

文章编号: 1001-2486(2005)04-0110-06

几何内蕴量对拉伸模具工作面力学性能的影响*

王兴波, 石金龙

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 曲率、度规不变量、凸凹性等几何内蕴量的不均匀分布直接影响模具的力学性能。本文研究了曲率与变形能、曲率与摩擦耗损功、度规不变量与热辐射、凸凹分布与辐射热通量等几何内蕴量与力学量之间的关系。结果表明: 复杂曲面表面高斯曲率的不连续分布将导致表面的变形能、摩擦耗损功出现相应的不连续分布; 型面上沿拉伸方向截面线的法曲率越小, 摩擦耗损功越大; 型面上的热通量会随着拐点数量的增加而增加。这些结果为模具表面优化设计提供了新的理论依据。

关键词: 模具; 几何造型; 力学性能; 优化设计

中图分类号: TG7 **文献标识码:** A

Effects of Geometric Intrinsic Quantities upon the Mechanical Properties on the Surfaces of Deep Drawing Dies

WANG Xing-bo, SHI Jin-long

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The mechanical properties on the active surfaces of the molds or dies will be directly influenced by non-uniform distribution of the geometric intrinsic quantities such as curvature, metric invariant, and convexity-concavity of the surfaces. This paper shows an investigation made on the relationship between such geometric intrinsic quantities and the mechanical quantities. The results demonstrate that discontinuity of Gaussian curvature will lead to discontinuity of deformation and frictional dissipative energy. The frictional dissipative energy will increase with the decrease of the normal curvature on the deep-drawing path. The heat flux will increase with the increase of inflection points on the surface. These provide novel references for optimal design of the molds and dies.

Key words: dies; geometry modeling; mechanical properties; optimal design

拉伸模具是一类对设计、制造要求很高的模具,其制件涉及到汽车、飞机等诸多领域,在国民经济中起着重要作用。由于拉伸模具尤其是大型模具的生产制作成本较高,因此,提高模具质量,对模具失效进行科学分析并合理预测其寿命,不仅有助于提高制件质量,还可以节省投资,提高效益,在现代工业生产中具有重要意义。

现行模具设计一般包括 CAD 几何建模、CAE 结构分析两个环节,主要依靠 CAD、CAE 软件如 UG/Catia、ANSYS/Nastran 等,也有采用专门的薄板冲压成型仿真软件的。在长期的研究探索与生产制造过程中,已经产生了许多具有价值的方法^[1,2]。但是不难看到,目前冲压模具的设计理论还存在许多基础问题没有解决,在实际设计、生产制造过程中延续着大量的非理性方法,模具的设计计算还落后于生产实践的需求,新的更加实用的方法仍旧是人们关注的热点^[3-5]。

拉伸作业过程是一个复杂的几何-物理非线性过程,目前主要按照板材成型过程的数值模拟进行评估。由于加工、计算的对象是板材,模具型面通常只作为边界几何条件,因而较少考虑型面的几何内蕴量(曲率、度规不变量、凸凹性等)对作业过程的影响。事实上,模具型面源于其 CAD 模型,模型上存在诸多几何内蕴量不连续的现象^[6,7],这些几何不均匀将直接影响模具表面的一些力学性能,如变形能、

* 收稿日期: 2005-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50175106); 广东省自然科学基金资助项目(04021250); 湖南大学现代车身技术教育部重点实验室开放基金

作者简介: 王兴波(1963—),男,副教授,博士。

微应力结构等。在循环作业模式下,这些力学量会加剧演化,致使表面出现损伤直至失效。除此之外,冲压件在大变形过程及回弹过程中会将部分变形能转换为热能释放,这些热能以辐射的形式传至模具表面,在一些作业中,模具表面温度已经达到相当的数量级^[8],在循环作业下的热积累将会促使表面微观力学(如热动力学)量发生改变,进而影响模具表面质量。因此,需要研究型面几何内蕴量与力学性能之间的关系。

