

文章编号: 1004 - 0609(2004)09 - 1599 - 05

复合轧制张力对层状复合材料临界变形程度的影响^①

朱旭霞¹, 刘浪飞², 彭大暑³

(1. 宁波高等专科学校 机械系, 宁波 315016; 2. 中国机动车辆安全鉴定检测中心, 北京 100053;

3. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 结合控制气氛轧制复合工艺, 研究了轧制张力和坯料加热温度对轧制复合临界变形程度和复合后厚比的影响规律。结果表明: 施加前、后张力可以明显减小轧制复合所需的临界变形程度, 张力的影响随着加热温度的升高而减弱; 控制张力可以在较小范围内精确控制复合后厚比。

关键词: 层状复合材料; 张力; 临界变形程度; 厚比; 控制气氛轧制

中图分类号: TG 339

文献标识码: A

Effect of bond rolling tensile force on threshold deformation of laminated material

ZHU Xu-xia¹, LIU Lang-fei², PENG Da-shu³

(1. Department of Mechanical Engineering, Ningbo College, Ningbo 315016, China;

2. China Inspection Center of Motor Vehicle Safety, Beijing 100053, China;

3. School of Materials Science & Engineering,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effect of temperature and tensile force on the threshold deformation and the thickness ratio after bond was mainly studied under the condition of control atmosphere rolling process. The results show that applying front and rear tensile force will decrease the threshold deformation obviously, which will weaken with increasing temperature. While the control of tensile force will adjust the thickness ratio within a small extent.

Key words: laminated materials; tensile force; threshold deformation; thickness ratio; control atmosphere rolling

控制气氛(Control atmosphere, CA)轧制复合技术及生产设备是美国 Polymetallurgical Crop. 开发的^[1]。CA 轧制复合技术采用带式法生产, 在设备上可以实现单独控制各层材料组元的轧制张力。CA 轧制设备采用 AGC 反馈控制技术, 通过控制压下量和轧制张力来控制复合带材的厚度和板型精度。

早期的研究发现, 对于特定的金属配对, 轧制复合有一个临界变形程度, 低于这个变形程度, 就不容易实现复合。基于常规的块式法轧制复合生产方式, 对于临界变形程度影响因素的研究主要集中在

在金属的特性、金属的加工状态、金属配对的表面处理状态等方面^[2~12], 而对于复合温度、复合速度和张力影响因素的研究则较少。本文作者研究了张力及复合温度对临界变形程度的影响。

1 实验

CA 轧制复合生产线轧辊尺寸为 $d\ 217\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 轧制速度为 80 mm/s 。实验材料选用宽 50 mm 、厚 1.5 mm 完全退火态的 H68 黄铜带和 L2 纯铝带。

① 收稿日期: 2003 - 12 - 23; 修订日期: 2004 - 06 - 07

作者简介: 朱旭霞(1972 -), 女, 讲师, 博士。

通讯作者: 朱旭霞, 博士; 电话: 0574 - 87081238; E-mail: zhuxuxia@sina.com.cn

板带在复合前经过热水洗、碱洗、酸洗、冷水洗、烘干、 d 0.2 mm 钢丝刷表面横向滚刷等处理过程。轧制力、张力、轧制速度、坯料加热温度、轧辊温度、带材总厚度等数据均可从监测仪表上直接在线读取。

采用生产线进行 CA 轧制复合实验, 由预备实验得出在室温、零张力时的临界变形程度为 42%。每组实验的轧制复合压下率都由 42% 开始, 按 5% 递减, 直到复合不上为止。

张力的最小调整度为 138 kPa, 实验中设定前、后张力相同, 调整范围设为 0, 138, 276, 414, 552, 690, 828 kPa。

2 种坯料加热温度相同, 分别为 20, 200, 300 和 400 $^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 相同前、后张力条件下温度对临界变形程度的影响

通过对一个月的试验性生产进行跟踪, 采集了 150 个有效数据, 以保证每一个数据点有 5 个以上的数据, 然后取每一数据点的平均值, 得到张力和坯料加热温度对临界变形程度的影响关系, 如图 1 所示。

