

移动了一个原子间距. 层错能愈低(即位错愈宽), 割阶沿位错线运动的速率愈小, 因而位错攀移的速率也愈小. 根据这样的模型, 也可以导出符合经验关系的式(30.68).

§ 30.15 溶质原子和弥散相对蠕变的影响

实际使用的金属高温材料, 绝大多数不是纯金属, 而是合金. 因为纯金属的抗蠕变性能都比较差, 而加入合金元素, 则可以显著提高其抗蠕变性能. 合金元素的强化方式有两种, 即(a)固溶强化, 和(b)弥散粒子强化.

(a) 固溶强化 大多数合金元素在固溶状态都能增强抗蠕变能力, 即减小蠕变速率和延长蠕变断裂时间. 常温下固溶强化的机制, 如溶质原子在位错附近形成气团, 以及溶质原子对位错的钉扎, 在常温蠕变中是主要的强化机制. 在高温蠕变中, 溶质原子的作用主要在于对回复过程的影响. 溶质原子降低了位错攀移的速率, 延缓了回复过程, 从而降低了蠕变速率. 溶质原子对位错攀移的影响有以下两种可能的机制. (1) 合金原子的加入可使层错能降低, 位错变宽, 因而使攀移困难. 例如, 镍铬合金的层错能比纯镍低, 抗蠕变能力就比较高. 在镍铬合金中添加钴, 使层错能又进一步降低, 抗蠕变能力也进一步提高. (2) 溶质原子与溶剂原子的结合力使扩散激活能增高, 因而降低了攀移速率. 溶质元素的熔点愈高, 效应就愈显著. 当溶质原子含量较低时, 不可能显著改变整个基体的扩散系数. 但溶质原子优先附着于位错的割阶上, 因而能够显著降低攀移速率. 少量合金原子对回复的显著影响, 可能就是这种机制.

(b) 弥散粒子强化 实际使用的耐热合金, 大都含有高度弥散的第二相粒子. 这种强化方法比固溶强化更为有效. 试验证明这种强化作用可以维持到 $0.7T_m$, 而固溶强化在 $0.6T_m$ 以上就显著减弱. 第二相粒子的弥散度愈高, 而且稳定性愈高, 则强化效应愈好. 高度弥散的第二相粒子, 可以有效地阻碍晶内位错的滑移和攀移以及晶界的滑动, 因而强化效应好. 弥散粒子的稳定性决定于弥

散相与基体间的界面能,以及弥散相在基体中的溶解度.弥散相与基体间的界面能愈低,则稳定性愈高.因为界面能是粒子长大的推动力,界面能低,粒子就不容易长大.弥散相在基体中的溶解度愈低,则粒子长大或再溶的过程愈慢,稳定性也愈高.有人观察到铬钼耐热钢在蠕变后沉淀粒子周围的位错乱网.由于乱网中位错密度很高造成强烈的应变硬化,同时粒子又阻碍这些位错的滑移与攀移,因而不易产生回复软化.这是弥散粒子提高耐热强度的一个重要原因.有些沉淀过程在形变过程中发生,沉淀相多在位错上成核,这样的沉淀相对位错的阻碍特别有效.

§ 30.16 蠕变与疲劳的交互作用^[157~161]

前面所讨论的蠕变和蠕变断裂,是在恒定载荷或恒定应力下发生的.由这样的试验提供的数据,仍然是检验材料质量和工程设计上的重要依据.但是,很多高温部件在使用状态下往往经受着蠕变与疲劳的复合作用.为了更好地判断高温材料的使用性能和使用寿命,近年来关于蠕变与疲劳复合作用下的性能研究日益增多.

蠕变与疲劳的复合作用,是指材料经受着恒定应力和交变应力两种应力的作用.也有人把这样的试验称为动态蠕变试验,或循环蠕变试验,以区别于恒定载荷(或应力)下的静态蠕变试验.一种典型的加载程序,如图 30.23 所示.图中 t 是周期, Δt 是在幅值应力 σ 下的保持时间, σ_0 是周期性卸载后保留的应力.

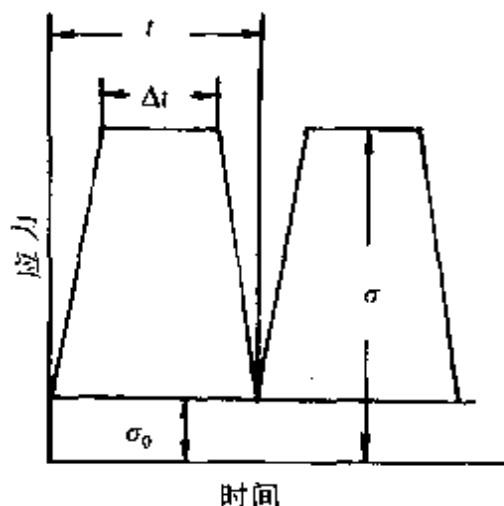


图 30.23 蠕变与疲劳复合试验的一种加载程序.

为了估算蠕变与疲劳复合作用下的性能,一般采用线性积累损伤法则.它假定蠕变损伤 φ_c 和疲劳损伤 φ_f 可以线性相加,在发生断裂时

$$\varphi_c + \varphi_f = 1, \quad (30.69)$$

式中

$$\varphi_c = \sum \frac{\Delta t}{t_r}, \quad \varphi_f = \sum \frac{N}{N_f}, \quad (30.70)$$

t_r 是静态蠕变断裂时间, $\sum \Delta t$ 是积累的蠕变时间, N_f 是纯疲劳的断裂周期数, N 是积累的周期数. 线性积累损伤法则, 表示蠕变与疲劳不发生交互作用, 两种损伤相互独立.