1 工作型面几何内蕴量影响的几个力学量

1.1 模具工作型面几何内蕴量的变化特征

几何上,拉伸模具的工作型面表现为由光滑曲面片拼接而成的复杂组合曲面,曲面片之间一般满足 GC^1 连续性要求,这些曲面片的边界形成模具型面上的连接网线。根据 CAD 理论,具有一阶几何连接的型面在连接线上的曲率是不连续的,即使是更高阶的几何连接,由于软件系统在实现上的局限性和造型过程的随机性,模具型面的实际模型上仍然分布着曲面片连接形成的连接网线。这些网线将型面的 CAD 模型分成许多区域,每个区域的几何内蕴量——曲率(主曲率、平均曲率)分布各不相同且在网线两侧发生曲率突变(图 1 所示)。在曲面的拐点曲线上,曲面的曲率矢量发生方向突变,也导致相应性质的突变。

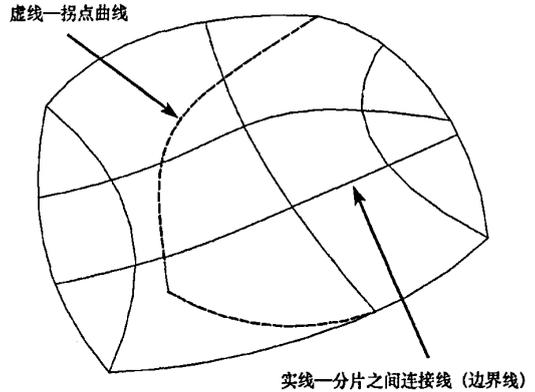


图 1 边界线与拐点线划分的曲率区域

Fig.1 Curvature regions marked by boundaries and inflection lines

依据 CAD 造型理论,曲面的 GC^0 、 GC^1 、 GC^n ($n > 1$) 等连续都是在连接边界上施加的几何约束,这就导致同样的连接条件在不同的造型方法(甚至步骤)下可得到“满足设计允差”的一组几何形状不同的连接面^[9],如图 2 所示。显然这些“满足设计允差”的连接面的几何内蕴量是有差异的。

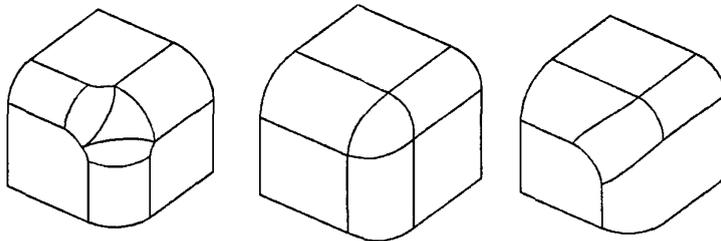


图 2 相同边界条件产生的不同形状的过渡面

Fig.2 Blending surfaces with different shapes generated by the same boundary conditions

综上所述,模具工作面上存在曲率突变及在设计允差的范围内曲率发生波动的现象。读者将在后文发现,这些几何内蕴量的改变对型面的力学性能与表面质量有很大影响。

1.2 曲率与表面变形能

GC^1 连接的复杂曲面是几何光滑的,但在连接处曲面的高斯曲率出现间断,这种曲率间断导致型面的变形能也发生间断。分析如下:

设有光滑型面的几何模型为 S , 承受载荷 F 。现取 S 上一线元,不失一般性仍记为 S , 且 $S = S_\alpha \cup S_\beta$, 如图 3 所示。设 S_α 、 S_β 在 P 点为 GC^1 连接, S_α 、 S_β 的曲率分别为 k_α 、 k_β , 则当 S 发生微小变形时在 P 点两侧的变形能为^[10]

$$e_\alpha \approx \frac{EI_\alpha}{2} \int_i k_\alpha^2 ds \quad e_\beta \approx \frac{EI_\beta}{2} \int_i k_\beta^2 ds \quad (1)$$

这里 E 为材料的弹性模量, I 为截面惯性矩, 只与截面形状有关, 故 $I_\alpha = I_\beta$ 。可见 $k_\alpha \neq k_\beta$, 亦即 S 在 P 点的变形能是不连续的。依据薄壳的变形能关系^[10], 易知这个结论对于曲面在连接线附近也成立。