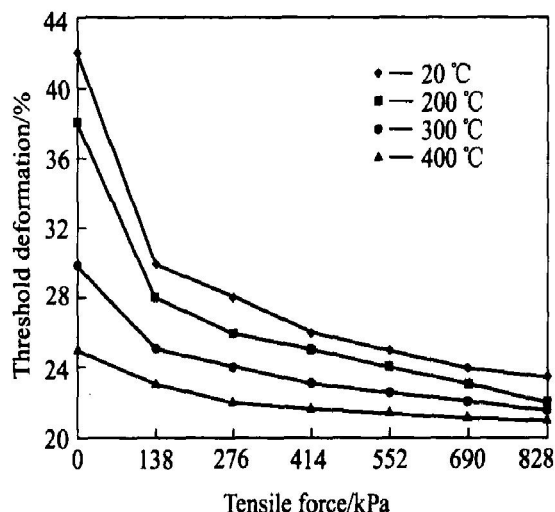


图 1 张力、温度对临界变形程度的影响

Fig. 1 Effect of tensile force and temperature on threshold deformation

由图 1 可以得出张力和坯料加热温度对临界变形程度的影响规律为:

1) 轧制复合工艺中, 施加前、后张力可以明显减小轧制复合所需的临界变形程度, 张力对临界变形程度的影响, 在张力初加时比较明显, 随着张力

值的增加, 影响逐渐减弱; 张力的作用还受到坯料加热温度的影响, 室温时张力引起的临界变形程度的变化比 400 $^{\circ}\text{C}$ 时更加明显。

2) 坯料加热温度的提高, 也会减小轧制复合所需的临界变形程度。加热温度在 200~300 $^{\circ}\text{C}$ 阶段对临界变形程度的影响最强; 加热温度的影响也受到张力的影响, 在张力初加阶段, 温度的影响比较明显, 在张力值为 828 kPa 时, 温度所引起的临界变形程度变化范围则很小。

3) 随着张力和温度的变化, 临界变形程度存在一个最小值, 约为 21%, 这对实际生产中制订轧制复合工艺很有帮助。

张力引起临界变形程度变化的主要原因是施加张力改变了轧制复合塑性变形区内材料的应变状态, 并引起了轧制复合中塑性变形区内材料前滑与后滑的变化。

对于单一金属的轧制, 前、后滑是前、后张力之差的函数^[1]。对于多层金属的轧制复合, 由于各层材料组元的后张力可以单独控制, 前、后张力对各层材料前、后滑的影响情况比较复杂。分析认为, 施加前、后张力会影响轧件中质点的流动速度, 由于硬层的 H68 和软层的 L2 的塑性变形性能不同, 所以张力对它们的质点流动速度的影响也不相同, 一般张力对软层金属质点流动速度的影响作用比较大。由上面的分析可以得出: 施加张力的复合轧制会引起 H68 层和 L2 层质点流动速度变化的差异, 因而对各层金属的前、后滑造成不同的影响作用; 施加张力所引起的材料前、后滑变化的综合效果是沿轧制方向上 2 层金属中性面的距离增大, 即搓轧区增大; 搓轧区的增大使配对金属在结合面上的剪切、搓动作用加强, 有利于结合面上新鲜金属表面的生成, 从而有利于提高配对金属之间的结合强度。

2.2 不同前、后张力对层状复合材料临界变形程度的影响

前、后张力差异的复合轧制对搓轧区的影响规律应会有所不同。通过实验, 考察了单独施加前、后张力时对临界变形程度的影响规律, 结果如图 2 所示。后张力比前张力的影响更大, 一方面, 因为材料经轧制复合后在出口端发生了加工硬化, 这样出口端比入口端更难于变形, 因而前张力对搓轧区变化的影响不如后张力; 另一方面, 因为软层金属比硬层金属易于变形, 所以软层金属的原始厚比大于复合后厚比。在相同张力作用下, 轧件中软层金