但近年来的大量试验结果表明, 线性积累损伤法则往往与实际情况不符. 为了表示蠕变与疲劳的交互作用, 应在式(30.69)中加入交互作用项. 已知与试验结果符合得较好的公式有以下两种^[157~161]:

$$\varphi_c + B(\varphi_c \varphi_f)^{1/2} + \varphi_f = 1, \quad (30.71)$$

$$\varphi_c + A \varphi_c^n \varphi_f^m + \varphi_f = 1, \quad (30.72)$$

式中 A, B 均称为交互作用系数; n 是蠕变损伤指数, m 是疲劳损伤指数, 并且 $m+n=1$. 实际上, 式(30.71)是式(30.72)的特例, 式(30.69)又是式(30.71)的特例.

为了预测在蠕变-疲劳复合作用下材料的断裂寿命, 有必要研究不同材料和不同试验条件下蠕变-疲劳交互作用的规律, 并通过微观结构的观察来阐明交互作用的本质. 目前这方面的研究是材料科学中国际热门课题.

§ 30.17 超塑性

材料在一定条件下呈现非常大的延伸率($\sim 1000\%$)而不发生缩颈和断裂的现象, 称为超塑性(superplasticity, 或称超范性). 通常碳钢和合金钢的延伸率不超过 $30\% \sim 40\%$, 铝及铝合金的延伸率也不过 $50\% \sim 60\%$. 超塑性变形的延伸率比通常塑性变形的延伸率要高出 10 倍以上, 并且基本上不发生加工硬化. 在变形过程中发生相变的超塑性称为相变超塑性. 在纯金属和单相合金的稳

定结构中得到的超塑性称为结构超塑性. 超塑性现象已经在很多种纯金属和合金中观察到. 近年来还发现, 陶瓷材料在适当条件下也可以呈现超塑性. 目前, 国内外都在发展超塑性变形技术, 以压制形状复杂的部件, 从而可以节约原材料, 改善制品的精密度, 并减少加工时的能源消耗.

出现超塑性的条件是: (1) 超细晶粒: 要求晶粒尺寸是微米的量级, 并且晶粒是等轴的; (2) 合适的变形条件: 形变温度要求在 $0.4T_m$ 以上 (T_m 是熔点绝对温度), 应变速率一般小于或等于 10^{-3} S^{-1} ; (3) 应变速率敏感系数较高. 如果我们将超塑性应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与应力 σ 的关系写成

$$\sigma = C\dot{\epsilon}^m, \quad (30.73)$$

式中 C 是与温度有关的常数, 则应变速率敏感系数为

$$m = \frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}}. \quad (30.74)$$

出现超塑性的条件是: $0.3 \leq m \leq 1$. 当 $m < 0.3$ 时, 就不出现超塑性.

超塑性变形时的一个明显特点是: 虽然材料发生了很大的应变, 但在变形前后, 晶粒仍基本上保持是等轴的. 在超塑性变形中, 晶界滑动产生的应变 ϵ_g 在总应变 ϵ_t 中所占的比例一般在 50% ~ 70% 之间. 这表明晶界滑动在超塑性变形中起了主要作用, 当然也需要有与之协调的晶界迁移和晶内位错运动相配合.

实验测出的超塑性变形的激活能值, 大多数与晶界自扩散激活能相近^[162], 这说明超塑性变形可能由晶界扩散所控制.

第十二编 参 考 文 献

- [1] Griffith A. A. , *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A **221**, 163 (1920).
- [2] Irwin G. R. , *Fracture*, Handbuch der Physik, **6**, Springer (1958).
- [3] Rice J. R. , *J. Appl. Mech.* , **35**, 13 (1968).
- [4] Stroh A. N. , *Adv. Phys.* , **6**, 418 (1957).
- [5] Cottrell A. H. , *Fracture*, *Proc. Roy. Soc.* , A**276**, 1 (1963).
- [6] Rice J. R. , Thomson R. , *Phil. Mag.* , **29**, 73 (1974).
- [7] Ohr S. M. , Narayan J. , *Phil. Mag.* , A**41**, 81 (1980).
- [8] Chang S. J. , Ohr S. M. , *J. Appl. Phys.* , **52**, 7174 (1981).
- [9] Mott N. F. , *Phil. Mag.* , **44**, 72, (1953); *Proc. Roy. Soc.* , **220**, 1, (1953).
- [10] Weertman J. , Weertman J. R. , in *Physical Metallurgy*, 3ed (eds. Cahn R. W. and Hassen P.) Chap. 20. , Elsevier Science Publishers, BV (1983).
- [11] Nabarro F. R. N. , Report on a Conference on Strength of Solids, Physical Society, London, 75 (1948).
- [12] Herring C. , *J. Appl. Phys.* , **21**, 437, (1950).
- [13] Mclean D. , *Grain Boundary in Metals*, Cambridge University Press (1957). 杨顺华译, 金属中的晶粒间界, 科学出版社 (1965).
- [14] Averbach B. L. , Felbeck D. K. , Hahn G. T. , Thomas D. A (eds). , *Fracture*, Wiley, New York (1959).
- [15] Mclean D. , *Mechanical Properties of Metals*, John Wiley Sons, Inc. (1962).
- [16] Cottrell A. H. , *Mechanical Properties of Matter*, John Wiley Sons, Inc. (1964).
- [17] Leibowitz H. , *Fracture*, 1~6, Academic, New York (1968).
- [18] Knott J. F. , *Fundamentals of Fracture Mechanics*, Butterworth London (1973).
- [19] Latanision R. M. , Pickens J. R. (eds), *Atomistics of Fracture*, Plenum, New York (1982).
- [20] Thomson R. , *Fracture*, in *Physical Metallurgy*, eds. Cahn R. and Hassen P. Elsevier Science Publishers, BV (1983).
- [21] Thomson, R. , in *Solid State Physics*, Eds. H. Ehrenreich and D. Turnbull, Academic, **39**, 1 (1986).
- [22] Sack R. A. , *Proc. Phys. Soc.* , **58**, 729 (1946).
- [23] Friedel J. , *Dislocations*, Pergamon Press (1964).
- [24] Andrade E. N. da C. , Tsien I. C. (钱临照), *Proc. Roy. Soc.* , A**159**, 346 (1937).