1.3 曲率与摩擦耗损功

作业过程中, 拉伸件与模具表面之间依靠摩擦力相互作用。先考虑一般情形。

设 Γ 是一路径, 其参数方程为

$$\Gamma: r = r(t) \quad t \in [a, b]$$

依据几何理论, Γ 在区间 $[a, t]$ 的弧长 s 为

$$s(t) = \int_a^t \|r'(\tau)\| d\tau$$

这里符号 $\|\cdot\|$ 表示量的大小。从而有

$$ds = \|r'(t)\| dt \quad (2)$$

动点 M (不计质量) 在力 $P(t)$ 的作用下沿 Γ 滑动, $N(t)$ 、 $T(t)$ 、 $k(t)$ 分别是 Γ 在 t 点的单位法矢、单位切矢与曲率, $\mu(t)$ 是 M 与 Γ 之间在 t 点的摩擦系数。那么 P 在 N 上的分量为

$$P_n = (P \cdot N)N \quad (3)$$

依据拉伸过程接触力的计算理论, P_n 产生的摩擦力 f 服从于库仑摩擦定律^[12]:

$$f = -\mu \|P_n\| T \quad (4)$$

故 f 在 Γ 上做的功为

$$W^f = - \int_{\Gamma} f \cdot dr = - \int_a^b f \cdot r' dt = - \int_a^b \mu (P \cdot N) T \cdot r' dt$$

由于 $r' = \|r'\| T$, 故有

$$W^f = - \int_a^b \mu (P \cdot N) T \cdot T \|r'\| dt = - \int_a^b \mu (P \cdot N) \|r'\| dt \quad (5)$$

将(2)式代入(5)式得

$$W^f = - \int_a^b \mu (P \cdot N) ds \quad (6)$$

上式表明, 摩擦耗损功与路径 Γ 的长度有正比例关系。

另一方面, 根据几何理论^[13], 如果 $k \neq 0$ 则 $N = T' / (\|r'\| k)$ 。从而得到

$$W^f = - \int_a^b \frac{\mu}{k} (P \cdot T') dt = - \int_a^b \rho \mu (P \cdot T') dt \quad (7)$$

这里 $\rho = 1/k$ 是 Γ 在 t 点曲率半径。

式(7)表明, 摩擦耗损功与曲率之间存在反比例关系; 同时也表明如果曲线路径的曲率不连续, 则摩擦力在该路径上做功也不连续。

1.4 形状微调与摩擦耗损功

CAD 模型优化的主要表现是对局部设计进行微小调整, 结果导致曲率、度规不变量等几何内蕴量的改变。

首先, 从式(6)、(7)可以看出, 如果保持弧长不变, 那么调整后曲率小于调整前曲率的路径上摩擦耗损功增加。现在考虑 CAD 建模常见的一种情况。设 Γ_1 、 Γ_2 是无零曲率点的两条平面凸曲线路径:

$$\Gamma_1: r = r_1(t) \quad t \in [a, b]$$

$$\Gamma_2: r = r_2(t) \quad t \in [a, b]$$

假定 Γ_1 、 Γ_2 满足:

$$(1) \text{ 端点位置关系: } r_1(a) = r_2(a), r_1(b) = r_2(b)$$

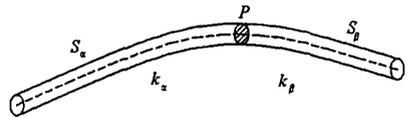


图3 几何连续性及其能量关系
Fig.3 The relation between geometric continuity and deformation energy

(2) 端点切矢关系: $r'_1(a) = \alpha r'_2(a), r'_1(b) = \beta r'_2(b) \quad \alpha, \beta > 0$

(3) 曲率关系: $\forall t \in [a, b], 0 \leq k_2(t) - k_1(t) < \eta, \eta > 0$

那么可以证明 Γ_2 的弧长不大于 Γ_1 的弧长*。事实上,设 θ 是切矢对两端点间弦的转角,可将 Γ_1, Γ_2 参数化成 θ 参数表示式:

$$\Gamma_1: r = r_1(\theta) \quad \theta \in [\alpha, \beta]$$

$$\Gamma_2: r = r_2(\theta) \quad \theta \in [\alpha, \beta]$$

又依据微分几何理论得到 $ds = \frac{d\theta}{k}$, 从而 $s_1 = \int_a^\beta \frac{d\theta}{k_1}, s_2 = \int_a^\beta \frac{d\theta}{k_2}$ 。由于曲率是与参数无关的内蕴量,

$$\text{故有 } s_2 - s_1 = \int_a^\beta \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1} \right) d\theta \leq 0。$$

