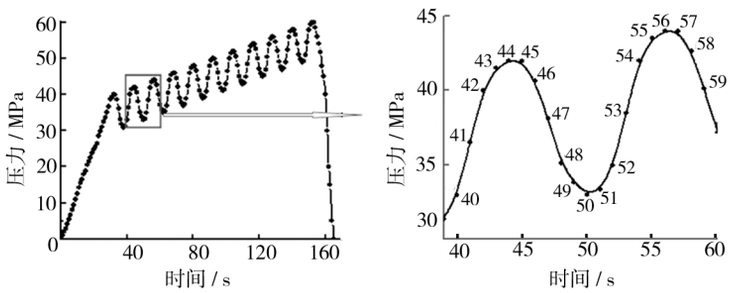
图 6　加载路径示意与 3 种加载路径下的实验结果

Fig. 6　Pulsating load paths and hydroformed tubes

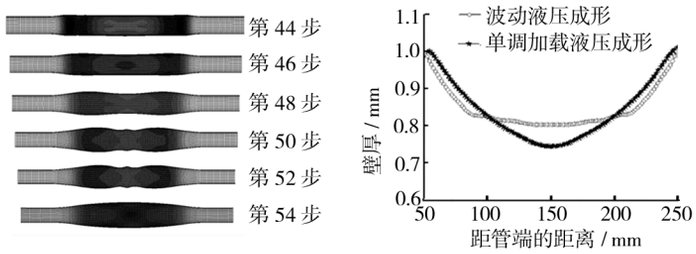
TP2 管材成形性能的影响。通过对单调增加的液压加载和波动液压加载两种加载条件下的试验结果对比,从试样变形区外径分布、厚度分布及裂纹扩展形式等多方面,都充分说明,在有轴向进给的波动内压加载条件下,管材变形分布的均匀性和成形能力都有明显的提高。

结果表明,在波动液压成形中,局部减薄被均匀胀形所阻止,成形性能得到显著的提高。虽然小的起皱在脉冲加载内压下降时生成,但很快因为内压的升高而消失。在脉冲加载中,这种微小起皱的生成和消除在内压力的变化下同时而又重复进行。这种小起皱的重复生成、消除避免了管材的局部减薄,使管材胀形均匀,如图 7 所示。

当管材与模具开始接触时,由于液压的波动,管



a　波动液压加载曲线



b　皱纹在一个压力波动周期内产生与消除的过程

c　2 种加载方式下成形区壁厚沿轴向分布

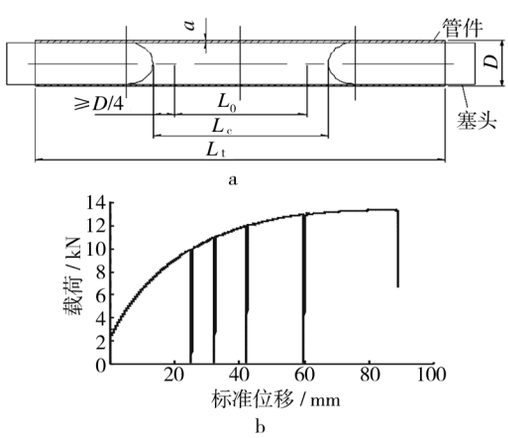
图 7　有轴向进给波动液压成形有限元模拟

Fig. 7　Finite element simulation of pulsating hydroforming with axial feeding

材交替发生收缩和胀形,直径反复胀大与收缩,导致管件所受法向压力时而减小,与单调液压加载方法相比,等效压力降低,从而摩擦力降低,管材的流动变得容易,材料不断得到补充,厚度均匀性提高,成形性因而提高。这就是管材液压成形过程中的松紧效应,即法向压力降低导致摩擦力降低,进而增塑。

3　多次加载/卸载条件下 AISI 304 管材单向拉伸相变诱导塑性

图 8a 为笔者[9]设计的不锈钢管件间歇式拉伸试验用的试件图及其拉伸试验应力应变关系曲线。试件在拉伸过程中经过多次拉伸及卸载,但其延伸率得到了异常的提高,一般要从 40%50% 提高到 70% 以上。笔者做了多种拉伸速度系列试验,获得了如图 9 所示的延伸率结果。同样对工业纯铜 TP2 管件进行了试验,但却没有得到明显结果。这说明在多次拉伸/卸载过程中 304 管件内部组织发生了某种变化。这种变化是 304 不锈钢管异常增塑的原因。



a

b

图 8　整管拉伸试样与间歇式拉伸力-位移曲线

Fig. 8　The entire tube tensile sample

多次加载和一次加载拉伸变形的不同在于,多次加载拉伸变形过程中有多次卸载和重新加载过程。因此,两种加载方式下金属成形结果的不同应该与这些卸载和重新加载过程带来的金属微观结构的变化,以及由这些微观结构的变化带来的变形机制的改变有关。这些金属微观结构的变化如位错的湮没或重排[10-12]、空位的移动以及溶质原子的析出等都会对卸载后的下次重新加载时可动位错的运动造成影响,例如析出的溶质原子对可动位错的钉扎,及形成所谓的“柯氏气团”,使可动位错移动困难。间歇式拉伸过程中出现的屈服点现象就是这种影响的一个很好的证明。另外,一些弹性畸变的回复会增加晶体之间变形的协调性,有利于塑性变形的继续进行。但详细的作用机制还有待进一步的研究。图 10 给出了 304 管件拉伸试样 TEM 观察到的形变诱发马氏体。这就是波动载荷下马氏体相变与逆相变增塑原理。