- [25] Joffe A. , et al. , *Z. Phys.* , **22**, 286 (1924).
- [26] Pearson G. L. , et al. , *Acta Met.* , **5**, 181 (1957).
- [27] Лихтман, В. , Ребиндер, Н. , Карпенко, Г. , Влияние поверхности активной среды на процессы деформации металлов, АН СССР (1954).
- [28] Orwan. E. , *Trans. Instn. Engrs Shipb. Scot.* , **89**, 165 (1949).
- [29] Irwin G. R. , *J. Mech.* , **24**, 361 (1957).
- [30] Westergaard H. M. , *J. Appl. Mech.* , **61**, 49 (1939).
- [31] Dugdale D. S. , *J. Mech. Phys. Solids*, **8**, 100 (1960).
- [32] Goodier J. N. , Field F. A. , *Fracture of Solids*, Interscience, New York (1963).
- [33] ASTM Standard E 399-72, Annual Book of ASTM Standards (1972).
- [34] Tada H. B. Paris P. , Irwin G. , *The Stress Analysis of Crack Handbook*, Del. Rsch. Coop. Hillertown, PA. (1973).
- [35] Sih G. C. M. (薛昌明), *Handbook of Stress Intensity Factors*, Lehigh Univ. (1973).
- [36] Eshelby J. D. , *Solid State Physics*, **3**, eds. Seitz F. and D. Turnbull, Academic, New York, 79 (1956).
- [37] Hutchinson J. W. , *J. Mech. Phys. Solids*, **16**, 13 (1968).
- [38] Rice J. R. , Rosengren G. R. , *J. Mech. Phys. Solids*, **16**, 1 (1968).
- [39] Landes J. D. , *ASTM STP*. (待查定)
- [40] Rice J. R. , et. al. , *ASTM STP*, **536**, 231 (1973).
- [41] Landes J. D. , Begley J. A. , *ASTM STP*, **560**, 170 (1974).
- [42] 陈箴等, 科学通报, **7**, 329, (1975).
- [43] 金属研究所断裂组, 金属学报, **12**, 162, (1976).
- [44] 吴希俊、姜健、尹花子, 金属学报, **14**, 420, (1978).
- [45] Srawley J. E. , *Inter. J. Fracture*, **12**, 470 (1976).
- [46] 蒋其汎, 金属学报, **12**, 45, (1976).
- [47] Bilby B. A. Cottrell A. H. , Swinden K. H. , *Proc. Roy. Soc. London*. **A272**, 304 (1963).
- [48] Kobayashi S. , Ohr S. M. , *Phil. Mag.* , **A42**, 763 (1980).
- [49] Ohr S. M. , Kobayashi S. , *J. Met.* , **32**, 35 (1980).
- [50] 王瑞杰、徐永波、王中光、周敬、张静华和胡壮麒, 材料科学进展, **6**, 103 (1992).
- [51] Majumdar B. , Burns S. , *Acta. Metall.* , **29**, 579 (1981).
- [52] J. C. M. Li. (李振民), in *Dislocation Modelling of Physical System*, eds. Ashby M. F. Bullough R. , Hartley C. S. , Hirth T. P. , Pergamon, Press, New York, 498 (1981).

- [53] Thomson R. M. , Sinclair. , *Acta. Metall* , **30** , 1325 (1982).
- [54] Ohr S. M. , Chang S. J. , *J. Appl. Phys.* , **53** , 5645 (1982).
- [55] Chang S. J. , Ohr S. M. , *Inter. J. Fracture* , **23** , R3 (1983).
- [56] Lung. C. W. (龙期威), Xong. L. Y. (熊良钺), *Phys. Stat. Sol.* , **77(a)** , 81 (1983).
- [57] Lung C. W. (龙期威), Deng. K. M. (邓开明), *Theor. Appl. Fracture. Mech.* , **11** , 209 (1989).
- [58] Ohr. S. M. , *Scripta, Metall.* , **21** , 1681 (1987).
- [59] Gilman J. J. , *Bull. Am. Phys. Soc.* **15** , 374 (1970).
- [60] Thomson R. Hsieh C. , Rana V. , *J. Appl Phys.* , **42** , 3154, (1971).
- [61] Sinclair J. E. , *Phil. Mag.* , **31** , 647 (1975).
- [62] Gehlen P. C, Kanninen M. F. , *Inelastic Behavior of Solids*, eds. Kanninen M. F. et al. , McGraw-Hill, Now York, 587 (1970).
- [63] Decelis B. Argon A. S, Yip S. , *J. Appl. Phys.* , **54** , 4864 (1983).
- [64] Orowan. , in [14].
- [65] Hirth J. , Lothe J. , *Theory of Dislocation*, McGraw-Hill, Now York (1981).
- [66] Thompson A. W. , Ashby M. F. , *Scripta Metall.* , **18** , 127, (1984).
- [67] Friedel J. , *Propagation of Crack and Work Hardening Fracture*, Swampscott Conference, 498 (1959).
- [68] Kelly A. Tyson W. R, Cottrell A. H. , *Phil. Mag.* , **15** , 567 (1967).
- [69] Hahn G. T. , et al. , in [14].
- [70] Low J. R. , *The Fracture of Metals*, *Prog. Mater. Sci.* , Pergamon Press, **12** , 1 (1963).
- [71] Hull D. , in *Fracture of Solids*, eds Drucker D. C. and Gilman J. J. , Interscience (1962).
- [72] Honda R. J. , *Phys. Soc. Japan.* , **16** , 1309 (1961).
- [73] Gilman J. J. , *Trans. AIME.* , **200** , 621 (1954).
- [74] Graeves R. H. , Jones J. A. , *J. Inst. Metals* , **34** , 85 (1925).
- [75] Li G H (李广海), Wu X J (吴希俊), *Intes J. Fracture* , **42** , R49 (1990).
- [76] Heslop J. , Petch N. J. , *Phil. Mag.* , **3** , 1128 (1958).
- [77] Wittman F. , Stepanow W. , J. , *Tech. Phys. U.S.S.R.* , **9** , 1070 (1939).
- [78] Orowan E. , in [14].
- [79] Low J. R. , *Relation of Properties to Micostructure*, A. S. M. (1954).
- [80] Cottrell A. H. , *Trans. AIME* , **212** , 192 (1958).
- [81] Petch N. J. , *Phil. Mag.* , **3** , 1089 (1958).
- [82] Heslop J. , Petch N. J. , *Phil. Mag.* , **1** , 886 (1956).