结合式(6)、(7)的结果可知,在不改变端点(边界)条件的前提下,微调后曲率小的路径摩擦损耗功大。

1.5 度规不变量与表面热辐射

拉伸大变形过程及回弹过程中会将部分变形能转换为热能。依据传热的基本规律,这些热能部分经空气对流散发,另外部分以辐射的形式在模具与制件表面进行换热。

我们知道,角系数(shape factor/configuration factor/view factor)是描述两个表面之间热辐射的基本指标。设 S_1, S_2 是两个能流密度均匀的灰体(漫辐射)表面, P_1, P_2 分别是 S_1, S_2 上的两个点, $r = \overline{P_1 P_2}$, N_1, N_2 分别是 S_1, S_2 在 P_1, P_2 对应的单位法矢量, θ_1, θ_2 分别是 r 与 N_1, N_2 之间不大于 π 的方向角, dS_1, dS_2 分别是 S_1, S_2 在 P_1, P_2 附近对应的微小面元,则依据传热学基本理论, dS_1 到 dS_2 及 dS_2 到 dS_1 热辐射的角系数分别为

$$F_{1-2} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi \|r\|^2} dS_2, F_{2-1} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi \|r\|^2} dS_1$$

由于 N_1, N_2 是单位法矢量,故有 $\cos\theta_1 = \frac{r \cdot N_1}{\|r\|}, \cos\theta_2 = \frac{r \cdot N_2}{\|r\|}$ 从而得到

$$F_{1-2} = \frac{(r \cdot N_1)(r \cdot N_2)}{\pi \|r\|^4} dS_2, F_{2-1} = \frac{(r \cdot N_1)(r \cdot N_2)}{\pi \|r\|^4} dS_1 \quad (8)$$

设 S_1, S_2 的参数方程为

$$S_1 = S_1(u^1, u^2), \quad (u^1, u^2) \in \Omega_1$$

$$S_2 = S_2(u^1, u^2), \quad (u^1, u^2) \in \Omega_2$$

这里 Ω_1, Ω_2 是二维参数区域。则依据微分几何理论,采用 Einstein 和式记法, S_1, S_2 的第一基本形式为

$$I_i = g_{\alpha\beta}^i du^\alpha du^\beta, \quad i, \alpha, \beta = 1, 2$$

记 $g^i = \begin{bmatrix} g_{11}^i & g_{12}^i \\ g_{21}^i & g_{22}^i \end{bmatrix} (i=1,2)$, 那么 N_1, N_2 可表示为

$$N_i = \left(\frac{\partial S_i}{\partial u^1} \times \frac{\partial S_i}{\partial u^2} \right) / \sqrt{g^i} \Rightarrow \frac{s_2^i \times s_1^i}{\sqrt{g^i}}, \quad (i=1,2)$$

将上两式代入(8)式得

$$F_{1-2} = \frac{[r \cdot (s_1^1 \times s_2^1)][r \cdot (s_1^2 \times s_2^2)]}{\sqrt{g^1 g^2} \|r\|^4} dS_2, F_{2-1} = \frac{[r \cdot (s_1^1 \times s_2^1)][r \cdot (s_1^2 \times s_2^2)]}{\sqrt{g^1 g^2} \|r\|^4} dS_1 \quad (9)$$

由于 $dS^i = \sqrt{g^i} du^1 du^2$, 从而得到

$$F_{1-2} = \frac{[r \cdot (s_1^1 \times s_2^1)][r \cdot (s_1^2 \times s_2^2)]}{\sqrt{g^1} \|r\|^4} du^1 du^2, F_{2-1} = \frac{[r \cdot (s_1^1 \times s_2^1)][r \cdot (s_1^2 \times s_2^2)]}{\sqrt{g^2} \|r\|^4} du^1 du^2$$