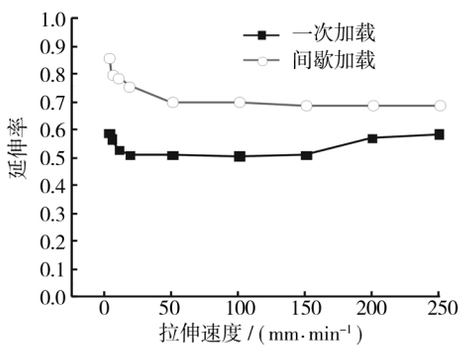


图 9　延伸率与拉伸速度的关系

Fig. 9　Relationship between elongation and tension speed

不锈钢的这种性质不但可以应用到管材液压成形领域,还完全可能应用到其他塑性加工技术领域。

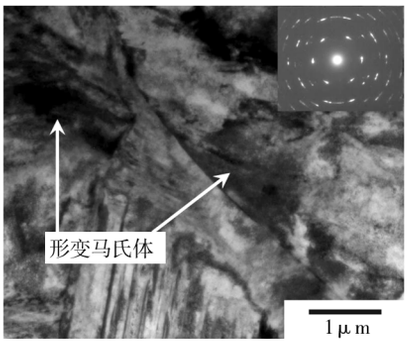


图 10 拉伸试样 TEM 观察到的形变诱发马氏体

Fig. 10 TEM image at deformed area of the tension sample: strain induced martensite

因此,研究结果具有很重要的工程应用价值。

紫铜管和不锈钢 304 管材的一次拉伸和间歇式单向拉伸实验结果很好的印证了无轴向进给波动液压成形实验所得出的结论。紫铜管的单向拉伸实验表明,间歇式加载对于提高紫铜管成形性能的作用不大,这一结果与紫铜管无轴向进给波动液压成形所得到的结论相吻合。对 304 不锈钢而言,间歇式拉伸使不锈钢管材的延伸率提高了 40% 左右,提高成形性能的效果明显。波动液压加载或间歇式拉伸可以显著提高其塑性变形能力,这是应力状态诱导的材料相变引起的,是这类材料的固有性质。

波动加载提高奥氏体不锈钢成形性能的原因是合理地利用了奥氏体不锈钢在加载-卸载过程中产生的微观组织的变化,使形变发生转移,使变形在整个变形区均匀分布,有效地抑制和推迟局部颈缩的发生,使均匀塑性变形能够持续更长的时间,起到提高成形性能的效果。

4 结论

随着塑性加工技术的不断发展,人们发现在很多工艺中金属材料都表现出了超常的塑性成形性能,用目前的理论难以解释。实际上,这些现象一般来自于加载方式,还有一些来自于材料组织演变。因此近几年来导致了更多的新的塑性成形工艺。

板材增量成形是一种典型的复杂局部成形工艺,人们已经提出了多种成形性提高机理。包括拉弯伴随成形,附加剪应力成形,接触状态下的局部成形,周期交变载荷条件下的成形性,以及高静水压力下局部成形性。以上几种机理都可能使变形局部化,都可以提高成形能力,都与增量成形某一方面特征相关。任意时刻都可以有多种机理同时起作用,但作用程度和方式还不是很清楚。

管材波动液压成形因为液压力波动引起起皱的生成与不断消除,使得变形更均匀,成形能力明显提高。在与模具的贴合过程中,由于液压波动引起直径不断扩大与收缩,形成瞬间间隙,导致法向压力减小,摩擦减小,材料流动容易,变形均匀性提高,成形性提高。不锈钢管材波动液压成形及多次拉伸时由于反复加载和卸载,引起马氏体相变与逆相变,这导致了管材塑性显著提高。

这些研究成果不但有助于人们对板材增量成形工艺和管材波动液压成形工艺的认识,还有助于人们对其他相关工艺的深入认识,并可望在这些研究成果基础上进一步开发、完善有关塑性加工工艺,甚至提出或发展一些新的塑性加工工艺。

参考文献:

[1] EMMENS W C, van den BOOGAARD A H. Incremental Forming Studied by Tensile Tests with Bending[C]. Proceedings of 9th ICTP, Gyeongjy, Korea, 2008.

[2] EMMENS W C, van den BOOGAARD A H. Tensile Tests with Bending: a Mechanism for Incremental Forming[C]. Proceedings of 11th ESAFORM Conference, Lyon, France, 2008.