- [83] Dorn J. E., Rajnak S., *Trans. AIME.*, **230**, 1052 (1963).
- [84] Peierls R., *Proc. Phys. Soc.*, London, **25**, 34 (1940).
- [85] Seeger A., *Phil. Mag.*, **1**, 651 (1956).
- [86] Conrad H., The Relation between the Structure and Mechanical Properties of Metals, NPL, **2**, 475 (1963).
- [87] Chen Y. T., Atteridge D. G., Gerberich., *Acta. Metall.*, **29**, 1171, 1187 (1981).
- [88] Sinha T. K., Chakravartty J. K., Wadekar S. L., Asundi M. K., *J. Mater. Sci.*, **19**, 1446 (1984).
- [89] Steal J. E., *J. Iron Steel Inst.*, **1**, 180 (1898).
- [90] Voce E., Hollow A. P. C., *J. Inst. Metals.*, **73**, 323 (1974).
- [91] Matsui H., Takaki S., Kimura H., *Fall Meeting of JIM* (1975).
- [92] Banerji S. K., Feng H. C., McMahon Jr C. J., *Metall Trans.*, **9A**, 237 (1978).
- [93] Johnson H. H., Morlet J. G., Troiano A. R., *Trans. AIME.*, **212**, 528, (1958).
- [94] W. Y. Chu(褚武扬), Y. Yao, C. M. Hsiao (肖纪美), *Corrosion*, **40**, 302~316 (1984).
- [95] Parkins R. N., *J. Iron Steel Inst.*, **172**, 149 (1952).
- [96] Westwood A. R. C., *Fracture in Solids*, Interscience, 553 (1963).
- [97] Harries D. R., Roberts A. C., *Effect of Radiation on Structural Materials*, *ASTM SIP*, **426**, 21 (1967).
- [98] Rice J. R., Wang J. S., *Mater. Sci. Eng.*, **A107**, 23 (1989).
- [99] Wang J. S., Anderson P. H., *Acta. Metall. Mater.*, **39**, 379 (1991).
- [100] Mason D. D., *Phil. Mag.*, **39**, 455 (1979).
- [101] Russel J. D., Winter A. T., *Scripta Metall.* **18**, 575 (1985).
- [102] Wu X. J. (吴希俊), Li G. H. (李广海), Cai M. (蔡民), Qiu Q. (邱强), Tang Q. H. (汤奇恒), *Mechanical Properties and Materials Design*, ed. Wu B, Elsevier Science Publishers, B. V., 723 (1991).
- [103] Peng B. Y. (彭八一), Wu X. J. (吴希俊), Zhou F. X. (周富信), Tang Q. H. (汤奇恒), *J. Appl. Phys.*, **71**, 1229 (1992).
- [104] Troiano A., *Trans. ASM.*, **52**, 54 (1960).
- [105] Briant C. L., Messmer R. P., *Phil. Mag.*, **B42**, 569 (1980).
- [106] Haydock R., *J. Phys. C*, **14**, 3807 (1981).
- [107] Woehler A., *Bauwesen Z.*, **20**, 73 (1870).
- [108] Amer. Soc. Metals Handbook (1948).
- [109] Paris P. C., Erdogan F., *J. Basic Eng.*, **85**, 528 (1963).

- [110] Dowling N. Z. , *ASTM STP*, **601**, 19 (1976).
- [111] Thompson N. Wadsworth J. N. , Louat N. , *Phil. Mag.* , **1**, 113 (1956).
- [112] Wood W. , in [14].
- [113] Kennedy A. J. , *Process of Creep and Fatigue in Metals*, Oliver and Boyd (1962).
- [114] McEvily A. J. , Machilin E. S. , in [14].
- [115] Hunsche A. , Neumann P. , *Acta. Metall.* (1983).
- [116] Essmann U. Goesel U. , Huhgrabi H. , *Phil. Mag.* , **A44**, 405 (1981).
- [117] Porsyth P. J. E. , *Acta. Metall.* , **11**, 703 (1963).
- [118] Laird C. , *ASTM STP*, **415**, 131 (1967).
- [119] Neumann P. , *Acta. Metall.* , **22**, 1155, 1167 (1974).
- [120] Schijve J. , Broek, *Aircraft Eng.* , **34**, 314 (1962).
- [121] Pearson S. , *Eng. Fract. Mech.* , **7**, 235 (1975).
- [122] Miller K. J. , *Fatigue Eng. Mater Struct.* , **5**, 223 (1982).
- [123] Cahn R. W. , Haasen P. , *Physical Metallurgy*, 3ed. , Elsevier Science Publisher, Chap. 25 (1983).
- [124] Honeycombe R. W. K. , *The Plastic Deformation of Metals*, Edward Arnold, Chap. 11 (1984).
- [125] Clarebrough L. M. , Hargreaves M. E. , West G. W. , *Phil. Mag.* , **1**, 528 (1956).
- [126] Cottrell A. H. , *Progress of Metal Physics*, **4** (1953).
- [127] Hu H. (胡郇), *Recovery and Recrystallization of Metals*, Interscience, 311 (1963).
- [128] Bailey J. E. , Hirsch P. B. , *Proc. Roy. Soc.* , **A267**, 11 (1962).
- [129] Dorn J. E. (ed), *Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature*, McGraw-Hill (1961).
- [130] Monkman F. C. , Grant N. J. , *Deformation and Fracture at Elevated Temperatures*, M. I. T. Press (1965).
- [131] K è T. S. (葛庭燧), *Phys. Rev.* , **71**, 533 (1947).
- [132] 葛庭燧、孔庆平, *物理学报*, **10**, 367 (1954); *中国科学*, **4**, 55 (1955).
- [133] 孔庆平、龙起易, *物理学报*, **24**, 83 (1975).
- [134] 孔庆平、王翔、倪群慧, *物理学报*, **34**, 937 (1985).
- [135] Kong Q. P. (孔庆平), Wang X. (王翔), *Scripta Metall. Mater.* , **29**, 103 (1993).
- [136] Schoeck G. , *Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperatures*, ed. Dorn J. E. , McGraw-Hill, 79 (1961).