* 本结论也可利用方德植编著《整体微分几何导引》第204页定理5.3证明,但证明过程不及此处简洁。

上式表明,热辐射角系数将随着型面度规不变量的增加而减小,如果度规张量出现不连续,则角系数也间断。

1.6 拐点与表面热辐射

设 S 是一个热辐射体的表面, P 是 S 上一点, N 是 S 在 P 点的单位法矢量, π 是 S 在 P 点的切平面,故 π 将整个空间分为两个半空间。热辐射定律告诉我们, S 从 P 点辐射出的热能将沿 N 所指半空间的各个方向传播。由此可知,如果 S 是一个凸体表面,则 S 上任意点都不会收到自 S 辐射出的能量(如图 4(a)所示)。

假如 S 出现凸凹分布的区域,则根据热辐射定律, S 上存在局部区域相互辐射的现象。如图 4(b)所示, S_2 上 A 、 B 、 C 三个不同区域的辐射效果各不相同。

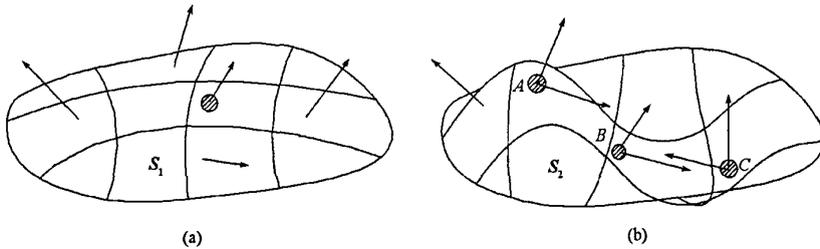


图 4 复杂曲面表面的热辐射
(a) 凸表面无局部自辐射; (b) 非凸表面存在局部相互辐射

Fig.4 Thermal radiation on composite-surface
(a) convex surfaces with no self-radiation; (b) non-convex surfaces with self-radiations

由于自身相互辐射的存在,使得 S 表面热辐射通量增加,也使得相应的热效应分析变得复杂,并且这种复杂程度随着表面拐点数量的增加而增加。几何理论表明^[14],在不改变边界条件的情况下,拐点是偶数为单位变化的,因此无论是设计还是分析计算,对拐点都是要严格控制的。有关拐点的变化与热辐射敏感性的定量问题涉及到深层次的几何理论,笔者将另文专门介绍。

2 结论与展望

减少模具表面磨损、提高制件质量一直是模具设计与制造的基本指导思想。本文的研究结果表明,型面的几何内蕴量是与宏观结构及微观损伤两个方面都密切相关的基本量。其中,高斯曲率不连续分布将导致表面变形能、摩擦耗损功出现相应的不连续分布;型面沿拉伸方向截面线的法曲率越小,其摩擦耗损功越大;型面上的热通量会随着拐点数量的增加而增加。这些几何内蕴量的不连续必将导致型面其它热力学量如型面变形能、摩擦耗损功及热辐射等力学量的不连续。依据热动力学原理,这些不连续的力学量势必导致型面其他热力学量如温度场、熵等不均匀。拉伸模具大多为金属制品,对温度很敏感,在不断循环的微观胀缩效应下,某个局部区域必然会出现微观力学结构失稳(初始损伤源)。除此之外,表面温度场不均匀还会导致表面热腐蚀的不均匀。这些微观效应的长期积累是损伤演变的重要途径。因此在模具设计中需要合理考虑这些由几何内蕴量变化而引起的表面质量因素。

综上所述,笔者以为未来的设计工作至少还需要考虑以下两个方面的问题:

(1) 基于摩擦耗损功最小的形状优化问题。寻找型面 S , 使在作用力 P 及相关条件下 S 上的摩擦耗损功最小:

$$\min[W^f = W^f(S, P, \mu, \dots)]$$

(2) 基于表面均匀热效应的形状控制问题。合理布局拐点使型面表面的热辐射通量均匀分布,这需要结合几何与传热理论充分考虑型面几何造型设计中拐点的控制问题,并对拐点分布与热效应作进一步研究。

参考文献:

- [1] Meinders T, Carleer B D, Vegter H, et al. Recent Development in Finite Element Simulations of the Deep Drawing Process[A]. Proceedings Shemet'97, 1997.
- [2] Miller B, Bond R. The Practical Use of Simulation in the Sheet Metal Forming Industry[A]. British Metal forming Technical Conference, 2001.
- [3] António C C, Castro C F, Sousa L C. Optimization of Metal Forming Processes[J]. Journal Computers & Structures, 2004, 82(17-19): 1425-1433.
- [4] Schenk O, Hillmann M. Optimal Design of Metal Forming Die Surfaces with Evolution Strategies[J]. Journal Computers & Structures, 2004, 82(21-22): 1695-1705.
- [5] Acharjee S, Zabarás N. On the Development of a Three-Dimensional Deformation Process Design Simulator[C]. EPD Congress 2004 Edited by M. E. Schlesinger TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2004.
- [6] Veltkamp R C. Survey of Continuities of Curves and Surfaces[R]. CWI Report, CS-R9202, 1992.
- [7] Putz B. On Normal Curvature Discontinuity Between Tangent Plane Continuous Patches[J]. Computer Aided Geometric Design, 1996, 13(1): 95-99.
- [8] Ganapathysubramanian S. Computational Design of Deformation Process for the Control of the Microstructure-sensitive Properties[D]. Ph. D. Thesis, Cornell University 2004.
- [9] 夸克工作室.精通 Pro/Engineering CAD 进阶篇[M].北京:中国青年出版社,(2000):369.
- [10] Landau L D, Lifshitz E M. The Energy of a Deformed Rod[A]. In: Theory of Elasticity(third edition). Butterworth-Heinemann, 1997.
- [11] Singer L L. Friction and Energy Dissipation at the Atomic Scale: A Review[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A. 1994, 12(5):2605-2616.
- [12] Hotz G, Kerzmann A, Lennerz C, et al. Calculation of Contact Force[A]. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'99), 1999, pp. 180-181.
- [13] Salas, Hille, Etgen. Calculus III[M]. Wiley 2003, 9th Edition.
- [14] 王兴波,石金龙.一个分析平面曲线拐点的可靠判据[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2004,17(2):1-6.

(上接第 74 页)

4 结 论

WCF 动态门限群签名方案是冗余的,本文在不降低安全性的情况下对 WCF 方案进行了简化。由于两种冒充攻击的存在,WCF 方案中可信中心不能有效追查签名人的身份,而且门限更新的安全性脆弱。简化的方案显示 WCF 方案中签名人只有一个子密钥在签名中有作用,因此导致原方案中有一些错误的结论和危险的操作。如该方案不能抵抗合谋攻击,被注销的群成员仍可参加签名,系统密钥更新不起作用。从本文的研究可见文献[7]中作者的设计并不太成功。

参考文献:

- [1] Chaum D, van Heyst E. Group signatures[R]. Advances in Cryptology-Eurocrypt'91, LNCS 547. Springer-Verlag, 1992, 257-265.
- [2] Desmedt Y, Frankel Y. Shared Generation of Authenticators and Signatures[R]. Advances in Cryptology-Crypto'91, LNCS 576. Springer-Verlag, 1992, 457-469.
- [3] Harn L. Group-oriented (t, n) Threshold Digital Signature Scheme and Multisignature[A]. IEE Proceedings, Computers and Digital Techniques, 1994, 141(5): 307-313.
- [4] Li C, Hwang T, Lee N. Threshold-multisignature Schemes Where Suspected Forgery Implies Traceability of Adversarial Share Holders[R]. Advances in Cryptology-Eurocrypt'94, LNCS 950. Springer-Verlag, 1995, 194-204.
- [5] 刘世栋,杨林,候滨,等.基于 CA 的电子印章系统设计与实现[J].国防科技大学学报,2003,25(1):26-30.
- [6] 王贵林,卿斯汉.几个门限群签名方案的弱点[J].软件学报,2000, 11(10): 1326-1332.
- [7] 王晓明,陈火炎,符方伟.动态门限群签名方案[J].计算机学报,2004,27(9): 897-902.