属在入口端所受的总作用力比在出口端大。又因为张力对软层金属质点流动的影响比对硬层金属的影响大, 所以后张力对临界变形程度的影响大于前张力。

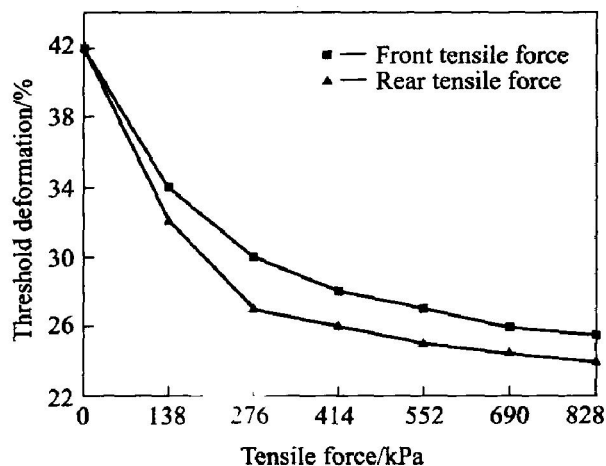


图 2 前、后张力对临界变形程度影响的差异

Fig. 2 Difference of effect of front and rear tensile force on threshold deformation

对于 CA 轧制复合来说, 因为各层材料组元的前张力可以单独进行控制, 基于前面的分析, 可以通过控制各层材料组元的轧制张力来控制搓轧区朝着有利于提高复合强度的方向进行。

张力的增加同时会引起轧制力的降低^[13], 这又不利于配对金属之间的结合。因而张力的施加, 同时引起搓轧区的增大和轧制力的减小 2 个相反的作用。张力较小时, 搓轧区增大的影响占主导地位, 临界变形程度明显降低。随着张力的增加, 轧制力降低的影响不断增强, 使临界变形程度的降低越来越缓和。当 2 个影响因素的作用达到动态平衡时, 临界变形程度将不再随着张力的增加而降低, 而是达到一个极佳值。

温度对临界变形程度的影响, 早期曾有学者进行过一些研究。轧制温度上升使临界变形程度降低很早已经得到了实验证实, 并且有学者提出了关于临界变形程度和 Homologous 温度的函数关系, 其中 Homologous 温度为复合温度与熔点温度的比值。他们认为, 临界变形程度取决于软层金属的相对变形程度。坯料加热, 温度上升时, 软层金属比硬层金属变形抗力降低得更快, 因而更容易变形, 要满足软层金属达到临界变形程度所需的轧制复合压下率相应减小。他们的结论是在某些双金属加热温度相同的试验条件下得出的, 因而有一定的局限性。事实上, 当 2 种金属的塑性变形性能相差较大时, 软层金属相对变形量增大对于提高复合强度作用不

大。本文中作者用 721-110 合金进行了补充实验, 由图 3 可看出, 影响临界变形程度的直接原因不是加热温度, 而是配对金属之间的变形抗力差异(比值)。当配对金属由于加热温度差异而出现变形抗力差异较大时, 即使能复合上, 硬层金属也容易出现周期性的拉薄或拉断现象。

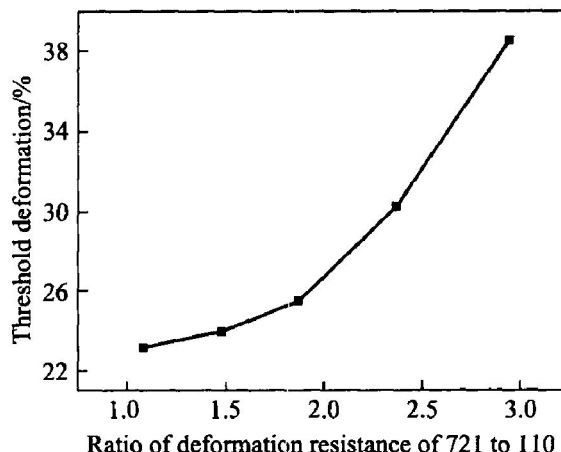


图 3 721-110 双金属变形抗力对临界变形程度的影响

Fig. 3 Effect of deformation resistance on threshold deformation of 721-110 bimetal

根据 Bay 复合机理模型^[14], 结合前面的分析, 可以得出形成超过临界强度的复合界面由 2 方面的因素决定:

1) 一定比率的有效新鲜表面。双金属轧制复合中, 并不一定所有新生表面都会变成有效新鲜表面, 只有配对金属在复合界面上重合的新鲜表面在搓轧作用下形成牢固结合, 结合表面才能称为有效复合新鲜表面。对于特定的金属配对, 达到牢固结合所需的最小有效新鲜表面的比率为一常数, 要达到这一常数所需的最小变形程度称为最小临界变形程度。图 1 中, 虽然在各组张力和加热温度条件下, 它们都刚好达到了有效新鲜表面的比率, 但很显然, 在不同轧制压下率下的新生金属表面比率各不相同。因而可以推测存在一个最优的温度和张力的条件, 使新生金属表面的比率接近有效新鲜表面比率, 如图 1 中各曲线随着温度和张力的变化有朝着一个最小临界变形程度变化的趋势。要使这一比率尽可能提高, 就需要配对金属之间的协调变形。

2) 促进新鲜表面之间结合的动力。相互接触的新鲜表面要达到一定强度的牢固结合, 还需要压力或摩擦的作用。因而通过控制张力和温度等条件来控制搓轧区大小是提高复合强度的有效手段。

根据实验数据, 综合考虑温度和张力的因素对临

界变形程度的影响, 总结出估算临界变形程度的经验表达式为:

$$\varepsilon_T = A \cdot \frac{\varepsilon_T^0}{Q} \cdot \exp \left[- \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{T2}} \right] \quad (1)$$

式中 A 为常数, 主要与配对金属的材料特性参数有关; ε_T^0 为由实验所得的室温零张力时的临界变形程度; Q 为轧制复合所施加的张力值, 对于前、后张力不同的情况, Q 参数还需由实验进行修正; σ_{T1} 和 σ_{T2} 为每一材料组元分别在温度 T_1 和 T_2 时的变形抗力。

2.3 轧制张力对轧后厚比的影响规律

分别对 721-110 热双金属各层单独施加后张力时, 控制层轧后厚比的影响规律如图 4 所示。分别对 982 3 层带材各层单独施加后张力时, 控制层轧后厚比的影响规律如图 5 所示。

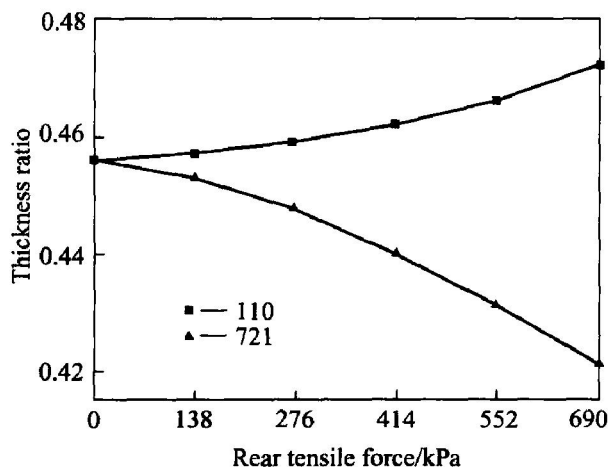


图 4 721-110 热双金属各层单独施加后张力对轧制复合厚比的影响

Fig. 4 Effect of rear tensile force on thickness ratio of 721-110 thermobimetal

由图 4 和图 5 可以明显看出, 多层金属复合轧制时, 单独对某一层金属施加后张力可以精细地调整轧后厚比。对控制层施加后张力可以减小轧后厚比, 而对复层施加后张力可以增加轧后厚比。施加轧制张力可以改变配对金属复合轧制塑性变形区内质点的应力状态和应变状态^[15]。变形区内质点的三向压缩应力状态在张力作用下可能会变为两向压缩一向拉伸的应力状态, 两向压缩一向拉伸的应变状态可能会变为一向压缩一向拉伸的应变状态, 这些都有利于材料在厚度方向上的变形。对于层状材料的复合, 如果在控制层上施加张力可以增加其在厚度方向上的变形, 因而复合后厚比减小。如果在复层上施加张力, 则增加复层在厚度方向上