- [137] Weertman J., Proc. 2nd Intern. Conf. Creep and Fracture of Engng. Materials and Structures, Part I, eds. Wilshire B., Owen D. R., Pineridge Press, Swansea (1984).
- [138] Barrett C. R., Nix D., *Acta Meta.*, **13**, 1247 (1965).
- [139] Coble R. L., *J. Appl. Phys.*, **34**, 1679 (1963).
- [140] Chang H. C. (张兴铃), Grant N. J., *Trans. AIME*, **206**, 544 (1956).
- [141] 孔庆平、常春诚, 物理学报, **24**, 168 (1975).
- [142] 孔庆平、戴勇, 物理学报, **36**, 855 (1987).
- [143] Kong Q. P. (孔庆平), Dai Y. (戴勇), *Phys. Stat. Sol. (a)*, **118**, 431 (1990).
- [144] Kong Q. P. (孔庆平), Dai Y. (戴勇), Zhou H. (周浩), Liu S. M. (刘少民), Proceedings of the Chinese Materials Research Society International '90 Conference, ed. Wu B. **5**, 83 (1990).
- [145] Kong Q. P. (孔庆平), Dai Y. (戴勇), Zhou H. (周浩), Proceedings of the Sixth International Conference on Mechanical Behaviour of Materials, (ed. M. Jono and T. Inoue), Pergamon Press, Oxford, **4**, 545 (1991).
- [146] Barrett C. R., Sherby O. D., *Trans. AIME*, **233**, 1116 (1965).
- [147] Mohamed F. A., Langdon T. G., *Acta Meta.*, **22**, 779 (1974).
- [148] Argon A. S., Moffatt W. C., *Acta Meta.*, **29**, 295 (1981).
- [149] Argon A. S., Takeuchi S., *Acta Meta.*, **29**, 1877 (1981).
- [150] Gottstein G., Argon A. S., *Acta Meta.*, **35**, 1261 (1987).
- [151] Xu W. (徐文), Kong Q. P. (孔庆平), *Philos. Mag.*, **A56**, 433 (1987).
- [152] 李勇、孔庆平, 物理学报, **38**, 41 (1989).
- [153] Li Y. (李勇), Kong Q. P. (孔庆平), *Phys. Stat. Sol. (a)*, **113**, 345 (1989).
- [154] Li Y. (李勇), Kong Q. P. (孔庆平), *Phys. Stat. Sol. (a)*, **122**, 511 (1990).
- [155] Kong Q. P. (孔庆平), Li Y. (李勇), *Phys. Stat. Sol. (a)*, **126**, 129 (1991).
- [156] Kong Q. P. (孔庆平), Li Y. (李勇), *Philos. Mag.*, **68**, 113 (1993).
- [157] 孔庆平、王翔、周浩、倪群慧, 物理学报, **35**, 1091 (1986).
- [158] Wang X. (王翔), Zhou H. (周浩), Ni Q. H. (倪群慧), Kong Q. P. (孔庆平), Zhou N. B. (周乃标), *Mater. Sci. Eng.*, **A122**, L9 (1989).
- [159] Wang X. (王翔), Ni Q. H. (倪群慧), Zhou H. (周浩), Kong Q. P. (孔庆平), *Mater. Sci. Eng.*, **A123**, 207 (1990).
- [160] Wang D. N. (汪德宁), Wang X. (王翔), Kong Q. P. (孔庆平), *Mater. Sci. Eng.*, **A142**, 157 (1991).
- [161] 王翔、周浩、孔庆平, 金属学报, **30**, A195 (1994).
- [162] Poirier J. P., *Plasticité à haute température des Solides Cristallins*, Eyrolles (1976); 中译本, 关德林译, 大连理工大学出版社 (1989).

人 名 索 引

三 画

- 马卓莱(Mazzolai, F. M.) 232
小宏昌宏(Koiwa, M.) 148, 232

四 画

- 贝尔科(Belko, N. V.) 193
贝克(Becker, R.) 267
贝格利(Begley, J. A.) 467
什瓦尔兹(Schwarz, R. B.) 168, 170
什里弗(Schlipf, J.) 132
瓦加德(Woigard, J.) 185
冈迪(Gondi, P.) 185
乌特拉夫(Woodruff, T. O.) 261
比尔弼(Bilby, B. A.) 162, 468
巴辛斯基(Basinski, Z. S.) 388
孔庆平 571, 585

五 画

- 龙期威 480
汉民(Hamming, R. W.) 19
皮尔森(Pearson, S.) 184
加兰德(Garland, C. W. R.) 238
卡罗(Caro, J. A.) 173
卡恩(Cahn, R. W.) 555
艾诺(Ino, H.) 84
布赖尔斯福特(Brailsford, A. D.) 121
弗拉歇尔(Fleisher, R. L.) 407

- 弗里德尔(Friedel, J.) 407, 499
杰克逊(Jackson, D. J.) 388
兰德斯(Landes, J. D.) 467
布恩斯(Burns, S.) 474
卡尼能(Kanninen, M. F.) 486
布里昂特(Briant, C. L.) 535
冬特(Donth, H.) 117