[3] EMMENS W C, van den BOOGAARD A H. An Overview of Stabilizing Deformation Mechanisms in Incremental Sheet Forming[R]. Report of CORUS RD&T and University of Twente, The Netherlands, 2009.

[4] RIKIMARU T, ITO M. Hammering Hydroforming of Tubes[J]. Press Working, 2001, 39(7):58-65.

[5] HAMA T, ASAKAWA M, FUKIHARU H, et al. Finite Element Simulation of Hammering of an Automotive Component[C]. Proceedings of TUBEHYDRO, Japan. 2003: 80-83.

[6] MORI K, MAENO T, MAKI S, et al. Mechanism of Improvement of Formability in Pulsating Hydroforming of Tubes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(6): 978-984.

[7] 袁安营,张士宏,王忠堂,等. 管材内高压成形新加载方式的研究[J]. 锻压技术, 2008, 33(5): 103-106.

(下转第 52 页)

表 3 剪切法测定的 25Cr5MoA 钢与不同金属固-固结合界面结合强度

Table 3 The interfacial bonding strength of 25Cr5MoA/ different metals solid-solid clad shaft by shear determination

复合轴状态	剪切面积 /mm²	剪切力 /kN	剪切强度 /MPa
挤压态	9.86×4.06	3.352	83.7
淬火温度:930℃,保温时间:30 min;回火温度:580℃,保温时间:60 min	9.46×4.07	8.271	214.8

由此可以看出,当挤压比等于 5.6 时,虽然 25Cr5MoA 钢/Q235 钢的剪切结合强度均比较低。但是,与复合板相比,复合轴结构上所具有的特点,使其即使结合强度较低,也不易产生剥离,经过后续热处理,通过元素的扩散过程,提高复合轴的结合强度。对于复合板,当界面结合强度较小时,复合板内的残余应力也可能使其产生剥离现象。

4 结论

1) 25Cr5MoA 钢/Q235 固-固复合坯料由于采用热装方式,因此在结合界面上出现了接近于连续分布的氧化物层。挤压比较小时,挤压变形无法消除氧化皮的影响。结合界面的氧化皮对元素扩散起到阻碍作用,使 Cr 元素在界面附近 Cr 元素分布出现跳跃。

2) 与挤压态相比,随着保温时间的延长,25Cr5MoA 钢与 Q235 钢结合界面的氧化物层有所改善。当保温时间大于 60min 时,结合界面两侧的显微硬度的差值减小,界面附近硬度峰值消失,与挤压态相比,界面附近显微硬度连续变化区间扩大。

3) 复合轴结构即使结合强度较低,也不易产生剥离,经过后续热处理,通过元素的扩散能够提高复合轴的结合强度。

参考文献:

[1] ZENG Y, YIN Z M, ZHU Y Z, et al. Microstructure Investigation of a New Type Super High Strength Aluminum Alloy at Different Heat-treated Conditions[J]. Rare Met, 2004, 23(4): 377-384.

[2] 张福泽,叶序彬,宋钧,等. 在 25 ℃和-40 ℃环境下的三种航空材料的裂纹扩展品质研究[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 593-595.

[3] 窦满锋,王北社. 大长径比高功率密度异步电机转轴机械设计[J]. 微电机, 2006, 39(9): 19-21.

[4] 赵章焰,彭泽军. 减速机转轴断裂事故分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2002, 26(6): 774-776.

[5] 戴娟,夏尊凤,汪大鹏. 轴类零件的失效分析[J]. 机电产品开发与创新, 2004, 17(3): 85-87.

[6] 杜世鸿,邱洁. 机车用电机转轴断裂原因分析[J]. 理化检验:物理分册, 2007, 43(2): 89-90.

[7] 董成文,李艳芳,任学平. TA1/Q235 钢复合板累积叠轧焊界面特性[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(3): 249-253.

[8] 陈靖,佟建国,任学平. 25Cr5MoA/Q235 钢复合板的结合性能[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(10): 985-988.

(上接第 6 页)

[8] ZHANG S H, YUAN A Y, WANG B, et al. Influence of Loading Path on Formability of 304 Stainless Steel Tubes [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(8): 2263-2268.

[9] 袁安营. 加载方式对管材液压成形性能的影响[D]. 沈阳:中国科学院金属研究所, 2009.

[10] TALEB L, HAUET A. Multiscale Experimental Investigations about the Cyclic Behavior of the 304L SS[J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25(7): 1359-1385.

[11] TSUZUKI H, BRANICIO P S, RINO J P. Molecular Dynamics Simulation of Fast Dislocations in Copper[J]. Acta Materialia, 2009, 57(6): 1843-1855.

[12] BLUM W, ZENG X H. A Simple Dislocation Model of Deformation Resistance of Ultrafine-grained Materials Explaining Hall-Petch Strengthening and Enhanced Strain Rate Sensitivity[J]. Acta Materialia, 2009, 57(6): 1966-1974.