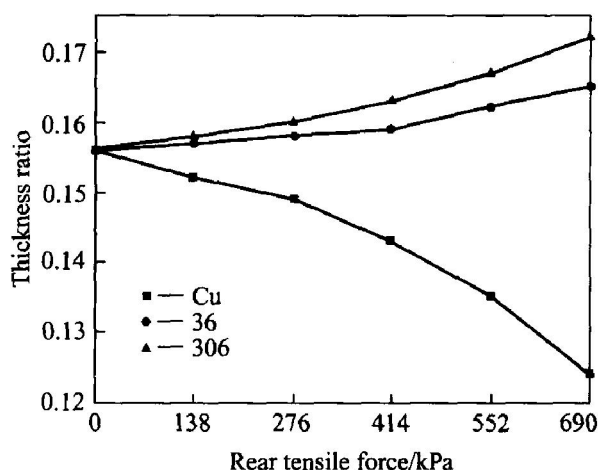


图 5 STBZ982 3 层带材各层单独施加后张力时对轧制复合厚比的影响

Fig. 5 Effect of rear tensile force on thickness ratio of 982 sandwich material

的变形, 因而复合后厚比增大。

3 结论

- 1) 施加前、后张力可以明显减小轧制复合所需的临界变形程度, 这种作用随着张力值的增加而逐渐减弱。
- 2) 张力的作用还受到坯料加热温度的影响, 在室温时比加热时更加明显。
- 3) 达到临界复合强度的决定因素为一定比率的有效新鲜表面和新鲜表面之间的结合力。
- 4) 后张力可以单独施加在特定层材料组元上, 因而可以通过施加后张力单独控制该层组元在厚度方向上的变形。后张力对层厚的控制范围在 10% 以内, 因而实际生产中可以通过在线调整张力来微量调整控制层的复合后厚比, 从而保证控制层的厚比精度。

REFERENCES

- [1] Products of polymetallurgical corporation[EB/OL]. <http://www.polymetal.com>.
 - [2] Akio S. Takao K. Rolling deformation characteristics of clad materials determined by model experiments and numerical simulation: numerical simulation of clad rolling by the rigid-plastic FEM[J]. J Mater Process Technol, 1995, 53: 544 - 551.
 - [3] 于九明, 于长生, 齐克敏, 等. 钢和铝异温轧制复合机理的研究[J]. 钢铁, 1995, 30(8): 44 - 47.
- YU Jiur-ming, YU Chang-sheng, QI Ke-min, et al. Bonding

- mechanism of steel-Al clad plate by rolling at different temperature[J]. Iron and Steel, 1995, 30(8): 44-47.
- [4] 王占学. 塑性加工力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- WANG Zhanxue. Plasticity Processing Mechanics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991.
- [5] Zhang W, Bay N. Influence of hydrostatic pressure in cold pressure welding[J]. Annals of CIRP, 1992, 1: 293-297.
- [6] Clift S E, Hartley P, Sturgess C E N, et al. Fracture prediction in plastic deformation processes[J]. J Mech Sci, 1990, 30(1): 1-17.
- [7] Hwang Y M, Chen T H, Hsu H H. Analysis of asymmetrical clad sheet rolling by stream function method[J]. J Mech Sci, 1996, 4: 443-460.
- [8] Bay N, Bjerregaard H. Cross shear roll bonding[J]. J Mater Process Technol, 1994, 45: 1-6.
- [9] Manabu K, Ken S, Yeong M H. Mathematical simulation of clad sheet rolling and sandwich sheet rolling[J]. Annals of CIRP, 1992, 41(1): 289-292.
- [10] Toshiko M, Shinji K, Petros A A. Press-formability of aluminum clad stainless steel sheet[J]. JSME International Journal, 1996, 39(2): 404-410.
- [11] 张沪, 彭星魁, 文洁, 等. 耐深冲不锈钢/铝/不锈钢复合材料研究[J]. 矿冶工程, 1992, 12(2): 56-60.
- ZHANG Hu, PENG Xir-kui, WEN Jie, et al. Study on the deep drawing performance of stainless steel/aluminum/stainless steel composites[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1992, 12(2): 56-60.
- [12] 张胜华, 郭祖军. 铜-铝复合材料的研究[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 128-132.
- ZHANG Sheng-hua, GUO Zu-jun. The study of copper-aluminum composite[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 1995, 5(4): 128-132.
- [13] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994. 20.
- ZHAO Zhi-ye. The Theory of Metal Plasticity Forming and Rolling[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. 20.
- [14] Bay N. Colding welding(part 1): characteristics, bonding mechanics, bond strength[J]. Metal Construction, 1986, 6: 369-372.
- [15] 彭大暑. 金属塑性加工力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992.
- PENG Da-shu. Metal Plasticity Processing Mechanics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1992.

(编辑 李向群)