六 画

- 吉巴拉(Gibala, R.) 84
吉尔曼(Gilman, J. J.) 484
达因斯(Dynes, R. C.) 228
库尔曼-威尔斯道夫(Kuhlmann-Wilsdorf) 390
约飞(Юффе, A. ф.) 488
多恩(Dorn, J. E.) 521
安德瑞德(Andrade, E. N. da C.) 448, 565

七 画

- 柯克伍德(Kirkwood, J. G.) 36
克里斯庆(Christian, J. W.) 200
克拉曼斯(Kramers, H. A.) 22, 118
克洛尼格(Kronig, R.) 22
坎内里(Cannelli, G.) 232
吴自良 105
肖克(Schoeck, G.) 141, 132, 231
肖克莱(Shockley, W.) 390
利克(Leak, G. M.) 184
汤姆森(Thompson, D. O.) 128,

131, 475, 503
 辛普森 (Simpson, H. M.) 132
 希勒 (Schiller, P.) 132
 汤普森 (Thompson, N.) 541
 沃雷尔 (Worrell, F.) 217
 纳巴罗 (Nabarro, F. R. N.) 438, 578
 李振民 474
 陈 麓 466
 吴希俊 466, 532
 杜格达尔 (Dugdale, D. S.) 458
 张兴铃 596
 张进修 145

八 画

阿莱费尔德 (Alefeld, G.) 120
 阿勒斯 (Alers, G.) 131
 阿凯瑟 (Akhieser, A.) 260
 阿瑞纽斯 (Arrhenius, S.) 29, 45
 阿布里考索夫 (Abrikosov, A. A.)
 阿刚 (Argon, A. S.) 584
 罗吉尔斯 (Rogers, D. H.) 163
 罗瑟汉 (Rotherhan, L.) 184
 波斯特尼可夫 (Postnikov, V. S.)
 193, 219
 凯叶斯 (Keyes, R. W.) 281
 凯利 (Kelly, A.) 503
 孟客曼 (Monkman, F. C.) 567
 倪嘉陵 (Ngai, K. L.) 3, 48, 147, 235

九 画

威尔逊 (Wilson, K. G.)

威尔特曼 (Weertman, J.) 168, 132, 438, 575, 577
 威勒 (Weller, M.) 3, 84
 派尔 (Pare, V. K.) 119
 费尔撒姆 (Feltham, P.) 172
 兹科皮阿克 (Szkopiak, Z. C.) 83
 柳克 (Lücke, K.) 3, 124, 132, 135, 164, 258
 科特雷耳 (Cottrell, A. H.) 162, 312, 386, 396, 398, 412, 437, 468, 556, 591, 593
 科斯特 (Köster, W.) 138
 科贝尔 (Coble, R. L.) 579
 洛默 (Lomer, W. M.) 91
 胡郇 (Hu, H.) 555

十 画

莱凡尤克 (Levanyuk, A. P.)
 莱克莱里 (Leclaire, A. D.) 91
 特尤汤尼科 (Teutonico, L. J.)
 164
 桥口 (Hasiguti, R. R.) 147
 索辛 (Sosin, A.) 132
 诺威克 (Nowick, A. S.) 2, 7, 89
 格伦纳托 (Granato, A.) 2, 124, 135, 297
 格亥莫 (Gremaud, G.) 173, 177, 179
 泰松 (Tyson, R. W.) 503
 泰勒 (Taylor, G. I.) 249, 311, 345
 配奇 (Petch, N. J.) 396, 520
 格拉特 (Gleiter, H.) 400
 格里菲斯 (Griffith, A. A.) 437,

格里维斯 (Graeves, R. H.)
 格朗特 (Grant, N. J.) 567
 特赖恩诺 (Troiano, A.) 535
 佩尔斯 (Peierls, R.) 522
 海道克 (Haydock, R.) 536
 诺埃曼 (Neumann, P.) 68, 78, 544
 莫尔斯 (Morse, R. W.) 272, 276,
 278, 494
 莫特 (Mott, N. F.) 202, 438, 541,
 575
 钱临照 448, 591

十 一 画

梅克林 (McLean, D.) 528, 583
 梅克曼 (McMahon, Jr. C. L.) 527
 梅逊 (Mason, W. P.) 112, 131,
 268, 273, 282
 康姆斯 (Combs, J. A.) 216
 寇勒 (Koehler, J. S.) 128
 盖伦 (Gehlen, P. C.) 486

十 二 画

斯瓦尔兹 (Swartz, J. C.) 84, 168
 斯尼德 (Snead, C. L.) 213
 斯特格 (Sturge, M. D.) 287
 斯泰因伯格 (Steinberg, M. S.)
 277
 斯诺克 (Snoek, J.) 83, 137
 斯托克斯 (Stokes, R. J.) 386
 斯特劳 (Stroh, A. N.) 437, 518
 斯劳利 (Srawley, J. E.) 466
 斯温顿 (Swinden, K. H.) 468

博多尼 (Bordoni, P. G.) 107
 博曼尔 (Bömmel, H. E.) 261,
 270, 277
 赖布弗里德 (Leibfried, G. Z.)
 130, 131
 舒尔茨 (Schultz, H.) 122
 曾纳 (Zener, C.) 2, 7, 89, 218, 265
 曾勒 (Zeller, R. C.) 288
 奥库达 (Okuda, S.) 147
 奥格塔尼 (Ogurtani, O.) 132, 157
 葛庭燧 2, 3, 89, 132, 138, 150, 157,
 180, 184, 185, 200
 道林 (Dowling, N. Z.) 540

十 三 画

雷瓦尔德 (Rehwald, W.) 240
 雷德 (Read, T. A.) 122
 雷纳克 (Rajnak, S.) 521
 鲍尔 (Bauer, C. L.) 132
 塞格 (Seeger, A.) 3, 112, 117,
 120, 143, 145, 390
 奥罗万 (Orowan, E.) 420, 421,
 422, 448
 奥尔 (Ohr, S. M.) 470, 477, 480
 蔡其巩 469
 赖斯 (Rice, J. R.) 437, 461, 503,
 528

十 四 画

福曼 (Foreman, A. J. F.) 200
 福斯 (Fuoss, R. M.) 36
 赫许 (Hirsch, P. B.) 373, 390, 555
 赫润 (Herring, C.) 438, 578

赫奈康 (Honeycombe, K. W. K.)
559

十 五 画

德·巴蒂斯特 (De Batist, R.) 2,
142

德杨 (Dejonghe, W.) 200

德洛梅 (Delorme, J. F.) 194, 195

德·莫登 (De Morton, M. E.)
208, 219

十 六 画

霍普金斯 (Hopkins, I. L.) 19

内 容 索 引

二 画

二级相变内耗 225
二能级系统的弛豫 288
几何弯结迁移模型 121

三 画

马氏体相变内耗 190

四 画

互作用参数 87
内参量 52,54
内耗 1,2
内耗的量度 13
内耗的唯象理论 7,23
化学强化 417
尺寸错配度 409
双滑移 332
双交滑移机制 323
反相畴界 415,416
不全位错 341
比例极限 315
无位错区 471,480,481
切变断裂 441

五 画

归一化应力弛豫函数 11
归一化蠕变函数 10
电子阻尼 270
切变模量 7,356,503
对数减缩量 14

弗-瑞源 376,420
加工硬化 312,372~394
加工硬化曲线 312,380,381,418
加工硬化系数 316,381~383,573
主滑移系统 332
四角畸变 406
长程的障碍 369
长程序 417
纠结 374
包辛格效应 392,393
包辛格应变 393
失效分析 442
对数蠕变 564,572

六 画

动态模量 12,181
动态响应函数 11,12,20,31,32
自由衰减法 14
压电半导体 282
多谷半导体 280
竹节晶界内耗峰 185
自诱发有序 83
共振系统法 13
弛豫 9
弛豫过程的热力学 56
弛豫型内耗 29,72
弛豫时间 24,26,29
弛豫强度 10,29,47,51,72
共格沉淀相 423
共格的脱溶区 418
共价键 359

共轭系统 332,333
 纤维强化 360,433
 回复 384,548,549,550
 回复蠕变 564
 再结晶 548,549,553~557
 再结晶温度 553
 扩散蠕变 578,579
 扩展位错 416,584
 压缩 313,314,330,392
 多滑移 332
 交滑移 332,352
 交结硬化 376~378
 动态试验 314
 动态回复 384,570
 有序强化 414~417
 次滑移系统 382
 竹节试样 344
 各向异性 352
 纤维断口 441
 负位错 479
 舌状花样 501,502
 多恩-雷纳克理论 520
 回火脆性 526
 过载效应 548
 交滑移模型 323,544
 吕德带 361,395
 网格长度理论 390
 退火 549
 退火织构 559
 退火孪生 559,560

七 画

应力 7,314,440

应力集中 448
 应力弛豫 9,25,26
 应力弛豫函数 9,32
 应力感生有序 72
 应力分量 60,452
 应力振幅 268,538
 应力-应变曲线 315,442
 应力-应变方程 53
 应力强度因子 455
 应变时效 109,364,365,413
 应变 7,313,441
 声子弛豫 131,253,260
 声电效应 283
 声速 16,126,239,261
 阻尼共振型内耗 49,131
 阻尼振弦模型 131,132
 纵向热流 256,257
 宏观涡流 263
 沃伊格特模型 185
 肖克模型 141
 序参量 240,242
 序参量弛豫 242
 麦克斯韦模型 24
 沉淀内耗峰 230
 局域对称性破缺 103
 连续相变 240
 位错弛豫 107
 位错共振 107
 位错共振与振动弦模型 122,201
 位错拖曳点缺陷 131
 位错脱钉内耗 157
 位错增强斯诺克效应 141
 束集 585

位错的攀移 438,575,584
位错平均自由程 391
位错的增殖 362,390
位错发射 471,504
位错与裂纹交互作用 473
位错屏蔽 390,476
位错反屏蔽 478
位错芯 169,329,503
位错塞积 391,397,507
位错双弯结 119,521
位错热激活 367,521,572
位错热激活体积 369,522,573
位错热激活焓 521
位移分量 453
形变带 337
形变势常数 279
形变织构 347~353,559
劳厄照相 334
劳厄星芒 331
时效合金 417
均匀加载 313
扭折 335,336
扭折带 337
层错 350
层错能 350,585
抛物线型硬化 383
沉淀强化 417
近邻键 415
纳米微晶 400
极轴机制 342,343
极轴位错 343
极射投影图 328
极射投影图的指标化 328

极图 348,349
延性断裂 494~498
延性-脆性转变 510~524
杜格达尔条形范性区模型
458~460
形变功率 467

八 画

佩尔斯能谷 114,115
佩尔斯应力 114
佩-纳势垒 358
佩-纳能谷 366,522
佩-纳力 358,359,366,522
波传播法 15
组态熵 87
杨-特勒缺陷 287
非弹性应变 7,12,194
非德拜弛豫 46,235
非均匀加载 314
屈服应力 315
屈服现象 315,360~366
屈服强度 355
屈服点 360
空位盘 405
单滑移 329
范性约束因素 346,515
范性形变的几何学与晶体学 313~
353
范性弯曲 335
范性功 448,449
线弹性断裂力学 450
表面倾动效应 340,341
线性硬化 381

泊松比 359,446
 固溶强化 403~410,586
 取向因子 328,331
 择优取向 348,559
 易滑移 381
 织构 343~352,559
 拉伸 313,350,392,440
 拉伸曲线 314,440
 拉伸试验 314,440
 制耳 352,353
 弥散强化 417,587
 表面能 443
 杯锥断口 441
 倪嘉陵相关态模型 3,48,235

九 画

重正化群理论 248
 相关态模型 235
 玻尔兹曼叠加原理 7,17,18,53,181
 胡克定律 7,23,355,445
 相变内耗 190
 顺服系数 7
 弯结对理论 112
 界面位错弦振动模型 201
 界面位错的脱钉模型 203
 界面位错的静滞后型内耗 202
 类相变 192,208
 点缺陷弛豫动力学 76
 标准滞弹性固体 25
 孪晶粗化 204
 孪晶畴界的热激活弛豫峰 217
 孪晶畴界的粘弹性损耗 213

复模量 11,16
 孪生 339~344
 孪生面 340
 孪生方面 340
 孪生要素 340
 孪生带 340
 孪生位错 341
 科特雷耳-比耳弼机制 342,343
 科特雷耳-比耳弼关系 162
 科特雷耳气团 106,154,410~413
 科特雷耳-斯托克斯定律 386,387,390
 科特雷耳-配奇理论 396,519
 临界系统 332
 临界切应力 326
 临界切应力定律 326~329
 弯结 113,114
 弯结对 112,366
 弯折试验 314
 相吸引的交结 376
 胞状结构 337,374,392
 胞壁 379
 点阵弯曲 334
 点阵硬化 404
 柏格斯矢量 321,323
 蚀斑 323,324
 点阵阻力 358,483
 持续滑移带 540
 侵入沟 540
 挤出带 540
 派力斯关系 537

十 画

桥口峰 147
偏心 103
振动位错弦模型 122
缺陷对称性 64
衰减系数 15,126,270
热弹性弛豫型内耗 253
高斯分布函数法 41
振幅内耗峰 150
朗道自由能 241,242
朗道-卡拉特尼可夫二级相变弛豫理论 242
高温位错内耗 180,187
能隙 227
能隙宽化 228,229
能量均分定律 367
原子偏聚 410,525
原子键合能 414
流变应力 372
弱硬化 405,406
铅笔式滑移 323
浸蚀法 323,361
铃木气团 410,411
珠光体 432,433
格里菲斯脆性断裂理论 444~448
格里菲斯裂纹 446
格里菲斯公式 446
穿晶断裂 441,580
脆性断裂 441,498
原子间键合力 483
能量释放率 448
疲劳断裂 535~546

疲劳寿命 536
疲劳极限 536
疲劳裂纹 535
疲劳裂纹扩展速率 537,538
疲劳裂纹萌生 540
疲劳裂纹扩展门槛值 537
微应变 361
微观涡流 263

十一 画

弹性 7
弹性后效 9
弹性后效函数 9
弹性偶极子 66,67,71,85
弹性模量 7
弹性模量软化 198
粘弹性 8
粘滞系数 23,181,273
粘滞型内耗 51,213
断裂 437,438,440~547
断口学 442
断口形貌 442
断裂韧度 455
断裂应力 440
断裂强度 443
断裂力学 449
断口形貌转变温度 512
理论断裂强度 443
剪切断裂 495,496
铍脆 526
脱溶区 418
脱钉 157,168,363,398
球面对称畸变 406

理论屈服强度 355~358

十二画

替代式溶质原子与位错相互作用效应 150

博多尼峰 107

超导载流子有关的内耗 225

曾讷弛豫 88

曾讷弛豫动力学 94

超声衰减 15,260,270,277,239

斯诺克气团 141,410,412

斯诺克弛豫 83

斯诺克-科斯特峰 49,137

滞弹性 8

滞弹性体 8

滞弹性应变 24,52,53,85,92,568

滞弹性弛豫 52,91,181

连续谱 30,33

晶粒长大 557~559

超塑性 588,589

晶间断裂 525,581

晶间断裂热力学理论 527,528

晶间断裂位错理论 528~531

晶间断裂原子理论 531

晶间断裂电子理论 534,535

晶间断裂脆性敏感性 529

晶界位错应力场 531

晶界结构 534

晶界位错发射 532,533

晶界杂质原子偏聚 525

晶界弛豫 534

晶界内耗峰 2,107,180,584

晶粒间热流 258

晶体的范性 311~433

晶体范性学 311

晶须 358

棱柱滑移 323

棱柱面 322,323

棱锥面 322

裂纹 445

裂纹扩展力 456,464

裂纹尖端范性区 455~458

裂纹张开位移 458,467

裂纹尖端应力场 449~454

裂纹尖端位错分布 468~473

裂纹位错 469

超结构 415

超越现象 232~234

强硬化 405,406

短程的障碍 369

短程序 416

割阶 377,585

畴界能 416

滑移面 321,322

滑移方向 321,322

滑移要素 321,322

滑移系统 332

滑移的晶体学特征 317~326

滑移的灵便性 347

滑移线 317,318

滑移带 317,318,319

十三画

塞格模型 143

错配度 409

错配度参量 409

奥罗万机制 420~422

辐照硬化 405

源强化 404

键合强度 414,415

塞积群 374,376,396

十 四 画

静态响应函数 8,19

静滞后型内耗 51,131,161,198,
268

稳态相变内耗 196

模量亏损 13,16,29

模-模耦合理论 248

隧道弛豫 289

磁声几何共振 278,279

磁致伸缩 263

磁弹性内耗 263

静态试验 316,317

模量错配度 409

辗轧织构 347~352

稳态蠕变 562,575

十 五 画

横向热流 255

德拜峰 28,29,30,127,235,242

德拜环 348

十六画以上

蠕变 8,24,25,316,562

蠕变与疲劳的交互作用 587

蠕变曲线 10,316,562

蠕变图 567,568

蠕变激活能 565,567

蠕变断裂 580

蠕变函数 8,18

瞬态蠕变 562,574

瞬态响应函数 18

霍耳-配奇关系式 396,399,401,
430

激活体积 367,369,565,573

激活能 109,367,369,365,566

膨胀系数的各向异性 60

瞬时范性 8

瞬态相变内耗 191

G. P. 区 418,419

J 积分 462

K-G-L 理论 124

λ 相变 240,242